

Nederlandse Defensie Academie

UNIVERSITEIT TWENTE.



Een off-road routeberekeningsmodel in ArcGIS

Bachelor-eindopdracht van de studie Civiele Techniek aan de Nederlandse Defensie Academie in samenwerking met de Universiteit Twente.

Naam: R. Spruit
Studentnummer: 51249800

Donderdag 3 april 2014

Een off-road routeberekeningsmodel in ArcGIS

Bachelor-eindopdracht van de studie Civiele Techniek aan de Nederlandse Defensie Academie in samenwerking met de Universiteit Twente.

Auteur: Tweede Luitenant der Mariniers R. Spruit

Studentnummer: S1249800

Opdrachtgever: Defensie Inlichtingen en Veiligheids Instituut

Locatie: 't Harde

Begeleiders: Dhr. D. F. Boon (MSc, MA) (Defensie Inlichtingen en Veiligheids Instituut)
Dr. Ir. E. Dado (Universitair Hoofd Docent Civiele Techniek
Nederlandse Defensie Academie)

Voorwoord

Voor u ligt het eindresultaat van de bachelor eindopdracht welke is uitgevoerd in het kader van de opleiding Civiele Techniek aan de Nederlandse Defensie Academie. Deze studie wordt in samenwerking met de Universiteit Twente aangeboden aan de cadetten en adelborsten van de Nederlandse Defensie Academie.

In 2007 heb ik na het behalen van mijn HAVO-diploma de keuze gemaakt om te gaan solliciteren naar de functie van Officier der Mariniers. Op dat moment bleek ik te jong te zijn om aan de korte Officiers opleiding te beginnen en voor de lange opleiding was het VWO-diploma een vereiste. De keuze was snel gemaakt en in 2009 behaalde ik mijn VWO-diploma. Het jaar waarin ik ook de Praktische Officiers Selectie Test succesvol heb doorlopen en uiteindelijk mocht beginnen met de lange opleiding tot Officier der Mariniers in Den Helder. Na 6 maanden in Den Helder, met het zeewater nog vers achter de oren, was de volgende stap de Praktische Opleiding Tot Officier der Mariniers. Een opleiding waarin zowel fysiek als mentaal het uiterste van de cursisten wordt gevraagd, maar niets is onmogelijk voor hen die willen. Na een succesvolle afronding van deze opleiding mocht ik mij in 2011 melden bij de Koninklijke Militaire Academie te Breda alwaar ik zou gaan beginnen aan het laatste gedeelte van mijn Opleiding tot Officier der Mariniers, de bachelor studie Civiele Techniek. De studie begon met een aantal inleidende vakken in Breda waarna ik in 2012 in Enschede ben begonnen met de hoofdfase van de opleiding. Nu, 2 jaar later, heb ik mijn eindopdracht afgerond en is het einde van mijn opleidingstraject in zicht.

Dankzij mijn studiekeuze voor Civiele Techniek heb ik vroeg in mijn loopbaan kennis mogen maken met het regiment Genietroepen van de Koninklijke Landmacht. Een regiment dat een belangrijke rol en tevens unieke functie vervult binnen de Nederlandse krijgsmacht. Een kennismaking die mij in mijn toekomstige werkzaamheden zeker nog van pas zal gaan komen.

Een voorwoord is geen goed voorwoord zonder dankbetuigingen. Daarom wil ik Dhr. Boon en Dr. Ir. Dado bedanken. Zij hebben mij tijdens de bachelor eindopdracht ondersteund om tot dit eindresultaat te komen. Wanneer ik tegen problemen aanliep stonden beiden klaar om deze in samenwerking met mij op te lossen. Tevens heeft Dhr. Boon mij tijdens het uitvoeren van de eindopdracht geïntroduceerd in de wereld van de Geografische Informatie Systemen en de remote sensing en hij heeft dit op zodanige manier weten te doen dat er gedacht wordt aan een vervolgopleiding in deze richting. Ook wil ik de Majoor Smeets en de Ritmeester Peters bedanken, want tijdens de dagelijkse werkzaamheden waren beiden altijd bereid mij te assisteren bij het gebruik van ArcGIS of vragen te beantwoorden.

Dan wil ik ook nog de Adjudant Slingerland, die mij in contact heeft bracht met Dhr. Visker, en Dhr Visker zelf bedanken. Want dankzij het werk dat Dhr. Visker heeft verricht bij het opzetten van een mobility database heb ik mijn onderzoek kunnen afronden. Waarvoor mijn dank.

Als laatste gaat mijn dank uit naar mijn familie, vriendin, vrienden en collega's waarmee ik over het onderwerp heb kunnen praten en discussiëren vanuit een eigen invalshoek.

Ik wil mijn voorwoord afsluiten met de volgende woorden:

De Titel...

Marinier

Een titel die je niet kunt erven...

Voor geen prijs te koop...

Niet te huur en niet te vinden...

En zeker niet te leen...

Deze is alleen maar te verdienen...

En dan ook nog door jou alleen...

Je zult hem dan ook altijd houden...

De Titel...

Marinier

Tweede Luitenant der Mariniers Romario Spruit
Lopik, april 2014

Samenvatting

Deze eindopdracht is uitgevoerd bij het Defensie Inlichtingen en Veiligheids Instituut (DIVI). Dit instituut is onder andere verantwoordelijk voor opleidingen op het gebied van Geografische Informatie Systemen (GIS). In het kader van deze opleidingen is de vraag ontstaan of het mogelijk is een off-road route berekeningsmodel creëren in ArcGIS (het door Defensie gebruikte GIS) waarbij rekening wordt gehouden met de terreinbegaanbaarheid van het gebruikte voertuig. Dit heeft geleid tot de volgende doelstelling:

Het ontwikkelen van een algemeen toepasbaar model in ArcGIS waarmee een routeberekening kan worden uitgevoerd waarbij rekening wordt gehouden met de terreinbegaanbaarheid van het voertuig.

Als afbakening is er in overleg met de DIVI gekozen om het model te creëren voor een enkele passage van een specifiek voertuigtype en voor een vooraf aangewezen terrein.

Om deze doelstelling te behalen is met behulp van een literatuuronderzoek bepaald welke factoren van invloed zijn op de terreinbegaanbaarheid van een voertuig en wat de mogelijkheden zijn van ArcGIS bij het creëren van een routeberekeningsmodel. Op basis van het literatuuronderzoek is een stappenplan gecreëerd dat universeel kan worden toegepast bij het creëren van routeberekeningsmodellen in ArcGIS.

Tijdens de literatuurstudie is ook naar de bruikbaarheid van andere (conceptuele) routeberekeningsmodellen gekeken. Zo zijn er elementen gebruikt uit het model van Suviven (Suvinen, 2005) en van het model van het Franse Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) en de Direction Générale de l'Armement (DGA) (Hohmann Et al., 2013) bij het creëren van het routeberekeningsmodel.

Uiteindelijk is het off-road routeberekeningsmodel opgebouwd met toevoeging van een aantal filters. Bij het opbouwen van het model is naar voren gekomen dat het routeberekeningsmodel in de toekomst betrouwbaarder kan worden gemaakt wanneer meer onderzoek wordt verricht naar het nauwkeurig bepalen van de draagkracht van de bodem met behulp van remote sensing.

Het model is vervolgens gevalideerd in het oefengebied. Uit deze validatie is gebleken dat zelfs met de relatief kleine ruimtelijke resolutie van de gebruikte geografische informatie er sprake is van niet onderkende vertragende micro topografische terreinkenmerken. Een onderzoek naar het onderkennen van deze micro topografische terreinkenmerken zal een verbetering kunnen zijn voor de off-road routeberekeningsmodellen van de toekomst.

Inhoudsopgave

1.	INLEIDING	3
1.1	AANLEIDING EN PROBLEEMANALYSE	3
1.2	DOELSTELLING	5
1.3	RELEVANTIE VOOR DEFENSIE EN DE WETENSCHAP	6
1.4	ONDERZOEKSMODEL	7
1.5	VRAAGSTELLING	8
1.6	AFBAKENING VAN HET ONDERZOEK	9
1.7	LEESWIJZER	11
2.	LITERATUURONDERZOEK	12
2.1	PARAMETERS DIE VAN INVLOED ZIJN OP TERREINBEGAANBAARHEID	12
2.2	GIS - ALGEMEEN	17
2.3	GIS - FUNCTIES VOOR ROUTEBEREKENINGEN	19
2.4	CONCLUSIES EN DISCUSSIE	23
3.	BESTAANDE (GIS)MODELLEN EN HUN GESCHIKTHEID VOOR GEBRUIK	24
3.1	SPATIAL ANALYSIS MODEL FOR GENERATING COMPOSITE COST SURFACES TO DEPICT CROSS COUNTRY MOBILITY IN NATURAL TERRAIN (GROGAN, 2009)	24
3.2	A GIS-BASED VEHICLE MOBILITY ESTIMATOR FOR OPERATIONAL CONTEXTS (HOHMANN ET AL., 2013)	28
3.3	A GIS-BASED SIMULATION MODEL FOR TERRAIN TRACTABILITY (SUVINEN, 2005)	30
3.4	CONCLUSIE EN DISCUSSIE	32
4.	UITWERKING VAN HET ROUTEBEREKENINGSMODEL IN ARCGIS	33
4.1	INFORMATIE INPUT EN GEOPROCESSING	33
4.2	COST RASTER, COST DISTANCE RASTER EN COST PATH ANALYSIS	42
4.3	CONCLUSIE EN DISCUSSIE	43
5.	VALIDATIE	44
5.1	ROUTE 1	44
5.2	ROUTE 2	46
5.3	ROUTE 3	49
5.4	CONCLUSIE EN DISCUSSIE	51
6.	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	52
6.1	CONCLUSIES	52
6.2	AANBEVELINGEN	54

BIBLIOGRAFIE	55
BIJLAGE I: TOELICHTING VOERTUIGKARAKTERISTIEKEN EN BANDKARAKTERISTIEKEN	56
BIJLAGE II: BESCHRIJVING USCS (UNIFIED SOILS CLASSIFICATION SYSTEM) EN TABELLEN VAN INSTRUCTIEKAART 5-131.....	58
BIJLAGE III: SAMENVATTINGEN	59
BIJLAGE IV: GEBRUIKTE (GEOGRAFISCHE) INFORMATIE	61

1. Inleiding

1.1 Aanleiding en probleemanalyse

Computers zijn de laatste decennia steeds verder geïntegreerd in de samenleving. De rekenkracht van deze computers is de laatste jaren ook nog eens sterk verbeterd, waardoor computers steeds complexere berekeningen kunnen uitvoeren en daarmee steeds complexere problemen kunnen oplossen.

Binnen de krijgsmacht zijn deze ontwikkelingen niet onopgemerkt gebleven. Computers worden in uiteenlopende situaties toegepast. Ook tijdens uitzendingen is er voor computers een steeds belangrijkere rol weggelegd.

Echter voor het bepalen van verplaatsingen in het uitzendgebied wordt nog veel door de commandant op basis van de tot hem beschikbare (veelal analoge) informatie ter plekke een inschatting gemaakt. Eén van de aspecten waarmee de commandant bij het bepalen van verplaatsingen rekening dient te houden is de begaanbaarheid van het terrein. De begaanbaarheid van het terrein draagt voor een groot deel bij aan de “Freedom of Movement” die de commandant tot zijn beschikking heeft.

In het cursusboek terreinevaluatie van de Instructiegroep Genie Inlichtingen & Verkenningen wordt voor de begaanbaarheid van het terrein de term terreinbegaanbaarheid gebruikt. In het cursusboek wordt terreinbegaanbaarheid als volgt omschreven:

Terreinbegaanbaarheid is het vermogen om verplaatsingen uit te voeren door het terrein, buiten de altijd begaanbare paden en wegen om.

(Instructiegroep Genie Inlichtingen & Verkenningen, 2013)

De begaanbaarheid van onverhard terrein voor voertuigen is van een aantal parameters afhankelijk: het voertuigtype, de ervaring van de chauffeur, het klimaat en of het weer en een aantal terreineigenschappen (Instructiegroep Genie Inlichtingen & Verkenningen, 2013). Om aan de hand van deze parameters een goede inschatting te maken van de terreinbegaanbaarheid is het belangrijk dat de beschikbare geografische informatie actueel is. Dit maakt het inschatten van terreinbegaanbaarheid niet alleen een plaatsafhankelijk, maar ook een tijdsafhankelijk probleem. Dit type problemen wordt ook wel “spatio-temporale” problemen genoemd. Voor dit type problemen kunnen Geografische Informatie Systemen (GIS) een uitkomst bieden (ITC, 2000).

Binnen Defensie wordt gebruik gemaakt van het GIS-softwarepakket ArcGIS. Dit softwarepakket wordt momenteel vooral op het operationele niveau en het militair-strategisch niveau toegepast.

Voorbeelden van toepassingen op het operationele en het militair-strategische niveau zijn het analyseren en presenteren van inlichtingen en het uitvoeren van terreinanalyses (ESRI Nederland, 2013) (US Army Corps of Engineers, 2014). Echter op het tactisch niveau wordt er weinig gebruik gemaakt van de mogelijkheden die moderne GIS-softwarepakketten te bieden hebben.

Een mogelijke toepassing van GIS op het tactische niveau, is een routeberekeningsmodel op basis van terreinbegaanbaarheidsparameters. Een dergelijk model zou de commandant in het veld kunnen assisteren wanneer deze als gevolg van een verwoeste brug of vijandelijk roadblock van zijn vooraf geplande route moet afwijken en in zeer beperkte tijd een nieuwe route moet bepalen zonder hierbij voor “verassingen” komen te staan.

Derhalve richt dit onderzoek zich op de mogelijkheden van ArcGIS ter ondersteuning van de commandant bij de bepaling van verplaatsingen in het terrein ten tijden van uitzendingen waarbij rekening wordt gehouden met terreinbegaanbaarheid van het specifieke voertuig. De resultaten van dit onderzoek zullen mogelijk worden opgenomen in de geo-analisten cursus van het Defensie Inlichtingen en Veiligheids Instituut (DIVI) en leiden tot nieuwe inzichten over de mogelijkheden die een GIS op het tactische niveau te bieden heeft.

Er is voor dit onderzoek de keuze gemaakt om een routeberekeningsmodel te ontwikkelen waarbij rekening wordt gehouden met de terreinbegaanbaarheid van één type voertuig. De voertuigkeuze is uit praktische overwegingen gevallen op de Mercedes Benz 290GD 5kN omdat dit type voertuig op vrijwel iedere defensielocatie aanwezig is en geschikt is om door onverhard terrein te rijden. De verwachting is dat het ontwikkelde model zodanig generiek is dat het ook kan worden toegepast op andere voertuigtypes, eventueel middels een kleine modificatie.

1.2 Doelstelling

Op basis van de probleemanalyse is de volgende doelstelling geformuleerd:

Het ontwikkelen van een algemeen toepasbaar model in ArcGIS waarmee een routeberekening kan worden uitgevoerd waarbij rekening wordt gehouden met de terreinbegaanbaarheid van het voertuig door een specifiek model te ontwikkelen om een routeberekening uit te voeren voor een “Mercedes Benz 290GD 5 kN” (MB290GD 5kN) (zie Figuur 1) door onverhard terrein en gebruik te maken van beschikbare geografische informatie.



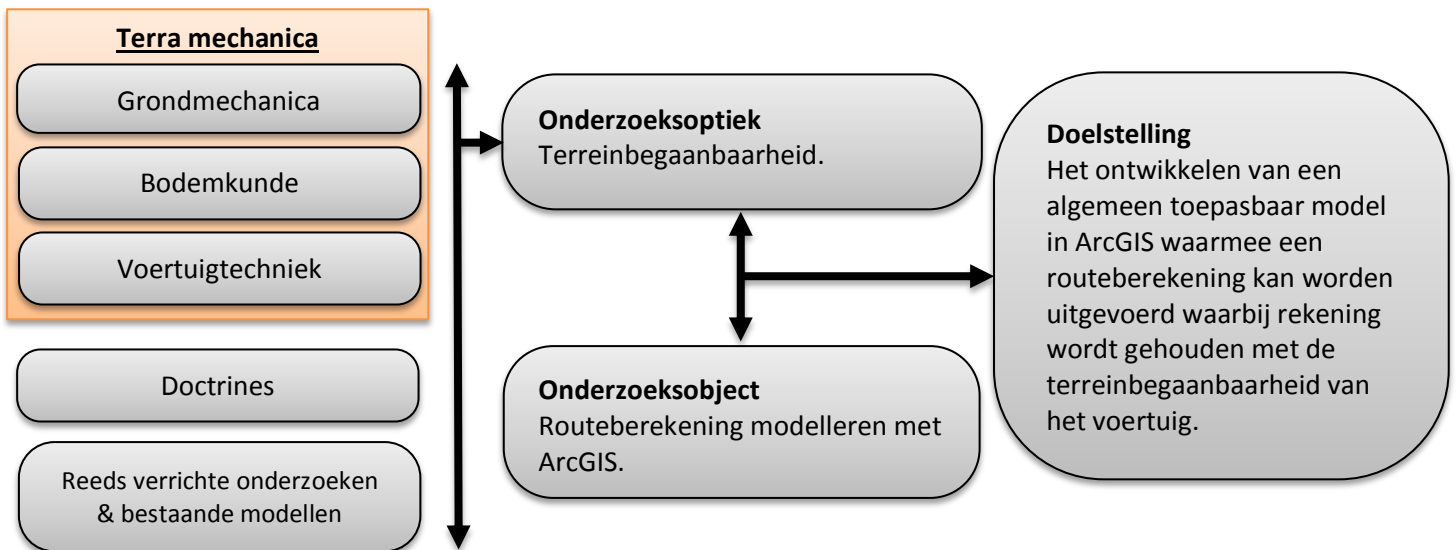
Figuur 1: Een MB 290 GD 5 kN hard-top.

1.3 Relevantie voor Defensie en de wetenschap

Bij iedere commandant bestaat de wens om tijdens uitzending over “volledige informatie” te beschikken. Deze wens blijkt steeds meer realiteit te worden door de technologische ontwikkelingen op het gebied van informatieverzameling, waaronder “remote sensing” en “Unmanned Aerial Vehicles (UAV’s)”. Echter, een commandant heeft tijdens een missie geen tijd om al deze informatie zorgvuldig te analyseren. In dit onderzoek wordt een model ontwikkeld in ArcGIS dat met behulp van geografische informatie een routeberekening kan uitvoeren op basis van terreinbegaanbaarheid van het gebruikte voertuig. Het ultieme doel is dat het model in een Command & Control systeem (bijvoorbeeld het momenteel door Defensie gebruikte Battle Management System) in het voertuig van de commandant wordt geïmplementeerd waardoor de commandant met één druk op de knop inzicht heeft in de terreinbegaanbaarheid. Een andere mogelijkheid is dat de commandant op afroep bij een Geo Spatial Analyst (GSA) een routeberekening kan aanvragen.

Naast de specifieke toepassing van het te ontwikkelen model in dit onderzoek, zal dit onderzoek ook een bijdrage leveren aan de vraag in hoeverre GIS ondersteuning kan bieden voor operationele activiteiten tijdens uitzendingen in het algemeen en inzicht verschaffen in de bruikbaarheid van de beschikbare geografische informatie voor de genoemde activiteiten. Deze inzichten zijn niet alleen van belang voor de Defensie organisatie maar kunnen ook bruikbaar zijn voor andere organisaties die met vergelijkbare operationele vraagstukken te maken hebben zoals bijvoorbeeld mijnbouworganisaties of bosbouworganisaties.

In deze paragraaf zal aan de hand van het onderzoeksmodel, dat in Figuur 2 staat weergegeven, het verloop van het onderzoek worden beschreven. Tevens vormt het onderzoeksmodel de basis voor de vraagstelling.



Met behulp van literatuur op het gebied van de grondmechanica, bodemkunde, voertuigtechniek, en het vakgebied dat deze kennisgebieden combineert - de terra mechanica - en defensiedoctrines zal er een theoretisch raamwerk worden gevormd over de terreinbegaanbaarheid van het voertuig. Daarnaast zal er gekeken worden naar de toepasbaarheid en theoretische achtergronden van bestaande modellen. Wanneer het theoretisch raamwerk is gevormd en duidelijk is welke parameters een rol spelen bij het voorspellen van de terreinbegaanbaarheid, wordt er gekeken naar welke informatie er nodig zal zijn om de terreinbegaanbaarheid te voorspellen. Op basis van het theoretisch raamwerk wordt een programmastructuur opgesteld dat als basis dient voor het ontwikkelen van een model in ArcGIS.

Het model zal uiteindelijk worden gebruikt om een routeberekening uit te voeren waarbij rekening wordt gehouden met de terreinbegaanbaarheid van het voertuig.

1.5 Vraagstelling

Op basis van de centrale doelstelling en het onderzoeksmodel zijn de volgende onderzoeksvragen geformuleerd:

- 1. Hoe wordt volgens de literatuur terreinbegaanbaarheid bepaald?**
 - a. Wat zijn de parameters waarmee de terreinbegaanbaarheid kan worden bepaald?
 - b. Wat zijn de mogelijkheden van ArcGIS om routeberekeningen te maken en welke parameters zijn hier van belang?
 - c. Wat zijn de mogelijkheden van ArcGIS om terreinbegaanbaarheidsparameters vast te leggen?
- 2. Zijn bestaande modellen (conceptueel of in GIS) geschikt om gebruikt te worden?**
 - a. Waar zijn deze modellen op gebaseerd?
 - b. Hoe zijn deze modellen opgebouwd en onderbouwd?
- 3. Op welke manier kan er een routeberekening op basis van terreinbegaanbaarheid worden gemodelleerd in ArcGIS?**
 - a. Hoe is het model opgebouwd?
 - b. Welke theoretische onderbouwing is er voor het model gebruikt?

1.6 Afbakening van het onderzoek

In overleg met het DIVI zijn er drie keuzes gemaakt om het onderzoek af te bakenen. In deze paragraaf zullen deze keuzes besproken worden en wat de gevolgen voor het onderzoek en/of model zijn.

- **Het model beperkt zich tot een enkele passage van één voertuig, de MB 290GD;**

Deze keuze is gemaakt om de aandacht niet te veel naar de verschillende voertuigen en bijbehorende factoren te laten gaan. De gevolgen van deze keuze is dat het routeberekeningsmodel enkel van toepassing zal zijn op wielvoertuigen en geen rekening houdt met de verandering van het terrein bij meerdere passages.

- **het model is specifiek gemaakt voor een vooraf aangewezen gebied;**

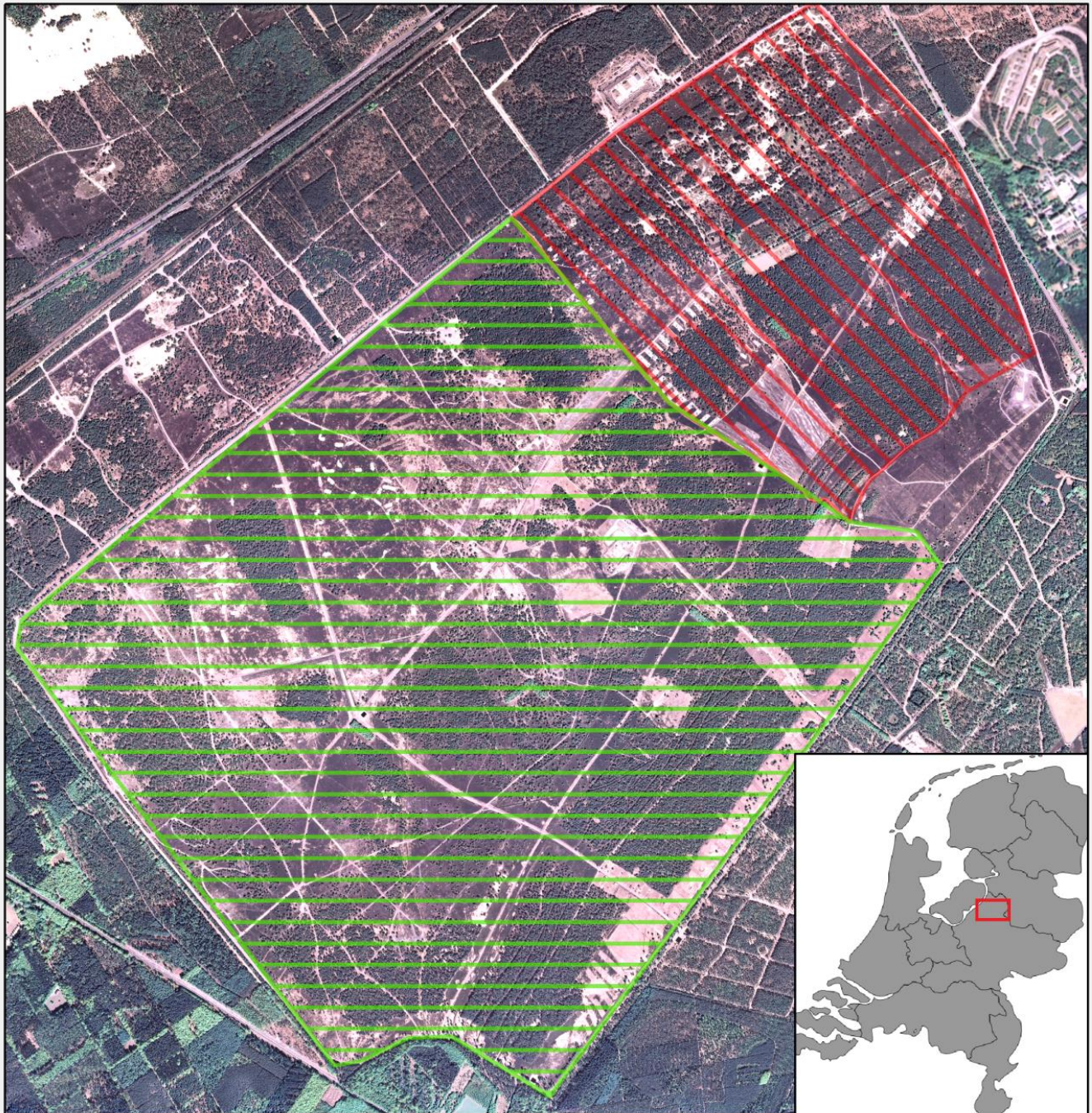
Voor het model is een gebied gekozen waarover de DIVI voldoende geografische informatie beschikt en waarvan de mogelijkheid bestaat om het model te valideren. Het aangewezen gebied staat in Figuur 3 op pagina 10 weergegeven.

- **er wordt geen gebruik gemaakt van geografische informatie in de vorm van kaartmateriaal omtrent de onverharde paden in het aangewezen gebied.**

Door deze keuze zal voornamelijk gebruik worden gemaakt van geografische informatie die is verkregen met behulp van remote sensing en zo zal het model ook toepasbaar zijn in gebieden waarvan geen kaartmateriaal bestaat.

Oefengebied

1:25.000



Coordinate System: RD New
Projection: Double Stereographic
Datum: Amersfoort
False Easting: 155.000,0000
False Northing: 463.000,0000
Central Meridian: 5,3876
Scale Factor: 0,9999
Latitude Of Origin: 52,1562
Units: Meter

Legenda

-  Toegankelijk
-  Niet toegankelijk

0 250 500 1.000 1.500 2.000 Meters



Figuur 3: Het vooraf aangewezen gebied. De Doornspijksche heide in 't Harde.

1.7 Leeswijzer

Dit rapport bestaat uit 6 hoofdstukken. In hoofdstuk 2 komen de resultaten van het uitgevoerde literatuuronderzoek ter sprake. Achtereenvolgens komen de parameters van terreinbegaanbaarheid, een beschrijving van GIS in het algemeen, de wijze waarop parameters in ArcGIS worden vastgelegd en de route-functies in ArcGIS aan bod.

In hoofdstuk 3 wordt een apart deel van het literatuuronderzoek behandeld. Hierin worden namelijk bestaande modellen geanalyseerd en hun bruikbaarheid voor het onderhavige onderzoek bepaald.

In hoofdstuk 4 wordt de opzet van het in dit onderzoek ontwikkelde routeberekeningsmodel uitgelegd. Achtereenvolgens komen de wijze waarop beschikbare geografische informatie wordt getransformeerd naar bruikbare informatie voor route-berekening in ArcGIS en de wijze waarop in ArcGIS de routeberekening is geïmplementeerd, aan bod.

Ter validatie van het ontwikkelde routeberekeningsmodel worden er een drietal routes uitgezet en gereden met een MB 290GD. De resultaten hiervan zijn in hoofdstuk 5 beschreven.

De rapportage wordt afgesloten met hoofdstuk 6 waarin de belangrijkste conclusies en aanbevelingen staan beschreven.

2. Literatuuronderzoek

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste resultaten van het literatuuronderzoek dat heeft plaatsgevonden in het kader van het onderzoek. Het hoofdstuk is opgebouwd uit vier paragrafen. De eerste paragraaf behandelt de parameters die invloed hebben op de terreinbegaanbaarheid. De tweede paragraaf geeft een korte uitleg over het gebruik van een GIS in het algemeen en de derde paragraaf beschrijft hoe de parameters die invloed hebben op de terreinbegaanbaarheid in ArcGIS kunnen worden vastgelegd. In de vierde en laatste paragraaf worden de conclusies van de bevindingen uit het literatuuronderzoek beschreven.

2. Parameters die van invloed zijn op terreinbegaanbaarheid

Volgens het cursusboek Genie Inlichtingen & Verkenningen (Instructiegroep Genie Inlichtingen & Verkenningen, 2013) is de terreinbegaanbaarheid van een voertuig afhankelijk van een viertal factoren. Deze factoren zijn: voertuig, chauffeur, weer en terrein. In deze paragraaf zullen deze factoren achtereenvolgens worden beschreven.

1. Voertuig

Ieder voertuig heeft karakteristieken dat het in meer of mindere mate terreinvaardig maakt. In Tabel 1 staan de voertuigkarakteristieken weergegeven van de MB 290 GD 5kn. Een meer gedetailleerdere beschrijving van de voertuigkarakteristieken is opgenomen in bijlage I.

Tabel 1: Voertuigkarakteristieken van de MB 290 GD 5kn.

Voertuigkarakteristiek	MB 290 GD 5kn	Eenheid
Voertuig massa	3100	[kg]
Wielbasis	2,4	[m]
Breedte voertuig	1,8	[m]
Motorvermogen	90	[pk]
Maximaal hellingspercentage	65	[%]
Maximale overhelling	25	[%]
Bodemvrijheid	0.20	[m]

Naast de in Tabel 1 benoemde voertuigkarakteristieken spelen bij wielvoertuigen de bandkarakteristieken een grote rol bij de terreinbegaanbaarheid. Zo wordt het gewicht van een wielvoertuig via het bandoppervlakte over het terrein verdeeld en ook de voortstuwing van het wielvoertuig wordt via de banden overgedragen. Het bandoppervlakte is afhankelijk van de in Tabel 2 benoemde bandkarakteristieken.

De bandkarakteristieken in Tabel 2 zijn afkomstig van de mobility database van het ministerie van Defensie (Visker & van Opstal, 2011). Een gedetailleerdere beschrijving van deze bandkarakteristieken is eveneens opgenomen in bijlage I.

Tabel 2: Bandkarakteristieken van het band-type: C 225/75R16 LM90 (TEX).

Bandkarakteristiek	Band-type: C 225/75R16 LM90 (TEX)	Eenheid
Breedte onbelast	0,232	[m]
Diameter onbelast	0,744	[m]
Sectiehoogte	0,169	[m]
Invering bij wegspanning	0,034	[m]
Invering bij terreinspanning	0,044	[m]
Bandfactor bij wegspanning	0,046	[-]
Bandfactor bij terreinspanning	0,059	[-]
Volume band	50	[dm ³]

2. Chauffeur

De chauffeur speelt een belangrijke rol in de terreinbegaanbaarheid van een voertuig. Zo zijn er een aantal (sub)factoren die de chauffeur kunnen beïnvloeden met als gevolg een positieve of negatieve invloed op de terreinbegaanbaarheid van het voertuig. Deze (sub)factoren zijn:

- Opleiding van de chauffeur;
- mentale gesteldheid van de chauffeur (bijvoorbeeld vermoeidheid of durf);
- fysieke gesteldheid van de chauffeur (bijvoorbeeld blessures).

Hoewel de chauffeur een belangrijke rol speelt in de terreinbegaanbaarheid van een voertuig is dit een parameter die lastig in een model is op te nemen. Het is namelijk moeilijk te kwantificeren wat de invloed van bijvoorbeeld een vermoeide chauffeur op de terreinbegaanbaarheid van het voertuig is.

De chauffeur als parameter is in dit onderzoek dan ook niet meegenomen in het routeberekeningsmodel maar heeft wel degelijk een niet te onderschatten rol in de terreinbegaanbaarheid van een voertuig.

3. Weer

Het weer beïnvloedt op verschillende manieren het terrein. Zo heeft neerslag in vloeibare vorm invloed op de verzadigingsgraad van de bodem en daarmee ook de bodembegaanbaarheid. Tevens is het mogelijk dat er door de neerslag plassen ontstaan aan het bodemoppervlakte (zie Figuur 4).

Zowel de verzadigingsgraad van de bodem als de plasvorming zorgt voor een verandering van de rolweerstand van het voertuig en een verandering van de draagkracht van de bodem.

Neerslag in vaste vorm (sneeuw en hagel) zorgt voor een gladdere bovenlaag maar kan ook belangrijke aspecten van het terrein, zoals reliëf en bodemtype, onzichtbaar maken (zie Figuur 4). Bij grote hoeveelheden sneeuw wordt de draagkracht van de sneeuw bepalend in plaats van de draagkracht van de bodem (Saarilahti, 2002).

Naast neerslag speelt ook de temperatuur een rol bij de terreinbegaanbaarheid. Wanneer het voor een langere periode gevrozen heeft zullen verzadigde gronden bevroren raken en daarmee beter begaanbaar zijn voor voertuigen.



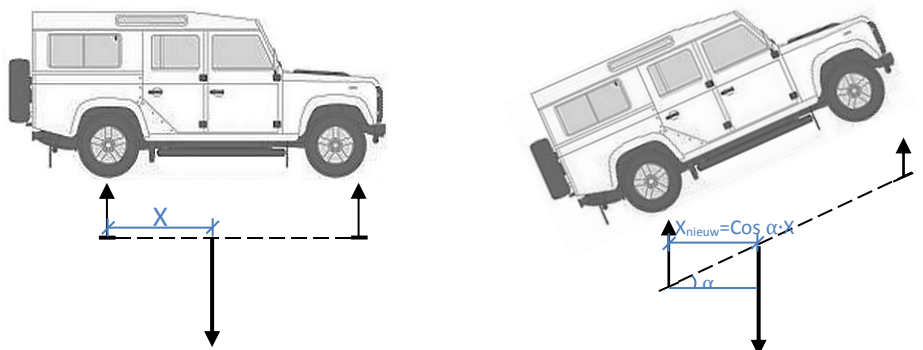
Figuur 4: Links: plasvorming in het terrein, Rechts: terrein bedekt met sneeuw.

4. Terrein

De factor terrein bestaat uit de sub factoren reliëf bodem, verzadiging/grondwaterstand, vegetatie, hydrologie en hindernissen (Instructiegroep Genie Inlichtingen & Verkenningen, 2013). Deze zullen achtereenvolgens besproken worden.

Reliëf

Hellingen hebben op twee manieren invloed op de terreinbegaanbaarheid van een voertuig. De hellingen hebben een negatieve invloed op de rijsnelheid doordat het voertuig een extra weerstand ondervindt als gevolg van het overwinnen van de hoogteverschillen. Daarnaast zorgt de helling bij een wielvoertuig voor een extra asbelasting met vastlopen als mogelijk gevolg (zie Figuur 5).



Figuur 5: Invloed van de helling op de asbelasting van een wielvoertuig. Bij het rechter voertuig is te zien dat de arm tussen de achterste as en het zwaartepunt kleiner wordt bij een helling.

Bodem

De bodem is waar het voertuig via de banden contact maakt met de ondergrond. De belangrijkste bodemeigenschappen die van invloed zijn op de terreinbegaanbaarheid:

- Bodemtextuur, de relatieve verhouding van bodemdeeltjes met een verschillende afmeting;
- bodemstructuur, de ordening van de bodemdeeltjes;
- bodemvocht, vocht dat zich tussen de bodemdeeltjes bevindt.

De NAVO heeft voor bodemclassificatie het Unified Soils Classification System (USCS) ontwikkeld. De benamingen van de bodemtypen van het USCS zijn opgenomen in bijlage II.

Met behulp van een bodemclassificatie aan de hand van het USCS, hoogteligging en de grondwaterstand van het terrein kan in de Instructiekaart 5-131 (IK 5-131) de draagkracht van de bodem worden opgezocht. De tabellen van de IK 5-131 zijn opgenomen in bijlage II.

Verzadiging / grondwaterstand

De mate van verzadiging van de bodem heeft invloed op de draagkracht, slipgevoeligheid, kleefvermogen, mate van spoorvorming en stofvorming (Instructiegroep Genie Inlichtingen & Verkeningen, 2013).

Vegetatie

Op verschillende manieren heeft vegetatie invloed op de terreinbegaanbaarheid. Zo kan bijvoorbeeld gras op een klei- of veengrond fungeren als dragende bovenlaag (Instructiegroep Genie Inlichtingen & Verkeningen, 2013).

Helaas kan er niet rechtstreeks op basis van alleen een bodemclassificatie (bijvoorbeeld veen) en de bepaling van aanwezige vegetatie (bijvoorbeeld gras) bepaald worden wat de bijbehorende draagkracht is. Verschillende andere factoren waaronder de bodemstructuur (verdicht of onverdicht) en de verdeling van de vegetatie over de bodem (van Eekeren & Deru, 2013) spelen hierbij een rol.

Hydrologie

Onder hydrologie wordt verstaan alle waterlopen die door het terrein lopen. Afhankelijk van de voertuigkarakteristieken zijn deze waterlopen begaanbaar of onbegaanbaar voor het voertuig. Hiervoor spelen het waadvermogen en of het amfibisch vermogen van het voertuig een rol.

Hindernissen

Volgens het cursusboek Genie Inlichtingen & Verkenningen wordt er onder hindernissen verstaan:

Elke terreingesteldheid, terreinvoorwerp of constructie, hetzij van natuurlijke aard, hetzij kunstmatig aangebracht, uitgebreid of gewijzigd, waardoor troepenbewegingen kunnen worden gestopt, belemmerd vertraagd of van richting veranderd, en waarbij al dan niet personele en/of materiële verliezen worden toegebracht. (Instructiegroep Genie Inlichtingen & Verkenningen, 2013)

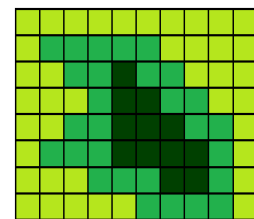
2.2 GIS - Algemeen

GIS staat voor Geografische Informatie Systeem. Deze systemen worden gebruikt voor het opslaan, managen, bewerken, analyseren en presenteren van geografische informatie. Van geografische informatie is sprake wanneer de informatie gerelateerd kan worden aan een locatie op het aardoppervlakte. Deze informatie kan zeer verschillende doelen dienen hebben. Zo kan het om natuurwetenschappelijke informatie gaan (bijvoorbeeld neerslag per vierkante meter of verdamping per vierkante meter) maar ook sociaal demografische informatie (bijvoorbeeld bevolkingsgroepen of religie).

Binnen een GIS kan geografische informatie worden opgeslagen in de vorm van:

- **Rasterinformatie**

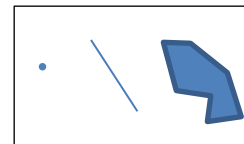
Bij rasterinformatie wordt de informatie per cel opgeslagen. Iedere cel heeft hierin een eigen waarde. De nauwkeurigheid van deze informatie is afhankelijk van de ruimtelijke resolutie (celgrootte) (ESRI, 2006). In Figuur 6 staat hoe rasterdata in een GIS wordt weergegeven.



Figuur 6: Rasterinformatie waarin iedere cel een eigen waarde en locatie heeft.

- **Vectorinformatie**

Bij vectorinformatie wordt de informatie opgeslagen in de vorm van punten, lijnen en polygonen. De nauwkeurigheid bij vectorinformatie is afhankelijk van de precisie van de coördinaten (ESRI, 2006). In Figuur 7 staat hoe vectorinformatie in een GIS wordt weergegeven.



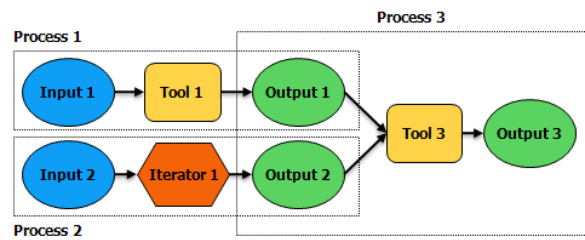
Figuur 7: Vormen van vectorinformatie. V.l.n.r. punt, lijn en polygoon.

In het onderhavige onderzoek is gebruik gemaakt van ArcGIS 10.2.1. Deze GIS-software wordt momenteel Defensie breed gebruikt. Het analyseren en de wat meer geavanceerde bewerkingen van geografische informatie gaat in ArcGIS met behulp van verschillende (reken)modules, de zogeheten tools. Afhankelijk van de gekozen rekenmodule wordt bepaald of er respectievelijk raster- dan wel vectorinformatie benodigd is als input.

ArcGIS biedt de mogelijkheid om de rekenfunctionaliteit van verschillende modules te combineren in één model om in feite zo een nieuwe specifieke rekenmodule te maken. Het combineren van rekenfunctionaliteiten wordt binnen ArcGIS gedaan met behulp van de module ModelBuilder. De module ModelBuilder voorziet in een relatief gemakkelijk te gebruiken interface waarmee de verschillende rekenfunctionaliteiten en de rekenoutput kunnen worden gebruikt om een geautomatiseerde bewerking/analyse te laten verrichten. Groot voordeel van de ModelBuilder is dat

de programmastructuur tijdens het creëren van een model direct zichtbaar is. De gebruiker hoeft geen kennis te hebben van een programmeertaal om een model te 'bouwen'. Wel dient de gebruiker kennis te hebben van de rekenmodules in ArcGIS.

In Figuur 8 is een voorbeeld te zien van een model dat met behulp van de ModelBuilder is vervaardigd. De blauwe ellipsen geven een input weer. De gele blokken representeren een analyse of bewerking met behulp van een rekenmodule (tool), en de oranje zeshoek geeft een bijzonder



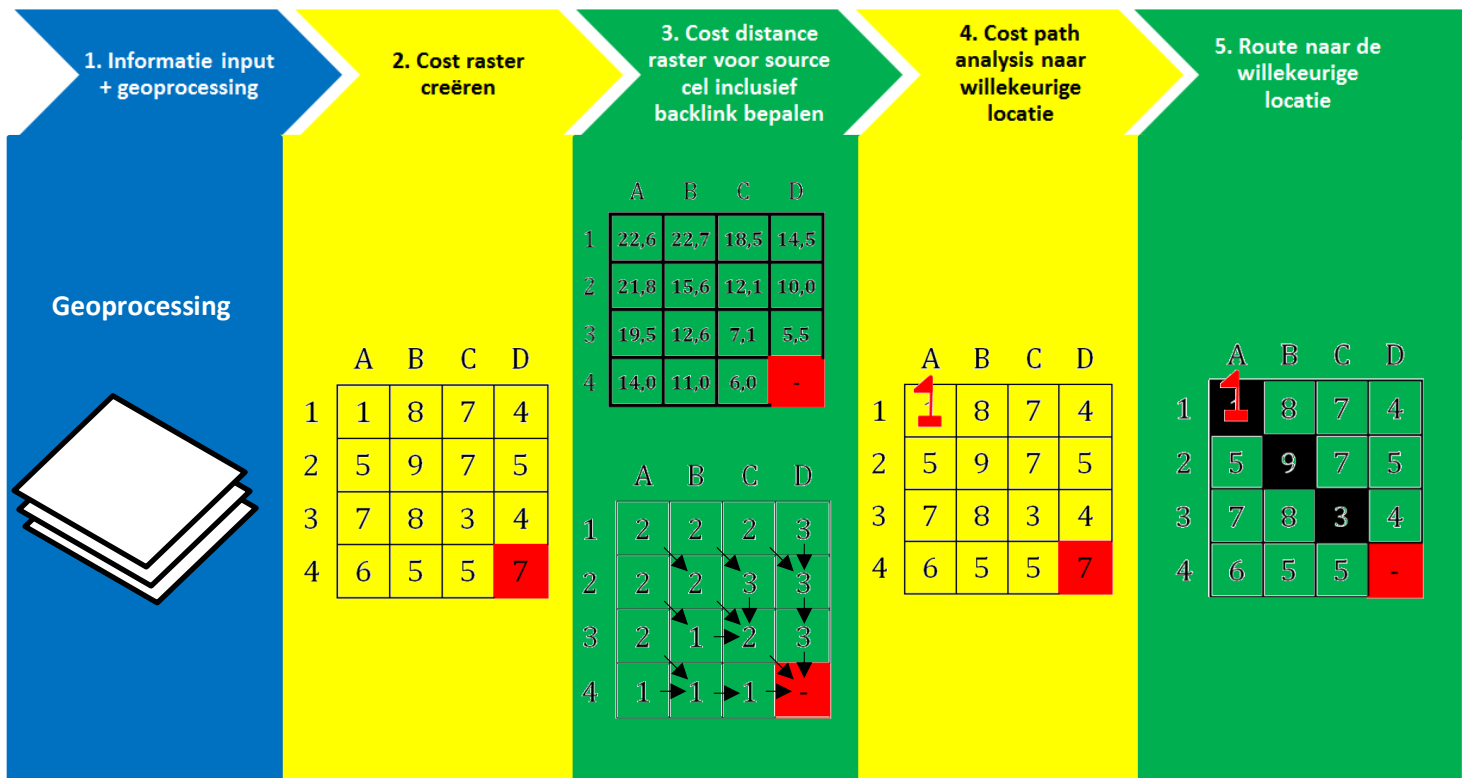
Figuur 8: Voorbeeld van een model (ESRI, 2012).

type functionaliteit weer namelijk de iterator. De iterator kan bijvoorbeeld worden gebruikt voor het implementeren van een for- of while loop in het model. De groene ellipsen representeren de output van een rekenmodule of een iterator.

Naast de module ModelBuilder bevat ArcGIS ook de zogenaamde ArcPY sidepackage waarmee de rekenmodules met behulp van de programmeertaal Python kunnen worden aangeroepen. Dit biedt de gebruiker de mogelijkheid om de geografische informatie en rekenmodules van ArcGIS te combineren met andere informatiebronnen en softwarepakketten.

2.3 GIS - Functies voor routeberekeningen

Voor het uitvoeren van een routeberekening in ArcGIS is de cost path analysis module beschikbaar. In Figuur 9 staat schematisch weergegeven welke stappen er doorlopen moeten worden voor het uitvoeren van een cost path analysis/routeberekening in ArcGIS.



Figuur 9: Een stappenplan hoe een routeberekening in ArcGIS kan worden uitgevoerd. Voor het rekenen/bewerken van geografische informatie in ArcGIS wordt de term geoprocessing gebruikt (ESRI, 2006).

1. Informatie input + geoprocessing

Voordat een cost path analysis kan worden uitgevoerd dient er een selectie gemaakt te worden van de geografische informatie die als basis dient voor het bepalen van de factoren die worden meegenomen in de routeberekening. Wanneer deze informatie in ArcGIS is vastgelegd en opgeslagen dienen de relaties tussen de verschillende factoren worden bepaald en worden verrekend naar één enkele waarde (per rastercel) waardoor er in feite een zogenaamd cost raster ontstaat. Het cost raster vormt de basis voor de routeberekening.

2. Cost raster creëren

De output van de vorige stap is een cost raster waarin iedere cel een waarde heeft gekregen die is gebaseerd op de door de gebruiker toegekende relaties van de informatie. In Figuur 10 staat een

	A	B	C	D
1	1	8	7	4
2	5	9	7	5
3	7	8	3	4
4	6	5	5	7

Figuur 10: Voorbeeld van een cost raster. De rode cel is de source cel.

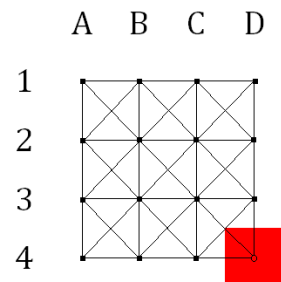
voorbeeld van een cost raster weergegeven. De rode cel is de source (bron) cel waarin zich de startlocatie van een routeberekening bevindt.

3. Cost distance raster voor source cel inclusief backlink bepalen

Het cost raster zal vervolgens naar een cost distance raster en een backlink raster worden omgerekend.

Dit omrekenen gaat in ArcGIS met behulp van de cost distance module. Deze module tool heeft als input een cost raster nodig en een aangewezen source cel om tot een cost distance raster en een backlink raster te komen.

Voor het cost distance raster wordt voor iedere cel de afstand tussen de node (middenpunt) van de cel en de broncel bepaald. In Figuur 11 staan de nodes en de mogelijkheden van reizen tussen de nodes weergegeven voor een vier bij vier raster.



Figuur 11: De nodes met daartussen alle mogelijkheden van reizen.

Voor het reizen tussen de nodes worden de volgende algoritmen gebruikt:

Horizontale en verticale verplaatsingen:

$$\frac{\text{Kosten cel 1} + \text{kosten cel 2}}{2} = \text{cost distance cel 1} \rightarrow \text{cel 2}$$

Voor de diagonale verplaatsing:

$$\frac{\text{Kosten cel 1} + \text{kosten cel 2}}{2} \cdot \sqrt{2} = \text{cost distance cel 1} \rightarrow \text{cel 2}$$

De cost distance waarde om van cel D4 (source cel) naar cel C4 te gaan wordt als volgt bepaald (zie Figuur 10):

$$\frac{7}{2} + \frac{5}{2} = 6$$

Om van cel D4 naar cel D3 te gaan wordt:

$$\frac{7}{2} + \frac{4}{2} = 5,5$$

De cost distance van D4 naar C3 wordt:

$$\frac{7}{2}\sqrt{2} + \frac{3}{2}\sqrt{2} = 5\sqrt{2} \approx 7,071$$

Wanneer er voor een cel een afstand langer dan één cel moet worden “gereisd” dan wordt de cost distance waarde van deze cel de laagste som van de route van de source cel naar de betreffende cel.

Voor $D4 \rightarrow C2$ zijn er de volgende routes mogelijk:

$$D4 \rightarrow D3 \rightarrow D2 \rightarrow C2 = \frac{7}{2} + \frac{4}{2} + \frac{4}{2} + \frac{5}{2} + \frac{5}{2} + \frac{7}{2} = \frac{32}{2} = 16,0$$

$$D4 \rightarrow D3 \rightarrow C2 = \frac{7}{2} + \frac{4}{2} + \left(\frac{4}{2}\sqrt{2} + \frac{7}{2}\sqrt{2} \right) = \frac{11}{2} + \frac{11}{2}\sqrt{2} \approx 13,3$$

$$D4 \rightarrow C3 \rightarrow C2 = \frac{7}{2}\sqrt{2} + \frac{3}{2}\sqrt{2} + \frac{3}{2} + \frac{7}{2} = \frac{10}{2}\sqrt{2} + \frac{10}{2} \approx 12,1$$

$$D4 \rightarrow C4 \rightarrow C3 \rightarrow C2 = \frac{7}{2} + \frac{5}{2} + \frac{5}{2} + \frac{3}{2} + \frac{3}{2} + \frac{7}{2} = \frac{30}{2} = 15,0$$

De cost distance waarde van de cel C2 wordt dan 12,1.

In Figuur 12 staat het cost distance raster van het voorbeeld in Figuur 10 weergegeven. Voor iedere cel in het cost distance raster is nu ook een route bepaald waarmee vanaf de source cel is gereisd. Deze “reisgegevens” worden opgeslagen in het backlink raster. In het backlink raster heeft iedere cel een waarde gekregen van één tot en met acht afhankelijk van de richting (zie Figuur 13) waarmee vanaf de source cel naar de desbetreffende cel is gereisd. In Figuur 14 is het backlink raster van het cost distance raster uit Figuur 12 weergegeven.

	A	B	C	D
1	22,6	22,7	18,5	14,5
2	21,8	15,6	12,1	10,0
3	19,5	12,6	7,1	5,5
4	14,0	11,0	6,0	-

Figuur 12: Cost distance raster behorende bij het in Figuur 10 weergegeven voorbeeld waardenraster.

6	7	8
5	0	1
4	3	2

Figuur 13: Waarden in een backlink raster. De source cel krijgt de waarde 0 en alle overige cellen krijgen een waarde afhankelijk van de richting waarlangs moet worden “gereisd” naar de source cel. Zo krijgt vanuit de cel naar rechts reizen een 1.

	A	B	C	D
1	2	2	2	3
2	2	2	3	3
3	2	1	2	3
4	1	1	1	-

Figuur 14: Backlink raster behorende bij het cost distance raster dat in Figuur 12 staat weergegeven.

4. Cost path analysis naar willekeurig locatie

Voor de cost path analysis dient er een locatie te worden gekozen waar naar toe gereisd moet worden. Vervolgens wordt met behulp van het cost distance raster en het backlink raster de route bepaald vanaf de gekozen locatie richting de source cel inclusief de kosten en de daadwerkelijke afstand tussen beide punten.

5. De route naar de willekeurige locatie

De route naar de willekeurige locatie wordt naar een nieuw raster weggeschreven met daarin de informatie behorende tot de bepaalde route. De resolutie van dit raster is gelijk aan de resolutie van het cost distance raster. Een voorbeeld hiervan staat in Figuur 15.

	A	B	C	D
1	1	8	7	4
2	5	9	7	5
3	7	8	3	4
4	6	5	5	-

Figuur 15: Cost raster met daarop de bepaalde route aangegeven in het zwart.

2.4 Conclusies en discussie

Uit het literatuuronderzoek is naar voren gekomen dat er een viertal factoren een belangrijke rol spelen bij de terreinbegaanbaarheid van een voertuig, namelijk:

- De voertuigkarakteristieken;
- de chauffeur;
- het weer;
- het terrein.

Vanwege het feit dat de invloed van de chauffeur op de terreinbegaanbaarheid moeilijk te kwantificeren is, is de keuze gemaakt om deze factor niet op te nemen in het model. Er zal worden geprobeerd om de overige factoren en bijbehorende sub factoren en de invloed op de terreinbegaanbaarheid van het voertuig op te nemen in het routeberekeningsmodel.

In ArcGIS bestaat de mogelijkheid om een routeberekening uit te voeren met behulp van een zogeheten cost path analysis. Om deze cost path analysis uit te voeren dient allereerst een cost raster opgebouwd te worden waarin de terreinbegaanbaarheid van het voertuig wordt gekwantificeerd op basis van de factoren die van invloed zijn op de terreinbegaanbaarheid.

3. Bestaande (GIS)modellen en hun geschiktheid voor gebruik

De volgende drie modellen worden in dit hoofdstuk besproken: a spatial analysis model for generating composite cost surfaces to depict cross country mobility in natural terrain, a GIS-based vehicle mobility estimator for operational contexts en a GIS-based simulation model for terrain tractability.

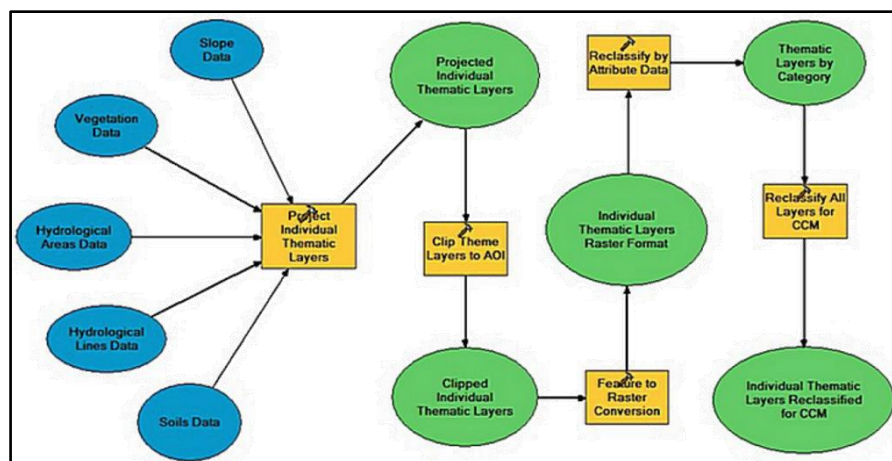
Alle drie modellen maken gebruik van de cost path analysis module van ArcGIS om de routeberekening uit te voeren. De verschillen tussen de drie modellen zijn te vinden in de manier waarop het cost raster wordt berekend.

In het onderstaande wordt per paragraaf uiteengezet wat de belangrijkste onderdelen van het model zijn en hoe zij worden toegepast. In bijlage III zijn de samenvattingen opgenomen behorende bij de artikelen van de modellen. In de laatste paragraaf zal worden beschreven wat op basis van de hier besproken modellen geconcludeerd kan worden.

3.1 Spatial analysis model for generating composite cost surfaces to depict cross country mobility in natural terrain (Grogan, 2009)

In dit onderzoek is een model gecreëerd in GIS met behulp van de Field Manual 5-33 (FM 5-33) Terrain Analysis van de Amerikaanse Landmacht. De cost map die het model creëert is een Cross Country Mobility (CCM) kaart. Deze CCM kaart is een raster waarin iedere cel een CCM cost waarde toegewezen heeft gekregen, welke gebaseerd is op de FM 5-33. Zo krijgen de terreinparameters die een negatieve invloed hebben op de terreinbegaanbaarheid een hogere waarde. Op die manier blijft er een cost raster over dat kan worden gebruikt voor een cost path analysis.

Het model bestaat uit twee delen. In het eerste deel worden de CCM cost waarden bepaald voor de verschillende parameters en in het tweede deel worden deze CCM cost waarden gesommeerd.



Figuur 16: Het eerste gedeelte van het model van Grogan (Grogan, 2009).

In Figuur 16 is het eerste deel van het model weergegeven. Het model begint met het herprojecteren van de geografische informatie die wordt gebruikt voor het classificeren van het terrein naar één projectie systeem. Vervolgens wordt de Area Of Interest (AOI) uit deze informatie geknipt middels de Clip tool. In het laatste deel van het eerste gedeelte van het model worden alle individuele lagen van het model

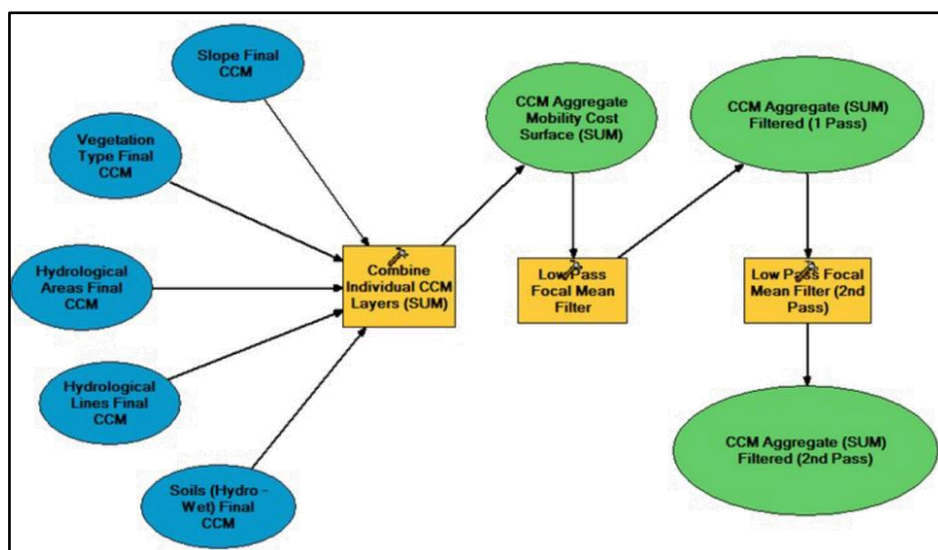
Percent Slope	Speed Ratio Difference	Speed (mph)	% of Highest Speed	CCM Cost
0-3 %	1.00	34.50	100.00%	10
3-6%	1.06	32.65	94.64%	11
6-10 %	1.12	30.80	89.28%	12
10-15%	1.19	27.40	83.92%	13
15-20%	1.44	24.00	69.57%	14
20-25%	1.63	20.00	61.26%	16
25-30%	2.16	16.00	46.38%	22
31%	2.16	15.33	44.45%	23
32%	2.25	14.67	42.52%	24
33%	2.35	14.00	40.59%	25
34%	2.46	13.34	38.66%	26
35%	2.59	12.67	36.72%	27
36%	2.88	12.00	34.79%	29
37%	3.04	11.33	32.85%	30
38%	3.24	10.67	30.92%	32
39%	3.45	10.00	28.98%	35
40%	3.70	9.33	27.04%	37
41%	3.99	8.66	25.11%	40
42%	4.31	8.00	23.18%	43
43%	4.71	7.33	21.25%	47
44%	5.18	6.67	19.32%	52
45%	5.75	6.00	17.39%	57
>45%	No Go	0	0.00%	5000

geclassificeerd naar de bijbehorende hinderniswaarde (CCM cost). Een

Figuur 17: Voorbeeld van de verdeling van de hinderniswaarde voor het hellingspercentage (Grogan, 2009).

voorbeeld voor de classificatie van de hellingen staat in Figuur 17 weergegeven.

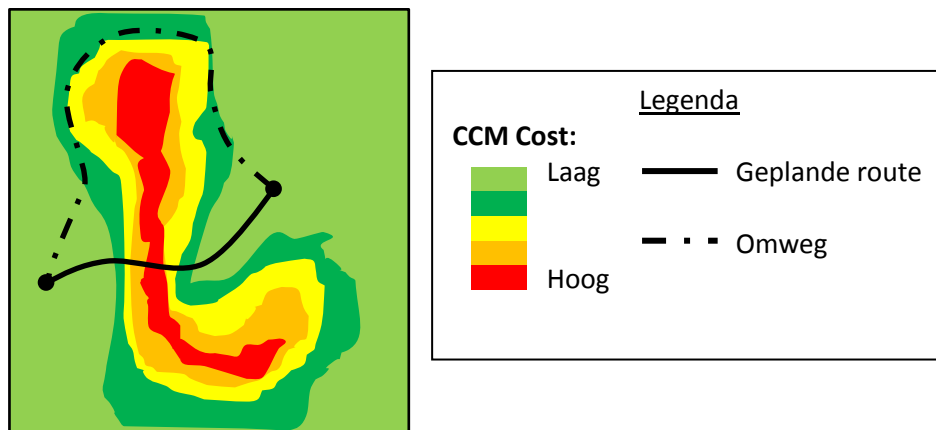
In Figuur 18 staat het tweede gedeelte van het model weergegeven. Hierin worden alle kaarten gecombineerd tot één CCM kaart. Waarna er met behulp van de low pass focal mean filter de extreme waarden uit de kaart worden gefilterd. Dit is gedaan om de invloed van de foutmarge van de geografische informatie op de terreinbegaanbaarheid te beperken.



Figuur 18: Het tweede gedeelte van het model van Grogan (Grogan, 2009).

Een voordeel van dit model is dat het eenvoudig te gebruiken is en gebaseerd is op een bestaande Amerikaanse doctrine (FM 5-31). Een ander voordeel is wanneer van een AOI er informatie input ontbreekt het model alsnog op basis van de overige informatie een CCM-kaart kan opbouwen, omdat er in het model geen onderlinge relatie is tussen de verschillende parameters en de bijbehorende CCM cost waarden.

Een nadeel van dit model is dat er rekening moet worden gehouden met de grootte van het gebied en de variatie in terreinkenmerken in relatie tot de resolutie van de CCM kaart. Er kan zich namelijk de situatie voor doen dat er in een gebied sprake is van een groot oppervlakte met een relatief hoge classificatie, het model zal dan een route aangeven die door een gebied loopt met een zeer hoge weerstand wat in feite als een “NO GO” (niet begaanbaar) is geclassificeerd, omdat een korte route over een hogere weerstand een lagere totale CCM waarde oplevert dan omrijden (zie Figuur 19 voor een voorbeeld). Wanneer de ruimtelijke resolutie toeneemt, zal er per cel, informatie verloren gaan.



Figuur 19: Voorbeeld van een cost raster waarbij de classificatie en de ruimtelijke resolutie een belangrijke rol spelen.

De informatie in de cel wordt dan gemiddeld met als gevolg een kleinere spreiding van de CCM waarden wat zal leiden tot, afhankelijk van de variatie in terreinkenmerken die worden meegenomen in het model, een toe- of afname van de totale CCM waarde. Afhankelijk van het gebied waar de routeberekening met dit model wordt uitgevoerd en de gekozen resolutie zal het model een voor- of afkeur hebben voor de omweg of de kortere route. Het is daarom van belang dat de gebruiker van dit model exact bekend is met de classificering die op de terreininformatie wordt uitgevoerd en wat de invloed van deze classificering op de route is.

Een mogelijke oplossing is het model te combineren met een voertuig specifiek filter. Met dit filter kunnen cellen die een hoge CCM waarde hebben en waarvan op basis van voertuigkarakteristieken en geografische informatie op voorhand kan worden gesteld dat deze cellen niet begaanbaar zijn een NoValue waarde krijgen toegewezen. Deze cellen worden dan niet meegenomen in de routeberekening.

Een ander nadeel van dit model is dat het lastig te valideren is hetgeen het moeilijk maakt om het model aan te passen aan andere terreintypes dan waarvoor het model is gecreëerd.

Tabel 3: Voor- en nadelen van het model van Grogan.

Voordelen	Nadelen
Een voor de gebruiker overzichtelijk en simpel model. Zo kan een gebruiker, met enige kennis van het model, achterhalen op basis van welke parameters een bepaalde route is gekozen.	Er is gebruik gemaakt van geografische informatie met een relatief grote ruimtelijke resolutie en daardoor is niet bekend hoe het model reageert bij geografische informatie met een kleinere resolutie.
Wanneer bepaalde informatie niet voor handen is kan het model alsnog gebruikt worden. De gevolgen hiervan op de resultaten dienen dan wel zorgvuldig in kaart te worden gebracht.	Het model houdt geen rekening met specifieke voertuigen maar maakt een algemene begaanbaarheidskaart. Het model is vanwege de kwalitatieve aard lastig te valideren.

3.2 A GIS-based Vehicle Mobility Estimator for Operational Contexts

(Hohmann Et al., 2013)

In Frankrijk is een onderzoek uitgevoerd waarin er is samengewerkt tussen het Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) en de Direction Générale de l'Armement (DGA, de Franse variant van de Defensie Materieel Organisatie). In Figuur 20 is de programmastructuur van het model weergegeven.

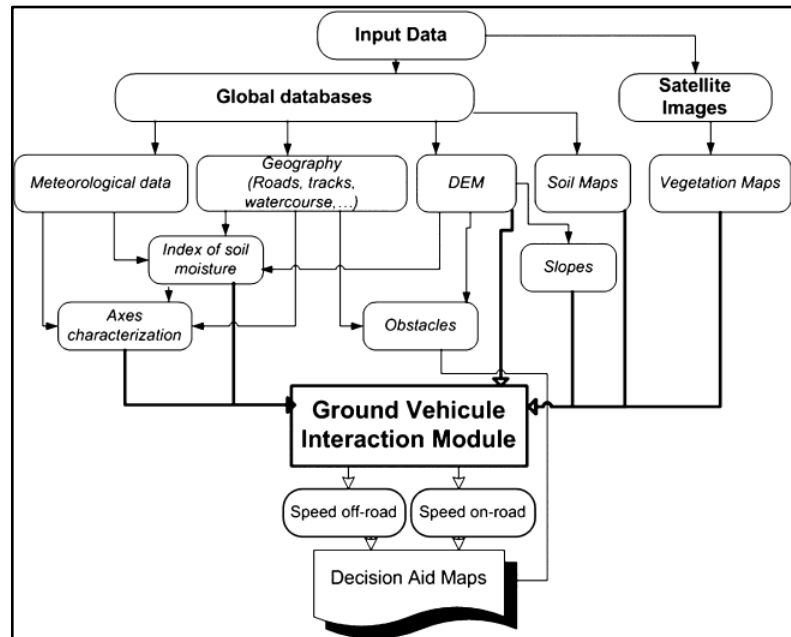
Er wordt verschillende "input data" gebruikt in het model.

Hierin is onderscheid gemaakt

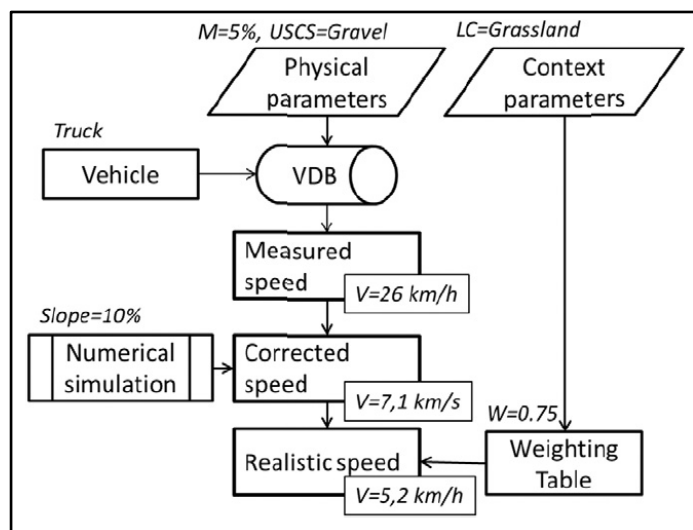
tussen informatie afkomstig van Global databases en Satellite images. Uit de global databases worden de meteorologische informatie, geografische informatie (wegen, paden, hydrologie etc.) de hoogte informatie (Digital Elevation Maps, DEM) en bodeminformatie (soil maps) verkregen.

Zoals te zien in Figuur 20 wordt al deze informatie direct of indirect gebruikt als input voor de Ground Vehicle Interaction Module (GVI). De programmastructuur van de GVI is in Figuur 21 weergegeven. De GVI werkt door middel van een uit een Vehicle Database (VDB) afkomstige gemeten snelheid (Measured Speed) bij een zeker USCS grondtype en vochtigheidsgraad om te rekenen (Numerical Simulation) naar een realistische snelheid (Corrected Speed). In Figuur 21 is er gebruik gemaakt

van een voorbeeld van een Truck die over grondtype USCS = Gravel met een verzadigingsgraad van $M = 5\%$ rijdt. In de VDB wordt een gemeten snelheid van 26 km/h gevonden. Vervolgens wordt deze



Figuur 20: Stroomdiagram van de Vehicle Mobility Estimator (VME) (Hohmann Et al., 2013).



Figuur 21: Stroomdiagram van de Ground Vehicle Interaction Module met een voorbeeld (Hohmann Et al., 2013).

snelheid door middel van een numerieke simulatie gecorrigeerd voor het bijbehorende hellingspercentage. De laatste correctie vindt plaats met behulp van een Weighting Table waarin een factor is te vinden om de snelheid te corrigeren voor de Land Component (type landgebruik). In het voorbeeld is de Land Component (LC) Grassland gebruikt. Volgens de gebruikte Weighting Table remt grasland de truck met ongeveer 25 % af.

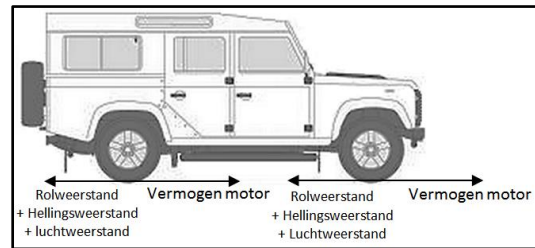
Nadeel van deze aanpak is dat er een allesomvattende VDB voor alle typen voertuigen moet worden opgezet, waarin voor alle voertuigtypen snelheden moeten worden gemeten bij alle USCS bodemtypen met verschillende verzadigingsgraden. Daarnaast is dit model gebruikt in een semi-aride en aride klimaatgebied waarin de ruimtelijke variatie van vegetatie en bodemsoorten klein is in verhouding tot andere klimaatgebieden met als gevolg dat hetzelfde model met dezelfde geografische informatie mogelijk niet bruikbaar is voor een ander klimaatgebied.

Tabel 4: Voor- en nadelen van het model dat door de BGRM en de DGA is ontwikkeld.

Voordelen	Nadelen
Een compleet routeberekeningsmodel dat ook verharde wegen meeneemt in de routeberekening.	Er wordt gebruik gemaakt van een vehicle database (VDB) voor het bepalen van snelheden. Dit kost Defensie veel tijd en geld om dit voor de Nederlandse krijgsmacht op te bouwen.
Bruikbaar voor verschillende voertuigtypen.	Er dient een externe programma te worden gedraaid om de numerieke simulatie van de helling uit te voeren.
Het model is gevalideerd in Frankrijk en Noord-Afrika.	Alle terreinkenmerken worden gegeneraliseerd in de uiteindelijke Decision Aid Map (DAM). Het is voor de gebruiker moeilijk inzicht te krijgen waarom een bepaald gebied niet begaanbaar is.

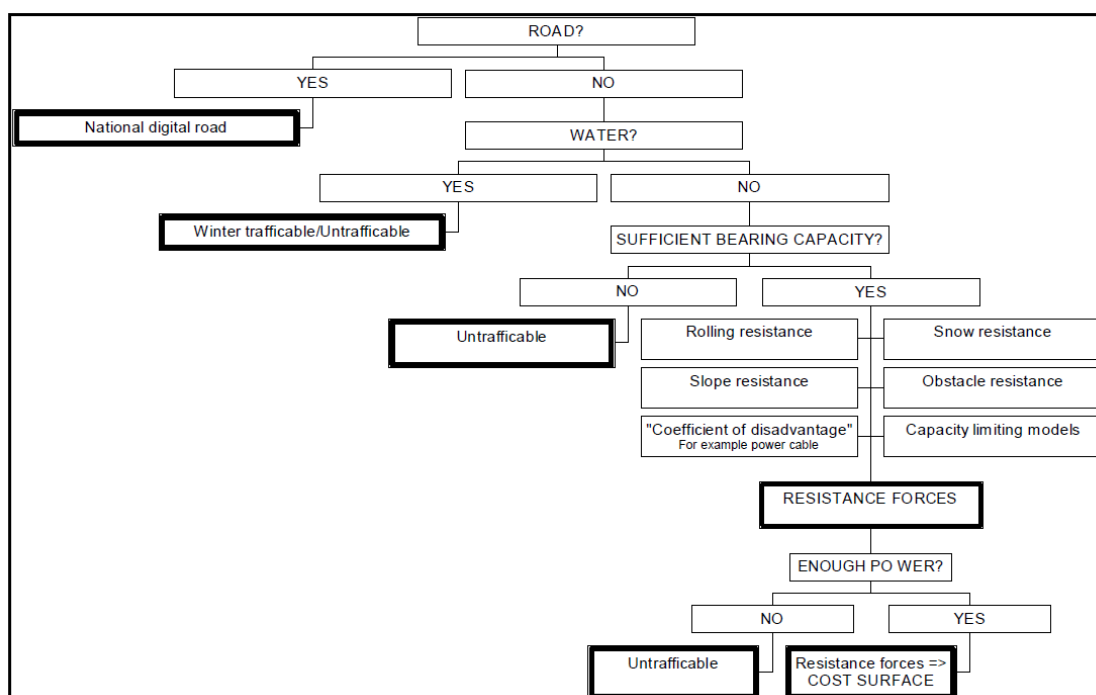
3.3 A GIS-based simulation model for terrain tractability (Suvinen, 2005)

Dit model is ontwikkeld door de universiteit van Helsinki. Suvinen heeft er voor gekozen om het routeberekeningsmodel te baseren op de krachten die op een voertuig werken wanneer deze zich door het terrein voortbeweegt (zie Figuur 22 voor een schematische weergave van deze krachten). De onderliggende theorie is afkomstig van een grootschalig onderzoek naar "Soil Interaction" dat is uitgevoerd door de universiteit van Helsinki tussen 1999 en 2002 (Saarilahti, 2002).



Figuur 22: Schematische weergave van de krachten die op een voertuig werken.

In Figuur 23 is het concept van het model te vinden. Het is een determinatietabel waaraan iedere cel op basis van de beschikbare geografische informatie wordt getoetst. De determinatietabel bestaat uit vier stappen. In de eerste stap wordt gekeken of er in de specifieke cel sprake is van een weg. Indien er sprake is van een weg wordt er gebruik gemaakt van de nationale wegenkaart. Wanneer er geen sprake is van een weg wordt in de volgende stap bepaald of er in de cel sprake is van water. Indien dit het geval is wordt er gekeken of deze toegankelijk is (in wintertijd) of ontoegankelijk (andere seizoenen). Wanneer er geen sprake is van water wordt er gekeken of de draagkracht van de bodem in de cel voldoende is om het voertuig te kunnen dragen. Als dit niet het geval is wordt de cel geclassificeerd als onbegaanbaar. Indien de bodem als begaanbaar wordt geclassificeerd dan wordt



Figuur 23: Conceptueel model van Suvinen (Suvinen, 2005).

vervolgens de totale weerstand berekend die het voertuig bij het rijden door de cel zal ondervinden. In de vierde en laatste stap wordt getoetst of het voertuig over voldoende vermogen beschikt om de cel te passeren. Wanneer dit niet het geval is wordt de cel alsnog als onbegaanbaar geclassificeerd. Als het vermogen wel voldoende is wordt de cel opgenomen in de Cost Surface (ofwel het cost raster).

De rol- en hellingsweerstand zijn beide afhankelijk van zowel terreinkenmerken (waaronder de draagkracht van de bodem en het reliëf) als de voertuigkarakteristieken (waaronder de voertuigmassa en het bandoppervlakte).

De rolweerstand wordt berekend met behulp van het bandoppervlakte en de zakking van het voertuig in het terrein. Saarilahti benoemd hiervoor in zijn artikel verschillende rekenmodellen (vergelijkingen).

Suvinen gebruikt de volgende vergelijking om de rolweerstand te berekenen:

$$F_{Ri} = \mu_R \cdot W_i$$

F_{Ri} = De rolweerstand per wiel [kN]

μ_R = Rolweerstandcoëfficiënt [-]

W_i = Gewicht van het voertuig per wiel [kN]

$$\mu_R = 0.04 + \frac{z}{\sqrt{2 \cdot R \cdot z}}$$

z = De diepte waarmee het wiel wegzakt in de bodem [m]

R = Gemodelleerde straal van het wiel [m]

Voordeel van de aanpak van Suvinen is dat met relatief weinig informatie (voertuigmassa, bandoppervlakte en draagkracht van de bodem) een inschatting kan worden gemaakt van de terreinbegaanbaarheid van het voertuig. Daarnaast biedt het model mogelijkheden om deze uit te breiden met aanvullende modules. Zo heeft Suvinen een module in zijn model verwerkt die rekening houdt met het bevriezen of dooien van de grond.

Tabel 5: Voor- en nadelen van het model van Suvinen.

Voordelen	Nadelen
Onderbouwd met behulp van theorieën uit de Terramechanica.	Het model is (nog) niet gevalideerd.
Toepasbaar op verschillende wielvoertuigen. Het model biedt een goede basis om verder uit te breiden met verschillende aanvullende modules.	Het bevat veelal empirische formules met verschillende parameters. Het is daardoor moeilijk het gevolg van een bepaalde parameter op het eindresultaat (route) te achterhalen.

3.4 Conclusie en discussie

Het model zoals opgezet door Grogan is niet voertuig specifiek en maakt gebruik van een hinderniswaarde waarvan lastig te achterhalen is wat dit voor een invloed heeft op een specifiek voertuig. Daarnaast is het model gecreëerd voor een terrein in Arizona waar vanwege de heersende klimaatomstandigheden sprake is van een geringe variëteit in terreinkenmerken in tegenstelling tot het oefengebied waar deze variëteit een stuk groter is. Deze geringe variëteit heeft als gevolg dat er in het model van Grogan gebruik is gemaakt van geografische informatie van een grote resolutie die niet zal kunnen worden gebruikt in het oefengebied.

Het model dat door de BGRM en de DGA is ontwikkeld maakt gebruik van verschillende databases. De informatie over bijvoorbeeld een gemeten snelheid bij een gegeven USCS en verzadigingsgraad is niet voor handen binnen de Nederlandse krijgsmacht. Het opzetten van een soort gelijke database zal Defensie veel geld en tijd kosten. Echter het gebruik van een voertuigdatabase in het routeberekeningsmodel is wel van toegevoegde waarde wanneer het model bruikbaar moet zijn voor verschillende voertuigtypen.

Het model van Suviven maakt in tegenstelling tot de andere twee behandelde modellen gebruik van een theoretische onderbouwing uit de terra mechanica. Deze aanpak zorgt er voor dat het model voor ieder voertuigtype gebruikt kan worden indien daarvan de benodigde voertuigkarakteristieken bekend zijn.

De theoretische onderbouwing uit het onderzoek naar soil interaction (Saarilahti, 2002) zal worden gekoppeld aan een voertuigdatabase om voor het aangewezen oefengebied een off-road routeberekeningsmodel in ArcGIS te creëren waarbij rekening wordt gehouden met de terreinbegaanbaarheid van de MB 290 GD 5 kN.

4. Uitwerking van het routeberekeningsmodel in ArcGIS

In dit hoofdstuk zal worden beschreven hoe het routeberekeningsmodel in ArcGIS is geïmplementeerd. Als leidraad voor de implementatie is het stappenplan uit hoofdstuk 2 gebruikt. Het stappenplan bestaat uit vijf stappen: informatie input en geoprocessing (1), cost raster creëren (2), cost distance raster en backlink raster berekenen voor een source cel (3), uitvoeren van de cost path analysis naar een willekeurige locatie (4) en de weergave van de route naar de willekeurige locatie (5).

In de eerste paragraaf komen de informatie input en geoprocessing van het routeberekeningsmodel ter sprake.

In de tweede paragraaf worden de stappen cost raster creëren, cost distance raster en backlink raster berekenen voor een source cel, uitvoeren van de cost path analysis naar een willekeurige locatie en de weergave van de route naar de willekeurige locatie behandeld.

In de derde en laatste paragraaf komt de conclusie en discussie van het ontwikkelde model ter sprake.

4.1 Informatie input en geoprocessing

Om de routeberekening te kunnen uitvoeren blijkt uit het literatuuronderzoek dat er in ArcGIS een cost raster opgebouwd dient te worden. Voor dit model is gekozen om de weerstand [N] als kosteneenheid te gebruiken. Om de totale weerstand te berekenen is besloten om enkel de rolweerstand en de hellingsweerstand in de berekening mee te nemen omdat deze weerstanden veelal afhankelijk zijn van statische voertuigparameters en statische terreinparameters. Deze keuze is gemaakt omdat de dynamische parameters afhankelijk zijn van de voertuigsnelheid en deze snelheid niet voor ieder stuk van de route berekend kan worden. Daarnaast moet het voertuig op ieder punt van de route stil kunnen staan zonder te verzakken.

De totale weerstand kan dan worden berekend volgens:

$$F_{Totale\ weerstand} = F_{Rolweerstand} + F_{Hellingsweerstand}$$

Om deze weerstanden te bepalen is er gebruik gemaakt van de volgende (geografische) informatie:

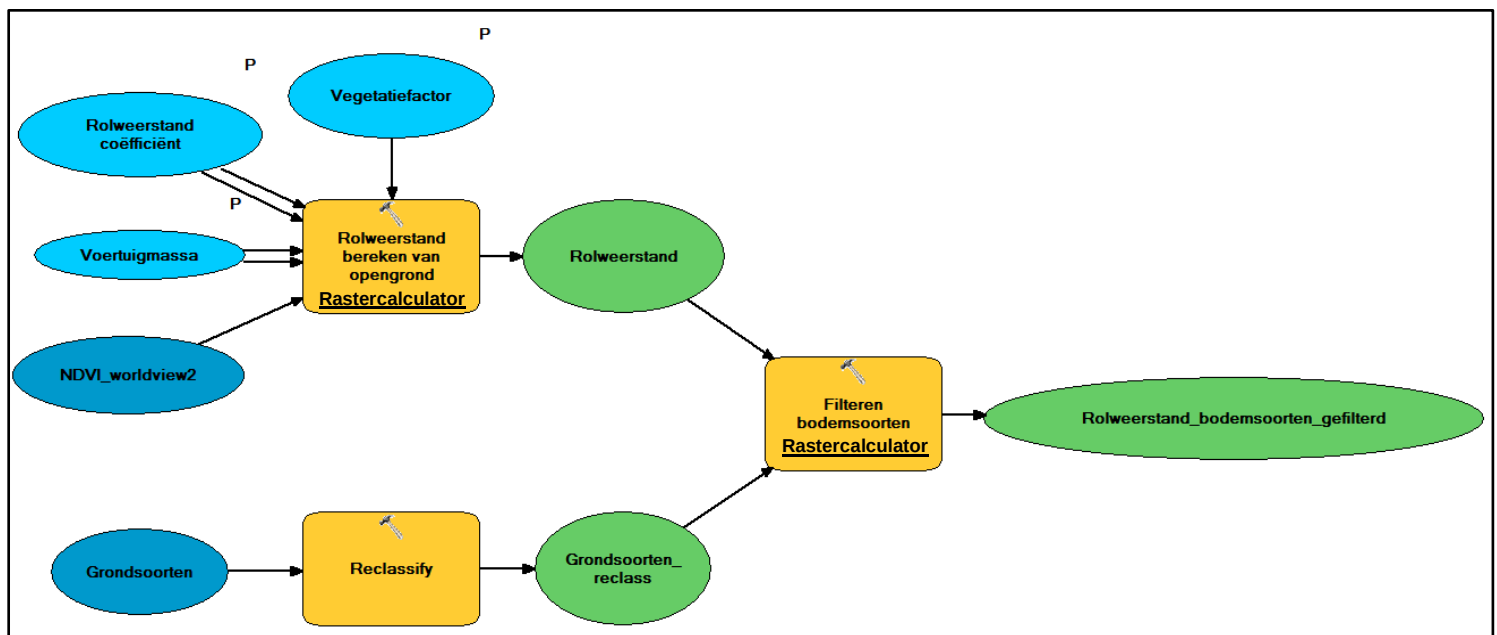
- WorldView-2 beelden voor het bepalen van de Normalized Differenced Vegetation Index (NDVI);
- luchtfoto's voor de presentatie van de route en validatie;
- bodemkaart van Nederland afkomstig van het Bodem Informatie Systeem (BIS) voor het bepalen van de USCS;

- actuele grondwaterstand van het gebied (Vitens, 2014);
- tabellen van de instructiekaart (IK) 5-131 van het Ministerie van Defensie voor het bepalen van de CI;
- concept mobility database v0.1 opgesteld door Ing. A.M. Visker en Ir. M.J.W. van Opstal voor het bepalen van de rolweerstandscoëfficiënt (Visker & van Opstal, 2011);
- hoogtedata in de vorm van Actueel Hoogtebestand Nederland 1 (AHN 1) en AHN 2 voor het bepalen van de hellingsweerstand en het filteren van hindernissen.

De tabellen van de IK 5-131 zijn opgenomen in bijlage II een omschrijving van de andere gebruikte (geografische) informatie is te vinden in bijlage IV.

Rolweerstand

In Figuur 24 staat het model weergegeven waarmee de rolweerstand van het oefengebied wordt bepaald.



Figuur 24: Model waarmee de Rolweerstand in het oefengebied wordt bepaald.

Het model begint met het bepalen van de rolweerstand met behulp van de rastercalculator tool (in Figuur 24 weergegeven met “Rolweerstand berekenen van opengrond”) met behulp van de volgende vergelijking:

$$F_R = \mu_R \cdot W$$

F_R = Rolweerstand [N]

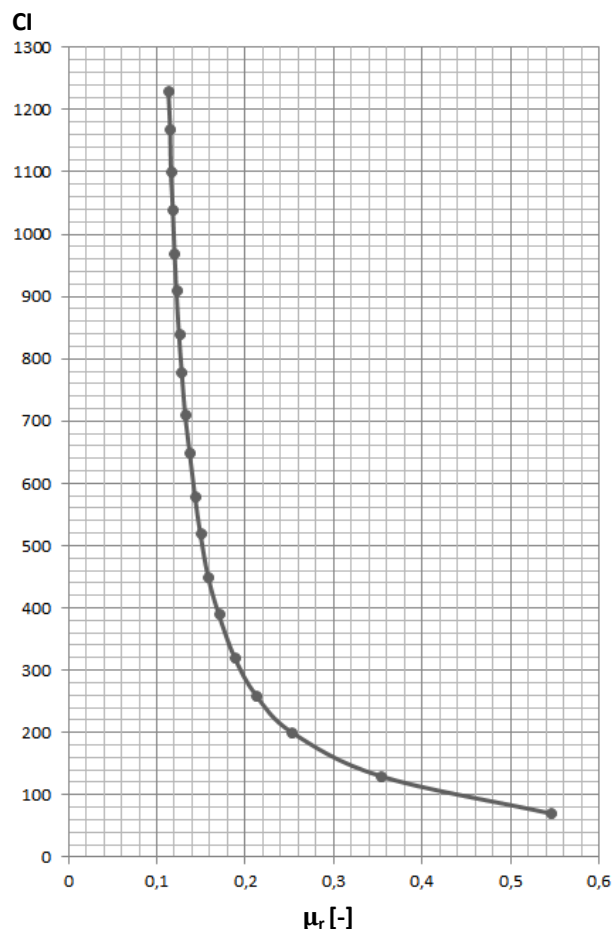
μ_r = Gemiddelde rolweerstand coëfficiënt (Visker & van Opstal, 2011) [-]

W = Voertuiggewicht [N]

De gemiddelde rolweerstandcoëfficiënt kan met de mobility database (Visker & van Opstal, 2011) bepaald worden met behulp van de Cone Index. De Cone Index is in dit model bepaald door gebruik te maken van de tabellen uit de IK 5-131 en de bodemclassificatie. In Figuur 25 staat een grafiek weergegeven waarin de Cone Indices van de tabellen van de IK 5-131 zijn uitgezet tegen de gemiddelde rolweerstandcoëfficiënt (in Tabel 6 staan de bijbehorende waarden weergegeven).

Tabel 6: Cone Indices met bijbehorende rolweerstandcoëfficiënt

CI [kPa]	μ_r [-]
70	0,546
130	0,353
200	0,253
260	0,212
320	0,188
390	0,17
450	0,158
520	0,149
580	0,143
650	0,137
710	0,132
780	0,128
840	0,125
910	0,122
970	0,12
1040	0,118
1100	0,116
1170	0,115
1230	0,113



Figuur 25: Cone Index uitgezet tegen de gemiddelde rolweerstandcoëfficiënt.

Tabel A van IK 5-131 (Bijlage II) is van toepassing op het geselecteerde gebied. Het betreft hier een hoog terrein met grondwater dieper dan 120 cm (Vitens, 2014). Volgens de bodemkaart betreft het hier het USCS-bodemtype “zand (SW)”. Hieruit volgt dat de bodem een minimale draagkracht heeft dat groter of gelijk is aan 1230 kPa (1,23 mPa in tabel A). Hieruit volgt, volgens de mobility database, een rolweerstandcoëfficiënt van 0,113.

Tegelijkertijd wordt met dezelfde rastercalculator, waarmee ook de rolweerstand wordt berekend, de open gronden uit het oefengebied gefilterd met behulp van de Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) van de WorldView-2 beelden.

De NDVI is een index die berekend kan worden met multi-spectrale satellietbeelden, in dit geval zijn de WorldView-2 beelden gebruikt. De NDVI is gebaseerd op het feit dat levend plantmateriaal een grotere reflectie van infrarode straling heeft dan de open gronden. Bij het berekenen van de NDVI wordt het verschil van reflectie van infrarood uitvergroot.

De NDVI met behulp van de WorldView2 beelden is als volgt te berekenen:

$$NDVI_{WorldView-2} = \frac{WorldView-2 \text{ band } 8 (NIR2) - WorldView-2 \text{ band } 5 (RED)}{WorldView-2 \text{ band } 8 (NIR2) + WorldView-2 \text{ band } 5 (RED)} \text{ (Wolf, 2010)}$$

Op basis van de gebruikte WorldView-2 beelden is er gekozen dat een cel met een $NDVI \leq 0,4$ geclassificeerd kan worden als zijnde open grond. Hierbij dient wel de opmerking gemaakt te worden dat dit selectie criterium niet altijd geldig is. De NDVI waarde is namelijk afhankelijk van onder andere klimatologische factoren en type vegetatie. Met andere woorden: de NDVI die voor dit gebied en deze opname geldt zal niet hetzelfde resultaat opleveren voor een ander gebied of een andere opname.

De gebieden die niet als opengrond worden geclassificeerd worden vermenigvuldigd met een zogeheten vegetatiefactor. Dit is gedaan om de vertraging als gevolg van een grotere rolweerstand van de heide in het model mee te nemen. Hiervoor is een waarde van 1,5 aangenomen. Deze keuze is vergelijkbaar met de gebruikte Land Context parameter voor lage struiken in het model van de BGRM en DGA (Hohmann Et al., 2013).

Voor de open gronden dient de rolweerstand coëfficiënt te worden ingevuld in het model. Voor het oefengebied en de MB 290 GD 5 kN met bandtype C 225/75R16 LM90 (TEX) wordt dit 0,113.

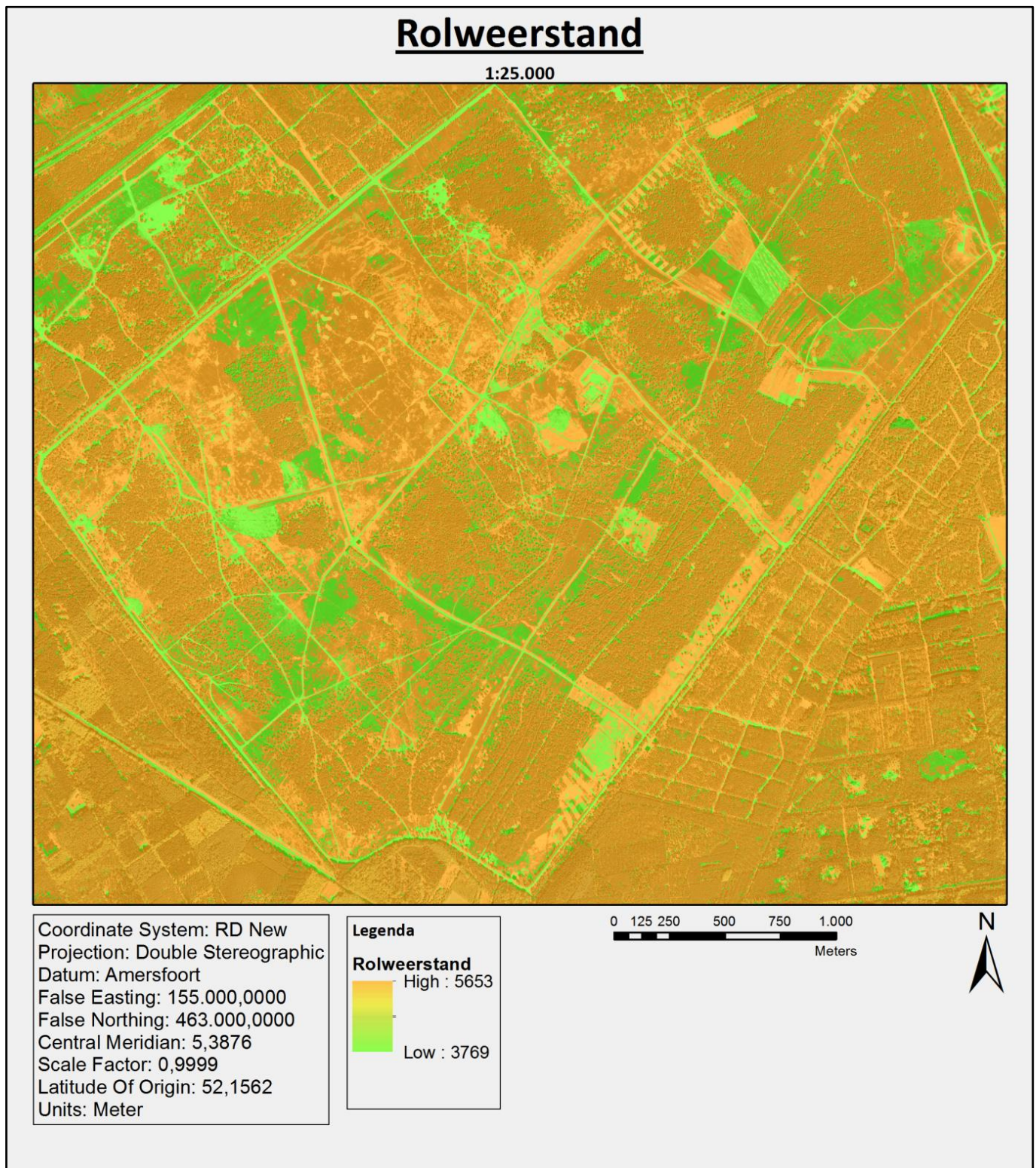
De volgende statement is hiervoor ingevoerd in de raster calculator:

```
Con("%NDVI_worldview2%" <= 0.4,float(%Voertuigmassa%) * 9.81 * float(%Rolweerstand
coëfficiënt%),float(%Voertuigmassa%) * 9.81 * float(%Rolweerstand coëfficiënt%) *
float(%Vegetatiefactor%))
```

Het gaat hier om een conditional statement waarmee voor iedere cel waarvan de NDVI kleiner of gelijk is aan 0,4 de rolweerstand wordt berekend zonder de vegetatiefactor. Bij cellen waarvan de NDVI groter is dan 0,4 wordt de rolweerstand berekend met vermenigvuldiging van de vegetatiefactor (1,5 voor heide).

Bij het bepalen van de rolweerstand met behulp van dit model komen de volgende factoren met betrekking tot de terreinbegaanbaarheid van het voertuig samen: voertuigkarakteristieken, weer en terrein. Zo is de wegzakking van het voertuig afhankelijk van onder andere de voertuigmassa en het bandoppervlakte (voertuigkarakteristiek), het actuele grondwaterpeil (indirect weer) en het bodemtype(terrein).

Het resultaat van het model is te vinden in Figuur 26 op pagina 38. In deze “rolweerstandskaart” zijn de gebieden met een lage rolweerstand met groen weergegeven en gebieden met een hogere rolweerstand met geel.

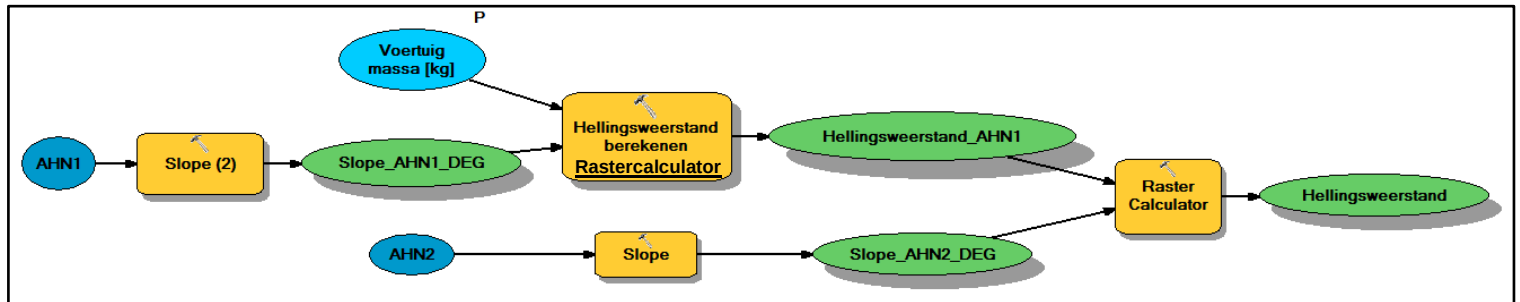


Figuur 26: Rolweerstandskaat van het oefengebied.

Hellingsweerstand

Om de hellingsweerstand te bepalen is de AHN1, AHN2 en voertuigmassa als input gebruikt.

In Figuur 27 is het ArcGIS model weergegeven.



Figuur 27: Model waarmee de hellingsweerstand wordt berekend en hindernissen op basis van hoogte worden gefilterd

Allereerst wordt hoogte-informatie van de AHN1 omgerekend naar helling informatie. Dit is gedaan met behulp van de Slope tool in ArcGIS¹. Vervolgens berekent het model op basis van deze helling informatie en voertuigmassa de helling weerstanden met behulp van de rastercalculator tool. Er is hiervoor gebruik gemaakt van de volgende vergelijking:

$$F_s = \sin(\alpha) \cdot M_{\text{voertuig}} \cdot g$$

F_s = Hellingsweerstand [N]

α = Hellingshoek [°]

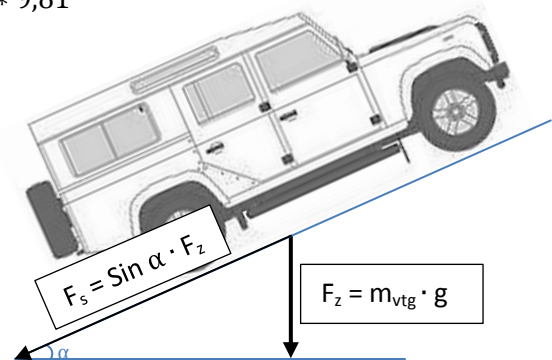
M_{voertuig} = Voertuigmassa [kg]

g = gravitatieversnelling [m^1s^{-2}]

Dit is op de volgende manier ingevoerd in de rastercalculator tool:

$$\text{Hellingsweerstand} = \sin\left(\left(\frac{\text{AHN1}}{180}\right) * 3,1459\right) * 3100 * 9,81$$

In Figuur 28 staat weergegeven waarop deze berekening is gebaseerd.



Figuur 28: Berekening van de hellingsweerstand.

¹ Bij gebruik van de slope tool met de AHN1 is het belangrijk dat de z-factor wordt ingesteld op 0,01. De z-factor is de factor tussen de horizontale eenheid (meter) en de gebruikte hoogte eenheid (centimeters).

Parallel aan bovengenoemd proces berekent het ArcGIS model de helling informatie van de AHN2 hoogte-informatie met behulp van de Slope tool. Het resultaat hiervan wordt in het model gebruikt om uit de berekende weerstandskaat hindernissen op basis van hoogte te filteren.

Voor het filteren is de volgende formule in de raster calculator van ArcGIS ingevoerd:

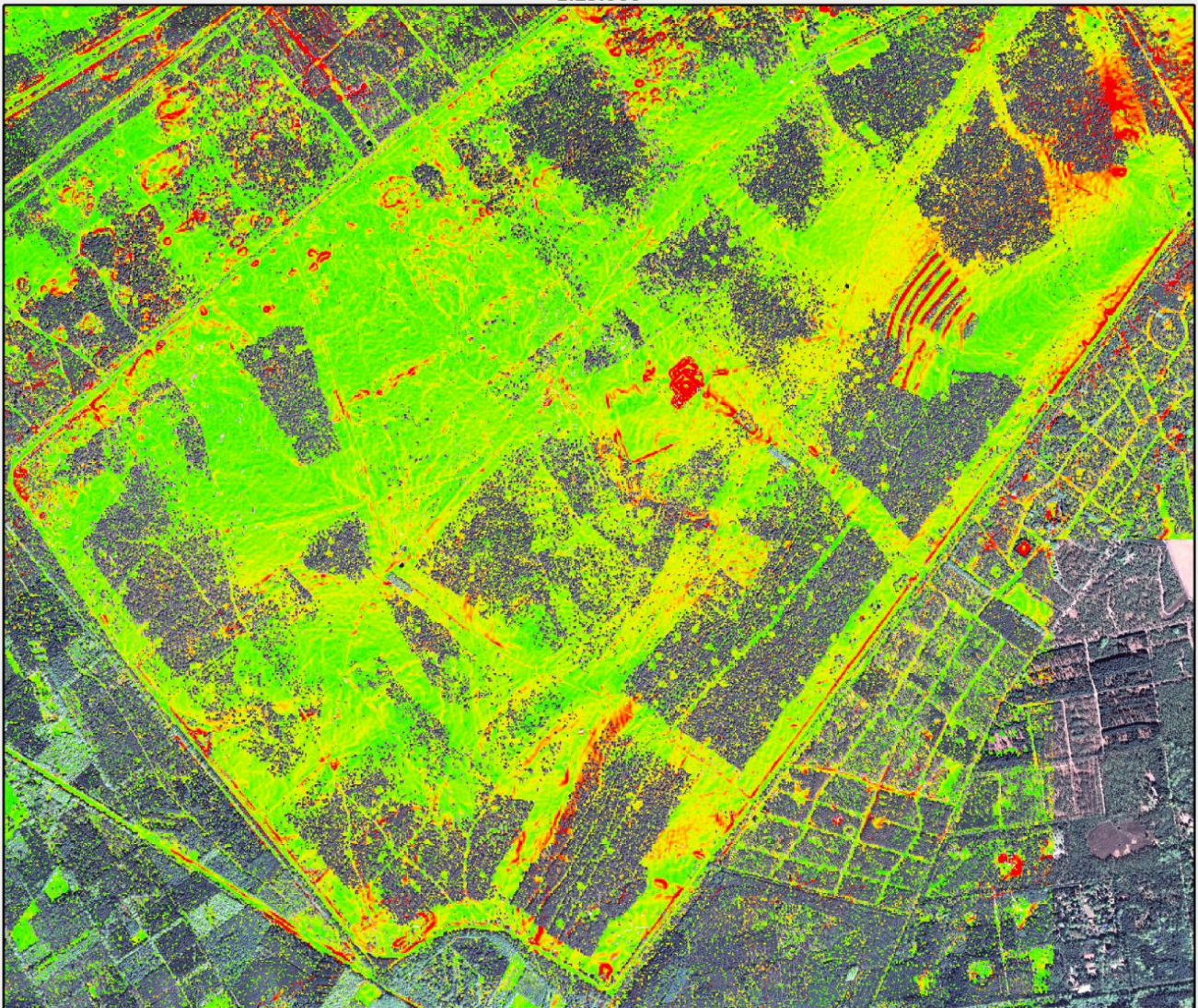
$$\text{SetNull}(\text{"Slope_AHN2_DEG"} \geq 45, \text{"AHN1"})$$

Deze formule selecteert alle cellen uit de AHN1 data die in de AHN2 (Bij een resolutie van 0,50 m bij 0,50 m) een helling groter of gelijk aan 45° heeft. Met dit filter worden hindernissen op basis van hoogte uit de geografische informatie gefilterd.

Het resultaat van dit model is te vinden in Figuur 29 op pagina 41. De hellingsweerstandskaat is over de luchtfoto geplaatst. Op die manier is duidelijk te zien dat de dichtere bosschages en eventuele hindernissen (op basis van hoogte) uit de hellingsweerstandskaat zijn gefilterd.

Hellingsweerstand

1:25.000



Coordinate System: RD New
Projection: Double Stereographic
Datum: Amersfoort
False Easting: 155.000,0000
False Northing: 463.000,0000
Central Meridian: 5,3876
Scale Factor: 0,9999
Latitude Of Origin: 52,1562
Units: Meter

Legenda
Hellingsweerstand
High : 13567
Low : 0

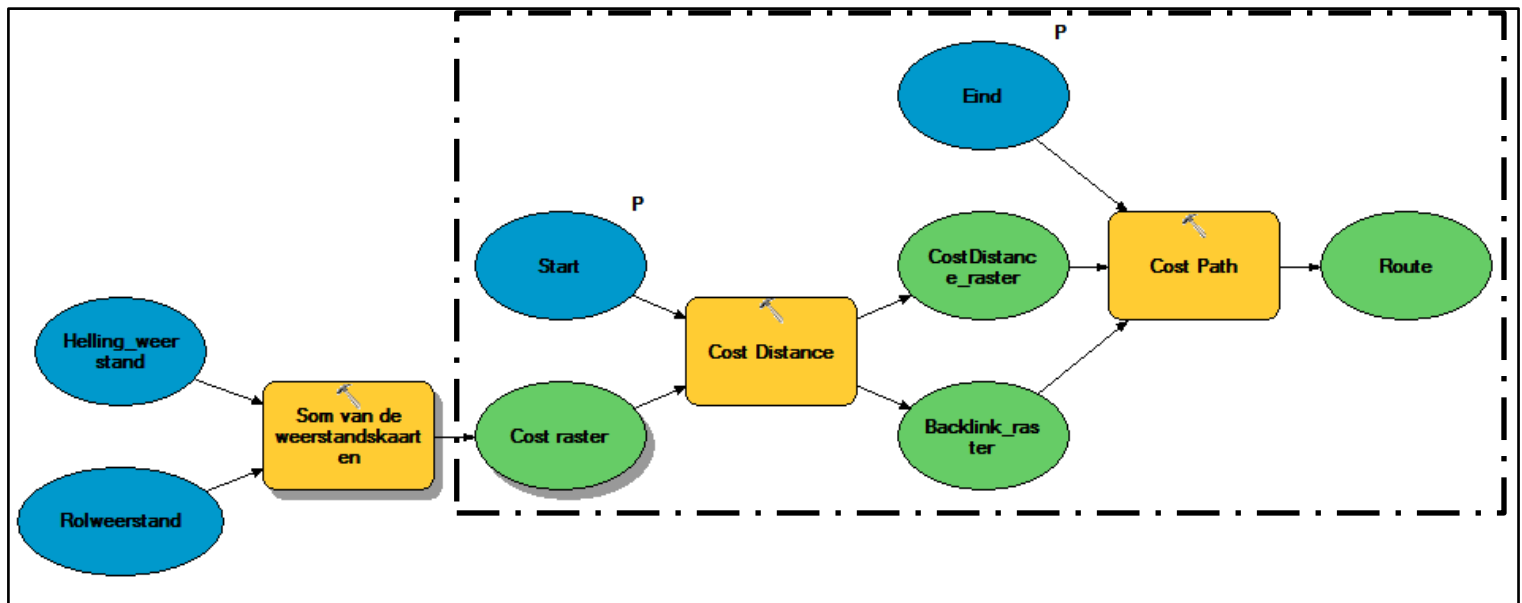
0 125 250 500 750 1.000
Meters



Figuur 29: De hellingsweerstandkaart van het oefengebied.

4.2 Cost raster, Cost distance raster en cost path analysis

In Figuur 30 worden de laatste stappen van het routeberekeningsmodel in ArcGIS weergegeven.



Figuur 30: Model waarmee de rolweerstand en de hellingsweerstand worden gesommeerd en de routeberekening kan worden uitgevoerd.

Allereerst wordt de totale weerstand berekend door de informatie over de rolweerstand en hellingsweerstand per cel met behulp van de rastercalculator tool te sommeren. De output hiervan wordt gebruikt als cost raster. Vervolgens dient er een startlocatie te worden ingevoerd waarmee het model het Cost distance raster en het backlink raster opbouwt.

Om de routeberekening uit te voeren dient er alleen nog een eindlocatie te worden ingevoerd waarmee het model een cost path analysis kan uitvoeren tussen de start- en eindlocatie.

4.3 Conclusie en discussie

In het geproduceerde model is gebruik gemaakt van voor Defensie relatief makkelijk te verkrijgen (geografische) informatie en het model is gebaseerd op theorieën uit de terra mechanica.

Minpunt is dat, bij de berekening van de rolweerstand, de draagkracht slechts op basis van de bodemkaart en IK 5-131 is bepaald. Hier zit namelijk een lastig te kwantificeren foutmarge in. Het model zou dan ook in de toekomst nauwkeuriger kunnen worden gemaakt wanneer het mogelijk zou zijn de draagkracht met behulp van remote sensing te berekenen.

Het berekenen van de hellingsweerstand met behulp van de AHN1 informatie blijkt geen problemen op te leveren. Daarnaast is er in dit model een filter van hindernissen op basis van hoogte toegepast. Dit is gedaan met behulp van de AHN2 informatie. Dit blijkt in het oefengebied zeer goed te werken bij het filteren van bosschages en bouwwerken.

Daarnaast dient de opmerking te worden gemaakt dat er in het ontwikkelde off-road routeberekeningsmodel, in tegenstelling tot de in hoofdstuk 3 behandelde modellen, gebruik is gemaakt van geografische informatie van een relatief kleine resolutie.

5. Validatie

Om het model te valideren zijn er een drietal routes berekend en gereden met een MB 290 GD 5 kN. De routes zijn berekend tussen de uiterste hoeken van het oefengebied om op die manier het model over een zo groot mogelijk oppervlakte een route te laten berekenen.

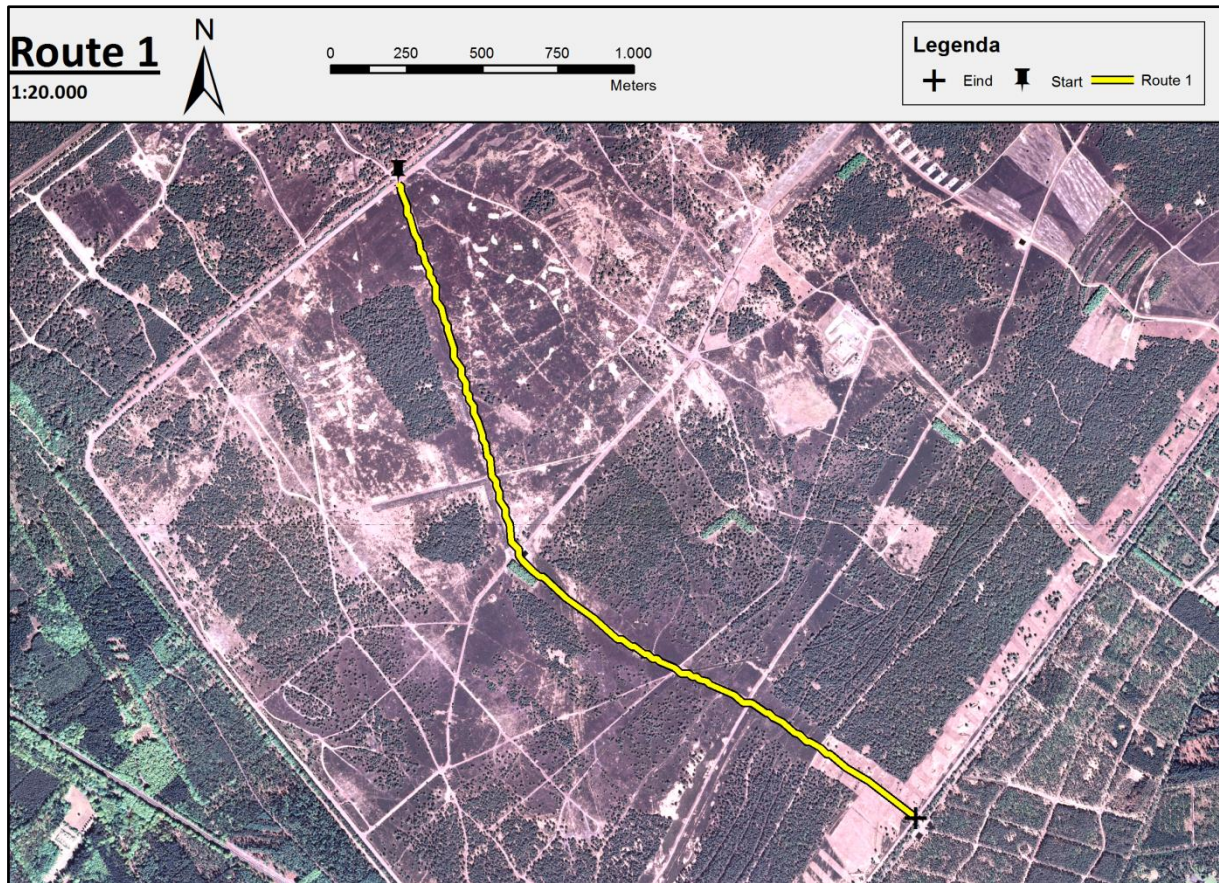
Nadat de drie routes zijn berekend in ArcGIS zijn de routes handmatig in de GPS geladen. Dit is handmatig gebeurd omdat het exporteren van routebestanden van ArcGIS niet compatible is met de gebruikte GPS. Het navigeren tijdens het rijden is gedaan met behulp van de GPS en ArcGIS als ondersteuning. De GPS heeft is ook gebruikt om tijdens het rijden de routegegevens op te slaan. Deze routegegevens zijn vervolgens geïmporteerd naar ArcGIS om de gereden route met de berekende route te kunnen vergelijken.

Het doel van het valideren van het model is om te zien of de begaanbaarheid die door het model wordt voorspeld klopt met de werkelijke situatie. Het hoofdstuk bestaat uit vier paragrafen, waarbij de eerste drie paragrafen de resultaten van validatie per route zullen beschrijven. Het hoofdstuk wordt afgesloten met de belangrijkste conclusies en discussie.

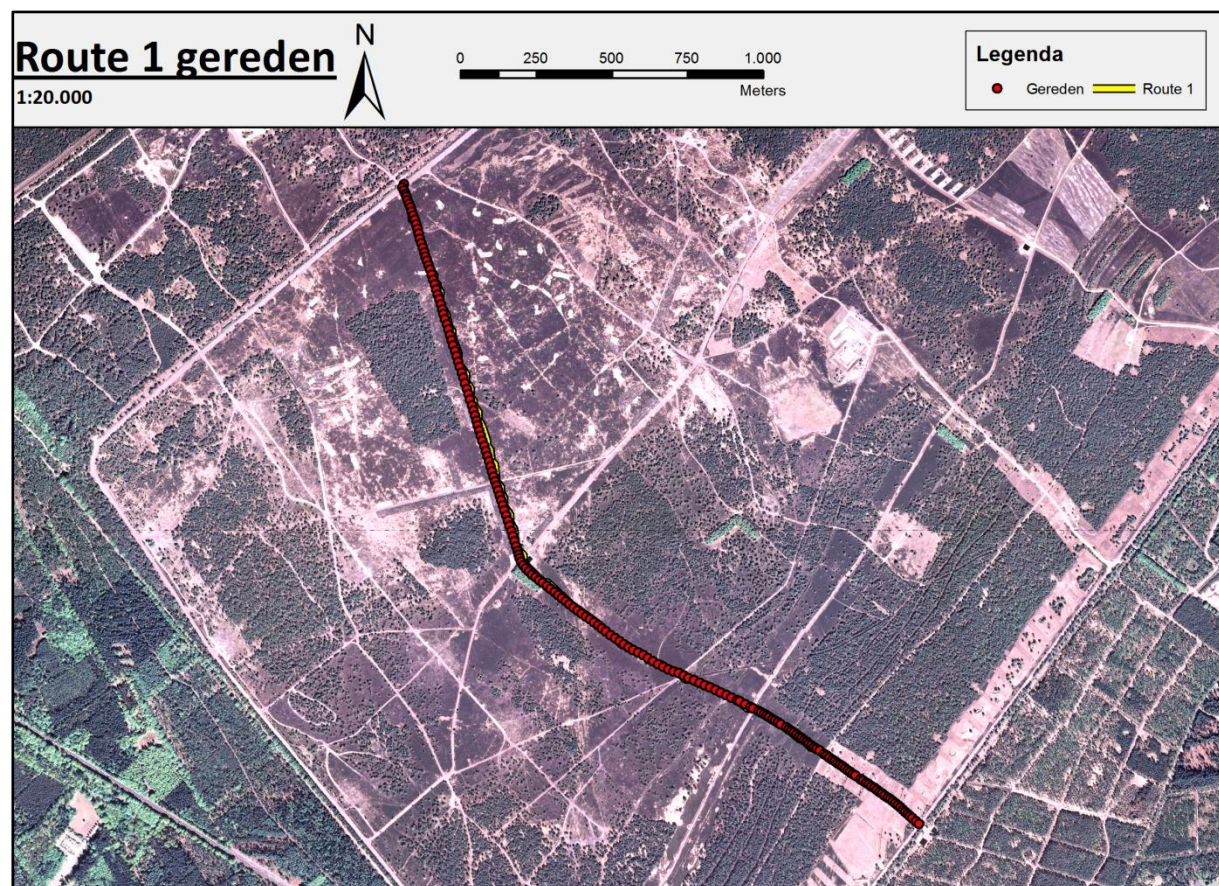
5.1 Route 1

Route 1 is gepland om het navigeren met behulp van de GPS te testen. Bij het rijden van de eerste route is gebleken dat het voor de chauffeur niet mogelijk is om tijdens het rijden te navigeren met behulp van de gebruikte GPS. De voornaamste reden hiervoor is dat het rijden door onverhard terrein de volledige concentratie van de chauffeur opeist. Om dit op te lossen is de chauffeur tijdens het valideren door een ander persoon aangestuurd.

In Figuur 31 is de berekende route 1 op een luchtfoto weergegeven. In Figuur 32 staat de daadwerkelijk gereden route weergegeven. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de gereden en de berekende route goed overeenkomen en dat de GPS goed werkt.



Figuur 31: Route 1, berekend.

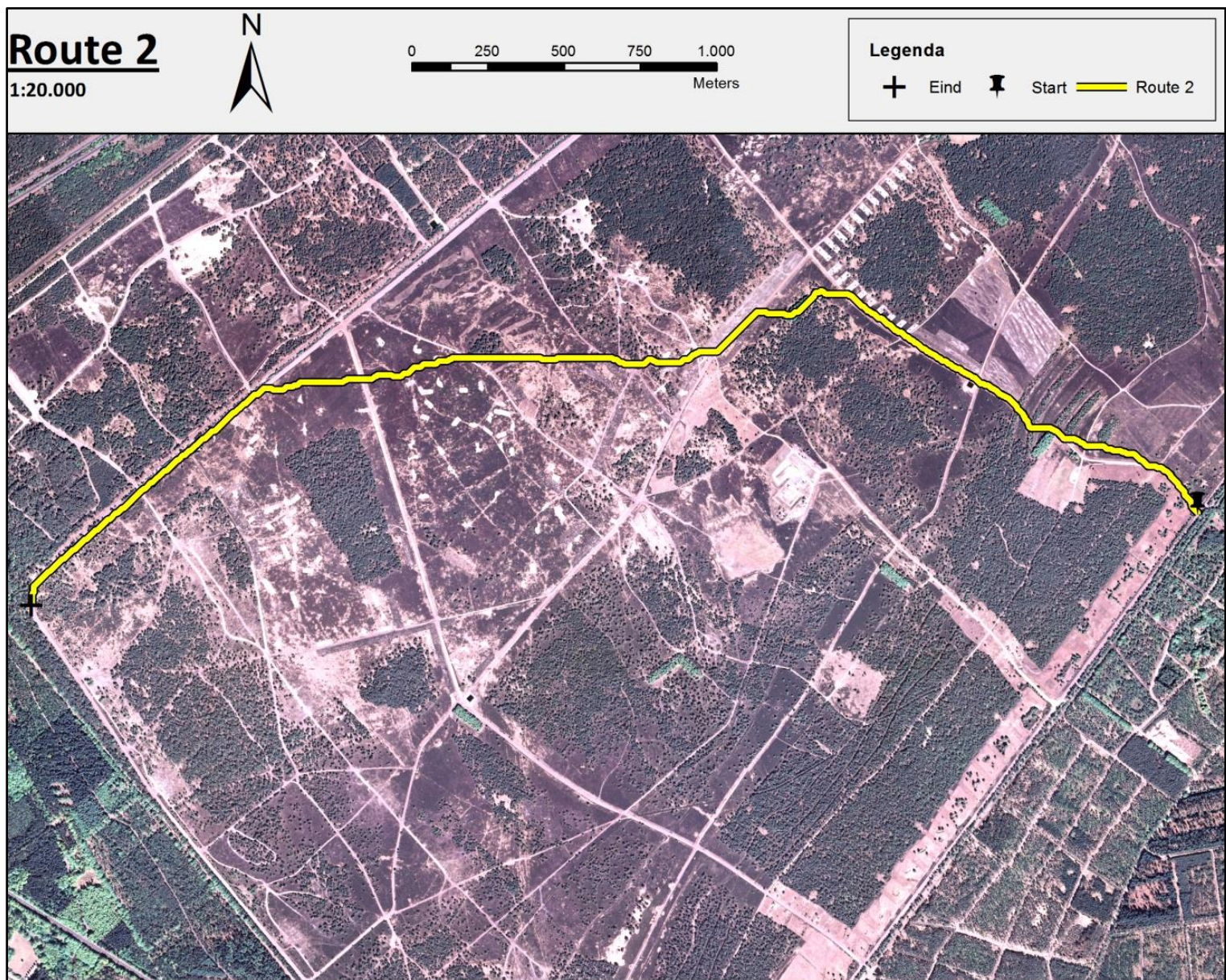


Figuur 32: Route 1, berekend en gereden.

5.2 Route 2

De tweede route die het model heeft berekend loopt van de oosthoek naar de westhoek van het terrein. In Figuur 33 is de berekende route weergegeven. Bij het plannen van deze route heeft het ArcGIS model een ruime keuze om van de zandpaden af te wijken indien dit een lagere totale weerstand geeft dan de zandpaden.

In Figuur 34 is de daadwerkelijk gereden route en de berekende route weergegeven. De afwijking van de gereden route met de berekende route zit hem vooral in het feit dat er een afwijking zit in de berekende route en de route die handmatig in de GPS is opgenomen. De nauwkeurigheid van de GPS tijdens het rijden was 8 m.

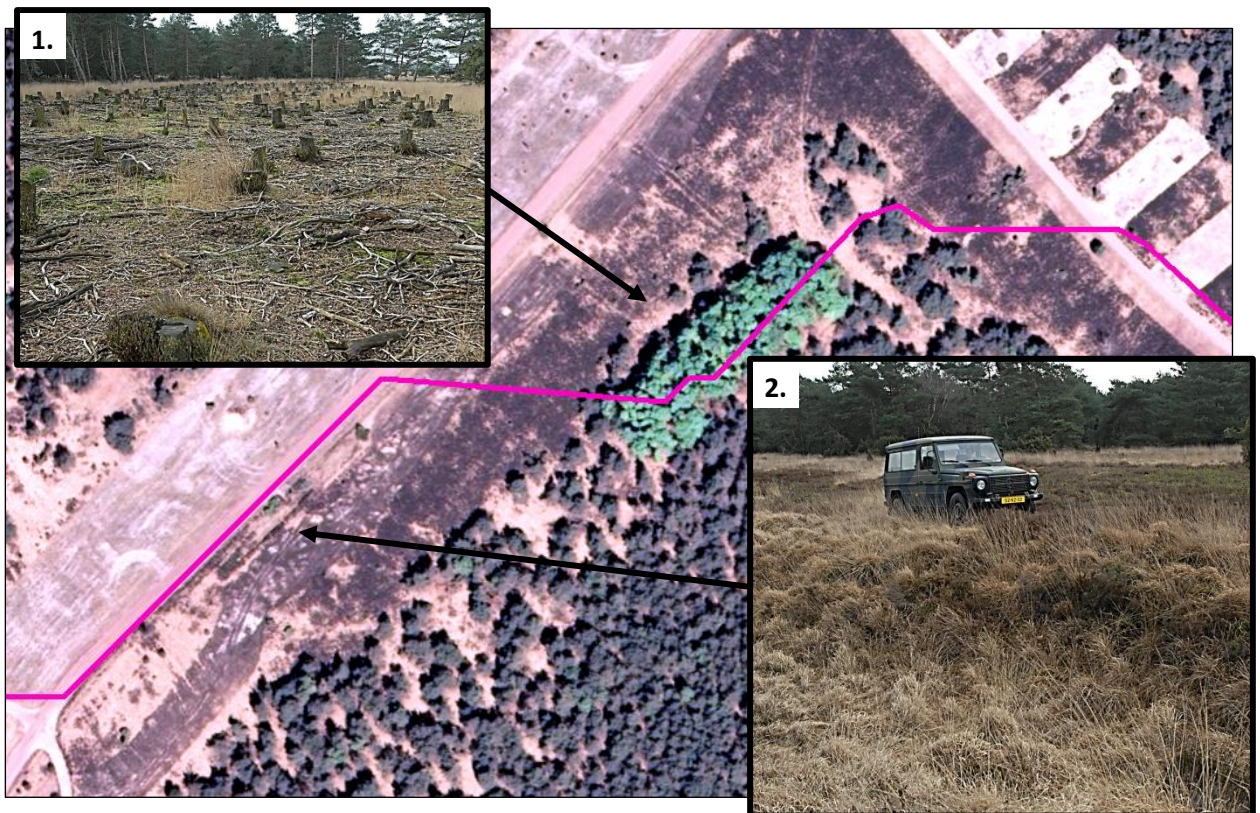


Figuur 33: Route 2, berekend.



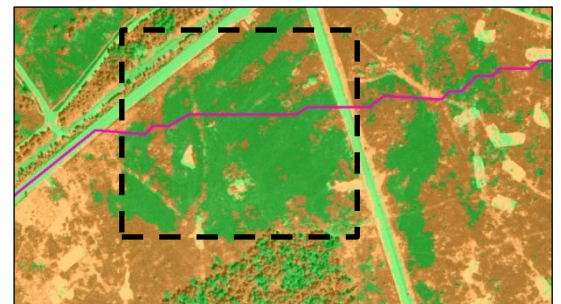
Figuur 34: Route 2, gereden en berekend.

Tijdens het rijden van route 2 zijn er een aantal opvallende situaties naar voren gekomen. Zo bleek de route op de luchtfoto door een bosschage te lopen. Echter op de AHN2 (recenter dan de luchtfoto) bleek deze bosschage niet aanwezig te zijn. Ondanks de hoge resolutie van de AHN2 (0,5 m x 0,5 m) bleek het gebied toch niet toegankelijk te zijn voor de MB (foto 1 in Figuur 35). Een positief resultaat daarentegen was het onderkennen van een diepe geul door het terrein waar de route omheen gepland bleek te zijn (foto 2 in Figuur 35).



Figuur 35: Interessante punten tijdens het rijden van route 2.

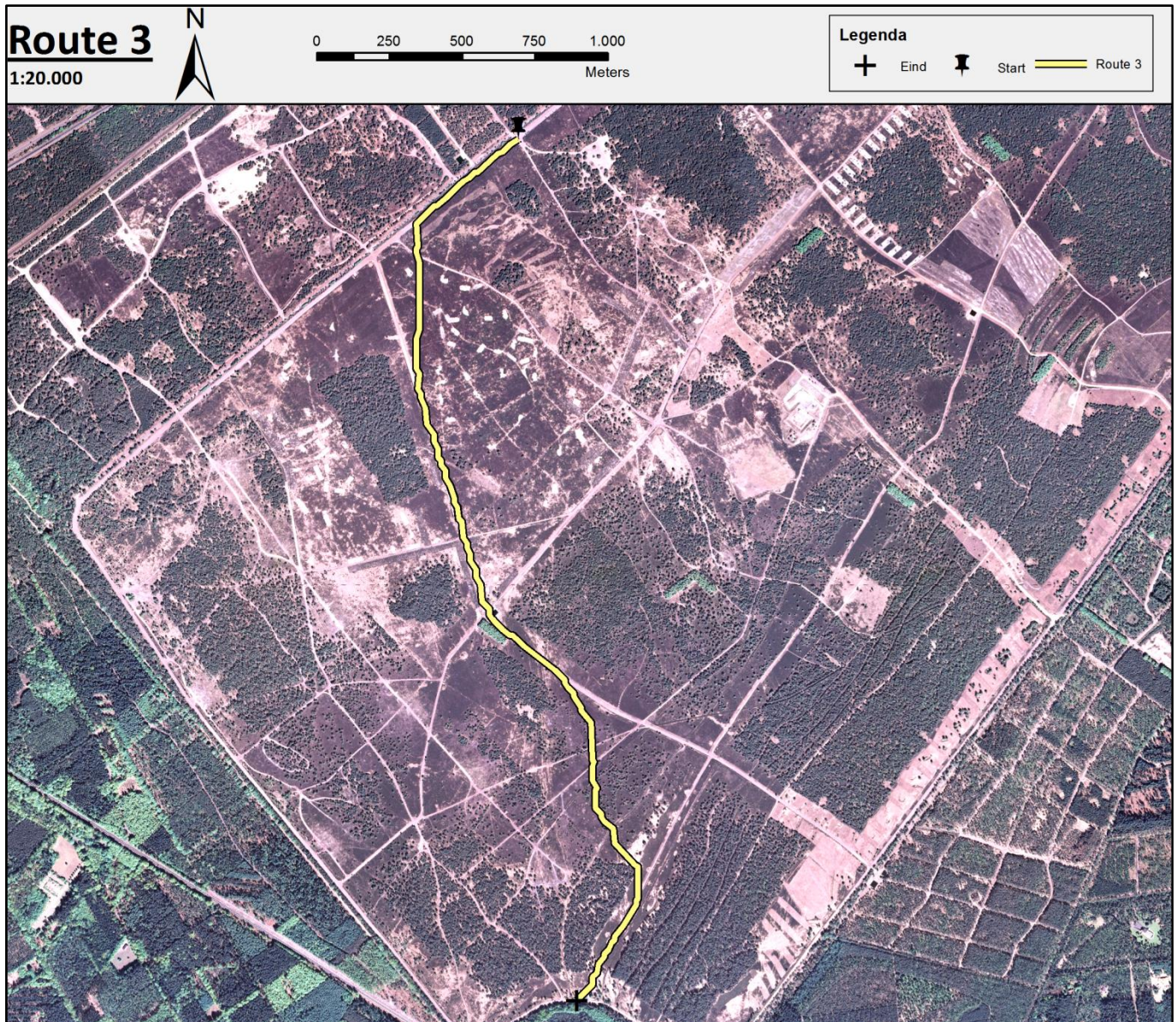
Bij het rijden van route 2 viel ook op dat door het gebruik van de NDVI, voor het onderkennen van opengronden, de route op sommige locaties van de paden is afgeweken waar tijdens het rijden bleek dat dit meer vertraging opleverde dan wanneer wel over de paden zou zijn gereden. Oorzaak hiervoor is dat op sommige locaties de vertragende heidegrond door het model gezien wordt als open grond. In Figuur 35 is één van deze situaties uitvergroot. In het omkaderde gedeelte bevindt zich een vlakte die door het model is gekwalificeerd als een open grond dit bleek tijdens het rijden een met vegetatie bedekte heidegrond te zijn.



Figuur 36: Een misser bij het berekenen van de rolweerstand (bij groene gebieden is er sprake van een lage rolweerstand, bij gele gebieden van een hoge rolweerstand).

5.3 Route 3

Route 3 is gepland van de noordelijke hoek van het terrein naar de zuidelijke hoek. In Figuur 37 is de berekende route weergegeven. In Figuur 38 is de gereden route en de brekende route samen weergegeven. Wat deze route interessant maakt is de doorkruising van een bosschage aan het einde van de route. Tijdens het rijden bleek dit geen problemen op te leveren (zie Figuur 38). Daarentegen bleek wederom dat er goed opgelet moest worden voor boomstronken die niet door het model onderkend zijn (zie Figuur 38).



Figuur 37: Route 3, berekend.



Figuur 38: Route 3, gereden en berekend en een blow-up van de doorkruising van de bosschage.

5.4 Conclusie en discussie

Tijdens het rijden van de routes zijn er geen problemen geweest met betrekking tot de draagkracht. Wel bleek bij route 2 dat het voertuig niet tussen de boomstronken kon rijden waaruit geconcludeerd kan worden dat micro topografische terreinkenmerken een niet te onderschatten rol spelen in de terreinbegaanbaarheid van een voertuig.

Een andere aanwijzing hiervoor is dat het rijden door de gebieden die door het model niet geclassificeerd worden als open gronden er slechts een snelheid van ongeveer 15 km/h haalbaar bleek te zijn in tegenstelling tot een snelheid van 40 km/h over de zandpaden (door het model geclassificeerd als open grond). Dit snelheidsverschil is het gevolg van enerzijds de noodzaak tot extra oplettendheid met betrekking tot boomstronken en anderzijds het reliëf op micro topografisch niveau. Het vergroten van de vegetatiefactor zou voor dit model een oplossing kunnen zijn. Echter een betere oplossing zou zijn wanneer er meer onderzoek wordt verricht naar de invloed van micro topografische terreinkenmerken op de voertuigsnelheid en de onderkenning van deze micro topografische met behulp van remote sensing.

6. Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden de conclusies en aanbevelingen van het onderzoek beschreven. In de eerste paragraaf zullen de conclusies van het onderzoek worden beschreven. Dit wordt gedaan door de in de inleiding benoemde onderzoeksvragen te beantwoorden.

In de laatste paragraaf worden aanbevelingen gedaan welke op basis van het onderzoek zijn ontstaan.

6.1 Conclusies

1. Hoe wordt volgens de literatuur terreinbegaanbaarheid bepaald?

De terreinbegaanbaarheid is afhankelijk van de volgende factoren:

- a. Voertuig;
- b. chauffeur;
- c. klimaat/weer;
- d. terrein.

Al deze factoren bestaan op hun buurt weer uit verschillende subfactoren die de terreinbegaanbaarheid in meer of mindere mate bepalen. Om deze sub factoren in een ArcGIS routeberekeningsmodel op te kunnen nemen dienen de relaties tussen de sub factoren onderling en de relatie tot de terreinbegaanbaarheid onderzocht te worden.

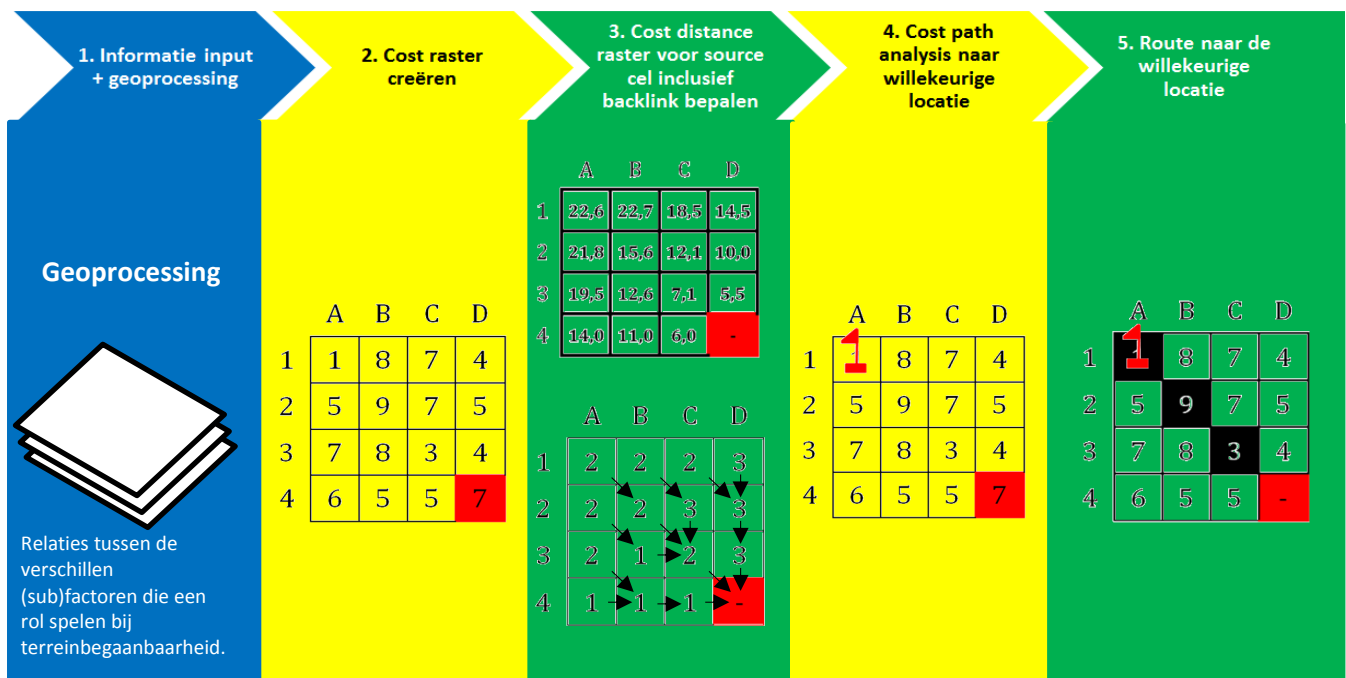
2. Zijn bestaande modellen (conceptueel of in GIS) geschikt om gebruikt te worden?

Er zijn meerdere modellen ontwikkeld met als doel off-road routeberekeningen uit te kunnen voeren met behulp van een GIS. Deze modellen verschillen in de aanpak en de onderliggende theorie. Wat ze gemeen hebben is het feit dat er gebruik wordt gemaakt van een cost raster waarop vervolgens een cost path analysis kan worden uitgevoerd.

3. Op welke manier kan er een routeberekening op basis van terreinbegaanbaarheid worden gemodelleerd in ArcGIS?

Een routeberekening in ArcGIS kan worden uitgevoerd met behulp van een cost path analysis. Hiervoor is een cost raster benodigd.

Om dit cost raster te creëren dient er een kosteneenheid te worden gekozen waarin alle factoren met betrekking tot terreinbegaanbaarheid kunnen worden uitgedrukt. Met behulp van geoprocessing kan vervolgens het cost raster worden opgebouwd. In Figuur 39 zijn schematisch de stappen weergegeven om een routeberekening in ArcGIS uit te voeren.



Figuur 39: Schematische weergave van de stappen die moeten worden uitgevoerd om een routeberekening in ArcGIS uit te kunnen voeren.

6.2 Aanbevelingen

Het ArcGIS model dat in dit onderzoek is ontwikkeld is gebaseerd op informatie uit de Mobility database en de theorie van Saarthi aangevuld met beschikbare informatie van digitale GIS-kaarten en remote sensing beelden. De mobility database heeft zijn waarde in dit onderzoeksproject bewezen en het is aan te bevelen om in de toekomst deze database verder uit te bereiden met meerdere voertuigtypen.

Een probleem dat tijdens het onderzoek naar voren kwam was de onmogelijkheid om de draagkracht van de bodem met behulp van remote sensing beelden te bepalen. Voornaamste reden hiervoor is dat de technieken op het gebied van de remote sensing nog niet zover zijn dat deze nauwkeurig kan worden bepaald. Dit is tijdens het onderzoek opgelost door gebruik te maken van de IK 5-131 in combinatie met de bodemkaart. Een uitgebreid onderzoek naar het bepalen van de draagkracht van de bodem met behulp van remote sensing zou van grote waarde zijn voor de toekomstige verdere ontwikkeling van het in dit onderzoek ontwikkelde routeberekeningsmodel.

Bij het rijden van de routes is gebleken dat de micro topografische terreinkenmerken een grote rol spelen. Een onderzoek naar de mogelijkheden op het gebied van het verkrijgen van micro topografische geografische informatie met behulp van remote sensing zal toekomstige routeberekeningsmodellen betrouwbaarder kunnen maken.

Tijdens het onderzoek bij het DIVI is gebleken dat de opleidingen met betrekking tot het opbouwen van geodatabases (database voor geografische informatie) en het gebruik van modellen in ArcGIS nog in de beginfase staan. Wanneer het DIVI de opleidingen met betrekking tot de geodatabases heeft vormgegeven is het verstandig om de in de toekomst te ontwikkelen modellen op deze geodatabases af te stemmen. Op deze manier wordt gewaarborgd dat de modellen voor iedere gevulde geodatabase inzetbaar zijn.

Bibliografie

- ESRI. (2006). *A to Z GIS*. Redlands, California: ESRI Press.
- ESRI. (2012, Januari 13). *ArcGIS 9.3 help - Neighborhood filters*. Consulté le maart 1, 2013, sur Webhelp van ESRI: <http://webhelp.esri.com>
- ESRI Nederland. (2013, oktober 11). *GIS voor Defensie*. Consulté le oktober 11, 2013, sur Website van ESRI Nederland: <http://www.esri.nl/defensie>
- Grogan, A. (2009). *Creating a spatial analysis model for generating composite cost surfaces to depict cross country mobility in natural terrain*. Tucson: The Pennsylvania State University.
- Hohmann Et al., A. (2013). A GIS-based Vehicle Mobility Estimator for Operational Contexts. *Transactions in GIS*, 78-95.
- Instructiegroep Genie Inlichtingen & Verkenningen. (2013). *Cursus boek Terrein Evaluatie*. Vught: OTC-Genie.
- ITC. (2000). *Principles of Geographic Information Systems*. Enschede: ITC.
- Saarilahti, M. (2002). *Soil interaction model*. Helsinki: University of Helsinki.
- Satellite Imaging Corporation. (2013). *WorldView-2 Satellite sensor*. Consulté le april 2014, sur Satellite Imaging Corporation: <http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/worldview-2.html>
- Suvinen, A. (2005). A GIS-based simulation model for terrain tractability. *Journal of Terramechanics*.
- US Army Corps of Engineers. (2014). *About the Army Geospatial Center*. Consulté le april 2, 2014, sur US Army Corps of Engineers: <http://www.agc.army.mil/About.aspx>
- van Eekeren, N., & Deru, J. (2013). Zoeken naar bodemstructuur en draagkracht onder grasland. *V-focus*, 32-33.
- Visker, I. A., & van Opstal, I. M. (2011, 11 29). Mobility database (concept). Den Haag, Nederland: Ministerie van Defensie.
- Vitens. (2014, februari 26). *Actuele grondwaterstanden*. Consulté le februari 26, 2014, sur grondwaterstand: <http://www.grondwaterstand.nl>
- Wolf, A. (2010). Using WorldView 2 Vis-NIR MSI Imagery to Support Land Mapping and Feature Extraction Using Normalized Differences Index Ratios. *8-Band Challenge*. Longmont: Digital Globe.

Bijlage I: Toelichting voertuigkarakteristieken en bandkarakteristieken

Voertuigmassa

Massa van het lege voertuig in kilogram.

Maximaal hellingspercentage

Het maximale hellingspercentage dat met het voertuig in de 1^{ste} versnelling bereden kan worden.

Maximale overhelling

De maximale overhelling is het maximale hellingspercentage dat het voertuig loodrecht op de rijrichting kan hebben.

Wielbasis

Afstand tussen de voorste en achterste as in meter

Waadvermogen

De maximale waterdiepte waardoor het voertuig in de laagste versnelling kan rijden in meter.

Bodemvrijheid

Het verschil tussen de onderkant van rups of wiel en het laagste deel van het chassis in meter.



Figuur 41: v.l.n.r. maximaal hellingspercentage, maximale overhelling en wielbasis.



Figuur 40: v.l.n.r. waadvermogen en bodemvrijheid.

Sectiebreedte onbelast

De sectiebreedte onbelast is de breedte van de band in meter in onbelaste situatie en opgepompt als vermeld op de band. In

Figuur 42 is dit de sectiebreedte.

Diameter onbelast

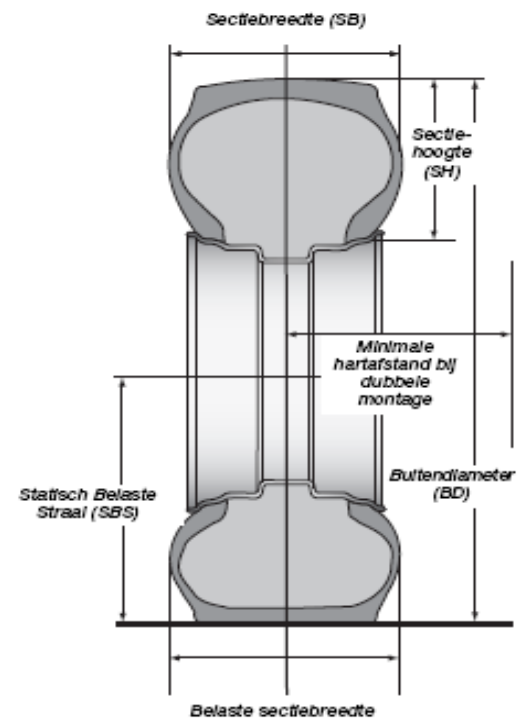
Diameter in meter vanaf de onderzijde van de band tot de bovenzijde van de band in onbelaste situatie en opgepompt als vermeld op de band.

Sectiehoogte

Hoogte van de band gemeten van de velg tot de bovenzijde van de band in meters. In Figuur 42 aangegeven met Sectiehoogte.

Statisch belaste straal

Straal gemeten van de onderzijde van de band tot de as in belaste situatie en de band opgepompt als vermeld op de band.



Figuur 42: Een aantal bandkarakteristieken (Visker & van Opstal, 2011).

Bijlage II: Beschrijving USCS (Unified Soils Classification System) en tabellen van Instructiekaart 5-131

Tabel 7: De USCS afkorting met bijbehorende beschrijving

USCS	Benaming
GW	Grind, goed gegradeerd (evenredig verdeeld)
GP	Grind, slecht gegradeerd (onevenredig verdeeld)
SW	Zand, goed gegradeerd
SP	Zand, slecht gegradeerd
SM	Zand / Siltmengsel
GM	Grind / Siltmengsel
ML	Silt met een lage plasticiteit
MH	Silt met een hoge plasticiteit
SC	Zand / Kleimengsel
GC	Grind / Kleimengsel
CL	Klei met een lage plasticiteit
CH	Klei met een hoge plasticiteit
OL	Klei / Silt, gemengd met organisch materiaal, lage plasticiteit
OH	Klei / Silt, gemengd met organisch materiaal, hoge plasticiteit
PT	Veen

TABEL A: HOOG TERREIN, NAT SEIZOEN. GRONDWATER DIEPER DAN 120cm (OF >20CM VORST)

USCS	0,07	0,13	0,20	0,26	0,32	0,39	0,45	0,52	0,58	0,65	0,71	0,78	0,84	0,91	0,97	1,04	1,10	1,17	1,23
GW	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
GP	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
SW	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
SP	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
GM	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
CH	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
SM	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
GC	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
SC	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
MH	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
CL	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
ML	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
OL	GEEN GEGEVENS																		
OH	GEEN GEGEVENS																		
PT	GEEN GEGEVENS																		

TABEL B: LAAG TERREIN, NAT SEIZOEN. GRONDWATER NIET DIEPER DAN 120cm (OF 5-20CM VORST)

USCS	0,07	0,13	0,20	0,26	0,32	0,39	0,45	0,52	0,58	0,65	0,71	0,78	0,84	0,91	0,97	1,04	1,10	1,17	1,23
GW	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
GP	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
SW	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
SP	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
SC	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
GC	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
CH	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
MH	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
SM	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
CL	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
GM	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
ML	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
OL	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
OH	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
PT	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++

TABEL C: LAAG TERREIN, BODEM VERZADIGD MET GRONDWATER (OF >15cm OPDOOI)

USCS	0,07	0,13	0,20	0,26	0,32	0,39	0,45	0,52	0,58	0,65	0,71	0,78	0,84	0,91	0,97	1,04	1,10	1,17	1,23
GW	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
GP	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
SW	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
SP	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
SC	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
GC	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
MH	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
CL	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
SM	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
GM	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
ML	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
OL	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
OH	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
PT	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++

Figuur 43: Tabellen van de IK 5-131. Van boven naar beneden: Tabel A, Tabel B en Tabel C.

Bijlage III: Samenvattingen

Hieronder zijn de samenvattingen te vinden van de in dit rapport behandelde onderzoeken naar off-road routeberekeningsmodellen in GIS.

Creating a spatial analysis model for generating composite cost surfaces to depict cross country mobility in natural terrain (Grogan, 2009).

Understanding and visualizing terrain is fundamentally important to military operations. The dynamic nature of spatiotemporal effects in complex natural systems creates unique and ever changing terrain characteristics. For units operating in natural terrain environments, understanding how these conditions will affect Cross Country Mobility (CCM) in vehicles is critical for real world decision making. This project developed a spatial analysis model in a geographical information system for generating composite cost surfaces to depict vehicle mobility in natural terrain features based on the CCM criteria defined in the US Army Field Manual 5-33. The result modernizes the traditional Army method of using mylar overlay techniques to create composite CCM maps and allows continuously varying parameters. The user can incorporate important temporal and seasonal variables such as wet versus dry conditions to modify mobility cost based on current operational parameters. The thematic data layers will then be optimized using smoothing algorithms and combined to create weighted composite CCM cost surface data. The cost surfaces provide a basis for applied spatial analysis to create cost distances to determine least cost paths and for generating semantic data which depict avenues of approach, key terrain, barriers/obstacles, and chokepoints. The model provides a standardized, yet flexible, application which can be applied to any area of interest and customized to suit the user's intended application. The output cost surface data will provide military units with a clear depiction of mobility within their operational area and can be combined with ancillary vector data to produce hard copy cartographic outputs for field dissemination. Non-military users can apply the model to provide base data regarding vehicle mobility for search and rescue operation, public land management, and environmental impact assessment.

A GIS-based Vehicle Mobility Estimator for Operational Contexts (Hohmann Et al., 2013).

A vehicle mobility estimator has been developed to produce decision aid maps for projecting civil or military forces on operational theatres. Based on exploitation of classical geographical sources (e.g. digital elevation models, optical images, and vector databases), the system computes speed maps for different kinds of vehicles moving both on-road and off-road. Such computations are realized through a ground-vehicle interaction module that estimates the vehicle performance for experimental results, numerical simulations and empirical relationships. The system's architecture is built using a GIS interface that manages the data, the computation and the presentation layers. An

operational version of this tool has been tested and validated on several operational theatres in France and in northern Africa. The results show good agreement between the predicted mobility performance of various vehicles and those observed on the field. A case study is presented to illustrate the mobility maps and demonstrate their relevance in the decision-making chain depending on different climate contexts. A short application to itinerary optimization is presented as a promising future application.

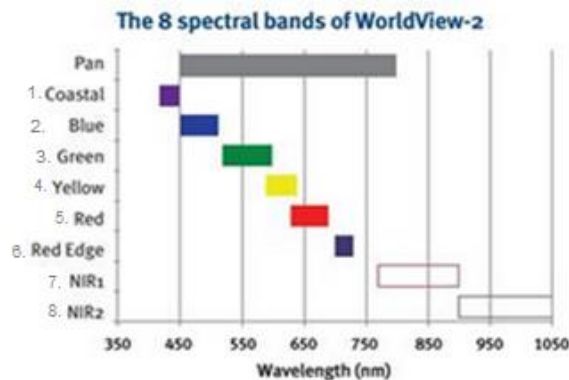
A GIS-based simulation model for terrain tractability (Suvinen, 2005).

The paper describes a concept for a GIS-based terrain tractability model and an optimal off-road routing. The general structure of the model is based on an object model which uses the cost surface technique to describe actual conditions in the terrain. The cost surface is a kind of mobility index and it is based, e.g., on vehicle, wheel, terrain, tree coverage, road information in objects. A regular raster analysis is used to determine alternative routes in different conditions. It has been shown that the adequate number of useful parameters can be found from national level digital maps to support off-road analyses.

Bijlage IV: Gebruikte (geografische) informatie

WorldView-2 beelden

In Figuur 44 staan de banden van de WorldView-2 weergegeven.



Figuur 44: De banden van de WorldView-2 opnamen (Satellite Imaging Corporation, 2013).

Datum:	28-09-2013
Resolutie:	5,0 m x 5,0 m
Spatial reference:	GCS_WGS_1984

Luchtfoto

Datum:	2007
Spatial reference:	WGS_1984_UTM_zone_32N

Mobility Database v0.1

Is een door het ministerie van Defensie gecreëerd Excel bestand met terreinbegaanbaarheid berekeningen van verschillende voertuigtypen. In het bestand is de theoretische onderbouwing van de verschillende berekeningen te achterhalen. De gebruikte database is een concept versie uit 2011. Er is nog geen latere versie beschikbaar.

AHN1

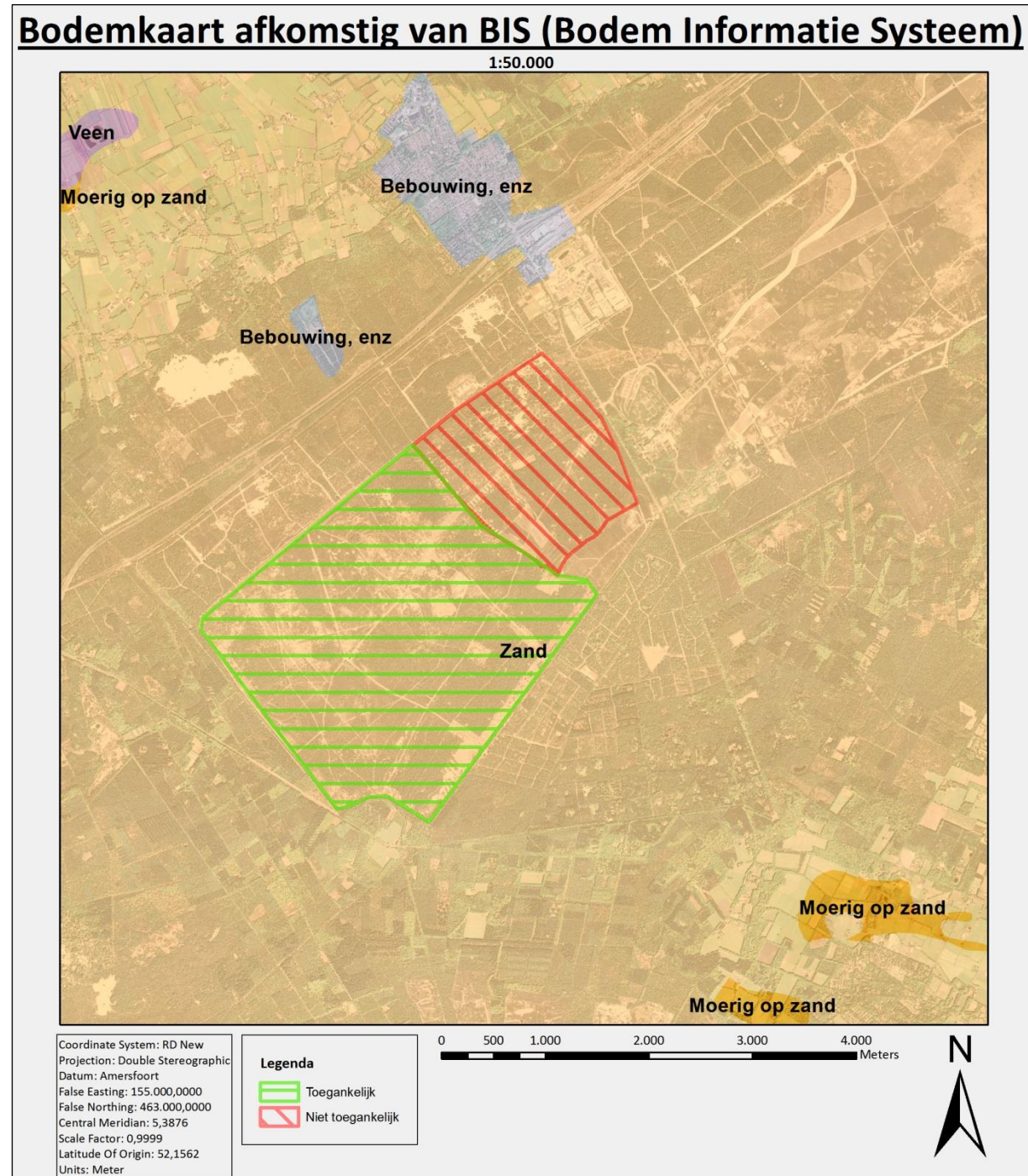
Datum:	05-2007
Resolutie:	5,0 m x 5,0 m
Spatial reference:	Rijksdriehoekstelsel
Hoogte eenheid:	cm

AHN2

Datum:	09-2013
Resolutie:	0,50 m x 0,50 m
Spatial reference:	Rijksdriehoekstelsel
Hoogte eenheid:	m

Bodemkaart Nederland afkomstig van het Bodem Informatie Systeem

Voor de bodemkaart is gebruik gemaakt van het Bodem Informatie Systeem (BIS). De kaart heeft een schaal van 1:50.000. De kaart is gedateerd van 2006 en is gratis verkrijgbaar op www.bis.nl. Het BIS wordt bijgehouden door de universiteit van Wageningen. In Figuur 44 is de gebruikte bodemkaart te vinden.



Figuur 45: Bodemkaart over de luchtfoto van het oefengebied weergegeven.

