

# Visuele interpretasie van ASTER-satellietdata, Deel I: Geologiese kartering in die Wieg van die Mensdom- wêrelderfenisgebied

*Visual interpretation of ASTER satellite data, Part 1: Geologic mapping in the Cradle of Humankind World Heritage Site*

**HJ VAN NIEKERK**

Departement Omgewingswetenskappe  
Posbus 392, Unisa, Pretoria, 0003, Suid-Afrika  
vniekhj@unisa.ac.za

**LA SANDHAM**

Geografie en Omgewingstudies  
Skool vir Omgewingswetenskappe, Noordwes-Universiteit  
Privaatsak X6001, Potchefstroom, 2520, Suid-Afrika  
luke.sandham@nwu.ac.za



Elna van Niekerk



Luke Sandham

**ELNA (HJ) VAN NIEKERK** is tans 'n dosent by die nuut-gestigte Departement van Omgewingswetenskappe aan die Universiteit van Suid-Afrika. Sy het haar BSc-graad aan die Universiteit van Stellenbosch behaal en haar honneursgraad *cum laude* verwerf aan die destydse Potchefstroomse Universiteit vir CHO (tans die Noordwes-Universiteit). Sy het haar MSc-graad ingedien by die Universiteit van die Witwatersrand en was mede-outeur van twee wetenskaplike publikasies op die terrein van omgewingsgeologie. Haar navorsingsbelangstellings fokus op omgewingsgeologie en die Suid-Afrikaanse geologiese erfenis.

**ELNA (HJ) VAN NIEKERK** is a lecturer at the newly established Department of Environmental Sciences at Unisa. She obtained a BSc at the University of Stellenbosch and the BSc Honours *cum laude* at the Potchefstroom University for CHE (now the North-West University). Her MSc dissertation in Environmental Science is currently under examination at the University of the Witwatersrand. She is the co-author of two scientific papers in environmental geology and her current research interests are focused on environmental geology and the South African geological heritage.

**DR LUKE SANDHAM** is tans 'n senior lektor in Geografie en Omgewingsbestuur by die Skool vir Omgewingswetenskappe aan die Noordwes-Universiteit, Potchefstroom. Hy het die volgende grade behaal aan die voormalige RAU, Johannesburg: BSc Ed, MSc en PhD (Geografie). Sedert hy in 1987 aangesluit het by die Noordwes-Universiteit het hy onderrig gegee in Klimatologie, Filosofie van Geografie, Afstandwaarneming, Geografiese tegnieke en Omgewingsbestuur. Sewe en twintig Magisterkandidate het reeds onder sy leiding afstudeer en 'n verdere nege voltooi tans hul studies. Hy is mede-outeur van elf wetenskaplike artikels en het 26 voordragte by plaaslike en internasionale konferensies gedoen. Sy navorsingsbelangstelling is tans hoofsaaklik in Omgewingsinvloedsbepaling.

**DR LUKE SANDHAM** is currently a senior lecturer in Geography and Environmental Management in the School of Environmental Sciences at the North-West University, Potchefstroom. He obtained the following degrees from the former RAU, Johannesburg: BSc Ed, MSc and PhD (Geography). Since his appointment at the North-West University in 1987 he has taught Climatology, Philosophy of Geography, Remote sensing, Geographical techniques and Environmental Management at first year to Master's level. Twenty seven Master's students have completed dissertations under his supervision and he is currently supervising the studies of a further nine candidates. He is the co-author of eleven articles in scientific journals and 26 presentations at local and international conferences. His current research interest is mainly in Environmental Impact Assessment.

**ABSTRACT*****Visual interpretation of ASTER satellite data, Part 1: Geologic mapping in the Cradle of Humankind World Heritage Site***

Since the first earth observing satellite was launched in 1972, remote sensing has become a powerful tool in the arsenal of geoscientists. This satellite became known as Landsat 1 and carried the Multispectral Scanner (MSS) delivering imagery at a spatial resolution of 80, and spectral resolution from blue to near infrared. Ongoing satellite and sensor development to the end of the century produced the Landsat Thematic Mapper (TM) with improved spatial and spectral resolution, as well as the SPOT series of satellites delivering the highest spatial but limited spectral resolution. These developments culminated in the SPOT 4 (1998) and Landsat Enhanced Thematic Mapper (1999) sensors. While Landsat ETM in particular provided much improved spatial and spectral resolutions, on the basis of which a large amount of geoscientific remote sensing was conducted world wide, the data did not provide adequate spectral and spatial sensitivity to be optimally effective for geological mapping at the local scale. On 18 December 1999 the Terra platform was launched, carrying five remote sensing instruments, including ASTER (Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer). ASTER consists of three separate instrument subsystems, each operating in a different spectral region, and using separate optical systems. These are the Visible and Very Near Infrared (VNIR) subsystem with a 15m-spatial resolution, the Short Wave Infrared (SWIR) subsystem with a 30m-spatial resolution and the Thermal Infrared (TIR) subsystem with a 90m-spatial resolution. ASTER effectively offers an improvement on Landsat MSS, Landsat TM, Landsat ETM+ and SPOT spectral and spatial resolutions. Given the paucity of published research on geological remote sensing at the local scale in South Africa, and particularly on the use of ASTER for geological mapping in South Africa, it is imperative that the value of ASTER be investigated. This article reports on the improved detail and scale achieved in the mapping of litho-stratigraphy, geological structures and mining-related features by the visual interpretation of processed ASTER images. ASTER imagery obtained from the EOS website was subjected to a range of image enhancement and analysis techniques including colour composites, band ratios, normalised difference indices, regression and decorrelation, in order to obtain optimal visual interpretability. Eight images thus obtained could be used for visual analysis, and it became evident that litho-stratigraphy, faults, fracture zones and elements of the regional seam system, as well as remnants of mining activities, were readily identifiable. Some of these were in accordance with the most recent and accurate geological map of the area, but many of them had apparently not been mapped. These features were annotated and were verified by field checks. In all cases the accuracy of detection and location from satellite imagery was confirmed on the ground. The improved detail and accuracy obtained by visual interpretation of processed ASTER satellite data for mapping a section of the Cradle of Humankind World Heritage Site demonstrated the potential value of this data for a variety of other geoscience applications. It appears that the improved accuracy can be ascribed jointly to the higher spatial and spectral resolution provided by ASTER data.

**KEY CONCEPTS:** Remote sensing; ASTER; Landsat; satellite images; spatial resolution; spectral resolution; digital image processing; visual interpretation; geological mapping; Cradle of Humankind World Heritage Site.

**TREFWOORDE:** Afstandwaarneming; ASTER; Landsat; ruimtelike resolusie; spektrale resolusie; satellietbeelde; digitale beeldverwerking; visuele interpretasie; geologiese kartering; Wieg van die Mensdom-wêrelderfenisgebied.

## OPSOMMING

Satelliet-afstandwaarneming het 'n kragtige instrument in die geowetenskaplike navorsingsarsenaal geword sedert die eerste van die aard-observasiesatelliete in 1972 gelanseer is, maar die effektiwiteit daarvan is egter ontoereikend as gevolg van die beperkte spektrale en ruimtelike sensitiviteit. Op 18 Desember 1999 is die Terra-platform in bedryf gestel met vyf afstandwaarnemingsinstrumente, onder andere ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). ASTER bestaan uit drie afsonderlike instrument-substelsels, wat met behulp van aparte optiese stelsels elk in 'n ander spektrale domein funksioneer, naamlik die Sigbare en Baie Naby-Infrarooi substelsel met 15m-ruimtelike resoluksie, die Kortgolf-Infrarooi substelsel met 30m-ruimtelike resoluksie en die Termiese-Infrarooi substelsel met 90m-ruimtelike resoluksie. ASTER bied beter spektrale resoluksie en ruimtelike resoluksie as Landsat MSS, Landsat TM, Landsat ETM+ en SPOT. Hierdie artikel doen verslag oor die verbeterde kartering van litostratigrafie, geologiese strukture en mynbouverwante verskynsels wat met die visuele interpretasie van verwerkte ASTER-satellietbeelde behaal is. Die verbeterde kartering in die Wieg van die Mensdom-wêrelderfenisgebied bevestig die potensiaal van ASTER-satellietdata vir verdere toepassings deur geowetenskaplikes.

## INLEIDING

Satelliet-afstandwaarneming het 'n kragtige instrument geword in die geowetenskaplike navorsingsarsenaal sedert die eerste *Earth Resource Technology Satellite* (ERTS-1) in 1972 gelanseer is.<sup>2,12</sup> Die bruikbaarheid van ERTS-1 (later herdoop tot Landsat 1 Multispektrale Aftaster (Multispectral Scanner – MSS) is egter ontoereikend vir geologiese kartering op lokale skale as gevolg van die beperkte ruimtelike resoluksie (80m), asook vanweë die beperkte spektrale resoluksie (0.5 tot 1.1µm) van die data.

Danksy die implementering van die Landsat 4 en Landsat 5 Tematiese Karteerder (*Thematic Mapper – TM*) in 1982 en 1984 onderskeidelik,<sup>12,16</sup> word data gelewer wat vir geowetenskaplikes veel bruikbaarder is omdat dit 'n verbeterde spektrale resoluksie (1.55 tot 2.35µm), sowel as 'n verbeterde ruimtelike resoluksie (30m) bevat (tabel 1).<sup>23</sup>

Die SPOT 1, 2, 3 en 4-reeks satelliete is onderskeidelik in 1986, 1990, 1993 en 1998 in bedryf gestel.<sup>12</sup> Hierdie satelliete lewer data in vier spektrale bande met spektrale resoluksies van 0.5 tot 0.89µm teen 'n ruimtelike resoluksie van 20m. 'n Panchromatiese band met 'n ruimtelike resoluksie van 10m en 'n spektrale resoluksie van 0.51 tot 0.73µm is ook beskikbaar (tabel 1).<sup>23</sup> Hierdie band kan gebruik word om die ander bande te hermonster na "pseudo" 10m-ruimtelike resoluksiebeelde wat van hierdie satellietbeelde as sodanig 'n waardevolle databron vir geowetenskaplikes maak. Die spektrale resoluksie van hierdie satellietbeelde is egter steeds ontoereikend vir geologiese kartering op plaaslike skale.

In 1999 het die *National Aeronautics and Space Agency* (NASA) die Landsat 7 Gevorderde Tematiese Karteerder (*Enhanced Thematic Mapper – ETM*)<sup>12</sup> in bedryf gestel met 'n verbeterde spektrale resoluksie (tabel 1) bestaande uit drie sigbare bande (blou, groen en rooi), een Baie Naby-Infrarooiband (BNIR) en twee Kortgolf-Infrarooibande (KGIR) met 'n ruimtelike resoluksie van 30m. Dit bevat ook 'n Termiese-Infrarooiband (TIR) met 'n ruimtelike resoluksie van 120m (tabel 1)<sup>23</sup> en 'n panchromatiese band<sup>12</sup> teen 'n 15m ruimtelike resoluksie. Die Landsat 7 Termiese Infrarooiband is verder verdeel in onderskeidelik 'n hoë- en 'n laegreinband. Vir geowetenskaplike toepassings is hierdie satellietbeelde 'n verbetering op die eerste geslag TM-data, maar dit is steeds suboptimaal ten opsigte van die ruimtelike en spektrale resoluksie vir kartering op fynere skale. Die Landsat TM-satellietbeelde sal dus voldoende wees om litologie, plantegroeioptrone en habitats te karteer, maar vir gedetailleerde geologiese kartering is die 30m ruimtelike resoluksie nie voldoende nie.<sup>22</sup>

Die Terra-platform wat op 18 Desember 1999 gelanseer is, word dikwels as die vlagskip van die *Earth Observing System* (EOS) bestempel. Hierdie stelsel is een van die primêre komponente van die *Earth Science Enterprise* (ESE) wat deur NASA van stapel gestuur is. Die ESE is 'n internasionale aardwetenskaplike program wat ten doel het om die waarnemings, begrip en modelleringsvermoë daar te stel wat benodig word om die invloed van natuurlike en antropogeniese aktiwiteite op die aarde te bepaal. Die lewensverwagting van EOS se Terra-sending was ses jaar en dit word in die vooruitsig gestel dat dit opgevolg gaan word deur ander EOS-ruimtetuie met toepaslike moderne afstandwaarnemingstechnologie, sodat 'n globale datastel van 18-jaar opgebou kan word.<sup>5</sup>

Die Terra-platform is 'n omvattende sisteem wat vyf afstandwaarnemingsinstrumente insluit, naamlik CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System), MISR (Multi-Angle Imaging Spectro-Radiometer), MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectro-Radiometer), MOPITT (Measurements of Pollution in the Troposphere) en ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)<sup>12</sup> (tabel 2).

ASTER is die enigste instrument op die Terra-platform met 'n hoë ruimtelike resolusie (15m) en 'n hoë spektrale resolusie (15 bande tussen 0.45 en 12.5 $\mu$ m).<sup>12</sup> As sodanig, en saam met die ander sensors wat die aarde met growwer ruimtelike resolusies waarneem, kan dit beskou word as 'n "zoom lens for the other Terra instruments", en is dit dus van besondere waarde vir onder andere die kalibrasie en validasie van data.

## PROBLEEMSTELLING EN DOELWITTE

Alhoewel 'n groot hoeveelheid navorsing oor die gebruik van ASTER-data gepubliseer is,<sup>5</sup> is daar tot hede min navorsing gedoen oor geowetenskaplike toepassings van ASTER-data in Suidelike Afrika. Die waarde van syferkundige beeldklassifikasie van ASTER-data vir diskriminasie van litologie in onderskeidelik die Barbertonse groensteengordel<sup>13</sup> en die westelike grense van die Kalahari<sup>8</sup> is geëvalueer, terwyl die vermoë van ASTER ten opsigte van hidrotermiese veranderingsones in Namibië beproef is.<sup>19</sup> Daarbenewens is ASTER-data benut om MODIS branddata oor Suidelike Afrika te valideer.<sup>20</sup> Aangesien die beperkte hoeveelheid navorsing wat wel gedoen is deurgaans van syferkundige beeldanalise gebruik gemaak het, is dit duidelik dat daar 'n groot leemte bestaan ten opsigte van visuele analise van hoëresolusie ASTER-data vir geowetenskaplike toepassings. Met die verbeterde spektrale en ruimtelike resolusie en die geredelike toeganklikheid van ASTER-satellietbeelde is dit dus noodsaaklik om die waarde van visuele analise daarvan vir geologiese kartering in Suid-Afrika te ondersoek.

Die ondersoek waarop hierdie artikel gebaseer is, het gefokus op die mate waarin ASTER-data benut kan word om geologiese kartering te rugsteun deur die visuele herkenning en identifikasie van:

- Litostratigrafie, geologiese strukture en mynbouverwante verskynsels (onder andere uitskothope, sliksdamme, ensovoorts).
- Die voorbereiding van 'n gedetailleerde geologiese kaart (struktureel en stratigrafies).
- Die verifikasie en identifikasie van geïnterpreteerde geofisiese kenmerke.

Daar is meer bepaald gelet op die visuele identifikasie van geologiese struktuur binne die Wieg van die Mensdom-wêrelderfenisgebied (*Cradle of Humankind World Heritage Site*) en na omgewingsgeologiese probleme wat met mynbou (uitskothope) geassosieer kan word. Die navorsing waarop hierdie artikel gebaseer is, het deel gevorm van 'n groter projek waarin die differensiële ontstaan van fossieldraende grotte in die Wieg van die Mensdom-wêrelderfenisgebied ondersoek is.

## AGTERGRONDINLICHTING

Satellietdata is relatief goedkoop en geredelik beskikbaar, maar só uiteenlopend ten opsigte van spektrale en ruimtelike resolusie (tabel 1) dat dit van die uiterste belang is om eers die toepassings, probleme en take te bepaal alvorens enige satellietbeelde aangeskaf word. Dit verseker die doeltreffende benutting van data wat vir die spesifieke toepassing verkry of aangekoop word.<sup>22</sup>

**TABEL1:** Vergelykende spektrale en ruimtelike resolusies van Landsat-, SPOT- en ASTER-sensors se bande (datum van inbedryfstelling en ruimtelike resolusie/pixelgrootte in hakies)<sup>5,12,22,23</sup>

Spektrale resolusie (mm)	Spektrale bande van die sensors				Eienskappe van spektrale bande
	Landsat MSS (1972) (80x80m)	Landsat TM (1982) & ETM+(1984) (30x30m)	SPOT4 (1998) (20x20m)	ASTER (1999) (15x15m)	
0.45 – 0.52	1	1			Blou-groen. Maksimum-indringing in water, bruikbaar vir batimetriese kartering in vlakwater, sowel as onderskeiding tussen grond en plante-groei, en tussen blad- en nieblad-wisselende plante.
0.52 – 0.6	2	2	1	1	Groen. Pas piek van groenplantegroei weerkaatsing; bruikbaar om lewenskragtigheid van plantegroei te bepaal.
0.63 – 0.69	3	3	2	2	Rooi. Pas die bladgroen absorpsieband wat noodsaaklik is vir diskriminasie van plantegroeitipes.
0.76 – 0.9	4	4	3	3N en 3B	Baie Naby-Infrarooi (BNIR). Bruikbaar vir bepaling van biomassa-inhoud en kartering van kuslyne.
1.55 – 1.75		5	4	4	Kortgolf-Infrarooi (KGIR). Dui voginhoud van grond en plantegroei aan. Dring deur dun wolke. Goeie kontras tussen planttipes.
2.08 – 2.35		7		5, 6, 7 en 8	Kortgolf-Infrarooi (KGIR). Stem ooreen met absorpsieband veroorsaak deur hidroksiel-ione in minerale.
2.4				9	Kortgolf-Infrarooi (KGIR). Kan ysterryke karbonate waarneem.
8.1 – 8.6; 8.4 – 9.0 8.8 – 9.55				10, 11 en 12 (90 x 90m)	Termiese Infrarooi (TIR). Wolk-temperatuur kan bepaal word; veldbrande waarneembaar op nagbeelde.
10.4 – 12.5		6 (120x120m)		13 en 14 (90X90m)	Termiese Infrarooi (TIR). Oppervlak- en seevlaktemperatuur.
0.51 - 0.73		Panchromaties (15x15m) (slegs ETM+)	Panchromaties (10x10m)		Bruikbaar vir samesmelting van satellietbeelde om resolusie te verbeter.

“Pixel” verwys na die individuele roosterelemente waaruit ’n digitale satellietbeeld opgebou is. Dit is ’n verkorte weergawe van die Engelse woorde “picture element”.

Landsat 1-data bied voldoende spektrale sensitiviteit vir regionale geologiese kartering, maar is nie werklik ’n effektiewe instrument vir die geowetenskappe op plaaslike ruimtelike skale nie. Om groot opskuiwings te karteer, sal die Landsat Multispektrale Aftaster (MSS) 1:1,000,000 (swart/wit) satellietbeelde met ’n ruimtelike resoluë van 80m voldoende wees. Vir kom-analises is die MSS ook genoegsaam, maar vir die kartering van metasomatiese veranderinge wat met mineraalneeslae geassosieer word, sal ’n baie beter ruimtelike asook spektrale resoluë benodig word. Daarvoor is die Landsat MSS-satellietbeelde nie meer voldoende nie. Dit kan wel vir verkenning en identifisering gebruik word.<sup>22</sup> Nietemin is heelwat navorsing onderneem om die nutswaarde van die Landsatdata vir geologiese toepassings op die proef te stel. ’n Voorbeeld hiervan is waar ’n Landsat MSS kleur-infrarooisatellietbeeld van die Rampart-bergreeks in die VSA gebruik is om regionale verskuiwings tussen die Pikes-piek en Castle Rock op te spoor.<sup>22</sup>

Een van die meer suksesvolle projekte wat met behulp van Landsat TM-satellietbeelde uitgevoer is, was die petroleumeksplorasië van die Paradox-kom in Utah. Die navorsers het uit die literatuur ontdek dat die petroleumneeslae geassosieer word met Pennsylvania-algehoë wat op die grense van verskuiwingsblokke voorkom. Landsat-satellietbeelde is geïnterpreteer en gebruik om die regionale geologiese struktuur te karteer. Hierdie kaart is gebruik om die petroleum-reservoirs op te spoor.<sup>22</sup> In Suid-Afrika is ongekarteerde asbesuitskothoë suksesvol opgespoor met behulp van Landsat TM-data<sup>24</sup> en verwerkte Landsat TM-satellietbeelde is gebruik om die nathed van die Merriespruit-slikdam gedurende die 16 maande voordat die wal gebreek het, te klassifiseer. Hierdie resultate is vir die eerste keer as wetenskaplike bewyse in ’n hofsak aanvaar tydens die ondersoek na die sliedamramp by die Merriespruit-goudmyn in 1994.<sup>26</sup>

Indien detail betreffende litologie en stratigrafie gekarteer moet word, is die 20m-ruimtelike resoluë van SPOT se multispektrale satellietbeelde voldoende, maar die beperkte spektrale resoluë veroorsaak dat dit nie geskik is vir gedetailleerde geologiese kartering nie.<sup>22</sup> SPOT-satellietbeelde is egter wel suksesvol gebruik om die graniet-groensteengordel tussen die Murchison- en Sutherlandreeks op ’n regionale skaal te karteer<sup>27</sup> en om die omgewingsprosesse van die Okavangodelta in Botswana te bestudeer.<sup>18</sup>

Die ASTER-satellietbeeldinstrument is ontwikkel as ’n koöperatiewe poging tussen NASA en die Japannese Departement vir Internasionale Handel en Nywerheid. Dit bestaan uit drie afsonderlike instrument-substelsels, wat met behulp van aparte optiese stelsels elk in ’n ander spektrale gebied funksioneer, naamlik: die Sigbare- en Naby-Infrarooisubstelsel (SNIR), die Kortgolf-Infrarooisubstelsel (KGIR) en die Termiese Infrarooisubstelsel (TIR) (tabel 2).<sup>23</sup>

Die SNIR-substelsel bevat twee sigbare bande (groen en rooi) en een Baie Naby-Infrarooiband (BNIR) wat verder onderverdeel is in ’n nadirband (3N) en ’n terugkykende band (3B). Die nadirband verwys na ’n sensor wat die aardoppervlak loodreg waarneem. Hierdie konfigurasie maak dit moontlik om Digitale Terreinmodelle (DTMs) te skep. Die KGIR-substelsel funksioneer in ses Kortgolf-Infrarooi spektrale bande en die TIR-substelsel bestaan uit vyf bande in die Termiese Infrarooigebied<sup>12</sup> (tabel 1).

## STUDIEGEBIED WAT ONDERSOEK IS

Die studiegebied is geleë binne die Wieg van die Mensdom (figuur 1), wat in 1999 as wêrelderfenisgebied verklaar en as sodanig gelys is. Dit beslaan ’n gedeelte van Gauteng en die Noordwes-Provinsie van Suid-Afrika en is as een van Gauteng se “Blue IQ”-projekte geïdentifiseer. Die “Blue IQ”-projekte van Gauteng bestaan uit tien spesiale projekte wat ontwerp is om

**TABEL 2:** Sensors op die Terra-Platform<sup>12</sup>

Sensor	Algemene eienskappe	Hooftoepassings
ASTER (Kyk tabel 1)	Drie aftasters met 14 spektrale bande in die sigbare, BNIR, KGIR en TIR. Ruimtelike resolusie 15m – 90m	Bestudering van wolke, plantegroei, rotstipes en vulkane. Ook nuttig vir DTM's en verskaffing van hoëresolusiedata vir algemene sending-vereistes.
MISR	Vierkanaal CCD-opstelling Nege sighoeke.	Veelhoek-sigpunte van aardkenmerke. Wolk- en atmosferiese aerosoldata.
MOPITT	Drie NIR-bande	Meet CO <sub>x</sub> en metaan in die atmosfeer.
CERES	Twee breëband-aftasters	Meet stralingsvloei aan buiterand van atmosfeer om totale stralingsenergiebalans van die aarde te monitor.
MODIS	36-kanaal beeldspektrometer. 250m – 1km ruimtelike resolusie.	Veelvuldige landoppervlak- en oseaan-toepassings, wolkbedekking en eienskappe.

werksgeleentehede in hierdie gebiede te maksimaliseer en ekonomiese ontwikkeling te stimuleer.<sup>10</sup> Die Wieg van die Mensdom-wêrelderfenisgebied word geologies onderlê deur gesteentes van die Malmani-Subgroep (Chuniespoort/Pretoria-Groep, Transvaal-Supergroep), bestaande uit die Malmani-Dolomiete en die Swartrif-Kwartsiete. Hierdie lae lê diskordant op die noordwestelike rand van die Halfway House-Granietkoepel en word weer oorlê deur gesteentes van die Pretoria-Groep.<sup>6</sup> Sedert 1895 is die Malmani-Dolomiete deur verskeie wetenskaplikes bestudeer,<sup>25</sup> wie se ondersoek geleidelik tot 'n beter begrip van die ontstaan en voorkomsmodus van die Dolomiete. Die gevolge van deformatsie van die Dolomiete sluit verskuiwings, frakture en plooië in, sowel as die indringing van dolerietgange.

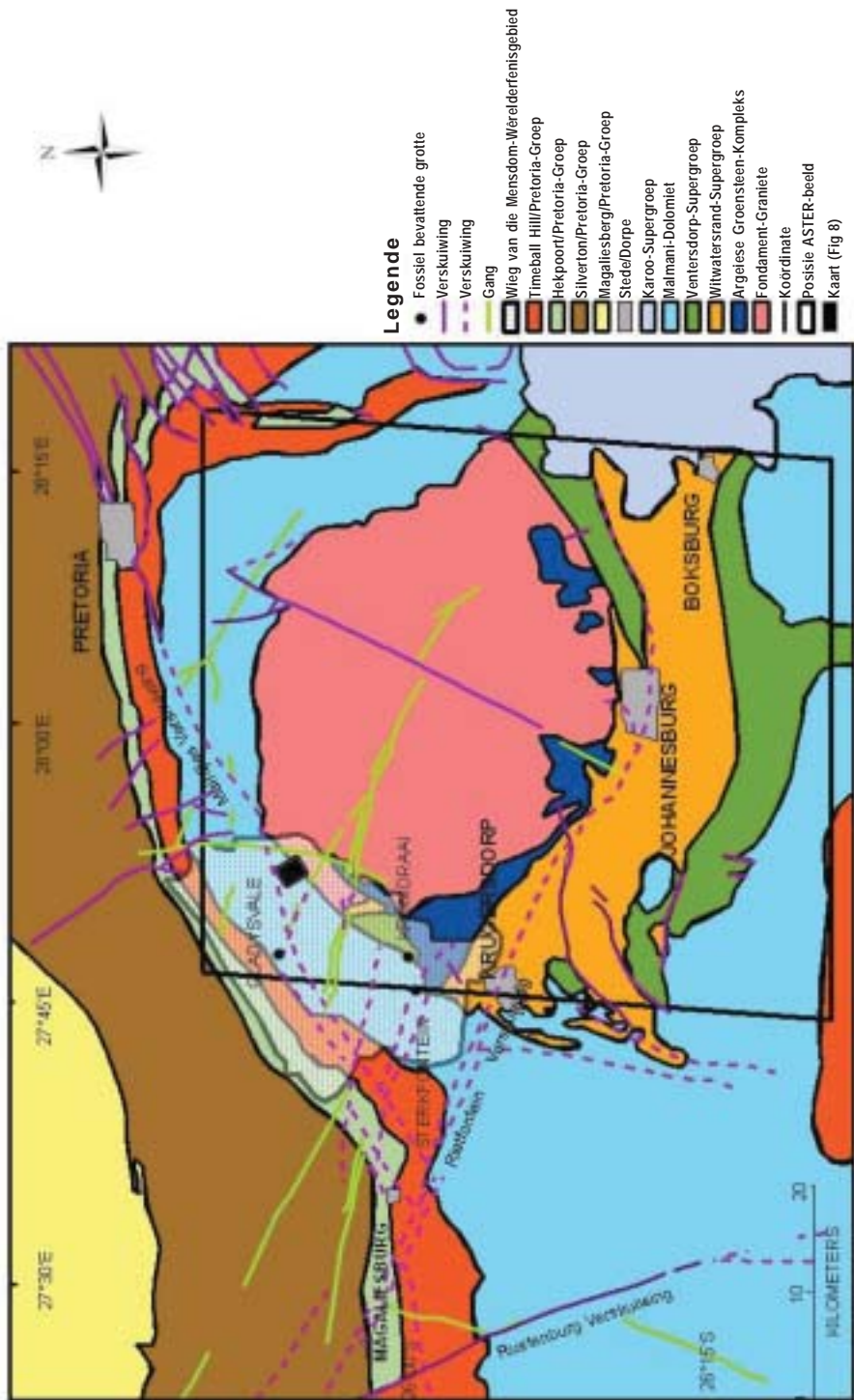
In 2001 het (mnr. A.M.) Obbes<sup>21</sup> van die Raad vir Geowetenskappe (voormalige Geologiese Opname van Suid-Afrika) 'n sorgvuldige geologiese studie van die Malmani-Dolomiete in die Wieg van die Mensdom-wêrelderfenisgebied voltooi. Sy werk het verskeie aspekte van die Dolomiete aangespreek, maar 'n beduidende aantal verskuiwings, frakture en liniêre strukture wat nie op sy gepubliseerde geologiese kaart verskyn nie, is sedertdien geïdentifiseer. Omdat die Malmani-Dolomiete 'n ryk ondergrondse waterbron vir groot dele van Suid-Afrika vorm, is dit noodsaaklik dat hierdie geologiese strukture verder bestudeer word ten einde hulle invloed op die grondwateromgewing te bepaal.<sup>10</sup>

As deel van 'n voortgaande ondersoek na die geologiese struktuurkenmerke van die Wieg van die Mensdom-wêrelderfenisgebied, word 'n 40 km<sup>2</sup>-gedeelte van die wêrelderfenisgebied tans gekarteer en bestudeer. Dit vorm deel van 'n groter multidissiplinêre studie van die geheel van die Wieg van die Mensdom-wêrelderfenisgebied.

## MIDDELE EN METODEDES

Drie ASTER vlak 1B-satellietbeelde uit die tydperk 1999 tot 2002 was beskikbaar vir onttrekking vanaf die EOS-datasentrum se webwerf. ASTER-prosesseringsvlak 1B beteken dat hierdie data aan 'n mate van voorafprosessering onderworpe was. Dit behels die volgende regstellings deur die EOS-sentrum alvorens die ASTER 1B-data aan gebruikers gelewer word: herstel verlore lyne, herstel lynstrepe, herstel posisionering van lyne, filter van toevallige geraas en herstel van sistematiese geometriese

GEOLOGIE VAN DIE STREEK



Figuur 1: Liggingkaart.



distorsies. Daarnaas word basiese radiometriese en geometriese korreksies op die rou data uitgevoer, met die gevolg dat die ASTER 1B-data ook nie ongewenste kolletjies en vlekke bevat nie en reeds tot 'n standaardkaartprojeksie geoverwys is.<sup>12</sup> Geoverwysing is 'n ander uitdrukking vir die term geokodering, wat ook noodsaaklik is vir Geografiese Inligtingstelsel (GIS)-prosesse.<sup>23</sup>

'n Vereiste vir die gekose satellietbeeld was dat dit oor Johannesburg en sy direkte omliggende area moes strek om te verseker dat 'n gedeelte van die studiegebied binne hierdie satellietbeeld val. Aangesien slegs een van hierdie satellietbeelde 'n gedeelte van die Wieg van die Mensdom-wêrelderfenisgebied bevat het, is daardie satellietbeeld vir alle verdere analyses gebruik (figuur 1).

Die data het bestaan uit die gekose ASTER-satellietbeeld, 'n lugfoto en bestaande geologiese kennis van die studiegebied. Analise is gedoen met behulp van TNTmips-beeldverwerkingsprogrammatuur en 'n Pentium-dataverwerker.

## **ANALISE VAN DIE ASTER-DATA**

Die analise is deur middel van beeldverwerking gedoen. Daar bestaan drie hoof-funksionele kategorieë van beeldverwerking:

- Beeldrestourasie, wat kompenseer vir datafoute, geraas en geometriese distorsies wat met die aftasting-, opname- en terugspeelaksies ontstaan.
- Beeldverbetering wat die visuele invloed van die satellietbeeld op die interpreteerder sodanig verander dat die inligtingsinhoud verbeter.
- Beeldonttrekking wat die besluitnemingsvermoë van die rekenaar benut om pixels te herken en te klassifiseer op grond van hulle spektrale eienskappe.<sup>23</sup>

### **Beeldrestourasie**

Aangesien ASTER 1B-data aangeskaf is, het die EOS-sentrum reeds 'n groot gedeelte van die regstellings gedoen. Daarna is bande 4 tot 9 na band 1 hermonster om satellietbeelde met 'n pseudo-ruimtelike resolusie van 15m te lewer. Die ASTER-data lewer dus 'n produk met beter spektrale resolusie en beter ruimtelike resolusie as Landsat ETM+-satellietbeelde (behalwe vir die blou band) en SPOT-satellietbeelde.

### **Beeldverbetering en beeldonttrekking**

'n Verskeidenheid beeldverwerkingsprosedures (uit die drie hoof-funksionele kategorieë hierbo) is op die satellietbeeld toegepas om visuele interpretasie te bevorder met die fokus op geologiese kartering en ander geowetenskaplike eienskappe. Verdere tegnieke wat aangewend kan word om verwerkte satellietbeelde te skep, is onder andere ruimtelike frekwensiefilters, kontrasstrekking, kleurintensiteitversadiging (KIV) kleursamestellings, en vele meer.<sup>9</sup> Alhoewel die meeste van hierdie tegnieke wel uitgevoer is, word slegs 'n beperkte aantal tegnieke van wisselende kompleksiteit vir bespreking in hierdie artikel uitgesonder. Hierdie werkwysie is gevolg aangesien die doel van hierdie studie die kartering van geologiese verskynsels behels het, en nie 'n ondersoek was na die relatiewe meriete van satellietbeeldverwerkingsprosedures nie.

### **Analise metodologie**

Die doelstellings, soos hierbo genoem, is bereik deur die toepassing van 'n reeks beeldverwerkingsprosesse, onder andere atmosferiese korreksies en geokodering van die satellietbeelde, beeldhistogramme, kontrasversterking, kleursamestellings, bandverhoudings, regressie-analise en dekkorrelasie-analise met 'n daaropvolgende visuele interpretasie van die satellietbeelde wat so geskep is.

## ***Rooi-Groen-Blou (RGB) Foto-Infrarooikleursamestelling***

Deur veelvuldige bande opties te oorlê (gewoonlik drie bande) word 'n kleurbeeld saamgestel volgens die beginsels van kleurbyvoeging. Indien een of meer van die bande nie in een van die primêre visuele kleurbande waargeneem is nie, byvoorbeeld 'n infrarooiband, is dit 'n vals-kleurbeeld. Sulke kleurbeelde het besondere bruikbaarheid vir 'n verskeidenheid toepassings, onder andere vir oes-toestandopnames, gewas-identifikasie, afbakening van vloedvlaktes, bodembenuutingsanalise, grondkartering, bestudering van informele nedersettings, skadebepaling by plantegroei, vulkaniese kenmerke, water-turbiditeit en die kartering van vleilande.<sup>3,4,17</sup>

In hierdie studie is 'n foto-infrarooi vals-kleurbeeld geskep deur middel van die sigbare groen (band 1), die sigbare rooi (band 2) en die Baie Naby-Infrarooi (band 3N) (figuur 2). Kontrasstrekking is uitgevoer met 'n outomatiese normalisering om die visuele interpreteerbaarheid van die satellietbeeld te verbeter.

### ***Bandverhoudings***

Soms ontstaan verskille in helderheidswaarde van dieselfde oppervlaktipes as gevolg van 'n verskeidenheid faktore soos onder andere seisoenale veranderinge in die sonskyn-invalshoek en -intensiteit, skadu's, topografiese helling en aspek. Hierdie toestande belemmer die interpretasie van sulke satellietbeelde.<sup>11</sup> Dit kan uitgeskakel word deur die verhouding tussen twee spektrale bande per pixel te bereken, sodat die verskille as gevolg van bogenoemde faktore nie in die voortvloeiende satellietbeeld sigbaar is nie en die interpreteerbaarheid van die satellietbeeld as sodanig dus verhoog word.

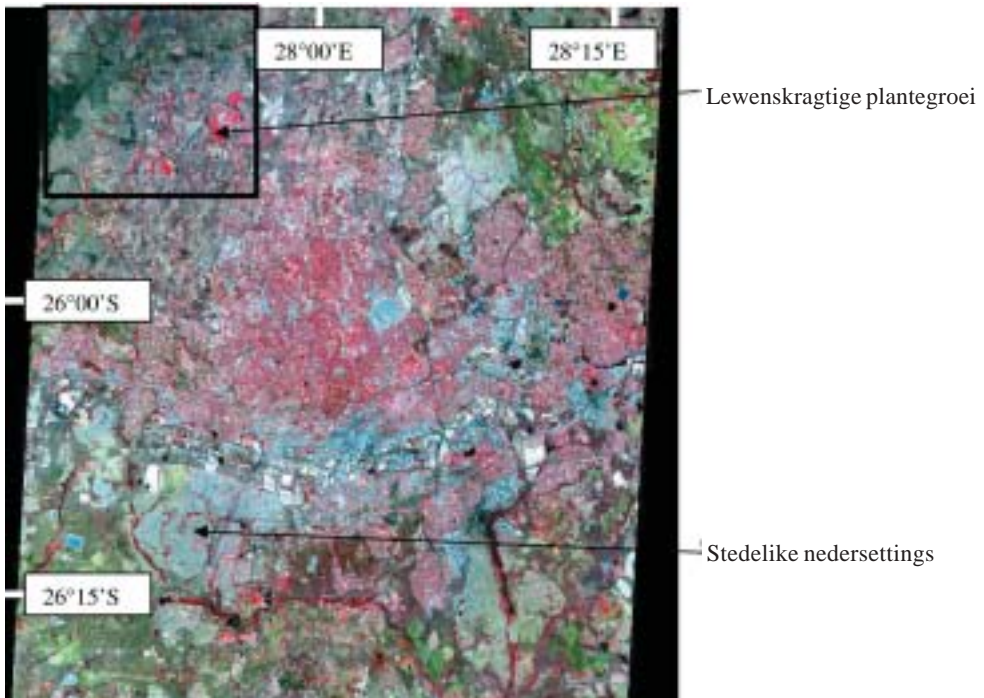
In hierdie studie is 'n bandverhouding geskep deur gebruik te maak van die volgende TNTmips-algoritme:  $C = A/B \times \text{skaalfaktor}$ . 'n Verhouding van band1/band 2 vertoon die groenheid van plantegroei, terwyl 'n bandverhouding van band3N/band2 helder vertoon waar plantegroei volop is, en donker waar die plantegroei skaars is. 'n Verhouding van band 2/1 vertoon yster, en 'n verhouding van bande 4/9 reflekteer waar die karbonate soos dolomiet volop is, en absorbeer waar die karbonate laag is. 'n Verhouding van bande 4/7 toon hoë kleikonsentrasies.

In die RGB-beeld van verhoudings 2/1-4/9-3/2 vertoon die dolomiet rooi en die plantegroei groen. Deur middel van kontrasversterking van hierdie satellietbeeld word die ysteranomalieë in helder geel sigbaar (figuur 3).

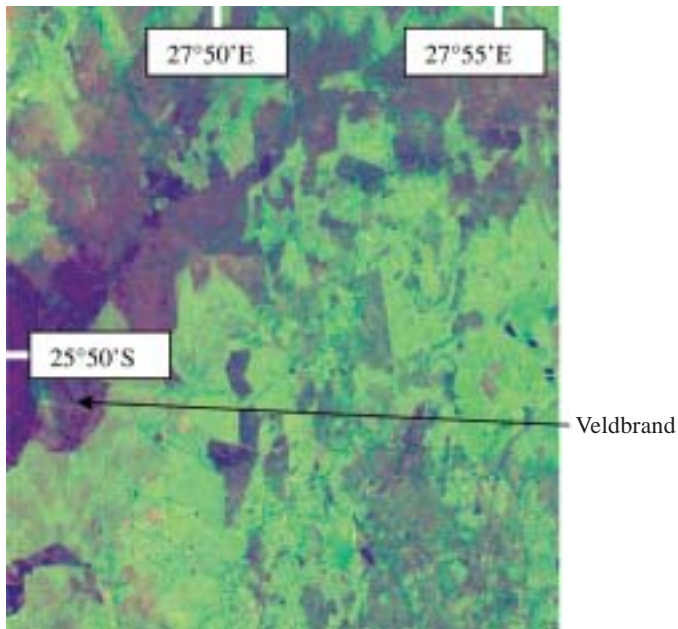
### ***Genormaliseerde Verskil-indekse (GVI)***

Gespesialiseerde bandverhoudings staan bekend as indekse. Drie sulke gespesialiseerde Genormaliseerde Verskil-indekse is saamgestel deur middel van die TNTmips-algoritme:  $(A - B) / (A + B) \times \text{skaalfaktor}$ . Die Genormaliseerde Verskil Plantegroei-Indeks (GVPI) word bereken as  $(3N - 2) / (3N + 2) \times 100\%$ . Die Genormaliseerde Verskil Klei-Indeks (GVKI) se formule is  $(4 - 9) / (4 + 9) \times 100\%$ . Die Genormaliseerde Verskil Yster-Indeks (GVYI) word gewoonlik saamgestel uit die rooi en blou bande van 'n datastel. Dit kan egter nie so gedoen word met ASTER-data nie, weens die afwesigheid van 'n blou band. Derhalwe word dit bereken as  $(2 - 1) / (2 + 1) \times 100\%$  (figuur 4).

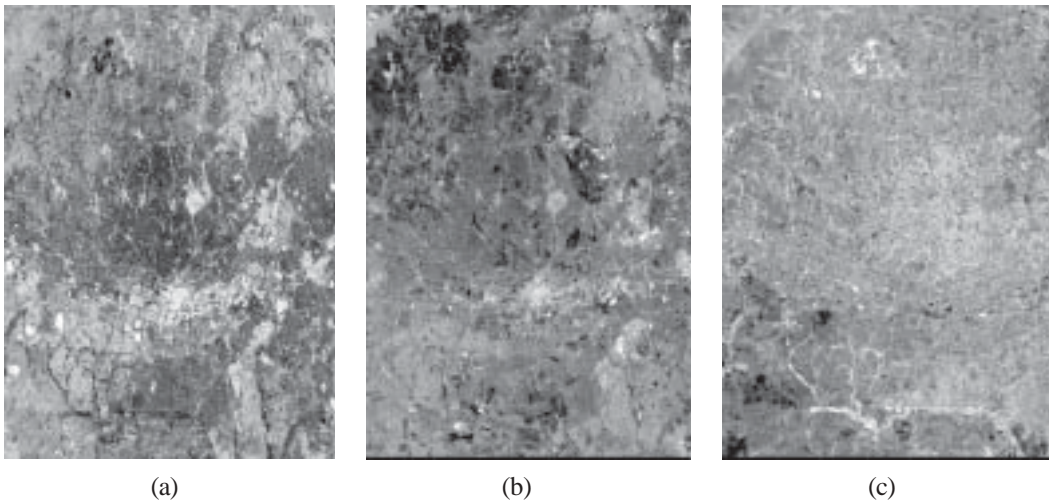
'n Baie interessante RGB-beeld is geskep deur 'n kleursamestelling van bogenoemde drie indeksebeelde te maak (figuur 5).



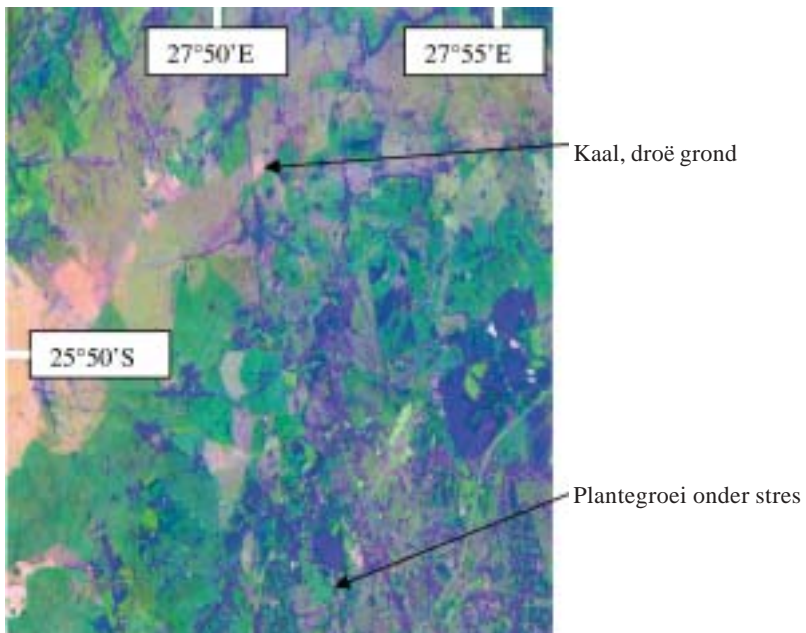
**Figuur 2:** RGB foto-infrarooi valspleurbeeld van die atmosferies gekorrigeerde ASTER-bande 3N-2-1.



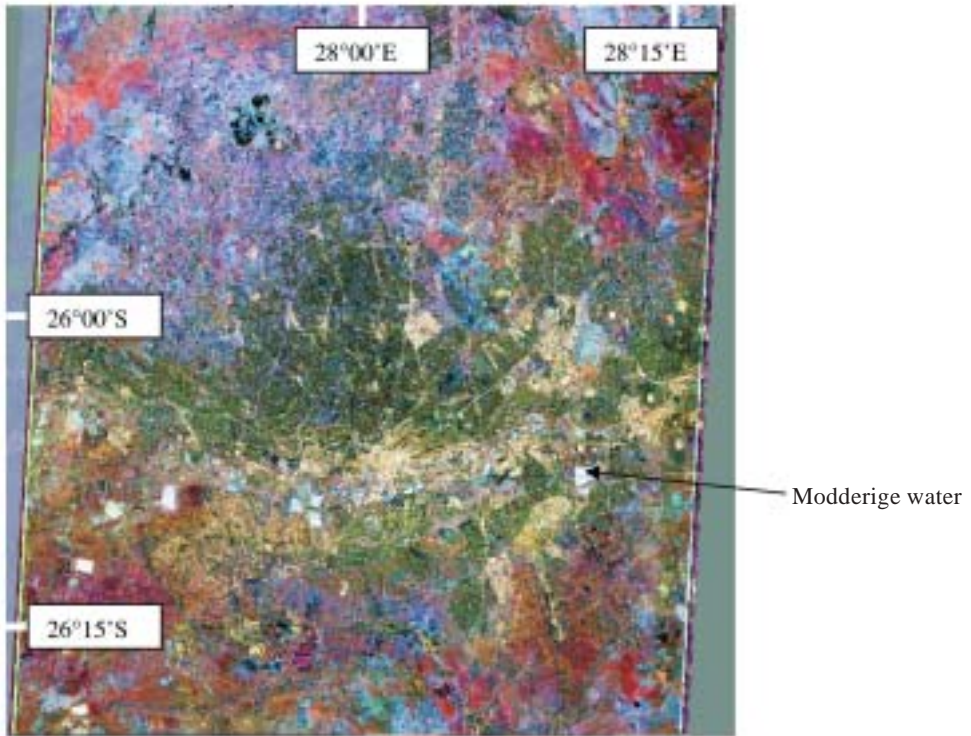
**Figuur 3:** RGB beeld van verhoudings 2/1-4/9-3/2. Slegs die noordwestelike hoek van die beeld waar die studiegebied geleë is, word getoon.



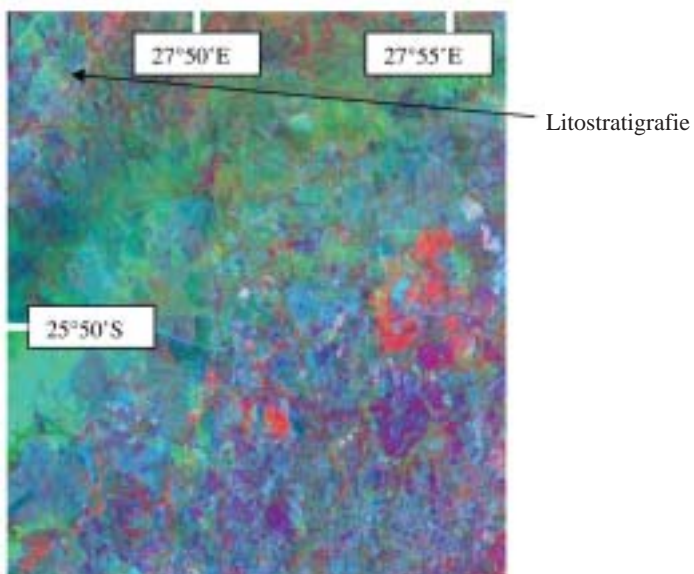
**Figuur 4:** Genormaliseerde Verskil-indekse vir (a) plantegroei, (b) klei en (c) yster. Die atmosferies-gekorreieerde hermonsterde ASTER-bande is gebruik.



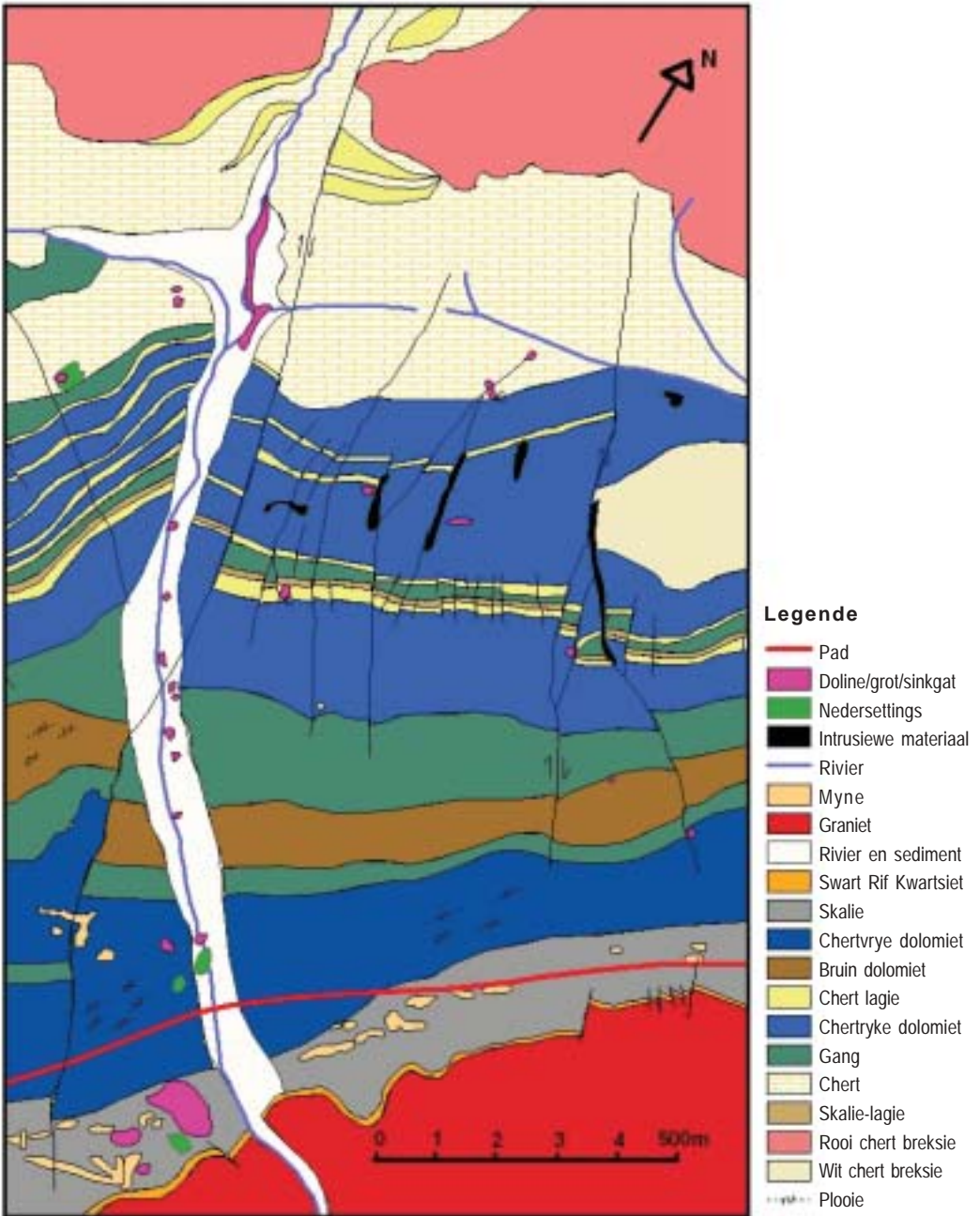
**Figuur 5:** RGB geskep met behulp van die GVIs vir klei, plantegroei en yster. Hierdie figuur toon slegs die noordwestelike hoek van die beeld waar die studiegebied geleë is.



*Figuur 6: RGB-beeld saamgestel deur regressie-analise van bande 4-7-9.*



*Figuur 7: Omgekeerde beeld van die RGB-beeld van hoofkomponente 3-2-1.*



**Figuur 8:** Gedeelte van die verbeterde satellietafgeleide geologiese kaart.

**TABEL 3:** 'n Aantal van die mees identifiseerbare eienskappe wat in die satellietbeelde sigbaar is

	<b>Fig 2: Foto-infrarooi</b>	<b>Fig 3: Band-verhoudings</b>	<b>Fig 5: GVI</b>	<b>Fig 6: Regressie</b>	<b>Fig 7: Dekorrelasie</b>
Lewenskragtige plantegroei	Helderrooi	Groen	Helderblou	Donkerblou	Rooi
Plantegroei onder stres	Magenta	Magenta	Groen skakerings	Ligblou	Magenta
Kaal, droë grond en oorbeweiding	Groen	Rooi	Pienk	Rooi en magenta	Groen
Stedelike gebiede en nedersettings	Blou-groen en pers (Johannesburg, Lanseria, lughawe en Soweto)	Bruin	Liggroen	Groen	Groen en blou-groen
Water in damme en riviere	Swart en donkerblou	Swart en donkerblou	Swart en donkerblou	Swart en donkerblou	Swart en donkerblou
Modderige en silterige water	Ligter kleure, bv. ligblou en groen sliksdamme	Ligblou en groen	Blou-grys	Grys	Ligblou
Veldbrand in die noordwestelike hoek van satellietbeeld	Bruin	Donkerpers	Pienk skakerings	Helder magenta	Liggroen
Klam grond	Effens donkerder groen as droë grond	Effens donkerder rooi as droë grond.	Effens donkerder pienk as droë grond	Effens donkerder groen as droë grond	Effens donkerder groen en blou-groen as droë grond
Litostratigrafie	Betreklik duidelik sigbaar in die noordwestelike hoek van die satellietbeeld	Min litostratigrafie sigbaar, maar enkele geologiese frakture is wel sigbaar en bruikbaar vir kartering van geologiese struktuur	Heelwat is sigbaar in die noordwestelike hoek en 'n beduidende hoeveelheid geologiese struktuur is ook sigbaar	Sigbaar as blou en pers lae	Sigbaar as blou en groen lae; Strukturele geologie is ook karteerbaar

### *Regressie-analise*

'n Baie duidelike RGB-beeld is geproduseer met helder kleure, deur regressie toe te pas op bande 4-7-9 (figuur 6).

### *Dekorrelasie-analise*

Hoofkomponente 1 tot 9 (HK1 tot HK9) van die ASTER-data is geskep. Hierdie is afgeleide statistiese data, en die beeld wat hiermee geskep is, dui gevolglik nie meer die effek van die topografie aan nie. 'n RGB-satellietbeeld van enige drie van die ASTER-bande toon egter helder kleure wat die doeltreffende visuele opsporing van geologiese inligting moontlik maak en veldwerk dus aansienlik vergemaklik. 'n Interessante satellietbeeld kan ook verkry word deur hierdie RGB-beelde om te keer (figuur 7).

## BESPREKING

Tabel 3 bevat 'n getabuleerde opsomming van 'n aantal van die mees identifiseerbare eienskappe in die verskillende satellietbeelde wat geskep is.

Figure 5, 6 en 7 het die meeste geologiese inligting opgelewer. In figuur 5 (Genormaliseerde Verskil-indekse van Klei:Plantegroei:Yster) het heelwat verskuiwings en fraktuursones sigbaar geword en die regionale naatstelsel is duidelik waarneembaar in die noordwestelike hoek van die satellietbeeld. Ook die stratigrafie van die dolomietlae is duidelik sigbaar. Hierdie satellietbeeld is dus hoogs suksesvol gebruik om die veldkartering in te lig en te rig.

'n Interessante aspek, sigbaar in figuur 6 (regressie-analise), is die verskil tussen die dolomiete (ligblou) en die Johannesburgkoepel (groen, geel en rooi). Die regionale streeksgeologie van die gebied is ook duidelik sigbaar op hierdie satellietbeeld. Hierdie was een van die mees bruikbare satellietbeelde vir die kartering van die mynbou-aktiwiteite in en om Johannesburg en het later ook deel gevorm van 'n groter projek rakende die lug- en waterbesoedeling as gevolg van die goudmyne se sliksdamme.

In figuur 7 (dekorrelasie) is die effek van die topografie nie meer sigbaar nie, maar omdat heelwat verskuiwings en fraktuursones voorkom, sowel as die stratigrafie van die dolomietlae wat sigbaar is op hierdie satellietbeeld, kon dit ook met vrug gebruik word om die veldkartering van die geologiese struktuur in die Wieg van die Mensdom-wêrelderfenisgebied te ondersteun.

## VELDWERK

Visuele bestudering van veral die geologiese eienskappe wat in die satellietbeelde sigbaar is, soos in tabel 3 uiteengesit, het die veldwerkfase van die studie ingelei.

Die beste geologiese kaart van die gebied wat tans beskikbaar is, is dié wat deur Obbes saamgestel is.<sup>21</sup> Die ouer kaarte dui die Malmani-Dolomiet as een laag aan, met baie min strukturele verskynsels. Obbes se kaart maak 'n onderskeid tussen verskeie dolomietlae op grond van die kleur en chert-inhoud.

Hierdie lae kon baie duidelik op die verwerkte satellietbeelde geïdentifiseer word, byvoorbeeld die Swartrif-Kwartsietlaag, dolomiet- en chert-lae, asook sommige plooië en verskuiwings. Verdere ongekarteerde detail binne die lae kon ook gesien word en met behulp van die satellietbeelde kon verskillende lae voorlopige gekarteer word.

Die bykomende, ongekarteerde verskynsels wat op die satellietbeelde waargeneem is, sluit in: 20 verskuiwings, twee plooië, drie voorkomste van intrusiewe materiaal, ses prominente dolomiet- en chert-lae en 24 klein, ou myne.

Die verskuiwings is geïdentifiseer met behulp van visuele identifikasie van verplasinge van die dolomiet- en chert-lae wat op die satellietbeelde sigbaar is. Die plooië is ook visueel op die satellietbeelde duidelik waar buigings in die chert- en dolomietlae voorkom. Intrusiewe materiaal kon opgespoor word na gelang van die visuele patroon of buitelyne daarvan, en prominente chert- en dolomietlae is op die satellietbeelde geïdentifiseer deur middel van die verskillende kleure van elke laag. Die ou myne is op die satellietbeelde sigbaar as gevolg van die "onnatuurlike" visuele voorkoms daarvan.

Deur die benutting van hierdie manier van basiskaartvoorbereiding voordat veldwerk aangepak word, kan sekere vreemde of onidentifiseerbare voorwerpe aangedui word vir spesifieke veld-identifikasie en kartering. Bogenoemde verskynsels is op die voorlopige geologiese kaart geannoteer. Verskynsels wat so waargeneem word, moet in alle gevalle so ver moontlik met grondkontrole-data geverifieer word.



Verifikasie is gedoen deur die voorlopige basiskaart, die satellietbeelde en 'n lugfoto veld toe te neem en die voorkoms van die satellietgeïdentifiseerde verskynsels op die grond te kontroleer. Al die bogenoemde verskynsels kon in die veld geverifieer word. Die grondkontrole-ondersoek het getoon dat 'n aansienlik hoër vlak van ruimtelike detail met behulp die ASTER-satellietbeeld beskikbaar gestel is, wat andersins slegs deur middel van sorgvuldige, duur en tydrowende veldwerk gekarteer sou kon word. Die gekontroleerde data is gebruik om 'n verbeterde geologiese kaart saam te stel, waarop die litostratigrafie, geologiese struktuur en mynboustrukture gekarteer is (figuur 8).

## SINTESE

Geologiese kartering op 'n skaal van 1:5 000 is tans onvolledig in Suid-Afrika. ASTER-satellietbeelde se waarde lê onder andere daarin dat dit sodanige kartering vergemaklik. Dit het dus waarde vir standaard geologiese kartering, en in hierdie spesifieke studiegebied, ook waarde vir kartering van die res van die Wieg van die Mensdom-wêrelderfenisgebied. Dit bied ook die potensiaal vir plaaslike kartering van die Vredefortkoepel/-impakkrater, asook vir ander erfenisgebiede met geologiese elemente, byvoorbeeld Pilanesberg (vulkanies) en die Tswaing-impakkrater. Die stadige verandering van geologiese verskynsels beteken dat 'n enkele wolklose ASTER-datastel genoegsaam is om die geologie van die hele Suid-Afrika te karteer tot 'n hoër vlak van detail.

## GEVOLGTREKKINGS EN AANBEVELINGS

Die bekostigbaarheid en geredelike beskikbaarheid van satellietdata, sowel as die toenemende verwerkingskrag van klein rekenaars, het die toepassing van beeldverwerking van satellietdata sodanig vergemaklik dat dit tans op 'n verskeidenheid terreine bruikbaar is, en volgens alle aanduidings steeds gaan verbeter. Die gerief en krag van byvoorbeeld "Google-Earth" is 'n treffende voorbeeld van 'n relatief eenvoudige toepassing.

Hierdie projek het getoon dat ASTER-afstandwaargenome data en geprosesseerde satellietbeelde met sukses vir gedetailleerde geologiese kartering aangewend kan word. Litostratigrafie, geologiese struktuur en mynboustrukture is op die satellietbeelde geïdentifiseer aan die hand van visuele interpretasies van die satellietbeelde wat deur middel van syferkundige beeldverwerking geproduseer is. Tydens veldkontrole is die ligging van hierdie elemente in die veld opgespoor en aangestip. 'n Geologiese struktuur en stratigrafiese kaart kon saamgestel word en sekere geologiese eienskappe wat met veldwaarnemings opgespoor is, kon aan die hand van die satellietbeelde geverifieer word.

Die bogenoemde bevindinge is van groot waarde vir geowetenskaplikes met betrekking tot eksplorasië, ingenieurs- en hidrologiese toepassings, omdat herkenning en kartering van rotstipes, geologiese strukture en stratigrafie nou moontlik is op 'n skaal van 1:5 000. Dit het ook potensieële waarde vir omgewingsgeologie met die skep van basislynkaarte van plantegroei, grond, water en antropogeniese versteurings, sowel as die omgewingsmonitering op 'n veel meer gedetailleerde skaal.

Daar word aanbeveel dat verdere navorsing onderneem word om die numeriese akkuraatheid van die ASTER-gebaseerde karteringstegniek in ander geologiese sisteme te toets. Meer syferkundige data moet ook verkry en verwerk word ter ondersteuning van die groter ondersoek van die Wieg van die Mensdom-wêrelderfenisgebied (*Cradle of Humankind World Heritage Site*). Geologiese kartering gerugsteun deur ASTER-data kan ook op groter skale, byvoorbeeld 1:1 000, getoets en geverifieer word. Dit sal die toepassingsmoontlikhede van hierdie satellietbeelde selfs nog verder uitbrei.

Afstandwaarneming met behulp van ASTER-data kan beslis in die toekoms benut word om verskeie aspekte van die omgewing te bestudeer, veral in ontwikkelende lande waar infrastruktuur gebrekkig of afwesig is en navorsingsfondse uiters beperk is.

Deel II van hierdie artikelreeks ondersoek die visuele interpretasie van ASTER-satellietdata in die identifisering en kartering van grondgebruik in Mpumalanga.

## DANKBETUIGINGS

Die bydraes en ondersteuning van die volgende persone en instansies word met dank erken:

Prof Chris Kapp en Dr Zandra Bezuidenhout vir waardevolle kommentaar op die konsepartikel en ook taalversorging.

Mev Lynne Meyer vir versorging van grafiese materiaal.

Departement Omgewingswetenskappe, Unisa, vir geleentheid vir H J van Niekerk om 'n artikelskrif-werkswinkel by te woon.

Die kommentaar van twee anonieme referente.

## BIBLIOGRAFIE

- 1 Avery, T.E., Berlin, G.L. (1992). *Fundamentals of remote sensing and air-photo interpretation*. Fifth Edition, New York: Macmillan.
- 2 Barrett, E.C., Curtis, L.F. (1995). *Introduction to environmental remote Sensing*. Third Edition, London: Chapman & Hall.
- 3 Drury, S.A. (1987). *Image interpretation in geology*. London: Allen & Unwin.
- 4 Drury, S.A. (1990). *Guide to remote sensing. Interpreting images of the earth*, Oxford University Press.
- 5 EO Library: Terra spacecraft fact sheet, <http://earthobservatory.nasa.gov/Library/AM1> [6 December 2006].
- 6 Eriksson, K.A., Truswell, J.F. (1977). Stratotypes from the Malmani subgroup north-west of Johannesburg, South Africa, *Transvaal Geological Society*, 77, 211-222.
- 7 Foody, G.M., Curran, P.J. (1994). *Environmental remote sensing from regional to global scales*, New York: John Wiley & Sons.
- 8 Gomez, C., Delacourt, C., Allemand, P., Ledru, P., Wackerle, R. (2005). Using ASTER remote sensing data set for geological mapping in Namibia, *Physics-and-Chemistry-of-the-Earth*, 30(1-3): 97-108.
- 9 ILWIS 2.1 for Windows. (1997). *The integrated land and water information system. user's guide*, The Netherlands: Enschede.
- 10 Integrated report for the development and management of the Cradle of Humankind World Heritage Site, <http://www.cradleofhumankind.co.za> [14 May 2003].
- 11 Jensen, J.R. (1996). *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. Second Edition, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- 12 Jensen, J.R. (2000). *Remote sensing of the environment: an earth resource perspective*, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- 13 Kemp, J.N. (2005). Evaluating image classification techniques on Aster data for lithological discrimination in the Barberton Greenstone Belt, Mpumalanga, South Africa. MSc dissertation, Stellenbosch University.
- 14 Legg, C.A. (1992). *Remote sensing and geographic information systems: geological mapping, mineral exploration and mining*, New York Ellis Horwood.
- 15 Lillesand, T.M., Kiefer, R.W. (1994). *Remote sensing and image interpretation*. Third Edition, New York: John Wiley & Sons.
- 16 Lillesand, T.M. Kiefer, R.W., Chipman, J.W. (2004). *Remote sensing and image interpretation*, Fifth Edition, New York: John Wiley & Sons.
- 17 Lo, C.P. (1991) *Applied remote sensing*. New York: Longman.
- 18 McCarthy, T.S., Franey, N.J., Ellery, W.N., Ellery, K. (1993). The use of SPOT imagery in the study of environmental processes of the Okavango Delta, Botswana, *South African Journal of Science*, 89: 432-434.

- 19 Mhangara, P. (2005). Testing the ability of ASTER (Advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer) to tap hydrothermal alteration zones : a case study of the Haib Porphyry Copper-Molybdenum Deposit, Namibia. MSc dissertation, Stellenbosch University.
- 20 Morisette, J.T., Giglio, L., Csiszar, I., Justice, C.O. (2005). Validation of the MODIS active fire product over Southern Africa with ASTER data, *International Journal of Remote Sensing*, 26(19): 4239-4264.
- 21 Obbes, A.M. (2001). The structure, stratigraphy and sedimentology of the Blackreef – Malmani – Rooihoogte succession of the Transvaal Supergroup south-west of Pretoria, *Bulletin No 127. Council for Geoscience*.
- 22 Prost, G.L. (2001). *Remote sensing for geologists: a guide to image interpretation*. Second Edition, Australia: Grodon and Breach Science Publishers.
- 23 Sabins, F.F. (1996). *Remote sensing. Principles and interpretation*. Third Edition, New York: Freeman.
- 24 Sandham, L.A., Prinsloo, H.B., Henning, J.J. (1993). Satellite detection of asbestos pollution in Transvaal, South Africa, *South African Journal of Science*, 89: 461-462.
- 25 Van Niekerk, H.J., Van der Walt, I.J. (2006). Dewatering of the Far West Rand dolomitic area by gold mining activities and subsequent land instability, *Land Degradation and Development*, 17, 441-452.
- 26 Van Niekerk, H.J., Viljoen, M.J. (2005). Causes and consequences of the Merriespruit and other slimes dam disasters, *Land degradation and Development*., 16, 201-212.
- 27 Viljoen, M.J., Coward, D., Wedepohl, C. (1993). Geological mapping of the granite-greenstone terraine between the Murchison and Sutherland ranges, Transvaal, using SPOT data, *South African Journal of Science*, 89: 436-441.