
Cross Country Mobility voorspellingen

Verplaatsen in het
onbekende

Cadet-vaandrig H.A. Kerkdijk

Cross Country Mobility Voorspellingen

Auteur: H.A. Kerkdijk

Cadet-vaandrig van het Wapen der Genie

Begeleiders: Dhr. Boon (MSc, MA) (Defensie Inlichtingen en Veiligheid Instituut)

Dhr., Van den Brink (Defensie inlichtingen en Veiligheid instituut)

Dr. Ir. Dado (Faculteit Militaire Wetenschappen)

Samenvatting

Kennis van het terrein van optreden is essentieel voor een militair commandant. Zonder verdere inlichtingen is hij beperkt tot het gebruik van bestaande en bekende wegen. Dit gaat ten koste van de voorspelbaarheid van de militaire actie. Ook wanneer een voertuig, of meerdere voertuigen, van punt A naar B moeten verplaatst worden is het van belang kennis te hebben van het terrein waarover plaatst moet worden. Naast kennis van het terrein zijn ook de eigenschappen en capaciteiten van het betrokken voertuig relevant. Op basis van deze gegevens kan een voorspelling gedaan worden over het vermogen van het voertuig om door het betreffende terrein te verplaatsen. Een dergelijke voorspelling wordt een Cross Country Mobility (CCM) voorspelling genoemd.

Informatie

Een CCM voorspelling is afhankelijk van de factoren: terreinkarakteristieken, voertuigeigenschappen en de invloed die het terrein op het presteren van het voertuig heeft. Deze drie factoren zijn onder te verdelen in verschillende subfactoren.

Tabel 1 (Sub-) factoren

Terreinkarakteristieken	Voertuigeigenschappen	Invloed van het terrein op het voertuig
Bodem	m.b.t. bodembegaanbaarheid	Kleef/Slip
Geometrie	m.b.t. het terrein	Wegzakken
Vegetatie	m.b.t. het verplaatsen	Gladheid
Hindernissen		

Wanneer men over informatie beschikt over deze subfactoren kan men een CCM voorspelling geven. Informatie voor de verschillende subfactoren kan op verschillende manieren worden verkregen. In dit onderzoek wordt er vanuit gegaan dat men zich niet fysiek in het terrein kan bevinden. Hierdoor zullen moeten worden gedaan op basis van remote sensing. Remote sensing is een techniek waarbij metingen gedaan worden in het elektromagnetisch spectrum. De metingen kunnen gedaan worden door sensoren van een platform in de lucht of ruimte. In dit onderzoek wordt gekeken naar de mogelijkheid van toepassing remote sensing techniek voor het bepalen van de genoemde terrein gerelateerde subfactoren. De volgende remote sensing technieken zijn meegenomen in dit onderzoek:

- Luchtfotografie;
- Multi spectrale scanners;
- Hyper spectrale scanners;
- Radar;
- Gamma straling;
- Laser scanner.

De mate van de kwaliteit van verkregen informatie middels de hierboven genoemde remote sensing technieken kan worden beoordeeld aan de hand van een drietal typen resoluties:

- *Ruimtelijke resolutie* geeft de pixelgrootte van het verkregen beeld;
- *Spectrale resolutie* bepaalt de mate waarin verschillende materie van elkaar onderscheiden kan worden;
- *Meetfrequentie* geeft aan hoeveel tijd er tussen metingen zit.

De voertuigeigenschappen kunnen worden verkregen van de fabrikant, eventueel aangevuld vanuit databases zoals Janes (Janes, 2012) of door middel van veldtesten.

Modellen

In de loop der jaren zijn er verschillende modellen ontwikkeld voor het bepalen van een terreinbegaanbaarheidsvoorspelling. Uit de analyse van de beschikbare modellen blijkt dat er een tweedeling te maken is tussen enerzijds modellen die het presteren van een voertuig op de bepaalde bodem bepalen en anderzijds modellen die bepalen waar in het terrein het voertuig zich kan verplaatsen.

De modellen die ontwikkeld zijn voor het presteren van voertuigen op een bepaalde bodem zijn te onderscheiden in empirische en wiskundige modellen. In het geval van empirische modellen wordt gekeken naar de resultaten van een vergelijkbaar voertuig op een vergelijkbare ondergrond. In de wiskundige modellen wordt op basis van de eigenschappen van de bodem en voertuig de bodembegaanbaarheid bepaald.

Er is slechts weinig inhoudelijke informatie beschikbaar over modellen die bepalen waar het voertuig zich in een terrein kan verplaatsen. Het NATO Reference Mobility Model is een van de bekendste CCM-modellen. De toepassing in het onderzoek is slechts beperkt doordat de informatie over de totstandkoming van een voorspelling niet beschikbaar is. Een volledig beschikbaar model is het Manoeuvre Analysis Flowchart. Dit model is echter beperkt in het aantal klassen waarin het de subfactoren kan indelen. Dit gaat ten koste van de kwaliteit van een voorspelling.

De kwaliteit van een voorspelling kan worden gemeten volgens een drietal kwaliteitscriteria: resolutie, nauwkeurigheid en performance. De *resolutie* is afhankelijk van de beschikbare informatie. Informatie met een hoge resolutie resulteert in een beter voorspelling. De *nauwkeurigheid* is afhankelijk van de juistheid van de waarnemingen en de wijze waarop deze informatie wordt meegenomen in het model. In verschillende modellen wordt informatie ingedeeld in klassen. Het aantal klassen is dan bepalend voor de nauwkeurigheid van het resultaat. De *performance* betreft de juistheid van de voorspelling. Komt het geen dat voorspeld is ook overeen met de werkelijkheid? Wanneer subfactoren niet op de juiste manier aan elkaar gekoppeld worden, of wanneer de verkregen informatie niet actueel bestaat de kans dat de voorspelling van mindere kwaliteit is.

In dit onderzoek is gekeken naar de totstandkoming van een CCM-voorspelling. Hierbij is gekeken naar de volledigheid van informatie die meegenomen wordt, de wijze waarop de informatie gevonden kan worden en de manier waarop de informatie aan elkaar gekoppeld kan worden.

Na afloop van dit onderzoek blijkt dat het toepassen van remote sensing technieken voor het verzamelen van informatie en samenvoegen van bestaande modellen kan resulteren in het bepalen van een goede CCM voorspelling. Om dit te bewerkstelligen is er een grootschaliger onderzoek vereist naar de verschillende informatietechnologieën en de koppeling van de verkregen informatie.

Om tot een goed werkende CCM-applicatie te komen is het van belang dat er verder onderzoek gedaan wordt naar de wijze waarop de voorspelling visueel kan worden gemaakt. De eisen van de gebruiker, de militair commandant, zijn hierbij maatgevend.

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	2
Inhoudsopgave.....	4
Voorwoord.....	7
1. Inleiding.....	8
1.1 Aanleiding.....	8
1.2 Probleemanalyse en probleemstelling.....	9
1.3 Doelstelling.....	9
1.4 Onderzoeksvragen.....	10
1.5 Onderzoekstrategie	11
1.6 Onderzoeksmodel	11
1.7 Aannames en afbakening van het onderzoek	12
2. Cross Country Mobility	13
2.1 Terreinkarakteristieken	13
2.1.1 Bodem	14
2.1.2 Geometrie.....	14
2.1.3 Vegetatie	15
2.1.4 Hindernissen.....	16
2.2 Voertuigeigenschappen.....	17
2.2.1 Voertuiggegevens m.b.t. de bodembegaanbaarheid.....	17
2.2.2 Voertuiggegevens m.b.t. het terrein	18
2.2.3 Voertuiggegevens m.b.t. het verplaatsen	20
2.3 Invloed van het terrein op een voertuig	20
2.3.1 Kleef/slip.....	20
2.3.2 Wegzakken	20
2.3.3 Gladheid	20
2.4 Informatiebehoefte	21
2.5 Conclusies.....	22
3. Het verkrijgen van informatie	23
3.1. Terreinonderzoek in de praktijk	23



3.2.	Remote Sensing.....	23
3.2.1.	Elektromagnetisch spectrum.....	24
3.2.2.	Spectrale reflectie curve.....	25
3.2.3.	Sensor en platformtypen.....	26
3.2.4.	Informatie karakteristieken.....	26
3.3.	Type sensoren	28
3.3.1.	Luchtfotografie	28
3.3.2.	Multi spectrale scanners	29
3.3.3.	Hyper spectrale scanners	30
3.3.4.	Radar	30
3.3.5.	Gamma straling	32
3.3.6.	Laserscanner	33
3.4.	Informatie eisen per subfactor.....	34
3.4.1.	Bodem	34
3.4.2.	Geometrie.....	36
3.4.3.	Vegetatie	36
3.4.4.	Hindernissen.....	38
3.5.	Conclusies.....	39
4.	Cross Country Mobility modellen	40
4.1	Algemene introductie.....	40
4.1.	NATO Reference Mobility Model	41
4.1.1.	AMC-71.....	41
4.1.2.	AMM-75.....	42
4.1.3.	NATO Reference Mobility Model (II)	42
4.2.	Terreinmodellen	43
4.2.1.	NATO Reference Mobility Model	43
4.2.2.	Manoeuvre Analysis Flowchart	43
4.3.	Bodem/Voertuig interactie modellen	46
4.3.1.	Vehicle Cone Index/Rating Cone Index (NRMM)	46
4.3.2.	Mean Maximum Pressure	47
4.3.3.	WONG-modellen	48
4.3.4.	Vergelijking empirisch en parametrisch	49
4.4.	Conclusies.....	51

5. Conceptueel model.....	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
5.1. Opzetten van model	52
5.1.1. Koppeling bodem/voertuig	52
5.1.2. Koppeling geometrie/voertuig	52
5.1.3. Koppeling vegetatie/voertuig.....	53
5.2. Schematische weergave model.....	54
5.3. Invulling conceptueel model	55
5.3.1. Vaststellen bodembegaanbaarheid	55
5.3.2. Meenemen invloed geometrie	55
5.3.3. Meenemen invloed vegetatie	55
5.3.4. Meenemen invloed hindernissen.....	55
5.4. Aandachtspunten	55
5.5. Conclusies	56
 6. Conclusies en aanbevelingen	 57
6.1. Conclusies	57
6.2. Aanbevelingen.....	60
 Bibliografie	 61
Verklarende woordenlijst	64
Bijlage A - USCS	66
Bijlage B - MI/VCI	69
Bijlage C – Vergelijking MMP/NTVPM	72
Bijlage D – Manoeuvre Analysis Flowchart	73



Voorwoord

Voor u ligt het resultaat van mijn onderzoek ter afsluiting van mijn studie Civiele Techniek aan de Faculteit Militaire Wetenschappen. Een periode die pieken, maar ook dalen heeft gekend. Het heeft de nodige moeite gekost om uit de dalen te klimmen. Met name het combineren van het afstuderen met en het afronden van de nodige vakken ging niet altijd even gemakkelijk.

Kennis over Cross Country Mobility is voor een Genist van groot belang. Hij is diegene waar men naartoe gaat voor advies over een te betreden terrein. De tijd van de zogenaamde 'hakproef' waarbij een aantal keer hard op de grond gestampt wordt kunnen we achter ons laten. Door het gebruik van nieuwe technologieën is het mogelijk om van afstand een voorspelling te kunnen doen over het Cross Country Mobility vermogen.

Met veel plezier heb ik naar het eindresultaat toegewerkt. Ik ben van mening dat er voor ons, als cadetten bestemt voor het Wapen der Genie, te weinig aandacht wordt besteed aan Cross Country Mobility.

Graag wil ik gebruik maken van de mogelijkheid om iedereen te bedanken die zich in de afgelopen tijd heeft ingezet om mij naar de eindstreep te helpen.

Ik hoop dat u het rapport met veel plezier zult lezen.

H.A. Kerkdijk

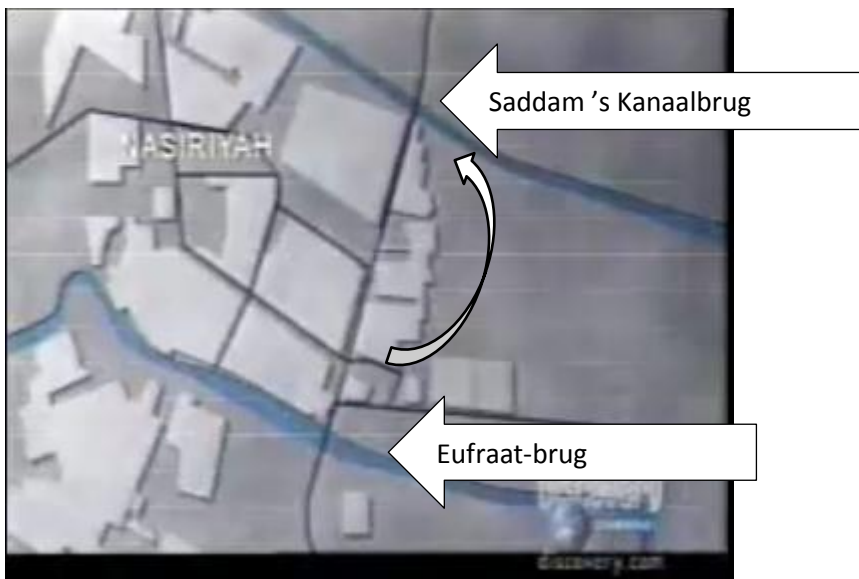
Cadet-vaandrig van het Wapen der Genie



1. Inleiding

1.1 Aanleiding

Op 23 maart 2003 kwamen Amerikaanse Mariniers van het Regimental Combat Team 1 in hun opmars naar Bagdad aan bij het dorp Nasiriyah. In dit dorp diende twee bruggen te worden veilig gesteld ten behoeve van de opmars naar Bagdad. Uit inlichtingen kwam naar voren dat in het dorp geringe weerstand verwacht kon worden, en dat het terrein geschikt was om over te verplaatsen. Er werd voor gekozen om niet over de hoofdweg door het dorp te rijden maar het oord aan de oostzijde te passeren. Dit om de Irakezen zo min mogelijk voordeel te geven van de aanwezige bebouwing. Onderstaande afbeelding geeft een schets van de situatie.



Figuur 1 Schematische weergave Nasiriyah met verplaatsingsroute (DiscoveryChannel, 2009)

Bij het passeren van de Eufraat-brug trokken de voertuigen van de eerste compagnie meteen vijandelijk vuur. De compagnie zette door naar de oostzijde van de stad, met de brug over Saddam's Kanaal als doel. De zandgronden aan deze zijde van de stad bleken te zijn veranderd in moddergronden door heftige regenval van de voorgaande dagen. Dit veroorzaakte dat meerdere voertuigen vast kwamen te zitten onder vijandelijk vuur. De volgende compagnie besloot hierdoor om over de hoofdweg naar de andere brug te rijden en kwam terecht in wat later 'Ambush Alley' werd genoemd. In totaal verloren 18 Mariniers het leven bij de slag om Nasiriyah en werden er 8 voertuigen vernield.

Uit het bovenstaande voorbeeld blijkt het belang van goede(actuele) inlichtingen voorafgaand aan een operatie of missie. De weerstand in het dorp was veel groter dan verwacht, maar ook de inlichtingen over het terrein waren onjuist. Het is daarom van belang dat er gekeken wordt naar actuele gegevens waarin ook de meteorologische gegevens van de dagen ervoor worden meegenomen.

In het verleden heeft de Nederlandse Krijgsmacht zich voornamelijk gericht op een bepaald gebied in Duitsland dat verdedigd diende te worden. Het gebied van optreden was bekend en toegankelijk voor verkenningen en oefeningen. Dit heeft er in geresulteerd dat commandanten bekend waren met het terrein en beschikten over goede inlichtingen met betrekking tot de terreinbegaanbaarheid.

Het huidige optreden, waar de slag om Nasiriyah een voorbeeld van is, vindt voornamelijk plaats in relatief onbekende operatiegebieden. Men kan niet meer in het terrein zelf onderzoek doen naar de bodemgesteldheid om zo te bepalen of bepaalde voertuigen hier kunnen passeren. Commandanten zijn daarom genooddaakt routes te kiezen over bekende paden en wegen. Dit gaat ten koste van de onvoorspelbaarheid in het optreden. Door het beperkt aantal mogelijkheden van een commandant is het voor vijandelijke partijen gemakkelijker het optreden te voorspellen.

Uit het bovenstaande blijkt de behoefte van een commandant om inlichtingen te krijgen over Cross Country Mobility (CCM). Onder CCM wordt het vermogen om door een terrein te rijden verstaan. Deze gegevens zullen bij voorkeur “op afstand” moeten worden bepaald. De Nederlandse krijgsmacht heeft veel ervaring opgedaan met het gebruik van remote sensing voor het bepalen van karakteristieken van terreinen op basis van satellietinformatie. In dit onderzoek wordt mede onderzocht in hoeverre remote sensing kan worden toegepast voor het bepalen van terreinkarakteristieken ten behoeve van CCM.

1.2 Probleemanalyse en probleemstelling

De terreinbegaanbaarheid van een bepaald voertuig in een bepaald terrein is afhankelijk van verschillende factoren. Allereerst zijn er de eigenschappen van het voertuig. Hierbij zit er bijvoorbeeld een wezenlijk verschil tussen wiel- en rupsvoertuigen. Ook is het aantal voertuigen dat moet passeren van belang. Daarnaast zijn er de eigenschappen van het terrein zelf van belang. Een kleibodem heeft heel andere eigenschappen dan bijvoorbeeld een zandbodem. Ook de grondwaterstand en de weersomstandigheden kunnen de terreinbegaanbaarheid beïnvloeden. Verder zijn er nog factoren als reliëf, vegetatie en andere (natuurlijke) hindernissen van belang. De gegevens over deze eigenschappen kunnen op verschillende manieren verkregen worden. Ook zijn er verschillende methoden bekend in de literatuur waarmee voorspellingen gedaan kunnen worden over het CCM vermogen. Al met al zijn er dus heel veel variabelen die bepaald moeten worden en veel methoden om dit te bepalen. Dit resulteert in een volgende probleemstelling:

Op welke wijze kan de Nederlandse Krijgsmacht “op afstand” informatie verzamelen en analyseren op het gebied van Cross Country Mobility (CCM) in onbekende operatiegebieden om haar commandanten een zo juist mogelijke CCM-voorspelling te geven.

1.3 Doelstelling

Vanuit de probleemstelling kan onderstaande doelstelling voor dit onderzoek worden geformuleerd:

Het doen van aanbevelingen aan de Nederlandse Krijgsmacht over hoe inlichtingen voor Cross Country Mobility verzameld en geanalyseerd kunnen worden door een aantal beschikbare methoden en modellen te analyseren.



1.4 Onderzoeksvragen

Op basis van de probleemstelling en doelstelling is de volgende centrale onderzoeksvraag vastgesteld:

Hoe kan de Nederlandse Krijgsmacht op een zo juist mogelijke manier CCM voorspellen in onbekende operatie gebieden?

De centrale onderzoeksvraag decomponeert in verschillende onderzoeksvragen. De eerste categorie onderzoeksvragen heeft betrekking op de vraagstukken met betrekking tot het bepalen van de benodigde informatie die als input dienen voor de analyse en de CCM voorspelling. De tweede categorie onderzoeksvragen heeft betrekking op de keuze van beschikbare modellen voor het doen van juiste CCM voorspellingen in relatie tot de manier waarop in dit onderzoek informatie wordt verkregen. Dit heeft geleid tot de volgende onderzoeksvragen:

- Onderzoeksvraag 1: Welke factoren hebben invloed op het CCM-vermogen?
- Onderzoeksvraag 2: Welke informatie is nodig om de CCM-factoren te kunnen voorspellen?
- Onderzoeksvraag 3: Op welke wijze kan deze informatie verkregen worden?
- Onderzoeksvraag 4: Welke methoden zijn beschikbaar om CCM te voorspellen?
- Onderzoeksvraag 5: In welke mate zijn beschikbare CCM modellen volledig om tot een goede voorspelling te komen?
- Onderzoeksvraag 6: Welke gebreken zijn er nog aan bestaande modellen om tot een juiste voorspelling van het CCM-vermogen te komen?

De samenhang tussen de onderzoeksvragen worden in paragraaf 1.6 weergegeven in een onderzoeksmodel.



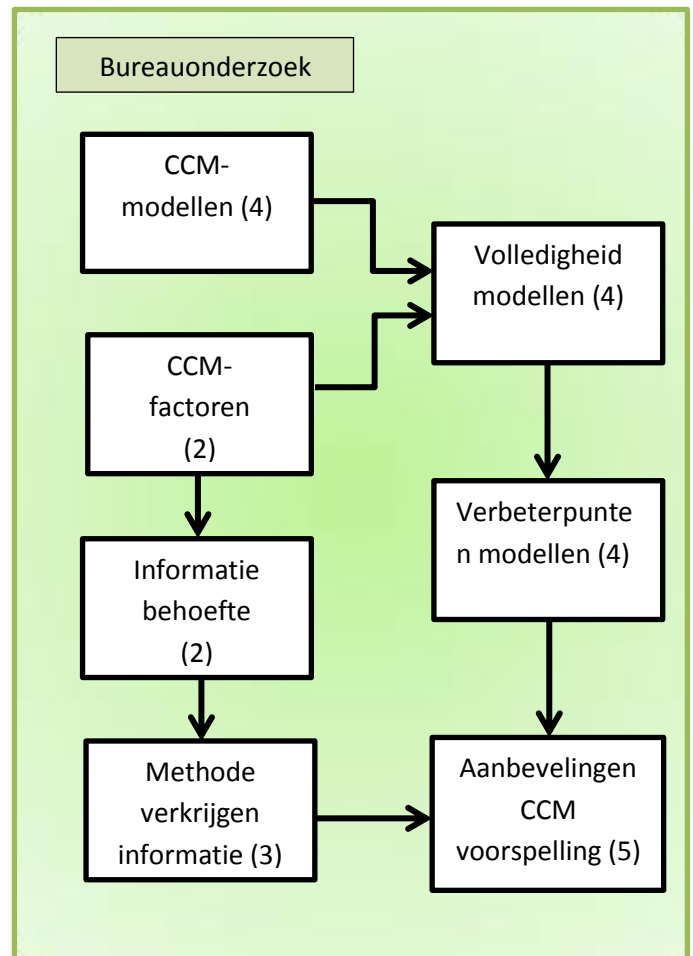
1.5 Onderzoekstrategie

Dit onderzoek bestaat enkel uit een bureaustudie. Informatie wordt verkregen uit wetenschappelijke publicaties en onderwijsleermiddelen. Deze worden gevonden met behulp van verschillende wetenschappelijke zoekmachines als ScienceDirect en GoogleScholar. De onderwijsleermiddelen worden gevonden in de collectie van het DIVI, de NLDA Bibliotheek, eigen collectie en via wetenschappelijke zoekmachines. De wijze van zoeken staat omschreven in Deskresearch (Van Veen & Westerkamp, 2010).

1.6 Onderzoeksmodel

In figuur 2 staat het onderzoeksmodel weergegeven. De stappen corresponderen met het betreffende hoofdstuknummer in het rapport.

Allereerst dient uiteengezet te worden welke factoren CCM bepalen (2). In deze lijn kan daarna worden gekeken welke informatie nodig is om deze factoren te kunnen kwantificeren (2), en hoe deze informatie kan worden verkregen (3). Tegelijkertijd worden een aantal bestaande CCM-modellen bekeken (4). Deze modellen kunnen worden getoetst op volledigheid op basis van de gevonden theorie over CCM uit de eerste onderzoeksvraag (4). Hierbij vormen de modellen het onderzoeksobject en de CCM theorie de beoordelingscriteria. De resultaten van de vijfde onderzoeksvraag leveren punten die verbeterd kunnen worden (4). Samen werken de onderzoeksvragen toe naar het antwoord op de centrale vraag (5): Op welke wijze kan de Nederlandse Krijgsmacht op een zo juist mogelijke manier CCM voorspellen in onbekende operatie gebieden?



Figuur 2 Onderzoeksmodel

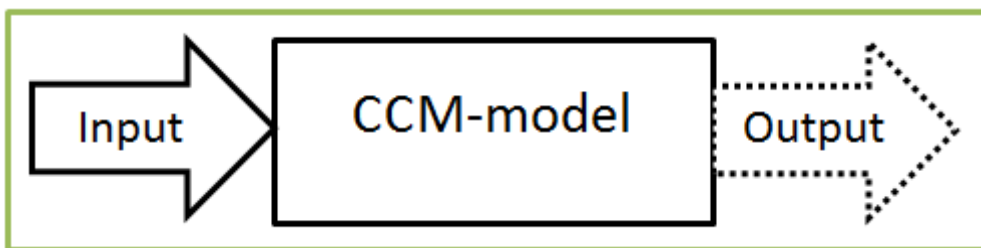
1.7 Aannames en afbakening van het onderzoek

Voor dit onderzoek is een goede afbakening van belang. Dit onderzoek kan worden gezien als een voorstudie voor het daadwerkelijk construeren van een werkend Cross Country Mobility (computer)model. De afbakening van dit onderzoek wordt mede bepaald door de gewenste output van dit model. Daarnaast speelt ook de methode waarop de benodigde input verkregen kan worden een rol:

- De CCM-voorspelling geldt voor een enkel voertuig. Dit is bepalend voor benodigde ruimtelijke resolutie van de input.
- In dit onderzoek wordt er van uit gegaan dat zogenoemde 'in situ' metingen niet mogelijk zijn.
- De benodigde informatie met betrekking tot het terrein zullen op basis van 'remote sensing' verkregen moeten worden.
- Naast een voorspelling óf er in een terrein kan worden gegeven, dient ook een snelheidsindicatie te worden gegeven.

Naast de input zijde wordt ook de methode waarop de voorspelling tot stand komt bekeken. Door een studie te doen naar beschikbare bestaande modellen kunnen conclusies worden getrokken en aanbevelingen worden gedaan voor een model. Hier wordt gekeken naar de wijze waarop de verschillende factoren en bijbehorende subfactoren aan elkaar gekoppeld worden.

In figuur 3 wordt een schematische weergave van het concept van een CCM-model weergegeven.



Figuur 3 Conceptueel CCM model

2. Cross Country Mobility

Zoals eerder genoemd is Cross Country Mobility (CCM) het vermogen om in een terrein te rijden. Het belang van kennis over het CCM vermogen komt naar voren in het in paragraaf 1.1 genoemde voorbeeld. Wanneer een voertuig niet in staat is zich over een bepaald terrein te verplaatsen kan dit het optreden belemmeren. Wanneer van te voren kennis over het betreffende terrein ingewonnen wordt kan de terreinbegaanbaarheid van het voertuig in het specifieke terreindeel voorspeld worden. Om tot een goede CCM voorspelling te komen moet er eerst onderzoek gedaan te worden naar de verschillende factoren die de terreinbegaanbaarheid beïnvloeden. Deze factoren zijn (Shamburger, 1967):

- Terreinkarakteristieken;
- Voertuigeigenschappen;
- Invloed van het terrein op een voertuig.

In het cursusboek *Terreinevaluatie (Verkenningen, 2011)* worden ook weersomstandigheden en de rijvaardigheden van de chauffeur als aparte factoren benoemd. In dit onderzoek zullen de gevolgen van de verschillende weertypen worden meegenomen bij de terreinkarakteristieken, of worden vermeld als weerstand bij de voertuigeigenschappen. De rijvaardigheid leent zich niet voor een dergelijk onderzoek en daarom wordt de chauffeur als rijvaardig verondersteld.

Factoren zijn op hun beurt weer onder te verdelen in subfactoren. Op deze wijze ontstaat er een boom van factoren die invloed hebben op CCM. Om een goede CCM voorspelling te bepalen dienen de parameters per subfactor zo juist mogelijk te worden ingevuld. In dit hoofdstuk zal worden vastgesteld welke parameters dat zijn. Het hierop volgende hoofdstuk zal in gaan op het de informatie verkregen kan worden.

In de eerste drie paragrafen zullen de drie factoren besproken worden, afsluitend zal in paragraaf 2.4 worden ingegaan op de benodigde informatie per factor.

2.1 Terreinkarakteristieken

De terreinkarakteristieken worden bepaald met behulp van een viertal subfactoren. Deze benadering wordt door Schamburger ook wel het 'factor-family concept' genoemd (Shamburger, 1967). Inhoudelijk gezien komen deze factoren overeen met de genoemde factoren uit het cursus boek van de instructiegroep Genie Inlichtingen en Verkenningen (Verkenningen, 2011), zie tabel 2.

Tabel 2 Naamgeving subfactoren terreinkarakteristieken

Artikel Shamburger	Cursusboek Genie Inlichtingen en verkenningen	Dit onderzoek
Surface composition	Bodem	Bodem
Surface geometry	Hellingen	Geometrie
Vegetation	Vegetatie	Vegetatie
Hydrologic geometry	(Lijn)hindernissen	Hindernissen

Een verschil tussen beiden kan worden gevonden in de laatst genoemde subfactor. Shamburger bedoelt met deze subfactor alleen hydrologische hindernissen. De Genie instructiegroep voegt aan deze factor ook andere lijnhindernissen toe zoals wallen en andere ophogingen.

In deze paragraaf zullen de vier subfactoren worden uitgewerkt. Hierbij worden de termen bodem, geometrie, vegetatie en hindernissen aangehouden.

2.1.1 Bodem

De bodembegaanbaarheid is afhankelijk van de draagkracht en de schuifsterkte van de bodem. De draagkracht van de bodem wordt bepaald door de samenstelling hiervan. Een zandbodem reageert anders op belasting dan een kleigrond. Een chauffeur zal dit, in tegenstelling tot de overige drie factoren (hellingen, vegetatie en hindernissen), minder goed kunnen schatten. Tijdens een missie is er niet altijd tijd om uit het voertuig te stappen en ter plekke de bodem te onderzoeken. Daarom zullen de eigenschappen van de bodem voorafgaand aan een operatie bekend moeten zijn. Deze eigenschappen kunnen worden bepaald op basis van het bodemtype en het vochtgehalte (Wong, Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering, 2010)

Bodemtype

Om de verschillende bodemtypen in te kunnen delen zijn in de vorige eeuw verschillende classificatie methoden ontwikkeld. Een veel gebruikte methode is het Unified Soil Classification System (USCS), ontwikkeld door A. Casagrande, van de US Army (Gitz, 1976). Dit ten behoeve van het construeren van vliegveleden gedurende de Tweede Wereldoorlog. In de loop der jaren is het systeem steeds verder ontwikkeld. De classificatie gebeurt op basis van de volgende kenmerken:

- Korrelgrootte;
- Korrelgrootteverdeling;
- Graad van plasticiteit;
- Gehalte aan organisch materiaal.

In bijlage A wordt het USCS nader besproken.

De bodemsamenstelling kan zowel horizontaal als verticaal variëren. Daarom is het van belang dat niet alleen de samenstelling van de toplaag bekend is, maar ook de dieper gelegen lagen. De benodigde diepte is afhankelijk van de gronddruk van het voertuig en de draagkracht van de bodem.

Vochtgehalte

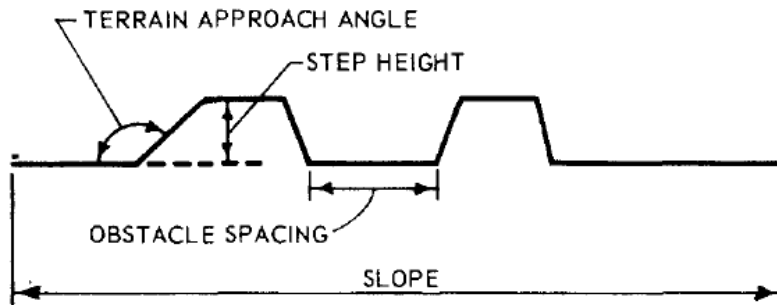
Het vochtgehalte heeft een grote invloed op de bodembegaanbaarheid. De meeste grondtypen zijn bij een matig vochtgehalte goed begaanbaar. Wanneer echter het vochtgehalte hoog is gaat de bodembegaanbaarheid omlaag.

2.1.2 Geometrie

De geometrie van het terrein kan een grote negatieve invloed hebben op de terreinbegaanbaarheid. Hierin worden vier verschillende subfactoren onderscheiden (Shamburger, 1967) :

- Helling *(Slope)*
- Ruimte tussen verticale obstakels *(Obstacle spacing)*
- Aanrijhoek *(Terrain approach angle)*
- Staphoogte *(Step height)*

Deze staan geïllustreerd in figuur 4.



Figuur 4 Verschillende invloeden hellingen (Shamburger, 1967)

W.E. Grabau maakt in zijn artikel over terrein evaluatie voor mobiliteitsdoeleinden (Grabau, 1964) een tweedeling in geometrie. Hij maakt een onderscheid tussen microgeometrie en macrogeometrie. Zoals uit de naamgeving al valt af te leiden gaat het in de macrogeometrie om de grove structuur van het aardoppervlak. Alle kleinere oneffenheden in het terrein vallen onder de microgeometrie. Een duidelijke grens tussen beide is niet gedefinieerd. Als richtlijn wordt een hoogtelijns interval van 3 meter (10 ft) gegeven. Deze waarde is gekozen om dat dit doorgaans het kleinste interval in reliëf op een topografische kaart is. Microgeometrie zal in combinatie met de fysieke afmetingen van de voertuigen de terreinbegaanbaarheid beïnvloeden. Kennis van de macrogeometrie is nodig om iets te kunnen zeggen over het vermogen van een voertuig om ergens te rijden. Dat wil zeggen of een voertuig een bepaalde helling op kan rijden.

2.1.3 Vegetatie

Vegetatie kan zowel een positieve als negatieve invloed hebben op het rijden door een terrein. Wortels van planten zorgen voor een sterkere samenhang het oppervlakttemateriaal. Dit verbetert de draagkracht en schuifsterkte van de bodem. Vegetatie kan op verschillende manieren de terreinbegaanbaarheid negatief beïnvloeden. Een goed voorbeeld is het verschil met rijden door een bos of een maïsveld. Het is niet mogelijk om door een dicht begroeid bos te rijden, maar rijden door een maïsveld is technisch wel mogelijk. Toch is er een overeenkomst tussen beide waardoor ze beiden het liefst gemedend zullen worden. Beide vormen een visuele belemmering, wat de mobiliteit sterk vertraagt.

Het is dus van belang om te weten welke type vegetatie men waar tegen komt. Samenvattend onderscheidt de Genie instructiegroep vier vegetatietypen met bijbehorende parameters:

- Bomen (stamdiameter, stamafstand)
- Onder begroeiing (dichtheid en hoogte)
- Gewassen (hoogte per seizoen, indien relevant)
- Dragende bovenlaag (bijvoorbeeld gras op een veenlaag)

Over het algemeen is de invloed van vegetatie goed in te schatten. Voor een leek is het duidelijk dat je niet met een voertuig door een dicht bos kunt rijden. Wanneer de boomstammen verder uit elkaar staan is de terreinbegaanbaarheid afhankelijk van de voertuigeigenschappen en snelheid.

2.1.4 Hindernissen

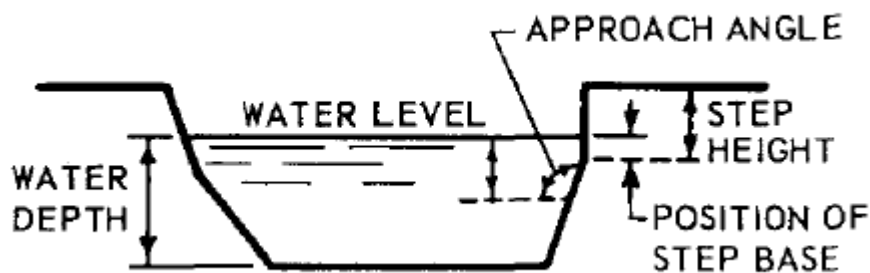
Onder deze factor vallen de hindernissen in het terrein die een remmende, dan wel stoppende werking hebben op een voertuig. Hier worden ook bepaalde terreindelen/gebieden onder geplaatst. Hieronder volgt een korte toelichting en informatie behoefte.

Waterhindernissen

Wanneer in het betreffende terreindeel waterlopen zijn te vinden is zijn de volgende gegevens relevant:

- (Oever)helling; (Approach angle)
- Staphoogte; (Step height)
- Waterdiepte; (Water depth)
- Waterbreedte;
- Stroomsnelheid;
- Stromingsrichting.

In figuur 5 staande benodigde gegevens geïllustreerd. De stroomsnelheid is in een doorsnede van een waterloop niet (altijd) overal gelijk (Fox, Pritchard, & McDonald, 2010). Hierdoor moet er worden gekeken naar snelheid op de bodem, het oppervlak en de gemiddelde stroomsnelheid over de gehele doorsnede (Bjerkie, Dingman, Vorosmarty, Bolster, & Congalton, 2003).



Figuur 5 Schematische weergave waterloop (Shamburger, 1967)

Gebiedshindernissen

Naast waterhindernissen kunnen er ook gebiedshindernissen worden aangetroffen. Met een gebiedshindernis wordt een relatief groot oppervlak in een terrein bedoeld, waar het rijden niet of beperkt mogelijk is. Voorbeelden van gebiedshindernissen zijn bossen en oorden. In deze voorbeelden kan eventueel wel gebruik worden gemaakt van conventionele wegen en paden (mits begaanbaar).

In dit onderzoek wordt onderscheid gemaakt tussen remmende en stoppende hindernissen. Dit is van belang om dat bepaald moet worden met welke snelheid door een terrein verplaatst kan worden. In het geval van een stoppende hindernis is verplaatsen niet mogelijk. In het geval van een remmende hindernis is verplaatsen wel mogelijk, maar niet op de gewenste snelheid.

2.2 Voertuigeigenschappen

Naast de karakteristieken van het terrein zijn ook de eigenschappen van een voertuig bepalend voor het vermogen om over een terrein te kunnen rijden. In deze paragraaf is er voor gekozen om ook de factor voertuigeigenschappen onder te verdelen in subfactoren. Op deze manier kan de informatie later per subfactor aan elkaar gekoppeld worden.

- Voertuiggegevens m.b.t. de bodembegaanbaarheid;
- Voertuiggegevens m.b.t. het terrein;
- Voertuiggegevens m.b.t. het verplaatsen.

In deze paragraaf wordt bij een aantal parameters gebruikt gemaakt van illustraties. De hierin genoemde waarden gelden voor de afgebeelde voertuigen en zijn niet universeel.

2.2.1 Voertuiggegevens m.b.t. de bodembegaanbaarheid

In deze paragraaf zullen de voertuiggegevens worden besproken die nodig zijn om te kunnen voorspellen of het betreffende voertuig over het bepaalde terrein kan rijden. De gegevensbehoefte is gebaseerd op de berekening van de 'Vehicle Cone Index' van het US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station. Meer informatie hierover is te vinden in de bijlage B.

Gronddruk

Om te kunnen bepalen of de grond draagkrachtig genoeg is dient bekend te zijn wat de gronddruk van het voertuig is. Deze kan worden geschat door het totale gewicht van het voertuig te delen door het grondoppervlak. Hierbij wordt er vanuit gegaan dat het gewicht evenredig verdeeld is over het voertuig. De daadwerkelijke gronddruk zal gemeten moeten worden.

Wiel aandrijving

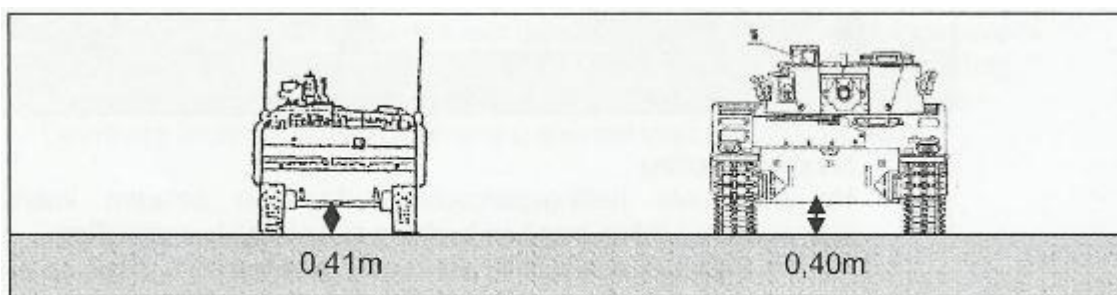
In het geval van een wielvoertuig is het van belang te weten hoeveel wielen worden aangedreven. Ook voor een rupsvoertuig kan het aantal aandrijfwielen verschillen.

Vermogen

Elke voertuig heeft een specifiek vermogen. De verhouding tussen gewicht en het vermogen zijn van belang voor het vaststellen van de terreincapaciteiten van het voertuig.

Bodemvrijheid

Voor het nemen van kleine obstakels en hellingen is het van belang te weten hoe hoog de bodemvrijheid is (Zie figuur 6). Daarnaast speelt de bodemvrijheid ook een rol bij het wegzakken van het voertuig. Dit zal worden behandeld in de paragraaf 2.3.



Figuur 6 Bodemvrijheid (Verkenningen, 2011)

Bandbreedte

De breedte van een band is mede bepalend voor de hoeveelheid grip dat een voertuig heeft. Dit geldt voor zowel rupsvoertuigen als wielvoertuigen.

Kamhoogte

Bij een rupsvoertuig kunnen er kammen op de rupsband zijn geplaatst. En aanwezigheid en hoogte hiervan speelt een rol bij de hoeveelheid grip van het voertuig. Vergelijkbaar kunnen er kettingen om de wielen van een wielvoertuig worden gemonteerd. Ook hier is de hoogte van belang. Voor de beeldvorming kan hierbij gedacht worden aan de hoeveelheid profiel dat er op een band zit.

Transmissie

Een automatisch schakelend voertuig heeft als voordeel dat hij sneller schakelt dan een handgeschakeld voertuig. Hierdoor kan het voertuig beter op het terrein anticiperen.

2.2.2 Voertuiggegevens m.b.t. het terrein

Voor het nemen en ontwijken van hindernissen zijn de volgende voertuiggegevens essentieel:

Draaicirkel

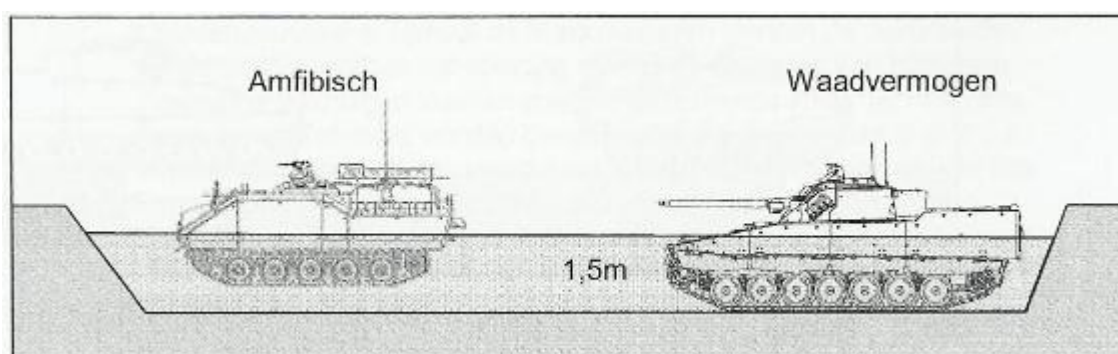
Om tussen de verschillende obstakels en hindernissen te kunnen manoeuvreren is het van belang te weten wat de draaicirkel van het voertuig is. Hiermee wordt de ruimte die een voertuig nodig heeft om te draaien bedoeld.

Afmetingen

Wanneer het voertuig tussen verschillende obstakels door moet rijden is het van belang te weten wat de afmetingen hiervan zijn. Hierbij gaat het om de breedte, hoogte en de lengte van het voertuig inclusief alle ladingen en wapensystemen.

Waadvermogen/amfibisch vermogen

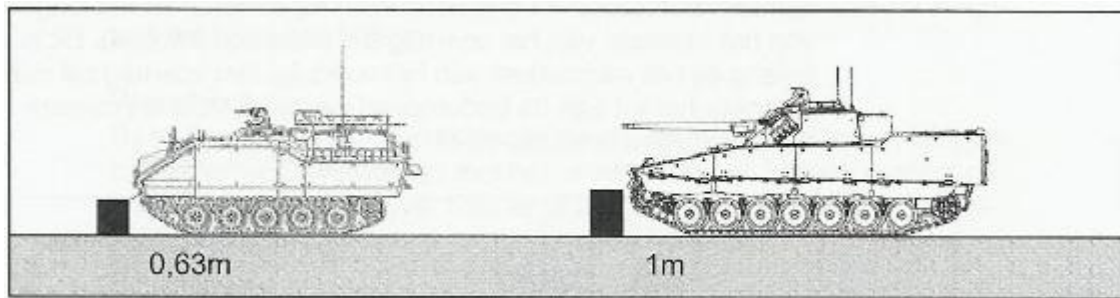
Wanneer een voertuig een waterloop dient te passeren bepalen gegevens over het waad- of amfibisch vermogen wanneer dit mogelijk is. In figuur 7 staan deze capaciteiten geïllustreerd.



Figuur 7 Amfibisch en waadvermogen (Verkenningen, 2011)

Opstap

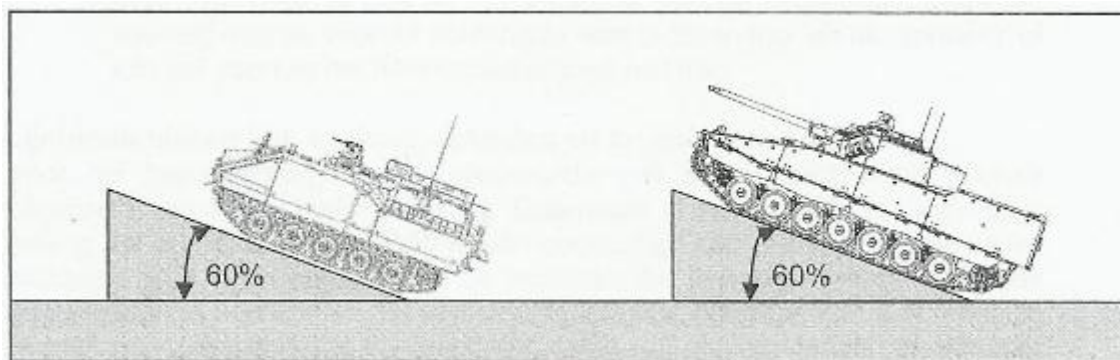
Het is niet altijd mogelijk of nodig om hindernissen te mijden. In bepaalde gevallen kan het voorkomen dat er een opstap genomen moeten worden. De maximale hoogte hiervan is afhankelijk van de capaciteiten van het voertuig. In figuur 8 staat een tweetal opstappen weergegeven.



Figuur 8 Opstap (Verkenningen, 2011)

Helling

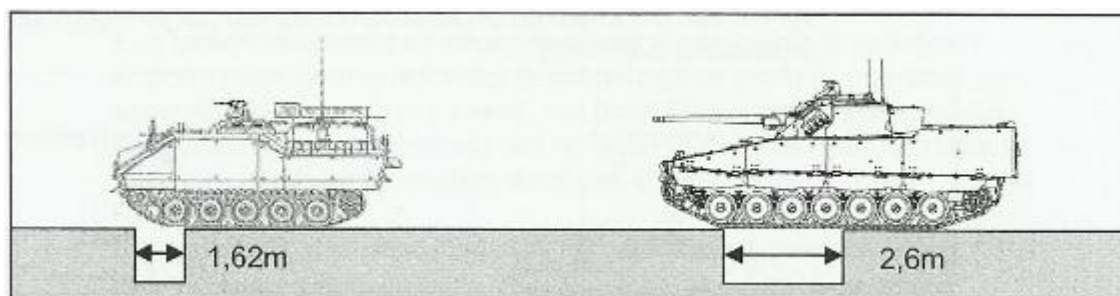
Wanneer een voertuig helling oprijdt gaat er naast de rolweerstand ook de zwaartekracht een rol spelen. Elk voertuig heeft daarom een maximale helling die hij op kan rijden (figuur 9). Om te bepalen of het voertuig een bepaalde oever of heuvel op kan rijden moet de maximale hellingshoek bekend zijn.



Figuur 9 Hellingshoek (Verkenningen, 2011)

Overschrijdend vermogen

Wanneer het voertuig over een sloot of geul moet rijden is kennis over het kantelmoment benodigd. Elk voertuig heeft een eigen overschrijdend vermogen. Dit is de maximale breedte van een sloot of geul dat overbrugd kan worden (figuur 10).



Figuur 10 Overschrijdend vermogen (Verkenningen, 2011)

2.2.3 Voertuiggegevens m.b.t. het verplaatsen

Om een voorspelling te kunnen doen over verplaatsingssnelheden en afstanden door een terrein zijn de volgende gegevens benodigd:

Snelheid

Voor een commandant is kennis over snelheid van zijn voertuigen essentieel bij het plannen een missie. Het moet voor de chauffeurs wel mogelijk zijn om op de juiste tijd op de afgesproken plaats aan te komen.

Actieradius

Bij het plannen van een missie is het van belang rekening te houden met de actieradius van een voertuig. Het rijden in een terrein met hindernissen zorgt voor een hoger brandstof verbruik. De weerstand in het terrein is hoger door de verschillende obstakels en terreindelen. Hierdoor moet de motor van het voertuig meer vermogen leveren en heeft dan een kleinere actieradius.

2.3 Invloed van het terrein op een voertuig

De laatste subfactor in het 'factor-family-concept' van Shamburger is de invloed van het terrein op het presteren van het voertuig. Hier wordt gekeken naar factoren in het terrein die het presteren van het voertuig tegen werken.

2.3.1 Kleef/slip

Wanneer een voertuig door een vochtig terrein rijdt kan het gebeuren dat er grond onder de wielen of rupsbanden van het voertuig blijft kleven. Hierdoor verliest het voertuig grip in kan het voertuig wegslijpen of zelfs niet meer vooruitkomen.

2.3.2 Wegzakken

In bepaalde gevallen kan het gebeuren dat een voertuig in de grond wegzakt of in een ander spoor terecht komt. Wanneer het voertuig dieper wegzakt dan de bodemvrijheid zal er een extra schuifweerstand ontstaan.

2.3.3 Gladheid

Wanneer er sprake is van vorst kan op vochtige ondergronden gladheid ontstaan. Hierdoor hebben voertuigen minder tot geen grip.



2.4 Informatiebehoefte

In dit hoofdstuk zijn de factoren besproken die invloed hebben op Cross Country Mobility. Wanneer voor elk van deze factoren gegevens bekend zijn kan er een goede CCM voorspelling gedaan worden. In deze paragraaf is per subfactor aangegeven welke informatie benodigd is:

Tabel 3 Informatiebehoefte terreinkarakteristieken

	Parameter	Eenheid
Terreinkarakteristieken	Bodem	
	- Bodemtype	classificatie
	- Vochtgehalte	percentage
	Geometrie	
	- Helling	graden
	- Ruimte tussen obstakels	meter
	- Aanrijhoek	graden
	- Staphoogte	meter
	Vegetatie	
	- Stamdiameter	centimeter
	- Stamafstand	meter
	- Type	n.t.b. classificatie
	- Zicht	meter
	- Hoogte	meter
	Hindernissen	
	- Type	Remmend/stoppend
	- Oeverhelling	graden
	- Staphoogte	meter
	- Waterdiepte	meter
	- Stroomsnelheid	meter/seconde
	- Stromingsrichting	n.t.b.

Tabel 4 Informatiebehoefte Voertuigeigenschappen

	Parameter	Eenheid
Voertuigeigenschappen	Terrein	
	- Gronddruk	kN/m ²
	- Gewicht	kN
	- Wiel aandrijving	aantal
	- Vermogen	pk/ton
	- Bodemvrijheid	meter
	- Bandbreedte	millimeter
	- Kamhoogte	millimeter
	- Transmissie	(hand/automaat)
	Hindernissen	
	- Draaicirkel	meter
	- Afmetingen (lxbxh)	meter
	- Waadvermogen	meter
	- Amfibisch vermogen	(ja/nee)
	- Opstap	meter
	- Helling	graden
	- Overschrijdend vermogen	meter
	Verplaatsen	
	- Snelheid	kilometer/uur
	- Actieradius	kilometer

Tabel 5 Informatiebehoefte Invloed terrein op een voertuig

	Parameter	Eenheid
Terreininvloed	Kleef	(ja/nee)
	Gladheid	(ja/nee)
	Wegzakken	meter

2.5 Conclusies

In paragraaf 2.4 staat uiteengezet welke informatie beschikbaar dient te zijn om een goede CCM voorspelling te kunnen doen. Hier op aansluitend zal in het volgende hoofdstuk worden gekeken naar de verschillende methoden waarop deze verkregen kan worden. Daarnaast zal in hoofdstuk 4 worden gekeken naar de manier waarop de verkregen informatie in beschikbare bestaande modellen aan elkaar gekoppeld wordt.

3. Het verkrijgen van informatie

In het voorgaande hoofdstuk is vastgesteld welke informatie nodig is voor het maken van een CCM voorspelling. Hierbij zijn de verschillende factoren onderverdeeld in subfactoren met bijbehorende parameters. In dit hoofdstuk zal worden gekeken naar methoden en technieken om deze informatie te verkrijgen. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de karakteristieken van het terrein en de voertuigeigenschappen. In dit onderzoek wordt er van uit gegaan dat de voertuigeigenschappen kunnen worden opgevraagd bij de fabrikant of worden verkregen uit databases zoals Janes Defence: Land Platforms (Janes, 2012), of eventueel door middel van testen en proeven in een geconditioneerde omgeving. In dit hoofdstuk zal daarom alleen worden gekeken naar de verschillende methoden en technieken om “op afstand” informatie met betrekking tot de karakteristieken van het terrein te verkrijgen. Deze methoden en technieken worden in de paragrafen 3.1. tot en met 3.3. besproken. Vervolgens zal er meer specifiek worden gekeken naar toepassingsmogelijkheden per subfactor. Hierbij zal per subfactor beschreven worden hoe de informatie gevonden kan worden. Doorgaans zijn er meerdere mogelijkheden om informatie te verzamelen.

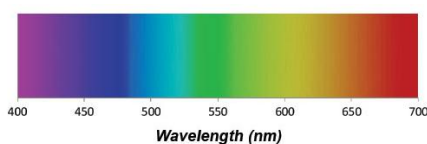
3.1. Terreinonderzoek in de praktijk

Grofweg kan terreinonderzoek in twee categorieën worden verdeeld (Chhaniyara, Brunskill, Yeomans, Matthews, Saaj, & Ransom, 2011) (Janssen, 2000). Men kan informatie verzamelen door fysiek in het terrein metingen te doen of grondmonsters te nemen. De verzamelde grondmonsters kunnen worden geanalyseerd in een lab. Deze manier van meten worden ‘in situ’ of ‘ground based’ genoemd. Meer informatie hierover kan onder andere worden gevonden in het boek Grondmechanica (Verruijt, 2009).

Naast ‘in situ’, het doen van fysieke metingen en testen, kan informatie verzameld worden op basis van ‘remote sensing’. Campbell en Wynne geven hiervan de volgende definitie: ‘The gathering of information at a distance’ (Campbell & Wynne, 2011). Op afstand worden metingen gedaan die vervolgens kunnen worden geanalyseerd. Deze manier van informatie verzamelen is van toepassing op dit onderzoek, omdat hier de voorwaarde is gesteld dat het betreffende gebied niet toegankelijk is. Vanuit een militair optiek komt dit voor wanneer het vijandelijk gebied betreft. Daar is het niet veilig om het gebied te betreden voor begaanbaarheidsonderzoek. Hierdoor zal gebruik moeten worden gemaakt van remote sensing technieken. In de volgende paragraaf komt de theorie van remote sensing aan bod.

3.2. Remote Sensing

Onbewust is een ieder die wel eens een foto heeft gemaakt bezig geweest met remote sensing. Een foto is een weergave van de hoeveelheid licht per kleur die door het object naar de fotocamera gereflecteerd wordt. Licht is opgebouwd uit de heel veel verschillende kleuren (zie figuur 11).



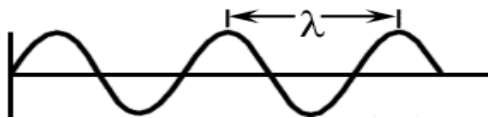
Figuur 11 Visuele spectrum (Film, 2012)

Deze kleuren verschillen van elkaar doordat ze met een verschillende golflengte worden uitgestraald door de bron. Een object krijgt een bepaalde kleur wanneer het verschillend op lichtstralen reageert. Wanneer een object alle kleuren volledig absorbeert, en alleen het groene licht reflecteert, noemen wij het object groen. Echter bij het ontbreken van een lichtstraal blijkt het object zwart te zijn.

Naast de stralen van zichtbaar licht bestaan er nog meer stralen die gereflecteerd en geabsorbeerd worden door alle objecten op de aarde. Deze elektromagnetische stralen zijn voor het menselijke oog niet zichtbaar, maar kunnen wel gemeten worden. Doordat alle stralen in golflengte van elkaar verschillen kan er een zogenaamd elektromagnetisch spectrum worden gedefinieerd.

3.2.1. Elektromagnetisch spectrum

Remote sensing is gebaseerd op het feit dat alle objecten, met uitzonderingen daargelaten, elektromagnetische straling uitzenden. Daarnaast reflecteren ze ook straling uitgezonden door andere objecten. Eén van de manieren om stralingstypen te onderscheiden is de golflengte (figuur 12).



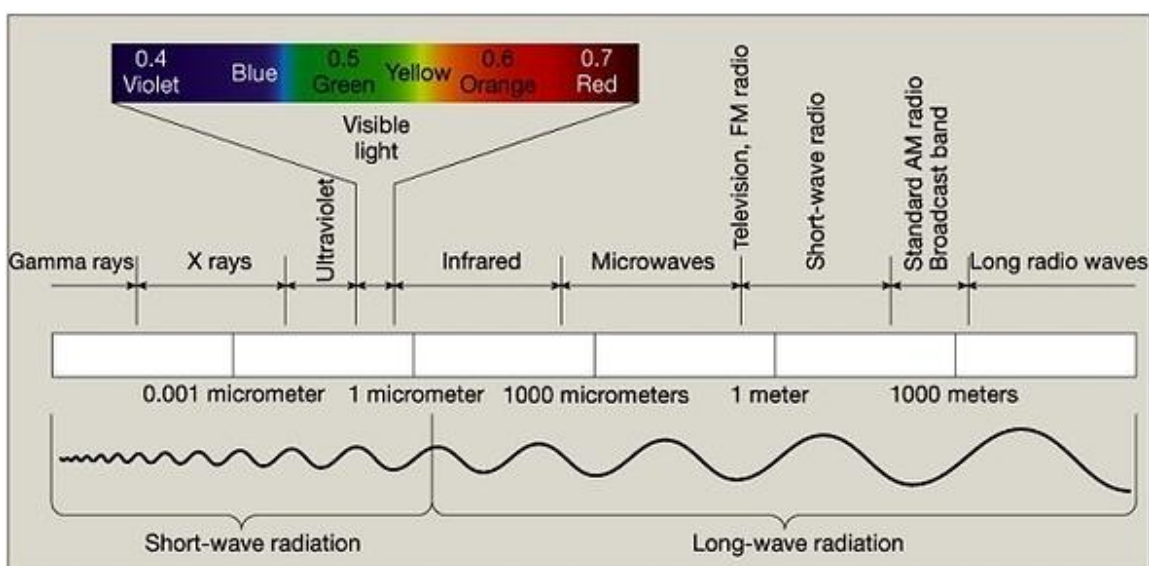
Figuur 12 Golflengte van een straal (DIVI, 2012)

Door straling in te delen per golflengte ontstaat er het elektromagnetisch spectrum (figuur 13).

Er kan ook worden gekozen voor een spectrum op basis van frequentie. Golflengte (λ) en frequentie (ν) kennen de volgende relatie:

$$\nu = c / \lambda$$

Hierbij is c, de snelheid van het licht, vastgesteld op $3 \cdot 10^8$ m/s. In dit onderzoek wordt er voor gekozen te werken met golflengte, tenzij anders staat vermeld.

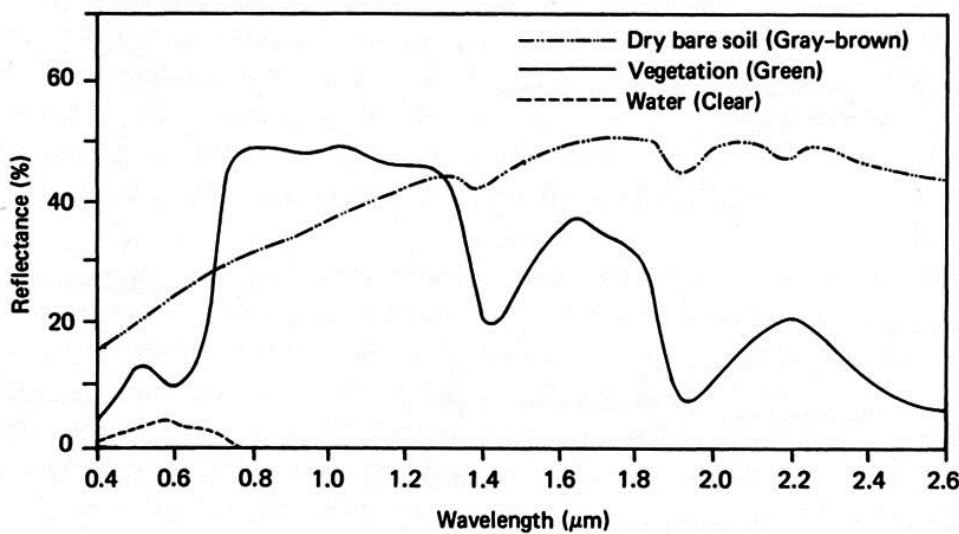


Figuur 13 Elektromagnetisch spectrum (Rooyen, 2010)

Naast het zichtbare licht staan in figuur 13 de overige typen stralingen weergegeven zoals ultraviolet en infrarood. In het begin van deze paragraaf is uitgelegd dat een object verschillend reageert op verschillende stralen zichtbaar licht. Dit principe geldt ook voor de rest van stralingen. De mate van reflectie kan worden uitgezet tegen de verschillende golflengten. In de volgende sub paragraaf wordt hier op door gegaan.

3.2.2. Spectrale reflectie curve

Wanneer men naast het zichtbaar licht, wat bijvoorbeeld vastgelegd wordt in een foto, ook reflecties met andere golflengten gaat vastleggen kan er een spectrale reflectie curve worden opgesteld. Op deze manier ontstaat er een spectrale handtekening van het gemeten object. In figuur 14 staan een aantal typische reflectie curven – droge kale grond, groene vegetatie en helder water.



Figuur 14 Spectrale reflectie curven (DIVI, 2012)

Dit principe kan ook worden omgedraaid. Wanneer een bepaalde reflectie curve wordt gemeten kan worden vastgesteld om wat voor object het gaat. Op deze wijze kan verschillende objecten en gebieden in een terrein in kaart worden gebracht. Hiervoor heeft men wel kennis nodig van de mogelijk aan te treffen objecten. Deze kennis kan worden verkregen door spectrale curves van bekende objecten en gebieden in een bekend terrein vast te leggen en te gebruiken. Een groot aantal vastgelegde spectrale curves zijn te gebruiken via spectrale bibliotheken (libraries) die worden meegeleverd in Remote Sensing software pakketten.

Om objecten zo goed mogelijk van elkaar te kunnen onderscheiden is het van belang dat er naar zoveel mogelijk verschillende golflengten gekeken wordt. Vaak worden stralen met vrijwel dezelfde golflengte echter geclusterd in banden. In tabel 6 staan de verschillende banden met bijbehorende bandbreedtes van de Enhanced Thematic Mapper (ETM+) weergegeven.

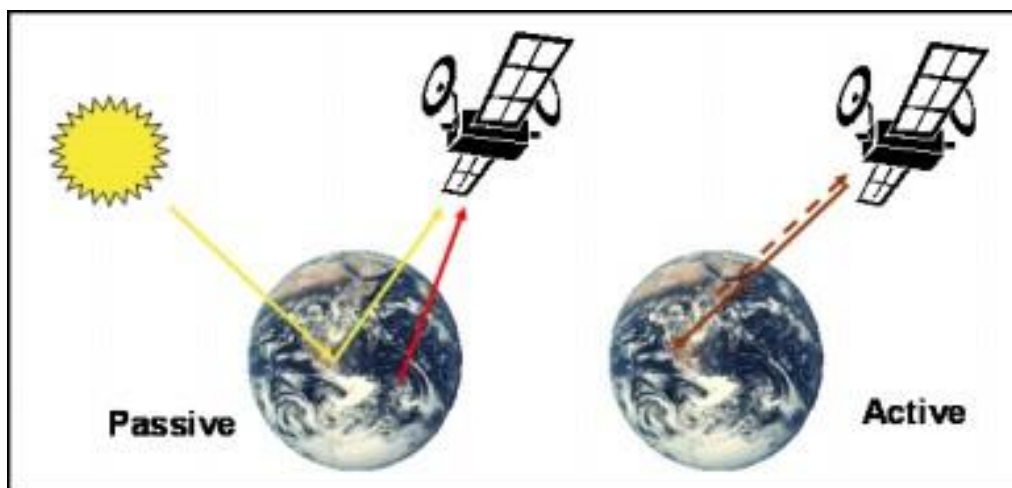
Tabel 6 Landsat 7 ETM+ Banden

Band	Bandbreedte (μm)
1	0,45-0,52
2	0,52-0,60
3	0,63-0,69
4	0,76-0,90
5	1,55-1,75
6	10,4-12,5
7	2,08-2,35
PAN	0,5-0,9

De hoeveelheid banden waarin gemeten wordt de spectrale resolutie genoemd. Naast de spectrale resolutie bestaan er nog meer criteria waarop de verkregen informatie beoordeeld kan worden. Deze zullen worden besproken in sub-paragraaf 3.2.4.

3.2.3. Sensor en platformtypen

Het meten van elektromagnetische straling gebeurt met behulp van sensoren. In remote sensing is een tweedeling te maken tussen passieve en actieve sensoren (figuur 15).



Figuur 15 Actieve en passieve sensoren (Malgorzata, 2010)

Passieve sensoren registreren gereflecteerde zonstraling vanaf het aardoppervlak. Actieve sensoren stralen zelf uit in een bepaalde frequentie en meten de reflectie.

In paragraaf 3.3 worden de sensoren ingedeeld op basis van de gebieden in het elektromagnetisch spectrum waarin ze meten. Verder worden ze ook ingedeeld op basis van de manier van meten (passief of actief). Naast de verschillende typen sensoren is er ook een tweedeling te maken in het type platform. Het platform is de drager van de sensor(en). Het onderscheid wordt gemaakt in de locatie van het platform, deze kunnen zich bevinden in de ruimte of in de lucht.

3.2.4. Informatie karakteristieken

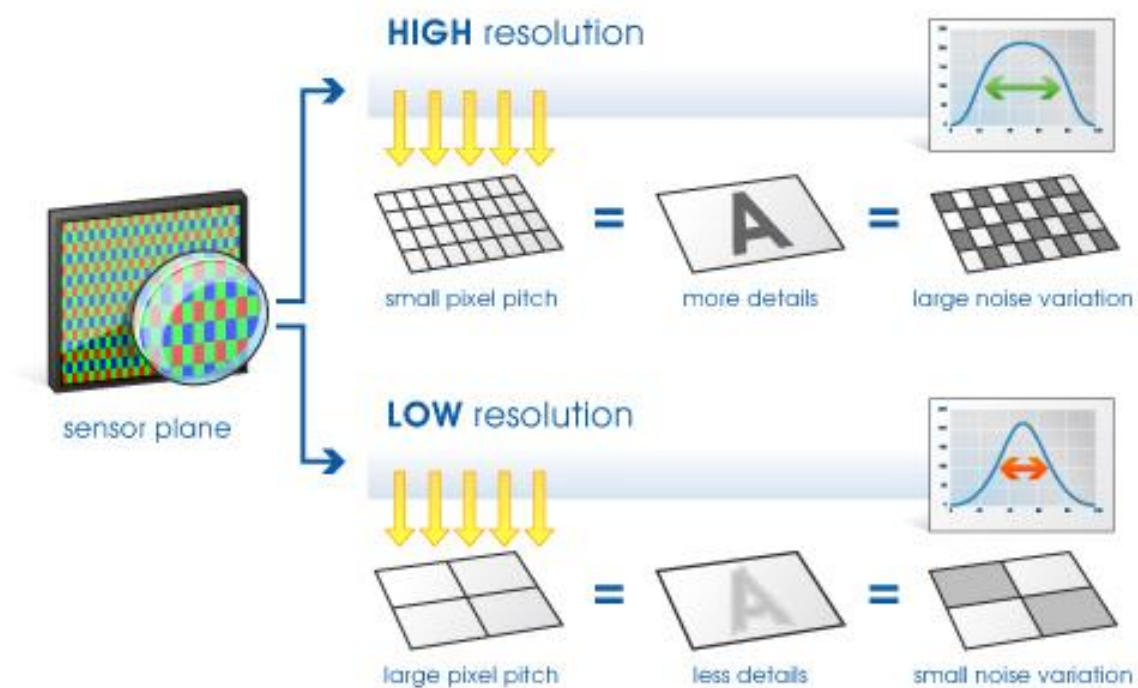
De verkregen meetgegevens kunnen worden gekarakteriseerd op basis van spectrale resolutie, ruimtelijke resolutie en de meetfrequentie (Janssen, 2000):

Spectrale resolutie

In de sub-paragraaf 3.2.2. is naar voren gekomen dat spectrale resolutie een rol speelt bij het definiëren van het bekeken object. Een hoge spectrale resolutie is nodig wanneer te onderscheiden objecten veel op elkaar lijken. Met behulp van figuur 14 kan geconcludeerd worden dat water en vegetatie spectraal gezien relatief eenvoudig van elkaar te onderscheiden zijn. Maar wanneer twee op elkaar lijkende vegetatie soorten van elkaar onderscheiden moeten worden zijn metingen in meerdere bandbreedtes gewenst.

Ruimtelijke resolutie

De ruimtelijke resolutie wordt bepaald door de pixelgrootte van een meting. Dit principe wordt in figuur 16 uitgelegd.



Figuur 16 Ruimtelijke resolutie (Leite, 2009)

In figuur 16 wordt gesproken over de *horizontale* resolutie van een beeld. De ruimtelijke resolutie kan worden onderverdeeld in vier klassen (Navulur, 2006):

- Lage resolutie: 30m of groter;
- Medium resolutie: 2-30m;
- Hoge resolutie: 0,5-2m;
- Erg hoge resolutie: Kleiner dan 0,5m.

Meetfrequentie

De meetfrequentie (ook wel temporele resolutie genoemd) geeft aan hoe vaak de beelden worden genomen. Voor bijvoorbeeld het bodemvocht is het van belang dat de informatie hierover actueel blijft. Veranderingen in weersomstandigheden kunnen van de een op de andere dag omslaan, en daarmee de hoeveelheid bodemvocht veranderen.

3.3.Type sensoren

In deze paragraaf zullen verschillende sensoren worden besproken. Van elk type zal een aantal bekende sensoren worden besproken. In de volgende paragraaf zullen deze sensoren worden vergeleken op toepasbaarheid voor dit onderzoek.

3.3.1. Luchtfotografie

Tegenwoordig zijn bijna alle topografische kaarten gebaseerd op luchtfoto's. Deze oudste vorm van remote sensing maakt gebruik van het voor de mens zichtbare gebied in het elektromagnetisch spectrum. Daarnaast kunnen ook metingen gedaan worden in infrarood. Om dit te kunnen visualiseren in een beeld zal een van de kleuren rood, groen of blauw hiervoor verwisseld moeten worden. In figuur 17 staat een foto twee maal weergegeven. De bovenste geeft de kleuren weer zoals te zien met het menselijk oog. In de onderste foto is de input voor de kleur rood verwisseld met de waarden van de infrarode band. Hierdoor zijn objecten met een relatief hoge infrarood reflectie (bijvoorbeeld vegetatie) rood gekleurd op de foto. Op deze manier kan uit de foto worden opgemaakt dat er in het stadion kunst gras ligt, doordat deze minder infrarode stralen reflecteert dan het grasveld naast het stadion.

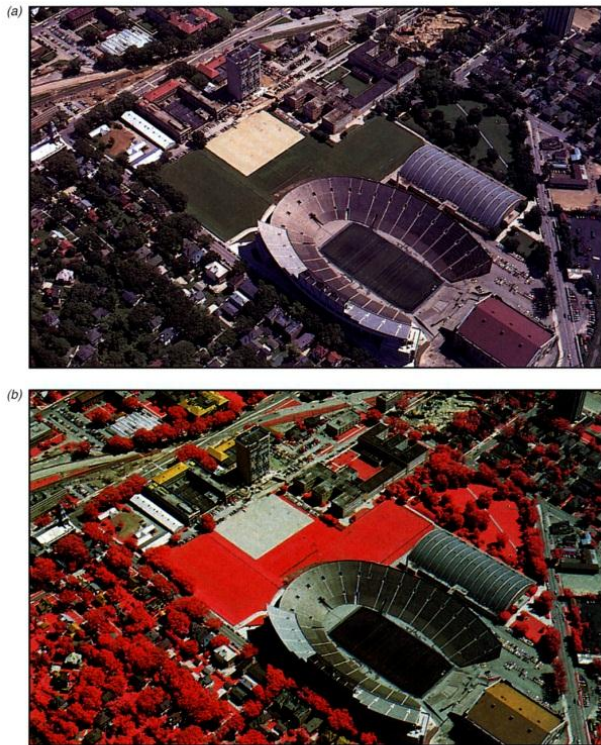
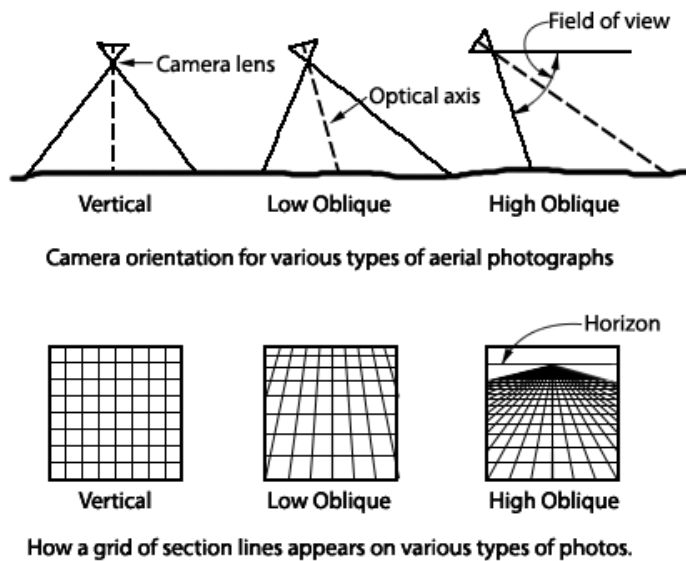


Plate 3 Oblique normal color (a) and color IR (b) aerial photographs showing a portion of the University of Wisconsin-Madison campus. The football field has artificial turf with low near-IR reflectance. (For major discussion, see Section 2.9.)

Figuur 17 Foto met en zonder infrarood (DIVI, 2012)

De meest gebruikte vorm van luchtfotografie is verticale luchtfotografie. Dit wil zeggen dat er een camera onder de romp van een vliegtuig is gemonteerd die foto's recht naar beneden neemt. Een andere optie is wat men in het Engels '*oblique photography*' noemt. Hierbij worden de foto's onder een hoek genomen (zie figuur 18) (Schuckman, 2009).



Figuur 18 Verschillende categorieën luchtfotografie (Schuckman, 2009)

In figuur 18 staan de resultaten van de verschillende technieken weergegeven. De ruimtelijke resolutie van een luchtfoto is afhankelijk van de lens van de camera en de hoogte waarop gevlogen wordt. Hiervoor geldt hoe beter de lens van de camera, en hoe lager er gevlogen wordt des te hoger de resolutie.

3.3.2. Multi spectrale scanners

Multi spectrale scanners meten de hoeveelheid gereflecteerde elektromagnetische straling. Hierbij wordt gemeten in verschillende gebieden in het elektromagnetisch spectrum, vandaar de naam multi spectraal. Deze techniek wordt in de civiele wereld gebruikt sinds 1972 na het lanceren van de eerste Landsat-satelliet. Aan elke pixel wordt voor elke gemeten bandbreedte een reflectie waarde toegekend. Op deze wijze ontstaat er een multi spectrale curve. De spectrale scanners kunnen zowel op een vliegtuig als op een satelliet worden gemonteerd. Door de jaren heen zijn er veel satellieten in een baan rond de aarde gebracht die voorzien zijn van multi spectrale scanners. Hieronder volgt een tabel met informatie over de Landsat 7 satelliet. Tabel 7 dient als voorbeeld voor beschikbare informatie over satellieten en sensoren. Deze informatie is te vinden in verschillende databases als de Satelliet Information Database van het NLR of ITC's Database of Satellites en Sensors.

Tabel 7 Landsat 7 satelliet informatie

Satelliet	Landsat 7		
Sensor	ETM+ (Enhanced Thematic Mapper)		
Start datum	15-4-1999		
Hoogte	705 km		
Beeldbreedte	185 km		
Meetfrequentie	16 dagen	μm	Ruimtelijke resolutie
Spectrale resolutie	Band 1	0,45-0,52	30m
	Band 2	0,52-0,60	30m
	Band 3	0,63-0,69	30m
	Band 4	0,76-0,90	30m
	Band 5	1,55-1,75	30m
	Band 6	10,4-12,5	60m
	Band 7	2,08-2,35	30m
	PAN	0,5-0,9	15m

3.3.3. Hyper spectrale scanners

Naast multi spectrale scanners, die slechts enkele banden bekijken, bestaan er ook hyper spectrale scanners. De Hyperion sensor is een hyper spectrale scanner, die is geplaatst op de EO-1 satelliet.

Tabel 8 Hyperion satelliet informatie

Satelliet	EO-1		
Sensor	HYPERION		
Start datum	21-11-2000		
Hoogte	705 km		
Beeldbreedte	7,5 km		
Meetfrequentie	30 dagen	μm	Ruimtelijke resolutie
Spectrale resolutie	60 banden (0,01 μm interval)	0,4-1,0	30 m
	160 banden (0,01 μm interval)	0,9-2,5	30 m

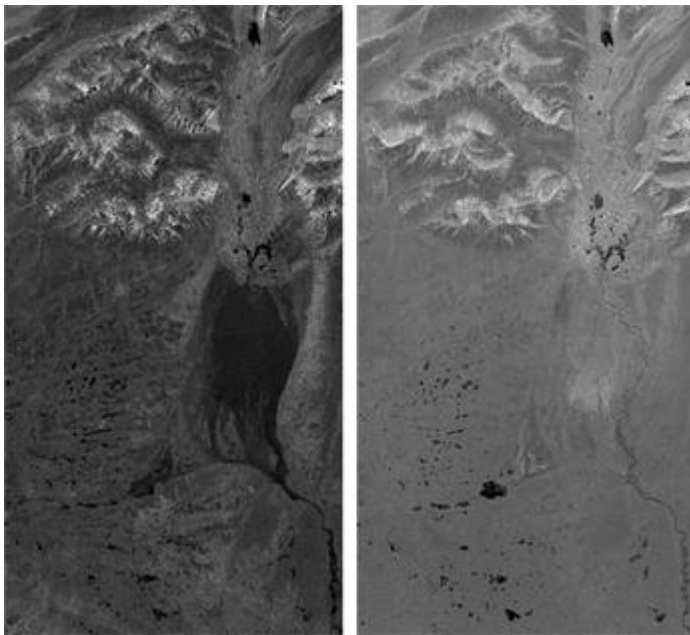
3.3.4. Radar

Radartechnologie maakt gebruik van een ander gedeelte van het elektromagnetisch spectrum. De golflengte van de bij deze technologie gebruikte microgolven varieert globaal tussen de 1 cm en 1 meter. De verschillende banden met bijbehorende golflengte staan in tabel 9 (Campbell & Wynne, 2011).

Tabel 9 Radar-banden met golflengte

Band	Golflengte
P-band	77-107 cm
L-band	15-30 cm
S-band	7,5-15 cm
C-band	3,75-7,5 cm
X-band	2,40-3,75 cm
Ku-band	1,67-2,40 cm
K-band	1,18-1,67 cm
Ka-band	0,75-1,18 cm

Het voordeel van deze langere golven is dat deze gemakkelijk door wolken en duisternis penetreren. Radarsensoren kunnen tot een diepte van 10-25% van hun golflengte de bodem penetreren (McBratney, Mendonca Santos, & Minasny, 2003). Dit kan echter alleen bij afwezigheid van bodembedekking en bodemvocht, bijvoorbeeld een zeer droge woestijngrond.



Figuur 19 Gebruik verschillende banden (Links P-band, rechts x-band) (Fugro-GeoSAR, 2010)

In figuur 19 staan twee beelden weergegeven van het zelfde gebied maar geanalyseerd in twee verschillende spectrale banden. Het betreft een gebied met ijs en sneeuw in Alaska. In vergelijking is te zien dat de p-band (links) in staat is dieper door de sneeuw en ijslaag te penetreren dan de rechter x-band. De verschillende banden kunnen gebruikt worden om verschillende objecten in kaart te brengen.

Door het uitzenden van radargolven en het meten van de reflectie hiervan kan een hoogtemodel worden opgesteld. Dit is mogelijk doordat het moment van zenden en ontvangen en de snelheid van de golf bekend zijn. In combinatie met een plaatsbepalingssysteem kan deze informatie aan een plaats gerefereerd worden, waardoor een hoogte model ontstaat.

Het gebruik van radar technologie ten opzichte van multi spectrale scanners heeft een aantal voor en nadelen (Toan, 2007):

Voordelen:

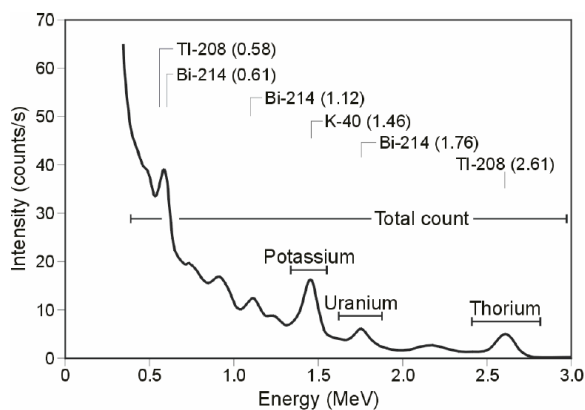
- Te gebruiken onder alle weersomstandigheden (beperkt gevoelig voor wolken en regen);
- Onafhankelijk van zonlicht;
- Geen invloed van de atmosfeer;
- Gevoelig voor diëlectrisch eigenschappen bodem (vocht, biomassa, ijs);
- Gevoelig voor ruwheid van het oppervlak;
- Accurate meting van afstand;
- In staat te meten onder de toplaag.

Nadelen:

- Beelden moeilijk te classificeren, complexe waarnemingen;
- Spikkeleffect bemoeilijkt interpretatie;
- Gevolgen van ruwheid van het oppervlak.

3.3.5. Gamma straling

Wanneer niet alleen de oppervlakte bekeken moet worden, maar ook de diepere grondlagen kan er gebruik worden gemaakt van gammastraling. Een zogenaamde gammastraalspectrometer is ontworpen om gammastralen te detecteren. Gammastraling is elektromagnetische straling met een heel korte golflengte (zie figuur 13). Op basis van de hoeveelheid gemeten straling is het mogelijk verschillende bodemtypen te onderscheiden.



Figuur 20 Gamma spectrum

Bij het meten van gamma stralen wordt er gekeken naar de hoeveelheid Potassium (K), Uranium (U) en Thorium (Th) die gemeten worden (zie figuur 20). Op basis van deze waarde kunnen verschillende bodemtypen worden onderscheiden. Een nadeel van het gebruik van gammastraling is dat niet alle bodemtypen hiermee gedefinieerd kunnen worden. Dit kan worden opgelost door de informatie aan te vullen met gegevens van andere sensoren. Een voordeel bij het meten van gammastraling is dat vegetatie de straling niet of nauwelijks beïnvloed (Wilford, 2002).

AGRS

Air Gamma Ray Spectrometer (AGRS) wordt gebruikt om de hoeveelheid gammastraling te meten vanaf een vliegtuig of helikopter. De ruimtelijke resolutie is hierdoor afhankelijk van de hoogte waarop het platform vliegt (Wilford, 2002).

3.3.6. Laserscanner

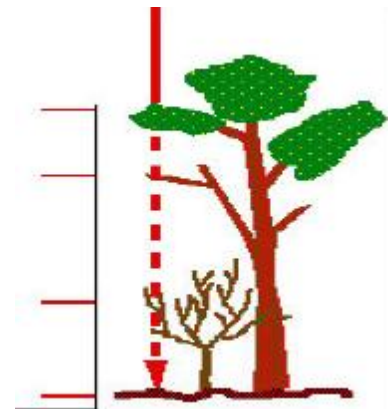
Een laserscanner is een actieve sensor die met behulp van laserpulsen de afstand van de sensor tot het aardoppervlak meet (Janssen, 2000). Door deze informatie te koppelen aan ruimtelijke locatie op het aardoppervlak ontstaat een puntenwolk (elk punt heeft een X, Y en Z coördinaat). Hieruit kan een Digital Elevation Model (DEM) afgeleid worden.

LiDAR

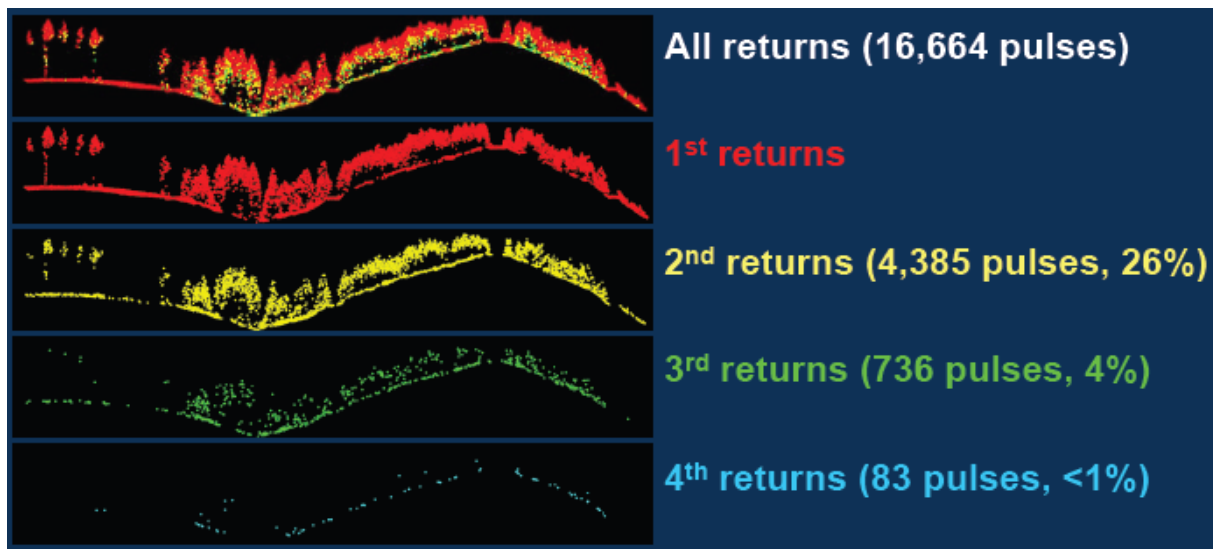
Light Detection and Ranging is een bekend voorbeeld van een laserscanner. Het systeem bestaat uit een Laser Range Finder (LRF), een Global Positioning System (GPS) en een Inertial Navigation System (INS) (Bartels & Wei, 2009). Bodemonderzoek bedrijf Fugro biedt verschillende applicaties van LiDAR aan. Hierbij is het FLI-MAP Fx systeem het meest geavanceerde. Dit systeem zendt en meet vanaf een vliegtuig de laserpuls met een frequentie tot 250 kHz naar het aardoppervlak. Met behulp van plaats bepaling door GPS en INS kan een ruimtelijke resolutie van 9-25 centimeter verticaal, en 15-30 cm horizontaal behaald worden (Fugro, 2011).

De NASA heeft in 2003 de zogenaamde ICESat satelliet in een baan rond de aarde gebracht. Op dit platform was een Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) geplaatst. Dit systeem maakte gebruik van een infrarode straal met een golflengte van 1064 nm en een frequentie van 40 Hz. Deze satelliet is 2010 buiten gebruik gesteld en men verwacht in 2015 zijn opvolger ICESat-2 in werking te hebben. Deze maakt gebruik van dezelfde golflengte maar dan met een puls van 10 kHz. Hierdoor wordt een hogere ruimtelijke resolutie verkregen.

Het US Army Engineer Research and Development Center heeft in 2004 een rapport gepubliceerd waarin gekeken wordt naar de toepassing van LiDAR in mobiliteitsanalyse (Blundell, Guthrie, & Simental, 2004). Hierin maken zij gebruik van een onder een vliegtuig gemonteerd LiDAR systeem. Moderne LiDAR systemen zijn in staat om meerdere reflecties van eenzelfde puls te meten. Dit fenomeen wordt multiple returns genoemd. Op deze manier kan, wanneer de vegetatie niet te dicht is, een uitspraak worden gedaan over de grootte en hoogte van vegetatie (Nayegandhi, 2007). (zie figuren 21 en 22)



Figuur 21 Illustratie multiple returns (Nayegandhi, 2007)



Figuur 22 Weergave multiple returns (Nayegandhi, 2007)

3.4. Informatie eisen per subfactor

Om op een juiste manier informatie te verzamelen is het van belang te weten welke informatie van belang is, en hoe deze verkregen kan worden. In deze paragraaf zal per subfactor worden besproken op welke wijze deze informatie gevonden kan worden.

3.4.1. Bodem

In hoofdstuk twee is naar voren gekomen dat het type bodem en het vochtgehalte bepalend zijn voor de draagkracht en schuifsterkte van de bodem.

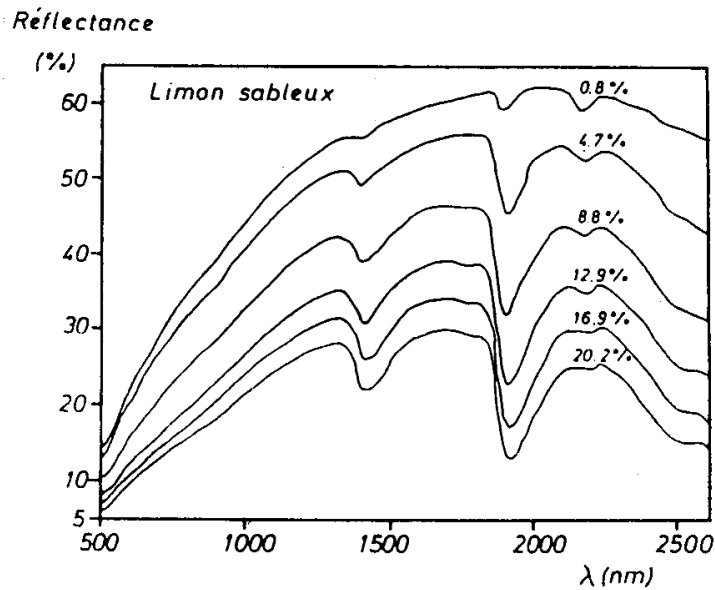
Tabel 10 Benodigde informatie bodem

Bodemparameters	Eenheid
- Bodemtype	classificatie
- Vochtgehalte	percentage

In figuur 14 staat de reflectie curve van een bodemtype weergegeven. De bodemreflectie curve wordt beïnvloed door de volgende factoren in volgorde van mate van invloed (DIVI, 2012):

- Vochtgehalte;
- Gehalte aan organisch materiaal;
- Bodemsamenstelling (zand, zilt en klei);
- Ruwheid van het oppervlak;
- Aanwezigheid van ijzeroxide.

In figuur 23 staat de invloed van bodemvocht weergegeven. Hieruit blijkt dat een verhoging van de hoeveelheid vocht een negatief effect heeft op het reflectiepercentage.



Figuur 23 Invloed van vocht op reflectiecurve (DIVI, 2012)

Dobos et al. hebben een studie gedaan naar de toepassing van informatie verkregen via een Multi spectrale scanner voor het in kaart brengen van verschillende bodemtypen (Dobos, Micheli, Baumgartner, Biehl, & Helt, 2000). Naast het gebruik van data van de AVHRR sensor is ook gebruik gemaakt van een digitaal hoogte model, de Normalized Vegetation Difference Index (NDVI) en een databank met gegevens over mogelijk voorkomende bodemtypen. Het hoogtemodel en de NDVI zullen later deze paragraaf worden behandeld. Met een relatief lage ruimtelijke resolutie (1100m) en een beperkt aantal banden (zie paragraaf 3.2.2.) hebben zij aangetoond dat de verschillende bodemtypen op regionale schaal in kaart kunnen worden gebracht. In hun conclusie geven zij aan dat toepassing van hogere resoluties een nauwkeuriger resultaat kan geven.

Hieruit kan worden geconcludeerd dat om de verschillende bodemtypen van elkaar te kunnen onderscheiden een hoge spectrale resolutie gewenst is. De ruimtelijke resolutie is afhankelijk van de gewenste nauwkeurigheid van de voorspelling. Daarom kan bij het bepalen van de bodemparameters worden volstaan met een slechts medium resolutie (2-30m). Dit komt omdat de verschillende bodemtypen geleidelijk in elkaar over gaan (Kuipers, 1984).

Zowel met multi/hyper spectrale scanners als met radartechnologie is het niet voldoende mogelijk om de bodem onder een dicht vegetatiedek goed te kunnen definiëren. McBratney et al. stellen daarom dat deze empirisch vastgesteld kan worden door een terreinanalist, of dat er gebruik kan worden gemaakt van gamma straling (McBratney, Mendonca Santos, & Minasny, 2003).

Veranderingen in het weer kunnen sterk bepalend zijn voor het vochtgehalte. Daarom is het van belang dat er gebruik wordt gemaakt van recente meetgegevens, dus een hoge meetfrequentie, en er gekeken wordt naar het weer en de weersvoorspellingen vanaf het moment van meten tot aan het moment van toepassing van de CCM voorspelling.

Grondlagen kunnen naast horizontaal ook verticaal variëren. Daarnaast kan het zijn dat er sprake is van bodembedekking. Door deze omstandigheden is het van belang dat niet alleen naar de toplaag gekeken wordt, maar ook naar diepere lagen. De diepte is afhankelijk van de gronddruk van het voertuig en de draagkracht van de grond. De mogelijkheden om dieper in de bodem te kunnen

meten op basis van remote sensing zijn zeer beperkt. Alleen onder bepaalde condities (bijvoorbeeld zeer droge woestijngrond zonder bodembedekking en bodemvocht) kan gebruik worden gemaakt van radartechnologie. Ook de toepassing van het meten van gammastraling biedt beperkte mogelijkheden. Een getrainde terreinanalist daarentegen kan wel op basis van satellietbeelden en stafkaarten een inschatting maken van de bodem onder bodembedekking en van de dieper liggende lagen. Hiervoor is bijvoorbeeld geomorfologische kennis belangrijk. De terreinanalist kan in sommige gevallen ook gebruik maken van bestaande bodemkaarten.

3.4.2. Geometrie

De geometrie kan worden weergegeven in een DEM. Dit digitale hoogte model, bestaande uit pixels, geeft van elk pixel de hoogte ten opzichte van een bepaald referentie punt. Voor deze subfactor is de ruimtelijke resolutie van belang. Horizontaal en verticaal gezien moet een zo juiste mogelijke waarde op een zo juist mogelijke plek gegeven worden.

In dit onderzoek wordt gekeken naar een enkel voertuig. Hierdoor zijn de afmetingen van het voertuig maatgevend voor de benodigde resolutie wanneer gekeken wordt naar de microgeometrie. Voor de meeste voertuigen geldt dat er een erg hoge resolutie (<0,5m) benodigd is. Deze waarde is gebaseerd op de afmetingen van een voertuig. Het vermogen van een voertuig om een bepaalde helling op te rijden wordt bepaald door zijn maximale hellingshoek in een terrein. Uit het DEM kan de in tabel 11 gestelde informatie worden uitgelezen.

Tabel 11 Benodigde informatie geometrie

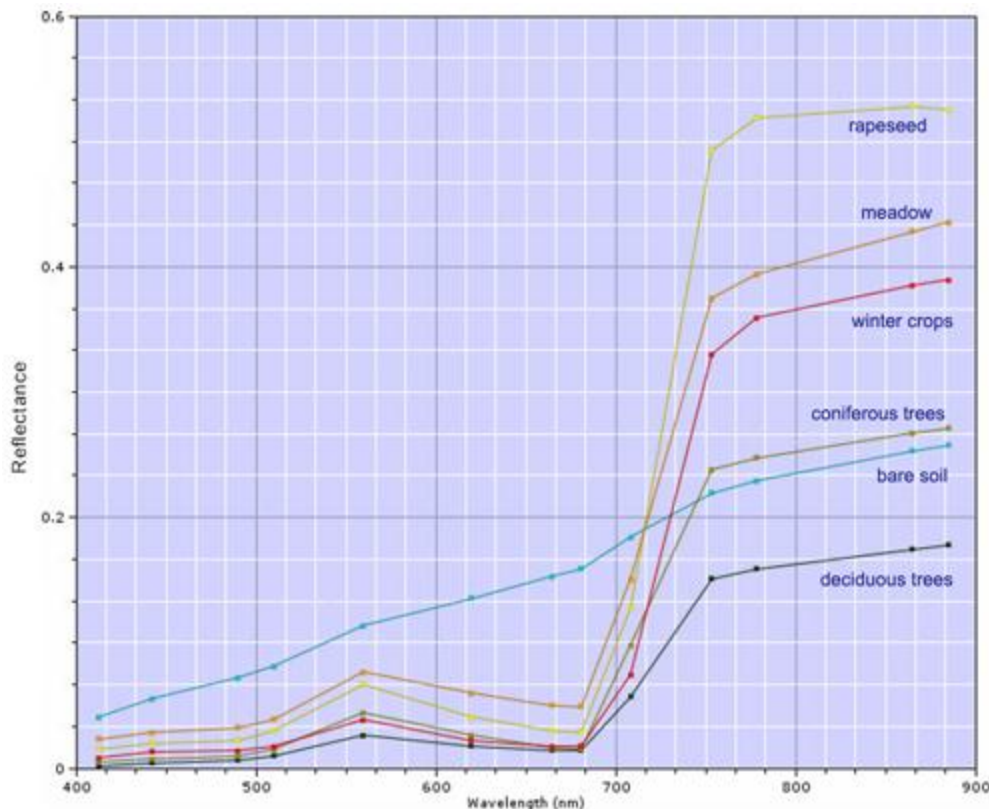
Geometrie parameters	Eenheid
- Helling	graden
- Ruimte tussen obstakels	meter
- Aanrijhoek	graden
- Staphoogte	meter

Blundell et al. hebben in hun rapport over het identificeren van obstakels in het terrein uiteengezet op welke wijze vanuit een hoogtemodel de nodige informatie kan worden onttrokken (Blundell, Guthrie, & Simental, 2004). In dit onderzoek hebben zij gebruik gemaakt van een hoogtemodel gebaseerd op last return waarden van LIDAR. Op deze manier gaan ze er vanuit dat ze te maken hebben met het grondoppervlak. Een andere mogelijkheid is om gebruik te maken van zogenaamde bare-earth algoritmes die objecten boven het grondoppervlak, zoals bomen en gebouwen, uit het model halen. Blundell et al. maken bij het analyseren van het DEM gebruik van software genaamd MICRODEM. Deze is ontwikkeld door Department of Geography and Enviromental Engineering van de U.S. Military Academy. Deze software is in staat hoogte profielen (doorsnede) op te stellen.

3.4.3. Vegetatie

Bij het in kaart brengen van vegetatie is het van belang het detailniveau te bepalen. Dit niveau kan variëren tussen een vegetatiegemeenschap en een individueel vegetatiesoort. De keuze van het detailniveau bepaald de benodigde ruimtelijke en spectrale resolutie. Wanneer men een gebied in detail wil beschrijven is er een zo hoog mogelijke ruimtelijke en spectrale resolutie benodigd.

Een voorbeeld van een spectrale reflectie curve staat weergegeven in figuur 6. Hierin wordt een onderscheid gemaakt tussen gewassen waarbij er wel of geen actieve fotosynthese plaatsvindt. Het verschil staat in figuur 14 weergegeven.



Figuur 24 Spectrale reflectie curven verschillende vegetatietypen (Malikova, 2010)

Een typische eigenschap van fotosynthetisch actieve vegetatie met betrekking tot spectrale reflectie is het contrast tussen reflectie in rode ($\pm 600-700\text{nm}^1$) en nabij infrarode licht ($\pm 700-900\text{nm}$) (Xie, Sha, & Yu, Maart 2008). Om vegetatie goed in kaart te kunnen brengen heeft een hoge spectrale resolutie de voorkeur, waarbij de banden in de rode en nabij infrarode gebieden meegenomen worden. Naast uitspraken over het dan wel/niet plaatsvinden van fotosynthese kunnen ook uitspraken worden gedaan over bladdichtheid, samenstelling (celstructuur) en de hoeveelheid water aanwezig in de plant (Janssen, 2000).

Naast de mogelijkheid om vegetatie te kunnen onderscheiden van andere materie is het van belang dat verschillende vegetatietypen geclassificeerd kunnen worden. Dit onderscheid wordt gemaakt door het toepassen van 'beeldclassificatie'. Hiervoor zijn verschillende methoden ontwikkeld die kunnen worden onderverdeeld in twee categorieën (Xie, Sha, & Yu, Maart 2008):

- Traditionele methoden:
 - *Unsupervised* is een classificatie methode waarbij een computer willekeurige clusters bepaald. Op basis gaat hij alle pixels indelen in clusters. Vervolgens bekijkt hij de gemiddelde waarde per cluster en definieert die als klasse.
 - *Supervised* de computer deelt elke pixel in per vooraf gedefinieerde klassen. Deze klassen worden vooraf ingevoerd vanuit een soort bibliotheek met vegetatiesoorten.
- Verbeterde methoden:

¹ De grenzen tussen de verschillende kleuren zijn niet eenduidig vast gesteld en geven in dit geval een indicatie.

- *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)* kijkt naar het typische verschil tussen de reflectie in het rode en nabij infra rode licht, en geeft een indicatie over de status van de vegetatie.
- *Artificial Neural Network (ANN)* is nuttig bij het onderscheiden van op elkaar lijkende vegetatie typen en complexe problemen. Het principe achter ANN is niet bekend omdat er gebruik wordt gemaakt van een zogenaamde black box waarin het proces gebeurt.

Bovenstaande methoden kennen het nadeel dat naar mate beelden in meer detail bekeken worden er ook meer computercapaciteit nodig is om alle berekeningen te kunnen doen. Daarnaast zijn methoden vaak ontwikkeld voor een specifiek vraagstuk en niet per definitie algemeen toepasbaar.

Tabel 12 Benodigde informatie vegetatie

Vegetatie parameters	Eenheid
- Stamdiameter	centimeter
- Stamafstand	meter
- Type	classificatie
- Zicht	meter
- Hoogte	meter

De nodige informatie met betrekking tot vegetatie die nodig is om CCM te kunnen voorspellen staan in tabel 12. Informatie over de voorkomende stamdiameters en stamafstanden zijn met remote sensing technologieën niet rechtstreeks verkrijgbaar. Een specialist zal hier op basis van het voorkomende type vegetatie, de status en hoogte hiervan een indicatie kunnen geven. Zicht en hoogte kunnen worden gevonden in een DEM met hoge resolutie.

3.4.4. Hindernissen

In paragraaf 2.1.4. is aan bod gekomen dat onder deze subfactor waterhindernissen en gebiedshindernissen vallen. Voor waterhindernissen is de gegevensbehoefte als volgt:

Tabel 13 Benodigde informatie hindernissen

Subfactor hindernissen	Eenheid
- Type	classificatie
- Oeverhelling	graden
- Staphoogte	meter
- Waterdiepte	meter
- Stroomsnelheid	meter/seconde
- Stromingsrichting	Windrichting

In sub-paragraaf 3.4.2. is naar voren gekomen dat de geometrie van het terrein afgelezen kan worden in een DEM. Op basis van het hoogte model en de spectrale reflectie kunnen de oeverhelling, staphoogte en stromingsrichting worden bepaald.

Bjerklie et al. hebben een artikel gewijd aan het verzamelen van gegevens van een waterloop met behulp van sensoren of verschillende satellieten (Bjerklie, Dingman, Vorosmarty, Bolster, & Congalton, 2003). Zij streven er naar om een uitspraak te kunnen doen over het debiet van een rivier.

In figuur 14 is te zien dat water relatief weinig licht reflecteert. Hierdoor is oppervlaktewater gemakkelijk te onderkennen in een gebied. Doordat water relatief weinig licht reflecteert is het moeilijker om de afstand tot de bodem, en daarmee de waterdiepte te meten. De WV-110 sensor op de worldview-2 satelliet meet met een speciale golflengte (Coastal band 400-450 μm). Deze wordt het minst geabsorbeerd door water, waardoor de waarden geschikt zijn voor het bepalen van de waterdiepte (DigitalGlobe, 2009). Hierbij wordt gebruik gemaakt van stereobeelden, waar gekeken wordt naar referentiepunten. Bjerklie et al. stellen dat met behulp van radar de waterstanden in grote rivieren, meren en overstromingen gemeten kunnen worden. Echter stellen zij zelf al vast dat de nauwkeurigheid van deze metingen te laag is (1-10m verticale ruimtelijke resolutie). Daarnaast stellen zij dat diepte niet rechtstreeks verkregen kan worden uit metingen op basis van remote sensing. Hierdoor zijn ze aangewezen op het schatten van diepte op basis van de waterstanden.

Bjerklie et al. maken in hun artikel gebruik van LIDAR voor het meten van de stroomsnelheid van een waterloop. Hierbij zetten zij de volgende beperkingen uiteen:

- Wind en golfslag kunnen het meten beïnvloeden;
- De stroomsnelheid van het water aan het oppervlak is niet gelijk aan de gemiddelde stroomsnelheid over de doorsnede.

Wel stellen ze dat op basis van de stroomsnelheid aan het oppervlakte de gemiddelde snelheid over de doorsnede kan worden geschat.

Gebiedshindernissen kunnen worden onderkend door gebruik te maken van de spectrale reflectiecurves. Afhankelijke van het type gebiedshindernis zijn ruimtelijke en spectrale resolutie van belang. In hoofdstuk twee zijn gebiedshindernissen gedefinieerd als relatief grote gebieden waarin het rijden niet mogelijk is of alleen over conventionele wegen. Dit terrein kan door een terreinanalist gemakkelijk worden onderkend op luchtfoto's, eventueel gecombineerd met aanvullende informatie van multi of hyper spectrale scanners.

3.5.Conclusies

De veelzijdige techniek van remote sensing in is verschillende mate toepasbaar om de in paragraaf 2.4 genoemde terreinparameters te kwantificeren. Per situatie zal moeten worden gekeken naar de best toepasbare remote sensing techniek. Nu bekend is op welke manieren de verschillende parameters kunnen worden ingevuld kan gekeken worden naar de wijze waarop de verschillende subfactoren aan elkaar gekoppeld kunnen worden. Op deze manier kan naar een CCM voorspelling voor een bepaald type voertuig in een onbekend gebied worden berekend. Net als het belang van kwalitatief goede informatie is een goede berekening ook van belang voor de kwaliteit van de uiteindelijke voorspelling.



4. Cross Country Mobility modellen

In het voorgaande hoofdstuk is besproken op welke wijze de input voor een CCM voorspelling gevonden kan worden. Hierbij is geconstateerd dat de benodigde informatie over het terrein voornamelijk via remote sensing verkregen dient te worden. De voertuigeigenschappen worden verkregen via de fabrikant of uit bestaande voertuigdatabases. Naast het verkrijgen van de juiste informatie over de gewenste plaats is het van belang met deze informatie een zo juist mogelijke voorspelling gedaan wordt. In dit hoofdstuk zal worden gekeken naar bestaande modellen en zal worden geanalyseerd op welke wijze in de verschillende input wordt verwerkt tot een CCM voorspelling.

4.1 Algemene introductie

De afgelopen decennia zijn er verschillende modellen ontwikkeld. Voornaamste reden voor het ontstaan van verschillende modellen is het verschil in toepassing (Birkel, 2003). Daarom is het bij het analyseren van een model van belang te palen welke functie het model vervult. Zal de voorspelling worden gebruikt om een tankbataljon door een gebied te sturen, of bijvoorbeeld een individueel verkenningsvoertuig? Daarnaast kunnen modellen worden gebruikt in computertrainingssimulaties. Hierbij wordt vaak een sterk vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid gegeven.

Koeppel heeft in zijn artikel over computermodelleren gekozen voor een tweedeling tussen modellen die de interactie tussen voertuig en de bodem beschrijven, en modellen die de interactie tussen het terrein en het voertuig voorspellen (Koeppel, 1985). De eerste groep modellen voorspelt de mate waarin een voertuig over een bepaalde bodem kan rijden. De tweede groep modellen kijkt naar de invloed die het terrein (geometrie, vegetatie en hindernissen) heeft op het vermogen van een voertuig om er te rijden.

In een CCM voorspelling zullen beide type modellen moeten worden meegenomen om tot een volledige voorspelling te komen. Het NATO Reference Mobility Model (NRMM II) omvat beide type modellen. In dit onderzoek zal gekeken worden naar de componenten van dit model die overeenkomen met de gestelde twee groepen modellen.

De kwaliteit van een voorspelling kan worden gemeten volgens een drietal kwaliteitscriteria: resolutie, nauwkeurigheid en performance (Birkel, 2003). De resolutie is afhankelijk van de beschikbare informatie. Informatie met een hoge resolutie resulteert in een beter voorspelling. De nauwkeurigheid is afhankelijk van de juistheid van de waarnemingen en de wijze waarop deze informatie wordt meegenomen in het model. In verschillende modellen wordt informatie ingedeeld in klassen. Het aantal klassen is dan bepalend voor de nauwkeurigheid van het resultaat.

De performance betreft de juistheid van de voorspelling. Komt het geen dat voorspeld is ook overeen met de werkelijkheid. Wanneer subfactoren niet op de juiste manier aan elkaar gekoppeld worden, of wanneer de verkregen informatie niet actueel bestaat de kans dat de voorspelling van mindere kwaliteit is.

Het NRMM II wordt door Birkel gezien als militaire standaard (Birkel, 2003). Daarom zal in de eerste paragraaf de ontwikkeling hiervan besproken worden. In de paragrafen 4.3 en 4.4 zullen de twee groepen modellen worden behandeld. Deze modellen zullen onderling worden beoordeeld op performance en bruikbaarheid voor dit onderzoek.

4.1.NATO Reference Mobility Model

In deze paragraaf zal de ontstaansgeschiedenis worden besproken van het NRMM (II). Hierbij wordt gekeken naar de verschillende toepassingen en functionaliteiten die zijn toegevoegd.

4.1.1. AMC-71

Het U.S. Army Material Command heeft in 1971 een onderzoek gestart naar terreinbegaanbaarheid (Fatherree, 2006). Er bestond een vraag naar een analytische procedure voor het voorspellen van off-road prestaties van voertuigen. Ten gevolge hiervan zijn een drietal onderzoeksinstituten, te weten het Waterways Experiment Station (WES), het U.S. Tank-Automotive Command (TACOM) en het U.S. Army Engineer Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL), gaan samenwerken om aan deze vraag te kunnen voldoen. Dit heeft geresulteerd in het eerste gedigitaliseerde terreinbegaanbaarheid-model, AMC-71 Mobility Model (AMC-71). WES was toen al bezig met het verzamelen en analyseren van vijftientig jaar onderzoek naar mobiliteit. Het onderzoek van Rula en Nuttall vormde de basis voor het AMC-71 initiatief (Rula & Nuttall, 1971).

Het streven was om het AMC-71 model preciezer en meer accuraat te maken dan de al bestaande modellen en methoden voor het bepalen van mobiliteit in een terrein. Het AMC-71 maakt een onderscheid in drie hoofdgroepen:

- Voertuig;
- Terrein;
- Chauffeur.

Elk van deze groepen moesten apart worden geanalyseerd en gekwantificeerd. Het terrein wordt gekwalificeerd op de volgende punten:

- Type oppervlaktemateriaal;
- Sterkte van het oppervlaktemateriaal;
- Helling;
- Ruwheid van het terrein;
- Hindernissen;
- Vegetatie.

Na het voltooien van het AMC-71 model heeft WES testen uitgevoerd om de voorspellingen met de werkelijkheid te vergelijken. Vijf verschillende type voertuigen en vijf verschillende terreinen dienden als basis voor het onderzoek. Op basis van de onderzoeksgegevens werd gesteld dat het model in zeventig procent van de testen een goede voorspelling gaf. Oorzaken van mislukte voorspelling werden gezocht bij het verkeerd schatten van:

- Ruwheid van het terrein;
- Nemen van hindernissen;
- Invloed van vegetatie;
- Presteren van chauffeur.

Ondanks deze tekortkomingen wordt het AMC-71 Mobility Model gezien als een goede basis voor de nieuwere modellen.



4.1.2. AMM-75

Het Army Mobility Model -75 (AMM-75) is de directe opvolger van het AMC-71. Waar het AMC-71 een terreindeel beoordeelde op dertien verschillende factoren, beschrijft het AMM-75 elk terrein deel op basis van tweeëntwintig wiskundig onafhankelijke terreinfactoren.

In het AMC-71 was het alleen mogelijk om gelijkwaardige voertuigen te gebruiken. In het AMM-75 kunnen verschillen in ladingen en afmetingen worden aangegeven. Daar kunnen ook verdere specificaties worden aangegeven zoals of een voertuig aangedreven en of geremd is. Dit is van belang wanneer een voertuig een ander voorttrekt. Verder omvat dit model ook vergelijkingen die rijden over gladde ondergronden, moerassen en sneeuw kan meenemen in zijn voorspelling.

4.1.3. NATO Reference Mobility Model (II)

De basis voor het NATO Reference Mobility Model (NRMM) is het AMC-71 en het daaropvolgende AMM-75. Een hierop doorgaand onderzoek naar mobiliteit heeft geresulteerd in een tweede versie van het NRMM, het NRMM II. Dit model is vooral bedoeld voor de zogenaamde 'command and control' beslissingen. Dat betekent dat het model minder geschikt is voor het voorspellen van de mobiliteit van een enkel voertuig, maar een indicatie geeft voor het hogere niveau. Dit komt omdat men uitgaat van een maximale handeling van de chauffeur. Wanneer bijvoorbeeld geremd wordt zal uitgegaan worden van het maximale remvermogen. Dit type model wordt ook het een traditioneel model genoemd (Birkel, 2003).

Het NRMM bestaat uit een drietal modules (Wong, Terramechanics and Off-road Vehicle Performance, 2009):

- Areal Module;
- Linear Feature Module;
- Road Module.

Deze modules kunnen gezamenlijk of apart gebruikt worden. Vanuit deze modellen wordt toegewerkt naar een zogenoemde 'speed made good'. Daarmee wordt de snelheid (speed) bedoeld waarmee het bepaalde voertuig door het terrein kan rijden. Dit gebeurt op basis van gegevens over het terrein, het voertuig en de chauffeur. Allereerst wordt er een maximum snelheid bepaald die het voertuig kan halen op basis van het vermogen van het voertuig en de invloeden van het oppervlaktemateriaal. Vervolgens worden verschillende factoren (met betrekking op het voertuig) bekeken die deze snelheid beïnvloeden. Dit wordt de 'force controlled speed' genoemd.

Ook zijn er factoren die geen invloed hebben op het vermogen van het voertuig, maar toch de snelheid bepalen. Deze snelheid, de 'non-force related speed limit', en de eerder gevonden snelheid van het voertuig vormen samen de 'maximum vehicle running speed'. Deze kan gevonden worden door steeds de laagste van de twee gevonden snelheden te kiezen. Deze snelheid geldt voor het specifieke terrein deel waarvoor deze is bepaald. Om een betere indicatie te kunnen geven moet gekeken worden naar de verschillende terreinen in een groter gebied. Deze indicatie wordt 'speed made good' genoemd.

4.2. Terreinmodellen

Wanneer een bodem geschikt is bevonden om over te rijden door een bepaald voertuig betekent dit niet meteen dat het voertuig daar ook daadwerkelijk kan rijden. Naast de bodembegaanbaarheid hebben ook de geometrie, vegetatie en hindernissen invloed op het vermogen van een voertuig om op een bepaald terreindeel te rijden.

4.2.1. NATO Reference Mobility Model

Zoals eerder vermeld bestaat het NRMM uit een groot aantal sub-processen en modellen. Hierbij wordt toegewerkt naar het 'speed made good', de snelheid waarmee een voertuig over een terreindeel kan verplaatsen. Hierbij wordt ook rekening gehouden met de invloed van geometrie, vegetatie en hindernissen.

Tabel 14 Invoergegevens terrein

Oppervlakte samenstelling:	Oppervlakte Geometrie:	Vegetatie:	Lineaire Geometrie:
Type	Helling	Stamgrootte	Doorsnede waterloop
Sterkte	Hoogte	Afstand tussen stammen	Stroomsnelheid
	Obstakels: (lxbxh)		Waterdiepte
	Ruwheid		
	Wegcurvatuur		
	Wegbreedte		
	Scheefheid		

Naast deze parameters kent het model ook variëteit in de verschillende seizoenen en de mate van vochtigheid. De verschillende seizoenen hebben voornamelijk betrekking op de vegetatie. Hierbij moet gedacht worden aan het verschil in zicht wanneer er wel of geen bladeren aan de bomen zitten. De mate van vochtigheid heeft invloed op de sterkte van de bodem.

In het NRMM worden in totaal 103 verschillende parameters onderkend met betrekking tot de voertuiggegevens. Deze zijn te vinden in de bijbehorende gebruiksaanwijzing (Haley, Jurkat, & Brady, 1979). Hier zijn ook de verschillende sub-processen en modellen besproken.

4.2.2. Manoeuvre Analysis Flowchart

Dit model² bepaalt op basis van vier factoren³ de mate van terreinbegaanbaarheid. Daarnaast onderkent het nog een drietal factoren die mobiliteit onmogelijk maken. Voor elk van de vier basis factoren, helling, bodembedekking, route nabijheid en de bodemsamenstelling, wordt afzonderlijk een indicatie gegeven voor de terreinbegaanbaarheid. In de analyse die gedaan wordt in dit model wordt alleen gekeken naar het terrein. De output van dit model geeft dan ook een algemene indicatie van de begaanbaarheid van een terreindeel. De mate van begaanbaarheid wordt weergegeven door een getal tussen de 0 en 1, waarbij 0 niet begaanbaar is. Het model is uitgewerkt in een stroomschema (bijlage D.).

² Dit model afkomstig van SNCO TERA, HQ ARRC en aangeleverd vanuit het DIVI ter verbetering.

³ Deze terminologie komt niet overeen met de in hoofdstuk 2 besproken CCM-factoren.

De factoren zijn opgebouwd uit een aantal klassen. In onderstaande tabellen staan de gegevens per factor uitgewerkt:

Tabel 15 Factoren met weegfactor

Factor:	Aantal klassen	Weegfactor
Hellingen	5	0,3
Bodembedekking	7	0,2
Route nabijheid	4	0,1
Bodemsamenstelling ⁴	14 x 3	0,4

Aan elk van de klassen is weer een bepaalde waarde gekoppeld.

Tabel 16 Hellingen

Hellingspercentage	Waarde
0	1
10	0,9
30	0,6
50	0,3
60	0

Tabel 17 Bodembedekking

Bodembedekking	Waarde
Stedelijk/infra	0
Water	0
Moeras	0,3
Zand	0,1
Kale grond	0,9
Vegetatie (gewassen)	0,5
Vegetatie (bomen)	0,1

Tabel 18 Route nabijheid

Route nabijheid	Waarde
MLC ⁵ 100 (Alle weertypen begaanbaar)	1
MLC 70 (Alle weertypen redelijk begaanbaar)	0,8
MLC 30 (matig begaanbaar)	0,6
Geen route	0

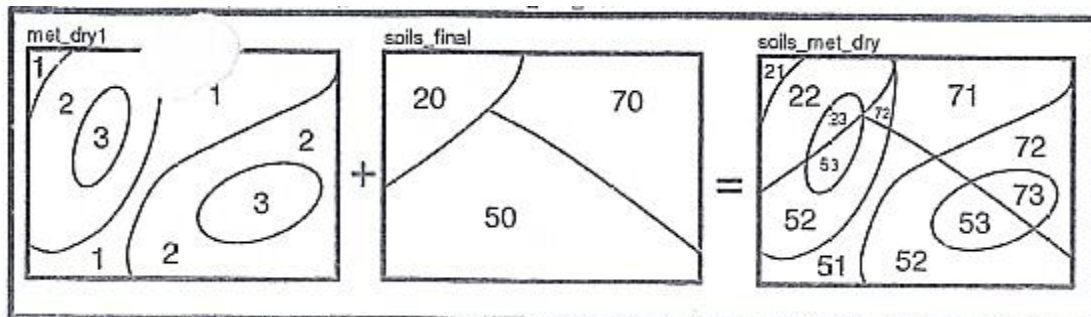
⁴ Deze factor is opgebouwd uit veertien klassen voor het bodemtype en drie klassen voor het bodemvocht (droog, vochtig en volledig verzadigd).

⁵ MLC: Military Load Class.

Tabel 19 Bodemsamenstelling

		Droog	Vochtig	Verzadigd
Bodem type	Waarde	1	2	3
Zand	10	0,5	1	1
Lemig zand	20	1	1	1
Zandig Leem	30	1	1	0,5
Zandig kleiig leem	40	1	1	0,5
Zandig klei	50	1	1	0,5
Leem	60	1	1	0,5
Kleiig leem	70	1	0,5	0,5
Klei	80	1	0,5	0
Ziltig klei	90	1	0,5	0
Ziltig kleiig leem	100	1	0,5	0
Ziltig Leem	110	1	1	0
Zilt	120	1	1	0
Veen	130	0,5	0	0
Steen/gravel	140	1	1	1

De waarden per bodem en vocht type zijn gegeven om deze ook apart te kunnen kwantificeren. Deze waarden kunnen op deze manier bij elkaar op geteld worden:



Figuur 25 Combinatie bodemvocht en grondtype

In tabel 19 kan men vinden dat een waarde van 73 een weging van 0,5 heeft.

Wanneer alle factoren zijn gekwalificeerd kan de weging worden toegepast. Wanneer men op een bepaald coördinaat een vochtige zandgrond aantreft onder een helling van 30%, met daarop wat kleine vegetatie, kan men op de volgende wijze de terreinbegaanbaarheid bepalen:

Tabel 20 Berekening

Factor en klasse	Waarde	Weging	Berekening
Helling van 30 %	0,6	0,3	0,18
Kleine vegetatie	0,5	0,2	0,1
Geen route	0	0,1	0
Vochtige zandgrond	1	0,4	0,4
Totaal:			0,68

Wanneer in het bovenstaande voorbeeld een helling van 60% of hoger was aangetroffen was het totaal op 0,5 uitgekomen. Dit suggereert dat er wel degelijk mobiliteit mogelijk is. Echter gezond verstand zegt al dat op een helling van meer dan 60% verplaatsen met voertuigen niet mogelijk is. Daarnaast is het niet mogelijk om door gebouwen of water te rijden⁶. Wanneer dit het geval is wordt het gevonden getal vermenigvuldigd met 0, en in alle andere gevallen met het getal 1.

4.3. Bodem/Voertuig interactie modellen

Bij het in de inleiding genoemde voorbeeld over Amerikaanse mariniers kwam een voertuig vast te zitten in een moddergrond. Vanwege de regenval van de voorgaande dagen had de zandgrond zijn sterkte verloren. Het voertuig raakte geïmmobiliseerd met alle gevolgen van dien. Om dit soort incidenten te voorkomen zijn er door de jaren heen verschillende modellen opgesteld. Hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen empirische en parametrische modellen. In het geval van een empirisch model doet met een voorspelling op grond van gegevens verkregen uit eerdere lab- en veldtesten. In parametrische modellen maakt men gebruik van vastgestelde formules die de interactie tussen bodem en voertuig wiskundig beschrijven. In deze paragraaf zullen een drietal van deze modellen aan bod komen. Allereerst zal er worden gekeken naar het Vehicle Cone Index (VCI) model. Deze wordt onder meer toegepast in het NRMM. Vervolgens zal het Mean Maximum Pressure (MMP) model behandeld worden. Zowel het VCI model, als het MMP model zijn beiden empirische modellen. Naast deze modellen worden ook de verschillende parametrische modellen van Wong besproken.

4.3.1. Vehicle Cone Index/Rating Cone Index (NRMM)

In deze methode worden zowel de voertuigen als de bodem geïndexeerd (Priddy, 1995). Dit betekent dat de eigenschappen van het voertuig (VCI) en de bodem (RCI) een bepaalde waarde(index) wordt gegeven. Een voertuig kan zich over een bepaalde grond verplaatsen wanneer de index van de grond hoger is dan die van het voertuig. De methode van VCI berekening staat is opgenomen in bijlage B (Wong, Terramechanics and Off-road Vehicle Performance, 2009). Hieruit blijkt dat eerst uit de voertuiggegevens een mobiliteitsindex (MI) per voertuig wordt berekend. Vervolgens wordt deze MI volgens een empirische formule omgerekend tot een VCI waarde. In de VCI waarde wordt onderscheid gemaakt tussen het aantal passages van een voertuig. Wanneer het om een individueel voertuig gaat, dat zich in een rechte lijn door het terrein verplaatst, dient de VCI_1 bepaald te worden. In het geval dat hetzelfde terreindeel meerdere keren wordt gepasseerd, of wanneer er manoeuvres moeten worden uitgevoerd dient de VCI_{50} worden bepaald.

Initieel werd de Cone Index (CI) vast gesteld met behulp van een penetrometer. Bij het gebruik van dit apparaat wordt er handmatig een conisch meetinstrument de grond in gedrukt. Bij een juiste meting wordt de conische punt met een snelheid van twee centimeter per seconde de aarde ingedrukt. Tegelijkertijd kan de weerstand worden afgelezen van het instrument. De gemeten waarde correspondeert met een CI uit de tabel. Eventueel kan er in de grote van de 'Cone' gevarieerd worden. Hierbij moet men wel rekening houden bij het aflezen van de tabel.

Op basis van vele metingen en bijbehorende labtesten hebben onderzoekers van het WES tabellen samengesteld die de CI waarde van de grond weergeven op basis van de USCS classificatie en verschillende bodemvochtklassen.

⁶ Met uitzondering van enkele voertuigen. Hiermee wordt in dit model geen rekening gehouden.

Naast de grondsterkte bepaald in de CI wordt ook onderscheid gemaakt in het type grond waarmee men te maken heeft. Deze tweedeling bestaat uit fijnkorrelige gronden en slecht ontwaterende grof korrelige gronden. Op basis hiervan wordt een Remolding Index opgesteld. Deze index geeft aan hoeveel sterkte de grond verliest bij meerdere passages. Wanneer men de CI met de RI vermenigvuldigt krijgt men de Rating Cone Index (RCI). Deze waarde dient te worden gehanteerd bij meerdere passages.

4.3.2. Mean Maximum Pressure

Het Mean Maximum Pressure (MMP) is opgesteld door de Zweed D. Rowland (Wong, Terramechanics and Off-road Vehicle Performance, 2009) (Maclaurin, 2007). Tijdens de Tweede Wereldoorlog was er een vraag ontstaan naar inzicht in de mobiliteit van tanks. De metingen op basis waarvan dit model is samengesteld zijn dan ook gedaan tijdens en na afloop van de WOII (Maclaurin, 2007). Rowland heeft de volgende formule opgesteld voor het bepalen van de MMP:

$$MMP = \frac{1,26W_v}{2nbe(pd)^{0,5}}$$

Tabel 21 Parameters MMP

Parameter	
W_v	Voertuig gewicht
n	Aantal wegwielen per rupsband
b	Rupsbreedte
p	Rupslengte
d	Diameter van wegwielen
e	Rups/bodem ratio (hoeveel van de rupsband daadwerkelijk de bodem raakt)

Volgens Rowland vormt deze formule een goede basis voor het voorspellen van de terreinbegaanbaarheid van rupsvoertuigen (Maclaurin, 2007). Later heeft hij de volgende formule opgesteld voor wielvoertuigen:

$$MMP = \frac{kW_v}{2nb^{0,85}d^{1,15}\left(\frac{\delta}{h}\right)^{0,5}}$$

Tabel 22 Aanvullende parameters MMP voor wielvoertuigen

Parameter	
k	Factor voor het aantal assen ⁷
δ	Doorzakking
h	Sectie hoogte van de band

Gesteld wordt dat de minimaal benodigde CI om een terrein te kunnen bereiden 0,83MMP dient te zijn. Hiermee gebruikt hij dus voor het bepalen van de bodemsterkte het principe van het WES.

⁷ In (Wong, Terramechanics and Off-road Vehicle Performance, 2009) $k = 0,5$ en $b^{0,85} = b$.

4.3.3. WONG-modellen

De basis voor deze parametrische modellen is gelegd voor Bekker in 1956. Het analyseren van verschillende parameters met behulp van kennis van grondmechanica heeft er toe geleid dat de interactie tussen voertuigen en bodem nu theoretisch kan worden voorspeld. Net als de hiervoor behandelde methoden maakt ook Wong onderscheid tussen wiel en rupsvoertuigen. Afwijkend is dat Wong onderscheid maakt tussen rupsvoertuigen met schakels en rupsvoertuigen met flexibele rupsbanden. In totaal zijn er dus de volgende drie software modellen:

- TVPM (Flexibele rupsbanden)
- RTVPM (geschakelde rupsbanden)
- NWVPM (Wielvoertuigen)

De modellen zijn ontwikkeld om het presteren van nieuw ontworpen off-road voertuigen te bepalen. Naast deze toepassing zijn de modellen ook geschikt om de performance van bestaande voertuigen te bepalen. Daarom kunnen ze ook worden toegepast bij het bepalen van CCM. De precieze rekenmethoden zijn te vinden in (Wong, Terramechanics and Off-road Vehicle Performance, 2009).

De modellen gaan uit van parameters van voertuigen en van de bodem. De bodemparameters zijn in alle drie de gevallen hetzelfde. Wel zit er verschil tussen de benodigde parameters voor de rupsvoertuigen en die voor de wielvoertuigen. De benodigde parameters staan weergegeven in tabellen 23-25.

Tabel 23 Voertuigparameters RTVPM

Parameter:	Eenheid:
Totaal gewicht	kN
x-coördinaat zwaartepunt ⁸	cm
Y-coördinaat zwaartepunt	cm
Tandwiel straal	cm
Roller straal	cm
Midden van roller (x-coördinaat)	cm
Midden van roller (y-coördinaat)	cm
Roller veer stijfheid	kN/m
Aantal steunende rollers	(aantal)
Initiële rupsspanning	kN
Dissel (x-coördinaat)	cm
Dissel (y-coördinaat)	cm
Bandlengte	cm
Wiel ruimte / rupsband	cm
Rupsbandwijdte	cm
Gewicht rupsband	kN/m

⁸ Oorsprong in het midden van het voorste tandwiel

Tabel 24 Bodemparameters Wongmodellen

Parameter	Uitleg	Eenheid
Druk/zakking		
n	Porositeit	getal (0-1)
k_c	(doorlatendheid)	$\text{kN/m}^{(n+1)}$
k_ϕ	(doorlatendheid)	$\text{kN/m}^{(n+2)}$
Herhalende belasting parameters		
k_o	Constante	kN/m^3
A_u		kN/m^4
Schuifsterkte parameters		
ϕ	Wrijvingshoek	graden
c	Cohesie	kPa
K	Compressiemodulus	cm

Tabel 25 Voertuig parameter NWVPM

Voertuigtype	Eenheid	Band nr. 1	Eenheid
Gewicht	kN	Diameter	cm
Zwaartepunt (x-coördinaat) ⁹	cm	loopvlak	cm
Zwaartepunt (y-coördinaat) ¹⁰	cm	Sectie hoogte	cm
Dissel (x-coördinaat)	cm	band/velg	
Dissel (y-coördinaat)	cm	band hoogte	
As nr. 1		band breedte	
As last	kN	Bandenspanning	kPa
Veerstijfheid	kN/m	Gronddruk	kPa
As-hoogte (boven harde grond)	cm	Bandconstructie	(radial or bias)
As (x-coördinaat)	cm	Parameter	k_e
Aangedreven	(ja/nee)	Band nr. 2 t/m n	aantal banden
Band type	(nr. 1)		
Aantal banden paren	aantal		
Spoorbreedte	cm		
As nr. 1 t/m n	n = aantal assen		

4.3.4. Vergelijking empirisch en parametrisch

Wong stelt in zijn boek over off-road vehicle performance dat empirisch vastgestelde methoden (VCI/MMP) niet altijd toepasbaar zijn, en gebaseerd op oude voertuigen. Door ontwikkelingen in de techniek zijn voertuigen beter in staat om door een terrein te kunnen rijden. Met de volgende vergelijking toont hij aan dat het MMP onvoldoende in staat is om terreinkarakteristieken mee te nemen in zijn berekening (Wong, Terramechanics and Off-road Vehicle Performance, 2009). In het VCI model wordt wel enigszins onderscheid gemaakt tussen verschillende bodemtypen door toepassing van de RCI in plaats van CI.

⁹ Oorsprong: Middelpunt van de eerste as van voren. (naar achteren is positief)

¹⁰ Vanaf de grond (bij hard oppervlak) onder middelpunt eerste as van voren. (omhoog is positief)

In deze vergelijking wordt gekeken naar een Armoured Personnel Carrier (APC) op een drietal verschillende ondergronden. Van het voertuig zijn volgende gegevens gebruikt voor het berekenen van een MMP waarde.

Tabel 26 Voertuiggegevens Armoured Personnel Carrier

Parameter	Waarde	Uitleg
W_v	88,71 kN	Voertuig gewicht
n	5	Aantal wegwielen per rupsband
b	0,15	Rupsbreedte
p	0,38 m	Rups lengte
d	0,61 m	Diameter van wegwielen
e	0,992	Rups/bodem ratio (hoeveel van de rupsband daadwerkelijk de bodem raakt)

In de onderstaande figuur staat de gemeten waarde, de voorspelde waarde door het NTVPM en het MMP. De NTVPM rekenmethode is terug te vinden in (Wong, Terramechanics and Off-road Vehicle Performance, 2009).

Terrain	MMP (kPa)		
	Measured	Predicted by NTVPM [*]	Calculated by Rowland's formula
LETE sand	299	310	98
Petawawa Muskeg A	68	72	98
Petawawa Snow B	279	288	98
Source: Wong (1994a). [*] The values of MMP predicted by NTVPM vary with track slip. Those given in this table are for the specific slips shown in Figure 7.3(a), (b) and (c), respectively.			

Figuur 26 Vergelijking NTVPM-MMP en werkelijkheid (Wong, Terramechanics and Off-road Vehicle Performance, 2009)

De grafieken van de gedane metingen zijn te vinden in bijlage C. Uit de resultaten van dit onderzoek kan een tweetal conclusies getrokken worden. In het MMP wordt onvoldoende rekening gehouden met de verschillende ondergronden.

Oorzaak van dit verschil ligt in de empirische oorsprong van de formule van Rowland. Deze is opgesteld op basis van waarnemingen en voertuiggegevens van voor 1960. Het NTVPM daar in tegen kent een beperkte marge tussen hetgeen gemeten en hetgeen voorspeld. Daarom bieden de software modellen van Wong mogelijkheden voor toepassing in een CCM-model.

4.4.Conclusies

In hoofdstuk zijn een aantal beschikbare modellen geanalyseerd. Hierbij is een tweedeling onderkend tussen modellen die de bodembegaanbaarheid bepalen en modellen die (ook) kijken naar de verdere subfactoren: geometrie, vegetatie en hindernissen.

Inhoudelijk is er nuttige informatie gevonden over bodembegaanbaarheidsmodellen. Hierbij is gekeken naar een vergelijking die gedaan is tussen verschillende voorspellingen en de werkelijkheid. Hierbij zijn de parametrische modellen van Wong beter in staat gebleken de begaanbaarheid te voorspellen dan de empirisch vastgestelde formules van Rowland en het WES. Daarom zullen de parametrische modellen worden meegenomen bij de invulling van het conceptueel model.

De beschikbare informatie over modellen die de verdere terreinaspecten meenemen is zeer beperkt. Het Manoeuvre Analysis Flowchart is het enige model dat inzicht geeft in de manier waarop het terrein geclassificeerd wordt. Uit de literatuur over het NRMM blijkt dat ook dit model in staat is het terrein te classificeren, echter is informatie over de precieze werking hiervan niet beschikbaar. Wel kan uit het NRMM worden meegenomen dat het gebruik maakt van sub modellen om de verschillende subfactoren te koppelen. Hierdoor kan het conceptueel model in hoofdstuk 5 slecht beperkt worden ingevuld op de subfactoren vegetatie, geometrie en hindernissen.



5. Conceptueel model

Na het bestuderen van de benodigde informatie, de wijze waarop de informatie verkregen kan worden en de wijze waarop bestaande modellen CCM voorspellen volgt nu de manier waarop de Nederlandse krijgsmacht kan toewerken naar een toepasbaar CCM model. In paragraaf 5.1 zullen de conclusies uit paragraaf 4.4 worden toegepast op de subfactoren met bijbehorende parameters uit hoofdstuk 2. Dit resulteert in een conceptueel model waarvan het stroomschema staat weergegeven in paragraaf 5.2. In paragraaf 5.3 zal worden begonnen met het invullen van het conceptueel model door te kijken naar de toepassing in bestaande modellen. Afsluitend zullen een aantal aandachtspunten besproken die ter verbetering van het conceptueel model kunnen dienen.

5.1. Opzetten van model

In paragraaf 4.1. zijn een drietal kwaliteitscriteria naar voren gekomen. Birkel stelt in zijn studie dat modellen beoordeeld kunnen worden op resolutie, nauwkeurigheid en performance. Bij het vormgeven aan een nieuw model zullen deze punten worden meegenomen. Verder blijkt uit het analyseren van bestaande modellen dat gebruik wordt gemaakt van sub modellen. Op deze manier kunnen de verschillende subfactoren aan elkaar gekoppeld worden. In de komende subparagrafen komende de koppeling tussen de parameters van de subfactoren van het terrein (bodem, geometrie, vegetatie en hindernissen) aan bijbehorende voertuigeigenschappen aan bod.

Bij het opzetten van een model is het van belang het doel van het model te definiëren. In dit onderzoek is niet alleen van een belang óf een voertuig ergens kan rijden, maar ook met welke snelheid.

5.1.1. Koppeling bodem/voertuig

In paragraaf 2.1.1 is naar voren gekomen dat voor het bepalen van de bodembegaanbaarheid voor de bodem de parameters: het bodemtype en het bodemvochtgehalte van belang zijn. Van het voertuig zijn zeven parameters van belang. Beiden staan samengevat in tabel 27.

Tabel 27 Te koppelen parameters bodem/voertuig

Bodem	Voertuigeigenschappen
- Bodemtype	- Gronddruk
- Bodemvocht	- Wielaandrijving
	- Vermogen
	- Bodemvrijheid
	- Bandbreedte
	- Kamhoogte
	- Transmissie

In de bestaande modellen spelen twee aspecten die bij de koppeling van bodem/voertuig een belangrijke rol bij het voorspellen van de bodembegaanbaarheid van een voertuig. Hierbij gaat het enerzijds om de hoeveelheid grip en anderzijds om de mate van wegzakken in de bodem. Wanneer een bodem begaanbaar is voor een voertuig dient ook gekeken te worden naar de snelheid waarmee het voertuig over de bodem kan rijden.

5.1.2. Koppeling geometrie/voertuig

Bij het koppelen van de geometrische gegevens aan de voertuigeigenschappen moeten worden gekeken naar de parameters van een obstakel zoals opgesteld in paragraaf 2.1.2. De

corresponderende voertuigparameters stonden in paragraaf 2.2.2, beiden staan in tabel 28 samengevat.

Tabel 28 Te koppelen parameters geometrie/voertuig

Geometrie	Voertuig
- Helling	- Opstap
- Ruimte tussen obstakels	- Helling
- Aanrijhoek	- Overschrijdend vermogen
- Staphoogte	- Afmetingen
	- Draaicirkel

Wanneer desbetreffende voertuigeigenschap aan de geometrie parameter voldoet kan het voertuig het obstakel nemen. Hierbij dient gekeken te worden naar de vertraging die een obstakel veroorzaakt.

5.1.3. Koppeling vegetatie/voertuig

Vegetatie kan, zoals gesteld in paragraaf 2.1.3. zowel een positieve als negatieve invloed hebben op de terreinbegaanbaarheid. Daarom is het van belang eerst te bepalen welke vegetatietypen op het terrein voorkomen. Op basis van deze gegevens kan worden gekeken of een voertuig in staat is zich over een terrein met deze voorkomende vegetatie typen te verplaatsen, zie tabel 29.

Tabel 29 Te koppelen parameters vegetatie/voertuig

Vegetatie	Voertuig
- Stamdiameter	- Draaicirkel
- Stamafstand	- Vermogen
- Type	- Afmetingen
- Zicht	
- Hoogte	

Wanneer verplaatsen over het terrein mogelijk is zal bepaald moeten worden in welke mate de vegetatie de gewenste snelheid van een voertuig vertraagd.

5.1.4. Koppeling hindernissen/voertuig

Per voorkomende hindernis dient de mate van vertraging op een voertuig te worden bepaald. Hierbij speelt het type hindernis, met bijbehorende eigenschappen en de voertuigeigenschappen een rol, zie tabel 30.

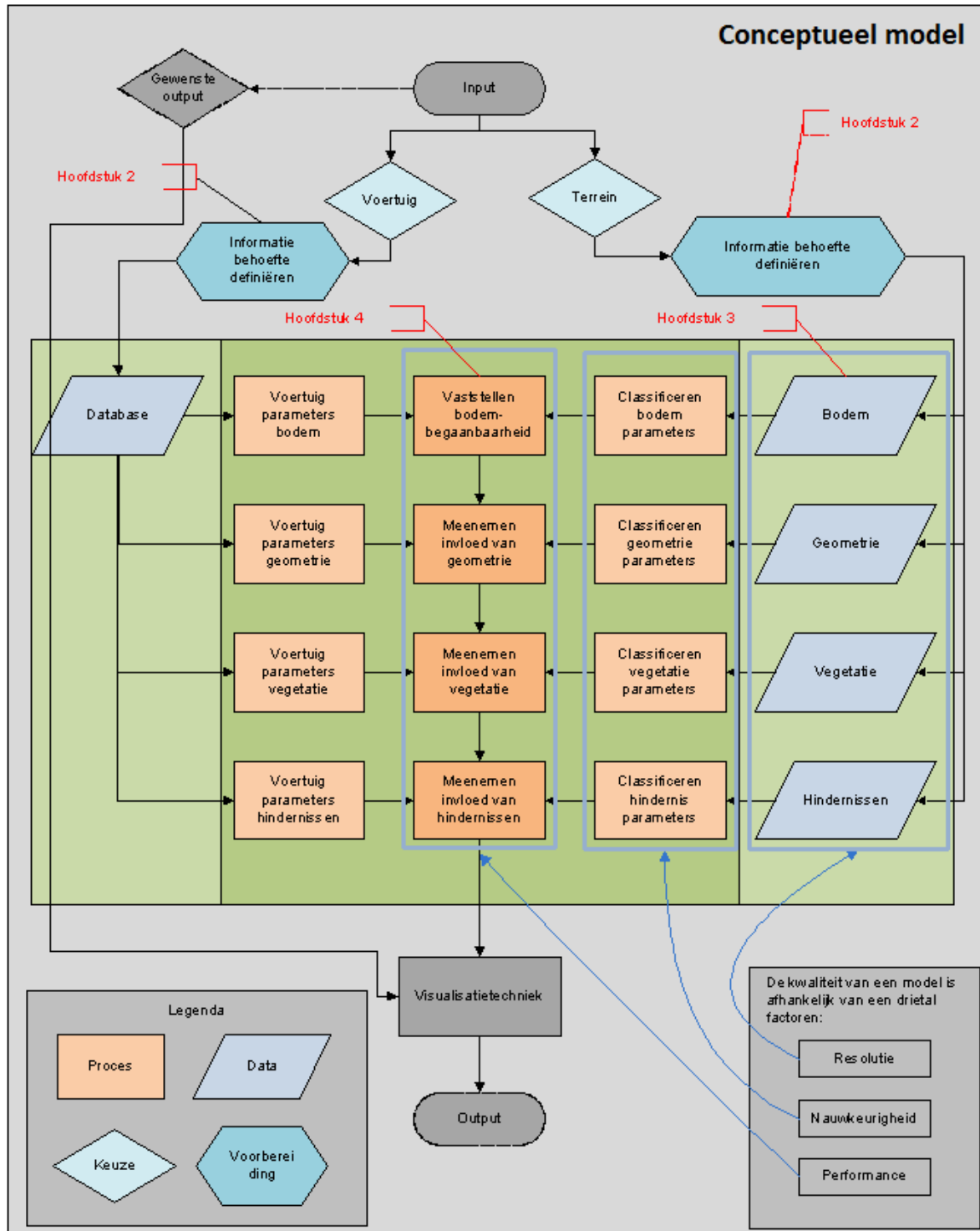
Tabel 30 Te koppelen parameters hindernissen/voertuig

Hindernissen	Voertuig
- Type hindernis	- Waadvermogen
	- Amfibisch vermogen

Naast het koppelen van de afzonderlijke parameters is het van belang dat gekeken wordt naar de interactie van de verschillende factoren. Dit betekent dat er rekening gehouden moet worden dat subfactoren elkaar beïnvloeden. Dit kan zowel positief, door bijvoorbeeld het verbeteren van de schuifsterkte van grond door gras, of negatief gebeuren door bijvoorbeeld een natte kleigrond op een helling.

5.2.Schematische weergave model

In figuur 27 staat een schematische weergave van het conceptueel model. Deze is gebaseerd op de koppeling van informatie besproken in paragraaf 5.1. Daarnaast staan de hoofdstukken vermeld waarin de verschillende stappen worden behandeld.



Figuur 27 Schematische weergave conceptueel model¹¹

¹¹ In dit onderzoek wordt geen aandacht besteed aan de visualisatie van de output van het model.

5.3. Invulling conceptueel model

Om tot de ontwikkeling van een volledig model te komen zal elke stap in het stroomschema moeten worden ingevuld. In het schema staan bij de stappen de hoofdstukken weergegeven waarin de mogelijkheden zijn besproken. De parameters genoemd in hoofdstuk 2 zijn paragraaf 5.1. behandeld bij de koppeling van informatie. Het verkrijgen van de informatie voor deze parameters is besproken in hoofdstuk drie. Hierbij is gebleken dat de wijze van informatie verzamelen verschilt per situatie. De verschillende remote sensing technieken hebben elk hun eigenschappen om objecten te kunnen onderscheiden onder verschillende omstandigheden. Per situatie zal een inschatting gemaakt dienen te worden van de toe te passen techniek. Hierbij is het van belang dat de verkregen informatie zo nauwkeurig mogelijk is, met een passende ruimtelijke resolutie.

Mede bepalend voor de performance van een model is de manier waarop een voorspelling tot stand komt. In paragraaf 5.1. is wel gedefinieerd welke parameters aan elkaar gekoppeld moeten worden, maar niet hoe een voorspelling hieruit tot stand komt. In het stroomschema staan een viertal processen¹² centraal in het model. In de nu volgende paragrafen zal de invulling hiervan worden besproken.

5.3.1. Vaststellen bodembegaanbaarheid

In paragraaf 4.3.4. is naar voren gekomen dat de parametrische modellen van Wong goed in staat zijn om de bodembegaanbaarheid vast te stellen¹³. Het implementeren van de modellen van Wong in het conceptueel model is daarom een logische keuze.

5.3.2. Meenemen invloed geometrie

De Manoeuvre Analysis Chart kent 5 klassen waarin hellingen kunnen worden geclassificeerd. Verder wordt er geen rekening gehouden met kleinere obstakels die ook immobiliteit kunnen veroorzaken. Daarom zal er gezocht moeten worden naar een sub model dat in staat is de invloed van geometrie op de mobiliteit van het voertuig te voorspellen.

5.3.3. Meenemen invloed vegetatie

In het Manoeuvre Analysis Flowchart wordt bij het voorkomen van vegetatie deze ingedeeld in slechts twee klassen. Hierbij wordt ook geen rekening gehouden met de verschillen per voertuig.

5.3.4. Meenemen invloed hindernissen

De stoppende hindernissen worden in het Manoeuvre Analysis Flowchart op een effectieve wijze meegenomen. Nadeel van dit model is dat elke hindernis meteen als stoppend wordt gedefinieerd. Een kleine waterloop is voor een gemiddeld voertuig goed begaanbaar, en wordt in dit model als stoppend weergegeven.

5.4. Aandachtspunten

Bij het invullen van het stroomschema zijn met namen op het modelleer gebied nog veel sub modellen niet volledig. Ter verbetering aan aanvulling van het model kunnen de volgende aandachtspunten worden gegeven:

- Om de invloed van geometrie op de mobiliteit van het voertuig te kunnen voorspellen zal naast de helling ook moeten worden gekeken naar kleinere obstakels die het rijden

¹² Hierbij kunnen de processen worden gezien als sub modellen.

¹³ Binnen een marge van 6% in dit onderzoek.

afremmen of zelfs onmogelijk maken. Hierbij moeten ook de eigenschappen per voertuig worden meegenomen.

- De vegetatie kan een grote invloed hebben op de terreinbegaanbaarheid. Wanneer meerdere klassen worden gedefinieerd, in combinatie met de capaciteiten en eigenschappen van het betreffende voertuig kan een meer¹⁴ nauwkeurigere voorspelling worden gedaan.
- Hindernissen dienen te worden geclassificeerd naar de hoeveelheid vertraging die ze opleveren.
- Een sterk punt van het Manoeuvre Analysis Flowchart is dat het wegingsfactoren kent in de mate waarin sub modellen bijdragen aan de voorspelling. In het stroomschema van het conceptueel model staat aangegeven dat de voorspelling afhangt van alle subfactoren. Hierin zal ook eventueel een bepaalde weging in kunnen worden gegeven.

5.5.Conclusies

Uit dit hoofdstuk blijkt dat alleen op basis van kennis over beschikbare bestaande modellen het niet mogelijk is om een volledig model op te stellen. Om wel een eigen model te krijgen dient onderzoek naar de mogelijkheden van het beschikbaar krijgen en toepassen van bestaande modellen, of het ontwikkelen van eigen sub modellen. Aandachtspunt hierbij is het uitbreiden van het aantal klassen om sub modellen in te kunnen classificeren. Op deze manier wordt de nauwkeurigheid waarmee een voorspelling tot stand komt verhoogd.

¹⁴ Nauwkeuriger dan nu gebeurt in het Manoeuvre Analysis Flowchart



6. Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk zal worden ingegaan op de verschillende conclusies die uit dit onderzoek naar voren zijn gekomen. Dit zal gebeuren door antwoord te geven op de verschillende onderzoeksvragen. Gezamenlijk werken deze vragen toe naar een antwoord op de centrale vraag:

Hoe kan de Nederlandse Krijgsmacht op een zo juist mogelijke manier CCM voorspellen in onbekende operatie gebieden?

Het antwoord op deze vraag zal worden gegeven in de vorm van aanbevelingen voor verder onderzoek.

6.1. Conclusies

In deze paragraaf zal per onderzoeksvraag de antwoorden worden gegeven.

Onderzoeksvraag 1: Welke factoren hebben invloed op het CCM-vermogen?

Om tot een goede CCM voorspelling te kunnen komen moet er eerst onderzoek gedaan worden naar de verschillende factoren die de terreinbegaanbaarheid beïnvloeden. Deze factoren zijn (Shamburger, 1967):

- Terreinkarakteristieken;
- Voertuigeigenschappen;
- Invloed van het terrein op een voertuig.

In het cursusboek Terreinevaluatie (Verkenningen, 2011) worden ook weersomstandigheden en de rijvaardigheden van de chauffeur als apart factoren benoemd. In dit onderzoek zullen de gevolgen van de verschillende weertypen worden meegenomen bij de terreinkarakteristieken (bodemvocht), of worden vermeld als weerstand bij de voertuigeigenschappen. De rijvaardigheid leent zich niet voor een dergelijk onderzoek en daarom wordt de chauffeur als rijvaardig verondersteld.

Onderzoeksvraag 2: Welke informatie is nodig om de CCM-factoren te kunnen voorspellen?

Hieronder wordt per subfactor aangegeven welke informatie benodigd is:

Tabel 31 Informatiebehoefte voertuigeigenschappen

	Parameter	Eenheid
Voertuigeigenschappen	Terrein	
	- Gronddruk	kN/m ²
	- Gewicht	kN
	- Wielaandrijving	aantal
	- Vermogen	pk/ton
	- Bodemvrijheid	meter
	- Bandbreedte	millimeter
	- Kamhoogte	millimeter
	- Transmissie	(hand/automaat)

	Parameter	Eenheid
	Hindernissen	
	- Draaicirkel	meter
	- Afmetingen (lxbxh)	meter
	- Waadvermogen	meter
	- Amfibisch vermogen	(ja/nee)
	- Opstap	meter
	- Helling	graden
	- Overschrijdend vermogen	meter
	Verplaatsen	
	- Snelheid	kilometer/uur
	- Actieradius	kilometer

Tabel 32 Informatiebehoefte Invloed terrein op een voertuig

	Parameter	Eenheid
Terreininvloed	Kleef	(ja/nee)
	Gladheid	(ja/nee)
	Wegzakken	meter

Onderzoeksvraag 3: Op welke wijze kan deze informatie verkregen worden?

In dit onderzoek is gekeken naar methoden en technieken om deze informatie te verkrijgen. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de karakteristieken van het terrein en de voertuigeigenschappen. Veelal kunnen de gegevens van het voertuig worden opgevraagd bij de fabrikant. Aanvullende gegevens kunnen worden verkregen uit databases, bijvoorbeeld Janes Defence: Land Platforms (Janes, 2012), of door middel van testen en proeven in een geconditioneerde omgeving.

De benodigde informatie voor de terreinkarakteristieken zijn grotendeels verkrijgbaar met behulp van remote sensing technieken:

- Luchtfotografie;
- Multi spectrale scanners;
- Hyper spectrale scanners;
- Radartechnologie;
- Gamma straling;
- Laserscanners.

Een beperking van het toepassen van remote sensing het verkrijgen van gegevens over de bodem en veel gevallen wordt bemoeilijkt door bodembedekking. Dit wordt veroorzaakt door het beperkte penetrerende vermogen van elektromagnetische straling. Hier kan gebruik worden gemaakt van terrein analisten die op basis van bekende gegevens het bodemtype kunnen schatten.

Onderzoeksvraag 4: Welke methoden zijn beschikbaar om CCM te voorspellen?

In de afgelopen decennia zijn er verschillende methoden en modellen ontwikkeld die iets van CCM voorspellen. In dit onderzoek zijn de volgende modellen besproken:

- Nato Reference Mobility Model;
- Manoeuvre Analysis Flowchart;
- Wong-modellen;
- Mean Maximum Pressure.

Afhankelijk van de wensen van de gebruiker wordt er toegewerkt naar een bepaalde voorspelling. Verder kunnen de modellen worden onderverdeeld naar functie. Hierin wordt een onderscheid gemaakt tussen modellen die de bodembegaanbaarheid van een bepaald voertuig in een bepaald gebied voorspellen, en modellen die het terrein analyseren.

Onderzoeksvraag 5: In welke mate zijn beschikbare CCM modellen volledig om tot een goede voorspelling te komen?

Het enige model beschikbaar dat een zo volledig mogelijke CCM voorspelling kan doen is het NATO Reference Mobility Model. Vanwege de empirische aard van het sub model voor het voorspellen van de bodembegaanbaarheid (VCI/CI) kunnen er vraagtekens worden gezet bij de uitkomst. De parametrische modellen van Wong daarentegen blijken in staat om redelijk nauwkeurig de bodembegaanbaarheid te voorspellen.

Van de verdere sub modellen van het NRMM is wel bekend welke parameters worden meegenomen, maar niet hoe de voorspelling berekend wordt. Daarom kan het NRMM slecht gebruikt worden bij het vormgeven van het conceptueel model.

Overige modellen, zoals het Manoeuvre Analysis Flowchart, geven wel een goed beeld over hoe de bepaling van terreinbegaanbaarheid kan gebeuren. Goede punten zijn meegenomen in het conceptueel model.

Onderzoeksvraag 6: Welke gebreken zijn er nog aan bestaande modellen om tot een juiste voorspelling van het CCM-vermogen te komen?

Uit hoofdstuk 4 zijn de volgende gebreken naar voren gekomen uit een analyse van bestaande modellen:

- Informatie is slechts beperkt beschikbaar;
- Modellen nemen niet alle factoren mee in hun voorspelling;
- Nauwkeurigheid van een voorspelling wordt beperkt door het te lage aantal klassen;
- Gebruikte formules zijn empirisch van aard. Hierdoor kan het zijn dat het model slechts beperkt toepasbaar is op het onderzochte gebied.

In hoofdstuk 5 is invulling gegeven aan conceptueel model. Ter verbetering aan aanvulling van het model kunnen de volgende aandachtspunten worden gegeven:

- Om de invloed van geometrie op de mobiliteit van het voertuig te kunnen voorspellen zal naast de helling ook moeten worden gekeken naar kleinere obstakels die het rijden



afremmen of zelfs onmogelijk maken. Hierbij moeten ook de eigenschappen per voertuig worden meegenomen.

- De vegetatie kan een grote invloed hebben op de terreinbegaanbaarheid. Wanneer meerdere klassen worden gedefinieerd, in combinatie met de capaciteiten en eigenschappen van het betreffende voertuig kan een meer¹⁵ nauwkeurigere voorspelling worden gedaan.
- Hindernissen dienen te worden geclassificeerd naar de hoeveelheid vertraging die ze opleveren.
- Een sterk punt van het Manoeuvre Analysis Flowchart is dat het wegingsfactoren kent in de mate waarin sub modellen bijdragen aan de voorspelling. In het stroomschema van het conceptueel model staat aangegeven dat de voorspelling afhangt van alle subfactoren. Hierin zal ook eventueel een bepaalde weging in kunnen worden gegeven.

6.2.Aanbevelingen

Door het opsommen van aanbevelingen wordt de centrale vraag van dit onderzoek beantwoord:

Op welke wijze kan de Nederlandse Krijgsmacht op een zo juist mogelijke manier CCM voorspellen in onbekende operatie gebieden?

- Investeren in het verkrijgen van hoogwaardige meetgegevens:
 - o *Remote sensing*: Hierbij kan gedacht worden aan het ontwikkelen van nieuwe sensoren en satellieten waarmee informatie van een hogere kwaliteit verkregen kan worden.
 - o *Lokale meettechnieken*: Onderzoek naar de implementatie van lokaal verkregen informatie vanuit het voertuig. Hierbij wordt de voorspelling continu aangepast aan omstandigheden in het terrein. Dit biedt de navigator aan boord van de mogelijkheid tijdig de route te wijzigen wanneer de terreinbegaanbaarheid afneemt. Hierdoor kunnen de hoge kwaliteitseisen die in dit onderzoek gesteld zijn aan de informatie worden ingeperkt.
- Investeren in computercapaciteit voor het analyseren van data en berekenen van voorspelling;
- Onderzoek naar uitwerken en verbeteren conceptueel model;
- Toetsen van het opgestelde conceptuele model in de praktijk;
- Om uiteindelijk tot een eindproduct te komen dient ook te worden gekeken naar de manier waarop de verschillende informatiebronnen op elkaar afgestemd worden;
- Om tot een goed werkende CCM-applicatie te komen is het van belang dat er gekeken wordt naar de wijze waarop de voorspelling visueel kan worden gemaakt.

Voordat de Nederlandse Krijgsmacht in staat is een goed CCM model toe te kunnen passen dient er meer onderzoek plaats te vinden. Dit onderzoek kan worden gezien als een voorstudie op dit onderzoek.

¹⁵ Nauwkeuriger dan nu gebeurt in het Manoeuvre Analysis Flowchart

Bibliografie

- Bartels, M., & Wei, H. (2009, 02 16). *Remote Sensing: Segmentation and Classification of LIDAR Data*. Opgeroepen op 11 16, 2012, van Computational Vision Group: <http://www.cvg.rdg.ac.uk/projects/LIDAR/index.html>
- Birkel, P. (2003). *Terrain Trafficability in Modeling and Simulation*. McLean: Sedris.
- Bjerkie, D., Dingman, L., Vorosmarty, C., Bolster, C., & Congalton, R. (2003). Evaluating the potential for measuring river discharge from space. *Journal of Hydrology*, 17-38.
- Bjerkie, D., Dingman, L., Vorosmarty, C., Bolster, C., & Congalton, R. (2003). Evaluating the potential for measuring river discharge from space. *Journal of Hydrology*, 17-38.
- Blundell, B., Guthrie, V., & Simental, E. (2004). *Terrain Gap Identification and Analysis for Assured Mobility*. Alexandria: ERDC.
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to remote sensing*. New York: The Guilford Press.
- Chhaniyara, S., Brunskill, C., Yeomans, B., Matthews, M., Saaj, C., & Ransom, S. (2011). Terrein trafficability analysis and soil mechanical property identification for planetary rovers: A survey. *Journal of Terramechanics (49-2012)*, 115-128.
- DigitalGlobe. (2009, Augustus). *The Benefits of the 8 Spectral Bands*. Opgehaald van White Paper: www.digitalglobe.com
- DIVI. (2012, 11 16). Remote Sensing Electromagnetic Spectrum.
- Dobos, E., Micheli, E., Baumgartner, M., Biehl, L., & Helt, T. (2000). Use of combined digital elevation model and satellite radiometric data for regional soil mapping. *Geoderma* 97, pp. 367-391.
- Fatherree, B. H. (2006). *The history of Geotechnical Engineering at the Waterways Experiment Station 1932-2000*. Vicksburg: US Army Engineer Research and Development Center.
- Film, O. G. (2012). *Performance*. Opgeroepen op 11 24, 2012, van Orca Grow Film: <http://www.orcagrowfilm.com/Articles.asp?ID=145>
- Fox, R., Pritchard, P., & McDonald, A. (2010). *Introduction to Fluid Mechanics*. Hoboken: Wiley.
- Fugro. (2011). LiDAR Mapping Services. Fugro.
- Fugro-GeoSAR. (2010, december 23). *Winter Weather Is No Match For GeoSAR*. Opgeroepen op 11 29, 2012, van <http://www.geosar.com>: <http://www.geosar.com/blog/index.php/2010/12/23/winter-weather-is-no-match-for-geosar/>
- Gitz, H. (1976). *Inventarisatie van classificatiesystemen van grondsoorten t.b.v. wegenbouw*. School Militaire Inlichtingendienst.
- Grabua, W. (1964). Terrain evaluation for mobility purposes. *Journal of Terramechanics (Vol. 1, No. 2)*, 22-34.

- Haley, P. W., Jurkat, P., & Brady, P. (1979). *NATO Reference Mobility model, Edition 1 Users Guide*. Hoboken: Stevens Institute of Technology.
- Janes. (2012). *Jane's Defence: Land Platforms*. Opgeroepen op 11 24, 2012, van Janes: <http://www.janes.com/products/janes/defence/det-modules/land-platforms.aspx>
- Janssen, L. L. (2000). *Principles of Remote Sensing*. Enschede: The International Insitute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC).
- Koeppel, W. (1985). Computer modelling. *Journal of Terramechanics*, 27-36.
- Kuipers. (1984). *Bodemkunde*. Culemborg: Educaboek BV.
- Leite, E. (2009, 04 12). *Pixels en resolutie*. Opgeroepen op 11 26, 2012, van Fotofocus.com: <http://focusfoto.com.br/pixels-e-resolucao/>
- Maclaurin, B. (2007). Comparing the NRMM (VCI), MMP and VLCI traction models. *Journal of Terramechanics* 44, 43-51.
- Malgorzata. (2010). *Data acquisition and integration*. Opgeroepen op 11 16, 2012, van Digitális Tankönyvtár: http://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop425/0027_DAI6/ch01s03.html
- Malikova, L. (2010). *Utilization of BEAM and NEST open source toolboxes in education and research*. Opgeroepen op 11 29, 2012, van Geoinformatics FCE CTU: http://geoinformatics.fsv.cvut.cz/gwiki/Utilization_of_BEAM_and_NEST_open_source_toolboxes_in_education_and_research
- McBratney, A., Mendonca Santos, M., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 3-52.
- Navulur, K. (2006). *Multispectral image analysis Using the object-oriented paradigm*. New York: Taylor and Francis.
- Nayegandhi, A. (2007, 06 20). Lidar Technology Overview. St. Petersburg, Florida, USA.
- Priddy, J. D. (1995). *Stochastic Vehicle Mobility Forecasts Using the NATO Reference Mobility Model*. Vicksburg: US Army Corps of Engineer Waterways Experiment Station.
- Rooyen, L. v. (2010, 11 19). *Nieuw in de Melkweg: gammabellen*. Opgeroepen op 11 16, 2012, van Kennislink.nl: <http://www.kennislink.nl/publicaties/nieuw-in-de-melkweg-gammabellen>
- Rula, A., & Nuttall, C. (1971). *An Analysis of Ground Mobility Models (ANAMOB)*, WES Technical Report M-71-4. Vicksburg: Waterways Experiment Station.
- Schuckman, K. (2009). *Optical Sensors*. Opgeroepen op 11 15, 2012, van GEOG 883 Remote Sensing Image Analysis and Applications: <https://www.e-education.psu.edu/geog883kls/node/434>
- Shamburger, J. (1967). A quantitative method for describing terrain for ground mobility. *Journal of Terramechanics (Vol.4, No. 2)*, 39-45.
- Toan, T. L. (2007, September 03). Introduction to SAR remote sensing.

- van Dort, K., & den Hollander, H. (2007). *Kartering Nationaal Park de Biesbosch*. Delft: Rijkswaterstaat Data-ICT Dienst.
- Van Veen, M., & Westerkamp, K. (2010). *Deskresearch*. Amsterdam: Pearson.
- Verkenningen, I. G. (2011). *Cursus boek Terrein Evaluatie*. Vught: OTC-Genie.
- Verruijt, A. (2009). *Grondmechanica*. Delft: VSSD.
- Verschuren, P., & Doorewaard, H. (2007). *Het ontwerpen van een onderzoek*. Den Haag: Lemma.
- Wilford, J. (2002). *Airborne Gamma-Ray Spectrometry*. Canberra: Remote Sensing: Segmentation and Classification of LIDAR Data.
- Wong, J. (2009). *Terramechanics and Off-road Vehicle Performance*.
- Wong, J. (2010). *Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering*. Ottawa: Elsevier.
- Xie, Y., Sha, Z., & Yu, M. (Maart 2008). Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of Plant ecology*, 9-23.



Verklarende woordenlijst

A

Amfibisch vermogen geeft aan of een voertuig naast op het land ook over water kan verplaatsen.

Artificial Neural Network is nuttig bij het onderscheiden van op elkaar lijkende vegetatie typen en complexe problemen. Het principe achter ANN is niet bekend omdat er gebruik wordt gemaakt van een zogenaamde black box waarin het proces gebeurt.

B

Bodembegaanbaarheid de mate van begaanbaarheid van de bodem op basis van draag en schuifkracht.

Bodemvrijheid is de vrije ruimte tussen de bodem van het voertuig en de ondergrond, wanneer deze niet is weggezakt in de bodem.

C

Cross Country Mobility (CCM) de mate waarin mobiliteit met een bepaald voertuig in een bepaald gebied mogelijk is.

D

Digital Elevation Model (DEM): In een digitaal hoogtemodel staan per pixel de hoogte van het terrein digitaal weergegeven.

F

Factoren: In dit onderzoek worden de benodigde gegevens weggezet in een hiërarchieke lijn. Deze is als volgt: CCM-factoren → subfactoren → parameters. Hierbij vormen de parameters de uiteindelijke informatie behoefte en zijn deze georganiseerd in verschillende (sub-) factoren.

G

Gronddruk is de hoeveelheid druk die een voertuig uitoefent op de ondergrond.

H

Helling is de hoek waaronder het terrein stijgt of daalt in hoogte.

I

In situ een methode van onderzoek waarbij metingen gedaan worden in het veld en/of grondmonsters worden geanalyseerd in een lab.

L

Light Detection and Ranging (LiDAR) remote sensing techniek dat gebruik maakt van laser pulsen. De pulsen worden verzonden naar het oppervlak en weer worden opgevangen.

M

Meetfrequentie geeft hoe vaak metingen gedaan (kunnen) worden. In het geval van een satelliet is dit de tijd die voorbij gaat voordat hetzelfde stuk van de aarde weer bekeken kan worden.



Mean Maximum Pressure Empirische vastgestelde formule van Rowland voor het bepalen van interactie tussen bodem en voertuig.

N

Normalize Difference Vegetation Index geeft de status van vegetatie aan door te kijken naar het contrast tussen reflectie van het rode licht en het nabij infra rode licht.

O

Opstap is de hoogte van een object waar een voertuig tegen op kan rijden (figuur ...)

P

Parameters (zie factoren)

R

Remote Sensing is het verzamelen van gegevens op afstand.

Radar is een remote sensing techniek die gebruik maakt van radargolven.

Ruimtelijke resolutie geeft de nauwkeurigheid waarmee een meting geplaatst kan worden in een gebied. Deze is afhankelijk van de pixelgrootte van de meting.

S

Subfactoren (zie factoren)

Staphoogte (zie opstap)

Spectrale resolutie bepaald de juistheid waarmee verschillende objecten van elkaar onderscheiden kunnen worden.

Schuifsterkte is de hoeveelheid horizontale weerstand de bodem kan leveren.

Supervised de computer deelt elke pixel in per vooraf gedefinieerde klassen. Deze klassen worden vooraf ingevoerd vanuit een soort bibliotheek met vegetatiesoorten.

T

Terreinbegaanbaarheid is de mate van begaanbaarheid van een terrein. Deze is afhankelijk van de bodembegaanbaarheid, geometrie, vegetatie en hindernissen.

U

Unsupervised is een classificatie methode waarbij een computer willekeurige clusters bepaald. Op basis gaat hij alle pixels indelen in clusters. Vervolgens bekijkt hij de gemiddelde waarde per cluster en definieert die als klasse.

W

Waadvermogen is een eigenschap van een voertuig met betrekken tot het rijden door water. Wanneer een voertuig een waadvermogen heeft van 1 meter, kan het door een waterpartij met een diepte van 1 meter rijden.

WES Waterways Experiment Station (US Army Corps of Engineers, Vicksburg)



Bijlage A - USCS

In deze bijlage wordt het USCS besproken en dient ter ondersteuning van paragraaf 2.1.1.

Een van de meeste gebruikte coderingen is het Unified Soil Classification System (USCS). De basis voor deze methode werd gelegd door A. Casagrande voor de U.S. Army ten behoeve van het aanleggen van vliegvelden tijdens de Tweede Wereldoorlog. Dit systeem kent vijftien verschillende klassen welke zijn gebaseerd op de volgende kenmerken (Gitz, 1976):

- Korrelgrootte;
- Korrelgrootteverdeling;
- Graad van plasticiteit;
- Gehalte aan organisch materiaal.

De USCS klassen:

- GW: Grind met alle korrel groottes evenredig aanwezig;
- GP: Grind met ontbrekende korrelgroottes;
- SW: Zand met alle korrelgroottes evenredig aanwezig;
- SP: Zand met ontbrekende korrelgroottes;
- SM: Zand-/siltmengsel;
- GM: Grind-/siltmengsel;
- ML: Silt met lage plasticiteit;
- MH: Silt met hoge plasticiteit;
- SC: Zand-/kleimengsel;
- GC: Grind-/kleimengsel;
- CL: Klei met lage plasticiteit;
- CH: Klei met hoge plasticiteit;
- OL: Klei, gemengd met organisch materiaal en lage plasticiteit;
- OH: Klei, gemengd met organisch materiaal en hoge plasticiteit;
- Pt: Veen.

Volgens een vaste methode is men in staat de grondsamenstelling te bepalen.

Naast deze methode bestaat er nog een andere methode die veel wordt gebruikt. Hierbij maakt men gebruik van het bodemgetal, deze wordt ook wel de Cone Index (CI) genoemd. De CI kan worden bepaald met behulp van een penetrometer of penetrologger. Hiermee wordt de schuifweerstand van de bodem bepaald. De weerstand in kN/cm^2 correspondeert met een bijpassende CI die in bijbehorende tabel gevonden kan worden. Op basis van de CI kan de grondsoort worden bepaald.

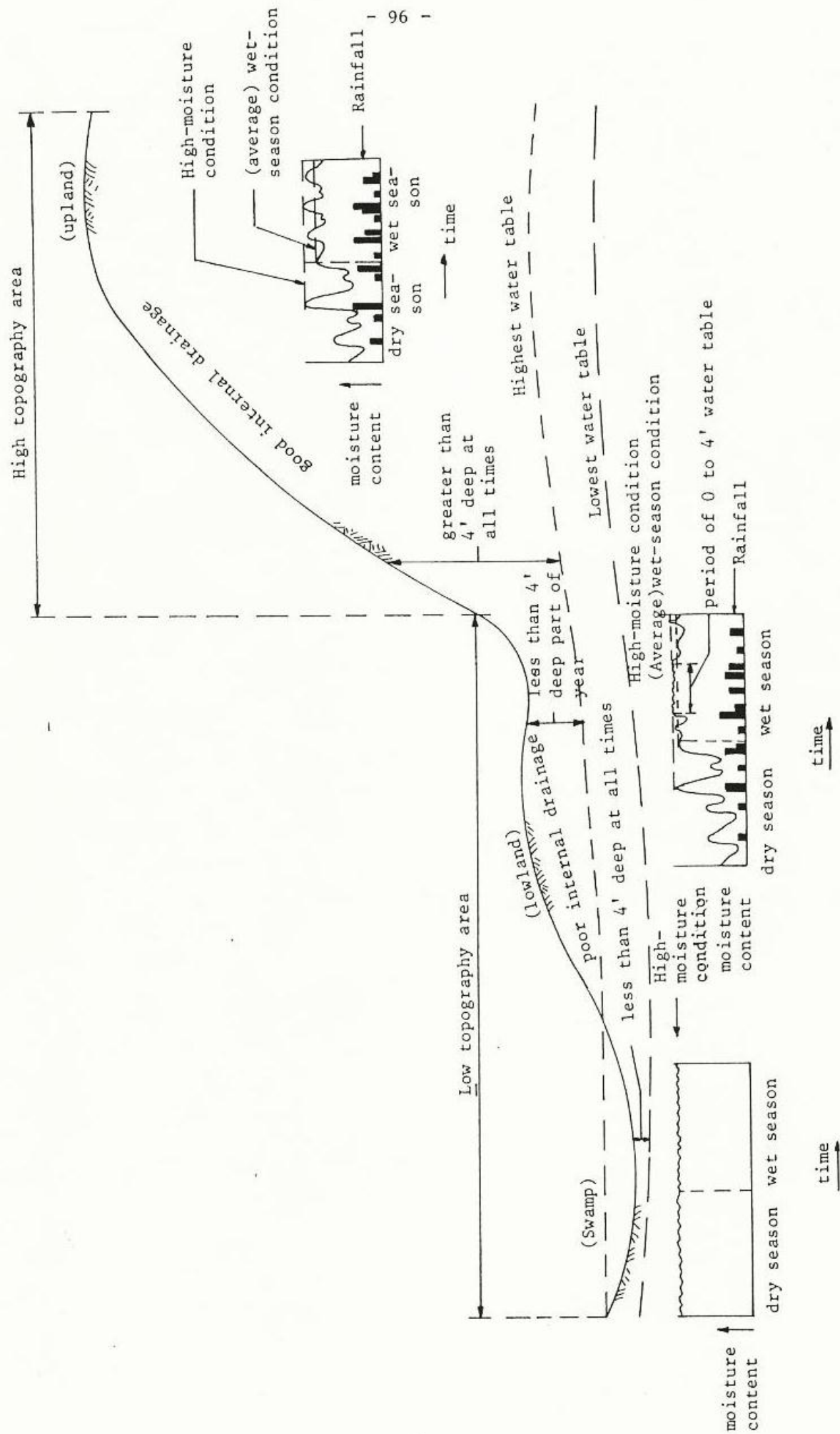
Naast de samenstelling van de grond is ook de hoeveelheid vocht bepaald voor de begaanbaarheid hiervan. Het USCS systeem onderscheidt hierin drie categorieën:

- High topography, wet season condition;
- Low topography, wet season condition;
- Low topography, high moisture condition.



De uitleg hiervan wordt weergegeven in de illustratie op de volgende pagina.





Bijlage B - MI/VCI

Onderstaande berekeningen tonen hoe het US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station de bodembegaanbaarheid van voertuigen bepaald (Wong, Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering, 2010). Eerst wordt voor het specifieke voertuig de Mobiliteits Index (MI) berekend. Vervolgens wordt deze volgens een empirisch vastgestelde formule omgeschreven naar een Vehicle Cone Index (VCI). In combinatie met de Cone Index (CI) kan hier mee een indicatie van bodembegaanbaarheid voor het specifieke voertuig op het bepaalde terrein worden gegeven. Voor het bereken van de MI wordt onderscheid gemaakt tussen wiel- en rupsvoertuigen.

Rupsvoertuigen

Mobiliteits index

$$= \left(\frac{\text{contact druk factor} \times \text{gewicht factor}}{\text{rupsband factor} \times \text{grouser}^{16} \text{ factor}} + \text{bogie factor}^{17} - \text{clearance factor} \right) \times \text{Motor factor} \times \text{transmissie factor}$$

$$\text{Contact druk factor} = \frac{\text{bruto gewicht (lb)}}{\text{contactoppervlakte met grond (in}^2\text{)}}$$

Gewicht factor:

- Minder dan 50.000 lb. (222,4 kN) = 1,0
- 50.000-69.999 lb. (222,4 – 311,4 kN) = 1,2
- 70.000 – 99.999 lb. (311,4 – 444,8 kN) = 1,4
- 100.000 lb. (444,8 kN) of zwaarder = 1,8

$$\text{Rupsband factor} = \frac{\text{rupsbandbreedte (in)}}{100}$$

Grouserfactor:

- Grouzers kleiner dan 3.8 cm in hoogte = 1,0;
- Grouzers groter dan 3.8 cm in hoogte = 1,1.

$$\text{Bogie factor} = \frac{\text{bruto gewicht in (lb)}}{(\text{totaal aantal bogies op rups in contact met de grond}) \times (\text{oppervlakte per rupsschoen (in}^2\text{)}) \times 10}$$

Motor factor:

- Meer dan 10 pk/ton aan voertuiggewicht = 1
- Minder dan 10 pk/ton voertuiggewicht = 1,05

Transmissie factor:

- Automaat = 1,0

¹⁶ Grouzers zijn kammen op de rupsband.

¹⁷ Bogies zijn de 'wielen' in een rupsband.

- Handgeschakeld = 1,05

Wielvoertuigen

Mobiliteits index

$$= \left(\frac{\text{contact druk factor} \times \text{gewicht factor}}{\text{tire factor} \times \text{grouser}^{18} \text{ factor}} + \text{wiel laad factor} - \text{clearance factor} \right) \times \text{Motor factor} \times \text{transmissie factor}$$

$$\text{Contact druk factor} = \frac{\text{bruto gewicht (lb)}}{\text{Bandbreedte (in)} \times \text{bandomtrek (in)} \times \text{aantal banden}}$$

Gewichtsfactor:

Gewichtsklassen	Gewichtsfactor vergelijking
< 2000 (8,9 kN)	$\bar{Y} = 0,553\bar{X}$
2000 – 13.500 (8,9 -60kN)	$\bar{Y} = 0,033\bar{X} + 1,050$
13.501 – 20.000 (60-88,9 kN)	$\bar{Y} = 0,142\bar{X} - 0,420$
> 20.000 (88,9 kN)	$\bar{Y} = 0,278\bar{X} - 3,115$
	$\bar{X} = \frac{(\text{bruto gewicht (kips)})}{\text{aantal assen}}$

$$\text{Bandfactor} = \frac{(10 + \text{bandbreedte(in)})}{100}$$

Grouserfactor:

- Met kettingen = 1,05;
- Zonder kettingen = 1,0.

$$\text{Wiel laad factor} = \frac{\text{bruto gewicht (kips)}}{\text{aantal assen} \times 2}$$

$$\text{clearance factor} = \frac{\text{bodenvrijheid(in)}}{10}$$

Motor factor:

- Meer dan 10 pk/ton aan voertuiggewicht = 1
- Minder dan 10 pk/ton voertuiggewicht = 1,05

Transmissie factor:

- Automaat = 1,0

¹⁸ Grouzers betreffen hier eventuele kettingen op de wielen.

- Handgeschakeld = 1,05

Voertuiggetal (VCI)

Zoals eerder vermeld kan de sterkte van de grond worden geclassificeerd met een Cone Index (CI). Deze CI kan worden gebruikt om een te bepalen welke voertuigen over het bijbehorende stuk terrein kunnen rijden. Hiervoor dient van elk betreffende voertuig de Vehicle Cone Index bekend te zijn. Per voertuig worden er twee VCI waarden bepaald, te weten VCI (1) en VCI (50). De VCI (50) waarde geeft een index voor het passeren van vijftig voertuigen over één spoor. Een terrein is geschikt voor het bereiden wanneer de CI hoger is dan de VCI voor het betreffende voertuig.

De VCI kan worden afgeleid van de MI:

Rupsvoertuigen:

$$VCI_1 = 7,0 + 0,2MI - \frac{39,2}{MI + 5,6}$$

$$VCI_{50} = 19,27 + 0,43MI - \frac{125,79}{MI + 7,08}$$

Wielvoertuigen:

$$VCI_1 = 11,48 + 0,2MI - \frac{39,2}{MI + 3,74}$$

$$VCI_{50} = 28,23 + 0,43MI - \frac{92,67}{MI + 3,67}$$

Deze formules zijn gebaseerd op empirische waarnemingen van het US Army Engineer Waterways Experiment Station.

Bijlage C – Vergelijking MMP/NTVPM

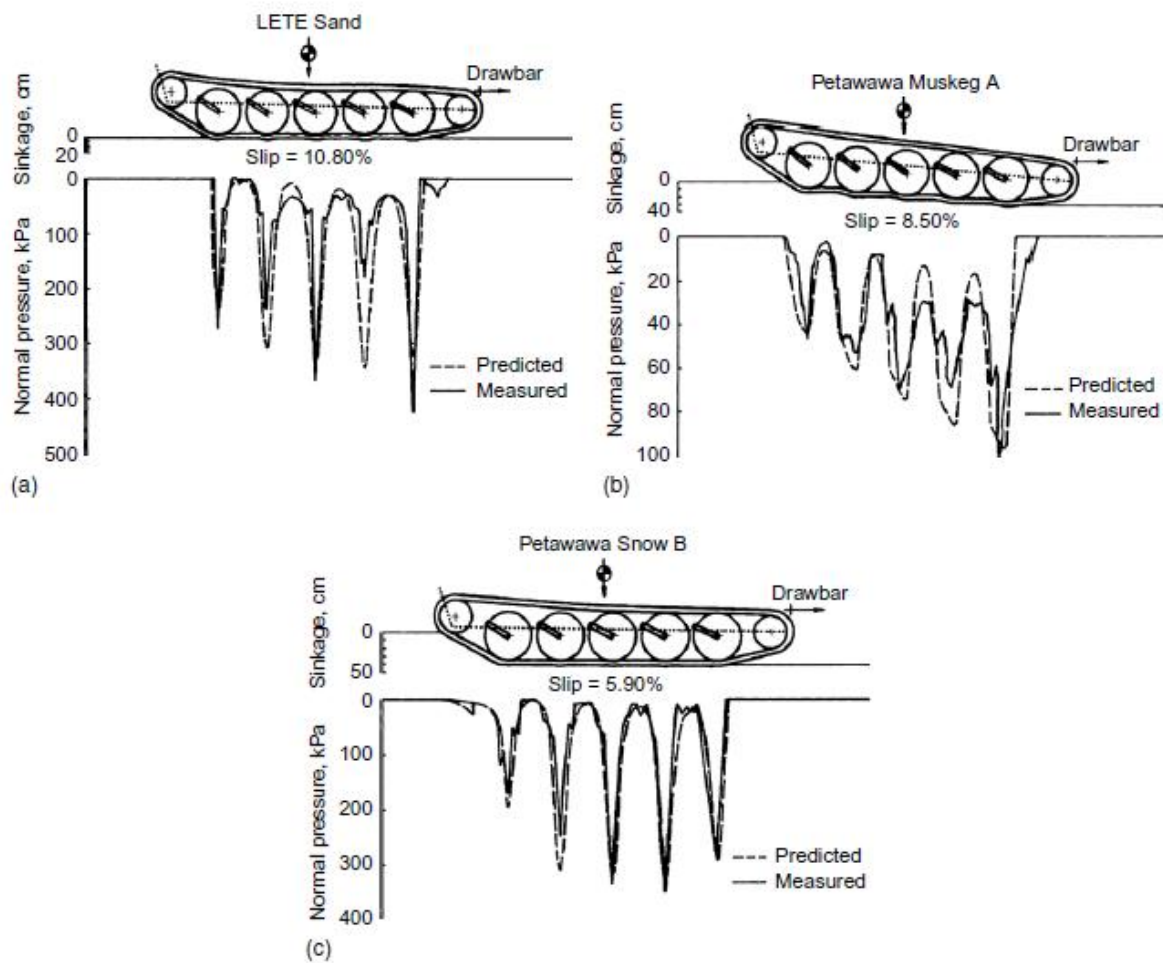


Figure 7.3: Measured and predicted normal pressure distributions by NTVPM under a tracked vehicle over (a) sandy terrain, (b) muskeg, and (c) snow-covered terrain

Bijlage D – Manoeuvre Analysis Flowchart

Op de volgende pagina (A3 formaat) staat het stroomschema van dit model.

