

# Het gebruik van remote sensing voor archeologie



*ir. F. Dentz en prof.dr.ir. R.F. Hanssen,  
Delft Institute for Earth Observation  
and Space Systems (DEOS),  
Technische Universiteit Delft*

Het Nabije Oosten is een regio waar veel archeologische vondsten zijn gedaan. Deze regio wordt ook algemeen beschouwd als het gebied waar de productie van ijzer rond 1200 v. Chr. als eerste werd ontwikkeld. Toch is hier verrassend weinig archeologisch bewijsmateriaal gevonden voor ijzerproductie en -smeding; tot aan 1996, toen overblijfselen werden ontdekt op Tell Hammeh in de Jordaanvallei in Jordanië. Als gevolg van deze vondsten verwachten archeologen ook op andere plaatsen in de omgeving van Tell Hammeh overblijfselen van ijzerproductie te kunnen aantreffen. Ook andere archeologische objecten, zoals oude nederzettingen en voormalige irrigatiekanalen, zijn in dit gebied te vinden.

In samenwerking met de Rijksuniversiteit Leiden is door het Instituut voor Aardobservatie en Ruimtevaartssystemen (DEOS) van de TU Delft een eerste studie afgerond om de omgeving van de Jordaanvallei te onderzoeken met een grote verscheidenheid aan satelliet remote sensing-data om de bijdrage van deze techniek voor toepassing in de archeologie vast te stellen [Dentz, 2008]. In het bijzonder is de mogelijkheid onderzocht om met satellietdata overblijfselen van ijzerproductie te herkennen en eventueel op te sporen.

## Het studiegebied

Tell Hammeh (fig. 2) is een circa 10 meter hoge kunstmatige woonheuvel, waarvan het ontstaan teruggaat tot tenminste de ijzertijd. De heuvel bestaat voornamelijk uit klei, net als het omringende land in de Jordaan Vallei. In de Jordaan Vallei bevinden zich tientallen van dergelijke 'Tell'-nederzettingen (woonheuvels), waarvan Tell Deir Alla de grootste en bekendste is. De heuvels ontstonden doordat huizen, gemaakt van ongebakken klei, erodeerden, waarna ze op exact dezelfde

*Fig. 2. Tell Hammeh, gezien vanuit het noordoosten, 14 april 2007. Op deze kunstmatige heuvel werden in 1996 resten van vroege ijzerproductie gevonden langs de bulldozersnede.*

de plek herbouwd werden. Zo werden de heuvels door de eeuwen heen steeds hoger, in sommige gevallen wel bijna 30 meter (Tell Deir Alla). De heuvels werden bewoond tot aan de Romeinse tijd. Tegenwoordig is de Jordaanvallei het belangrijkste landbouwgebied voor Jordanië. Omdat er gedurende de zomer, van mei tot november, vrijwel geen neerslag valt, wordt de Jordaanvallei geïrrigeerd. Irrigatie is niet iets van de laatste decennia in dit gebied - er zijn restanten van systemen gevonden die vermoedelijk teruggaan tot in de Middeleeuwen - maar waarschijnlijk vond al in de ijzertijd irrigatie plaats.

Ten oosten van Tell Hammeh begint de Zarqa Vallei (fig. 1), een zijdal van de Jordaanvallei. Een paar kilometer in dit dal ligt Tulul edh Dhahab (Arabisch



*Fig. 1. Het gebied in Jordanië waar ijzerproductie-overblijfselen zijn gevonden.*

voor 'heuvels van goud'). Dit is een natuurlijke circa 100 meter hoge heuvel in een meander van de Zarqa-rivier, die tegenwoordig niet meer is dan een klein stroompje. Boven op deze heuvel zijn ook restanten van ijzerproductie aangetroffen, overblijfselen van fortificaties en een paleis. Vier kilometer ten noorden van Tulul edh Dhahab bevindt zich in het hoogland Mugharet al-Warda, waar de enige ijzerertsafzetting van Jordanië is gevonden. Deze



locatie werd reeds in de ijzertijd gebruikt om erts te delven. Het hoogland ligt met 800 meter circa 1 kilometer hoger dan de bodem van de Jordaan Vallei, die zich bevindt op 200 meter beneden de zeespiegel. Dit maakt dat het hoogland een natter klimaat heeft en daardoor meer begroeid is dan de lager gelegen hellingen langs de Jordaan Vallei.

## Ijzerproductie

Voor de productie van ijzer zijn allereerst ijzererts en brandstof in de vorm van houtskool nodig. Daarnaast is er ook klei en water nodig om ovens mee



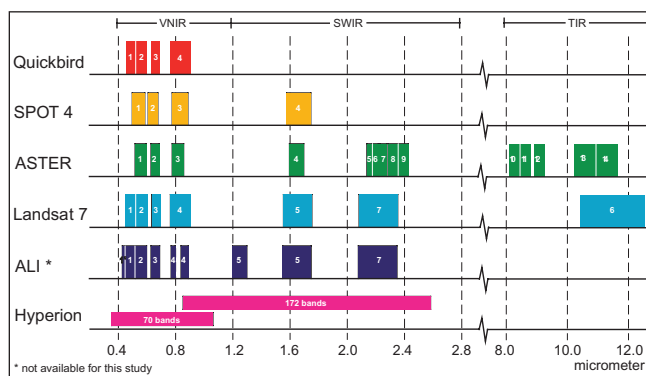
Fig. 3. Slak: het belangrijkste overblijfsel van ijzerproductie.

te kunnen bouwen. In de ovens worden erts en houtskool in lagen opgestapeld en daarna aangestoken. Tijdens het smelten van het ijzererts, ontstaat naast ijzer ook een restproduct van gesmolten zand, klei en kalksteen. Wanneer deze substantie stolt, ontstaat er een soort van zwarte stenen, slak genaamd (fig. 3). Slak vormt op Tell Hammeh het belangrijkste bewijsmateriaal voor ijzerproductie, daarnaast zijn er ook aslagen en verbrande klei aangetroffen. Deze overblijfselen zijn ontdekt in 1996, nadat een bulldozer een stuk van de heuvel had afgegraven om meer landbouwgrond te creëren. Langs de bulldozersnede (fig. 2) kwamen toen lagen met slak bloot te liggen.

## Dataselectie

Voor het onderzoek zijn een grote groep optische en radarsatellietbeelden van verschillende sensoren gebruikt. In fig. 4 worden een aantal veel gebruikte optische satellietsensoren met elkaar vergeleken. Uiteindelijk is gekozen voor ASTER, Hyperion en Quickbird. ASTER is dankzij de vele

Fig. 4. Vergelijking tussen de spectrale banden van verschillende optische satellietsensoren.



SWIR- (Shortwave Infrared) en TIR-banden (Thermal Infrared) in staat verschillende geologische formaties te onderscheiden, zoals tussen zandsteen en kalksteen. Hyperion is een hyperspectrale satellietsensor, waarmee bedoeld wordt dat het waarnemingen registreert over zeer veel (242) banden, dit in tegenstelling tot multispectrale sensoren, die slechts over vier tot enkele tientallen banden waarnemen. Quickbird is een satellietsensor met zeer hoge resolutie, wat betekent dat de beelden bestaan uit zeer kleine pixels (60 cm), in tegenstelling tot bijvoorbeeld ASTER (15 m) en Hyperion (30 m). Een nadeel van Quickbird is dat er slechts vier banden in het zichtbare en nabij-infrarood (Visible and Near Infrared, VNIR) worden waargenomen.

Naast de optische data is er ook een grote hoeveelheid radarbeelden gebruikt van verschillende golflengten en polarisaties (ERS, Envisat en SIR-C). Radarbeelden geven meer inzicht in de textuur van het landschap, terwijl met optische beelden beter de mineralogische verschillen in kaart gebracht kunnen worden. Fig. 5 geeft een overzicht van de uiteindelijk gebruikte satellietbeelden. Duidelijk is te zien dat de radarbeelden (grijs) een veel groter gebied beslaan dan de optische beelden. De breedtes variëren van 100 km (ERS) tot 7,5 km (Hyperion).

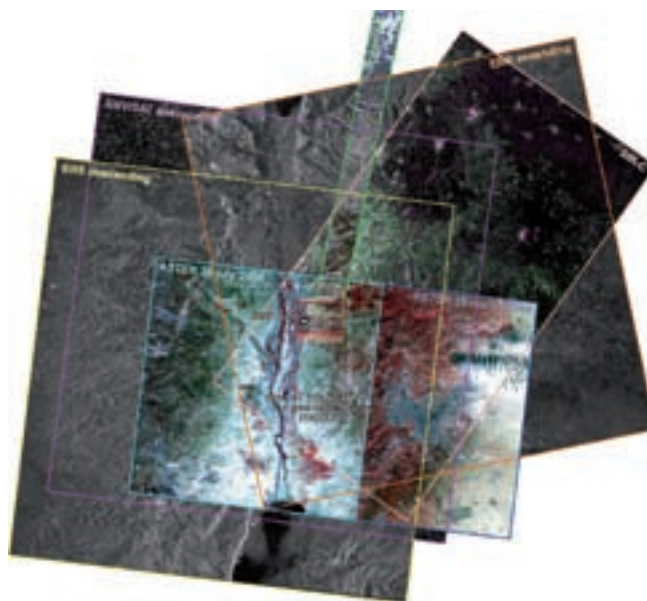


Fig. 5. Ruimtelijk overzicht van de geselecteerde satellietbeelden voor het onderzoek.

## Veldspectrometer

Om te weten te komen of vroege ijzerproductielocaties opgespoord kunnen worden met satellietdata, is het van belang te onderzoeken of de reeds bekende locatie (Tell Hammeh) een unieke spectrale signatuur bezit. Wanneer

dit het geval mocht zijn, kan in het satellietbeeld worden gezocht naar pixels met een vergelijkbaar spectraal profiel. Op deze locaties zouden dan in het terrein mogelijk ook overblijfselen van ijzerproductie kunnen worden aangetroffen. De beste manier om een gedetailleerd profiel vast te stellen, is door middel van hyperspectrale data. Helaas viel Tell Hammeh net buiten het Hyperion-beeld. Dit probleem werd echter omzeild door gebruik te maken van een veldspectrometer (fig. 6). Dit is een optisch instrument dat de lichtintensiteit meet tussen 350 en 2500 nanometer (VNIR en SWIR) in intervallen van 2 nanometer. Voor de meeste toepassingen is men echter niet geïnteresseerd in de totale hoeveelheid lichtenergie (radiance), maar in de ratio van de door de aarde gereflecteerde energie tot de totale energie die op de aarde valt (reflectance). Hiertoe wordt de veldspectrometer gekalibreerd aan een wit referentievlak, genaamd spectralon, dat licht op alle golflengten met 100% reflecteert. De metingen in het terrein zijn dus in relatieve reflectance ten opzichte van dit referentievlak, in waarden variërend tussen 0 en 1.



Fig. 6. De veldspectrometer; linksonder is het spectralon afgebeeld.

## Veldwerk

Veldmetingen op Tell Hammeh zijn uitgevoerd op twee manieren. Allereerst zijn veel waarnemingen gedaan aan het oppervlak van de Tell, die vervolgens zijn gemiddeld om een idee te krijgen hoe het spectrale profiel waargenomen zou worden met een hyperspectrale satellietsensor. Daarnaast

zijn metingen genomen van specifieke materialen die op de Tell kunnen worden aangetroffen, zoals slak, stukjes ijzererts, zandsteen, kalksteen, klei en potscherven. Om vast te kunnen stellen of de spectrale signatuur van Tell Hammeh uniek is, zijn er ook metingen uitgevoerd op Tell Deir Alla en Tulul edh Dhahab. Op Tell Deir Alla zijn geen overblijfselen van ijzerproductie aangetroffen.

In fig. 7 zijn de resultaten te zien van de metingen aan het oppervlak van de drie locaties. Bij de interpretatie wordt vooral gelet op absorptiebanden (dipjes in het spectrale profiel) die uniek kunnen zijn voor specifieke mineralen. Verschil in amplitude is veel minder van belang, omdat dit vooral veroorzaakt wordt door veranderingen in de atmosfeer en de stand van de zon. Opvallend is dat de drie profielen vrijwel hetzelfde zijn, wat betekent dat de spectrale signatuur van Tell Hammeh niet uniek is. Wanneer gekeken wordt naar de afzonderlijke materialen (fig. 8), is te zien dat de slak totaal geen absorptiebanden heeft. De verwachting was dat in slak resten van ijzer meetbaar zouden zijn maar dit blijkt niet het geval, in tegenstelling tot ijzererts en rode zandsteen. Deze twee profielen tonen duidelijk de ijzerabsorptiebanden rond 900 nanometer, die overeenkomen met het profiel van het ijzermineraal hematiet.

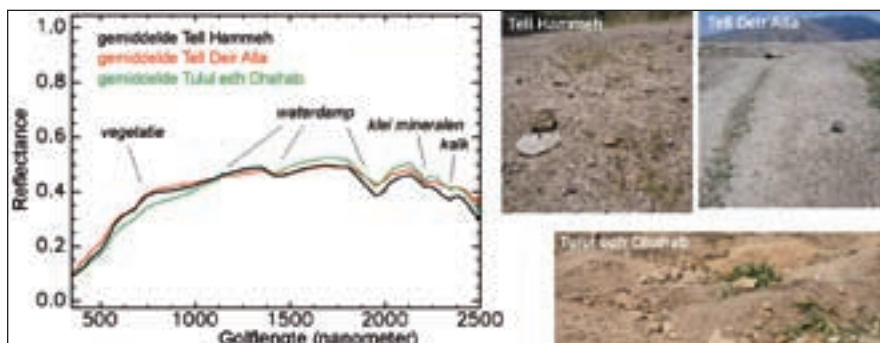


Fig. 7. Vergelijking van het gemiddelde spectrum van Tell Hammeh met spectra van andere voormalige nederzettingen toont aan dat deze spectra vrijwel identiek zijn, wat betekent dat er geen significante verschillen zijn in mineralogische samenstelling.

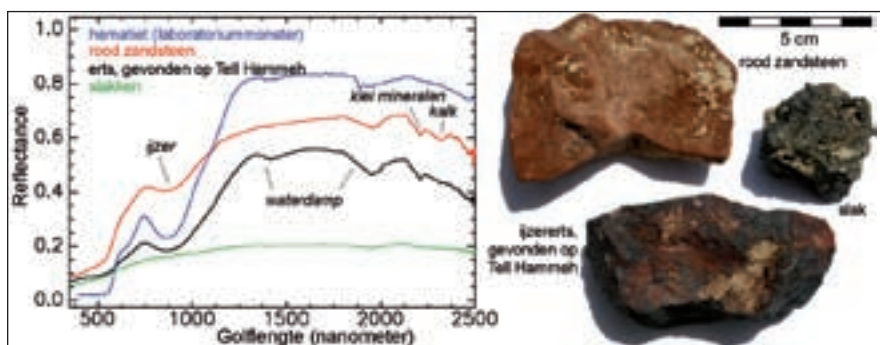


Fig. 8. Spectra van ijzererts, rood zandsteen en hematiet tonen een sterke ijzerabsorptie rond 900 nanometer, terwijl deze voor de slak afwezig is.

De conclusie is dus dat de overblijfselen van ijzerproductielocaties niet uniek opgespoord kunnen worden met hyperspectrale metingen. Kort samengevat zijn hiervoor vier waarschijnlijke oorzaken. Er is te weinig slak aanwezig aan het oppervlak in verband met observaties vanuit de lucht. De slak heeft geen significante absorptie-eigenschappen. Zichtbaar licht en infrarood dringen niet door in de grond en de Tell bestaat uit dezelfde klei als in de omgeving kan worden aangetroffen.

## Hyperion

De ijzerertsafzetting van Mugharet al-Warda viel gelukkig nog wel binnen het Hyperion-beeld. De ertslaag wordt tegenwoordig afgegraven in een steengroeve (fig. 9), vermoedelijk vanwege het omliggende kalksteen dat gebruikt wordt voor cementproductie. Voordat ijzermineralen met

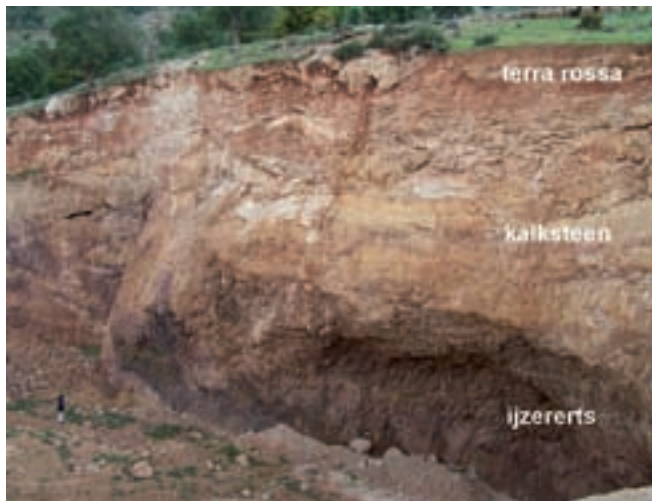


Fig. 9. De steengroeve bij Mugharet al-Warda maakt de erts slaag duidelijk zichtbaar.

een hyperspectraal beeld kunnen worden gedetecteerd moet de data een aantal verwerkingsstappen ondergaan. Fig. 10 toont het spectraal profiel van de steengroeve uit het Hyperion-beeld in verschillende stadia van verwerking.

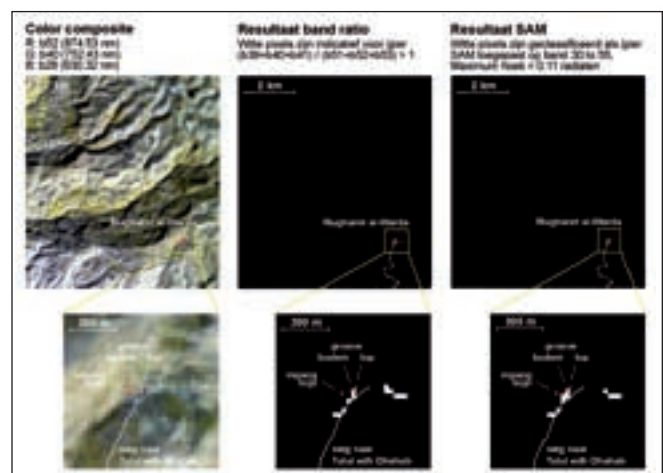
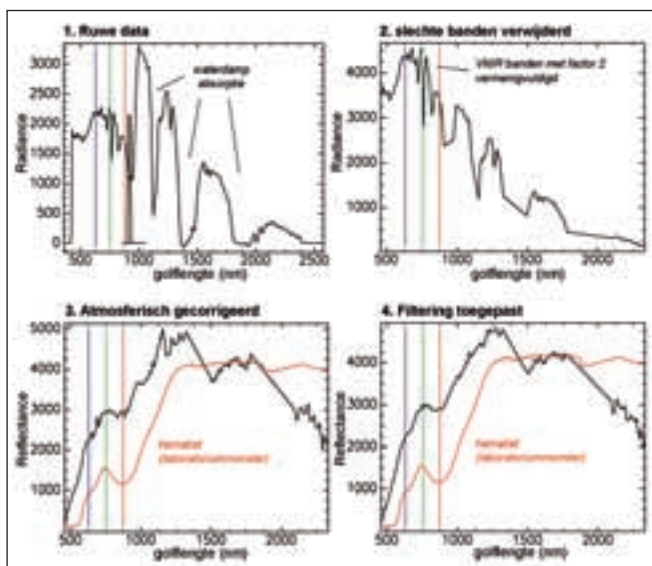
De ruwe Hyperion-data bevatten een aantal ongekalibreerde banden en banden met zeer veel ruis door waterdampabsorptie in de atmosfeer. Deze banden zijn verwijderd uit de dataset voordat verdere verwerking plaatsvond. Vervolgens is de data aan de hand van een atmosferisch model getransformeerd van radiance naar reflectance, waarbij tevens is gecorrigeerd voor onder andere waterdamp-, zuurstof- en koolstofdioxide-absorptie door de atmosfeer. Na deze belangrijke stap bleef er nog steeds enige mate van ruis achter in de data. Daarom is de data als laatste stap gefilterd met een spectraal 'polishing'-algoritme.

Fig. 11. Resultaten Hyperion; in het SAM-resultaat is te zien dat vrijwel alleen rond Mugharet al-Warda ijzer kan worden aangetroffen.

Het resultaat laat duidelijk ijzerabsorptie zien in de banden rond 900 nanometer. Spectrale vergelijking met laboratoriumspectra van de United States Geological Survey (USGS) maakt duidelijk dat dit absorptieprofiel het beste past bij het ijzermineraal hematiet, dat inderdaad veel voorkomt in ijzererts. De conclusie is dus dat ijzer opgespoord kan worden met hyperspectrale satellietbeelden.

De volgende vraag is of er meer locaties te vinden zijn met een vergelijkbaar spectraal profiel. Daartoe is als eerste stap de ratio uitgerekend tussen het gemiddelde van de banden 39, 40 en 41, en de banden 51, 52 en 53 (de groene en rode lijnen in fig. 10). Het resultaat is zichtbaar gemaakt in fig. 11, waar de witte pixels aangeven waar mogelijk ijzermineralen in het terrein kunnen worden aangetroffen. Nadeel van deze bandratio's is dat slechts gebruik gemaakt wordt van enkele banden en niet de totale absorptiecurve, waardoor het resultaat gevoelig is voor ruis in de data. Daarom is het Hyperion-beeld ook geclassificeerd met het SAM-algoritme (Spectral Angle Mapper), dat aangeeft welke pixels het beste overeenkomen met het hematietprofiel. Dit resultaat is ook weergegeven in fig. 11 en laat aanzienlijk minder pixels zien dan het bandratioresultaat. Geconcludeerd kan worden dat buiten Mugharet al-Warda geen ijzererts kan worden aangetroffen, althans niet detecteerbaar met Hyperion.

Fig. 10. Spectraal profiel van de steengroeve uit fig. 9 in verschillende stadia van verwerking.



## ASTER

De multispectrale ASTER-sensor heeft niet genoeg banden om ijzerabsorptie te kunnen waarnemen. ASTER heeft echter wel een aantal banden in het SWIR waarmee andere geologische materialen kunnen worden opgespoord, zoals zandsteen, kalksteen en klei. ASTER-data zijn daarom gebruikt om de geologie van de Jordaan Vallei in kaart te brengen, om vast te kunnen stellen welke mineralen en grondsoorten wel detecteerbaar zijn in dit gebied. Net als voor Hyperion moeten ASTER-data een aantal verwerkingsstappen ondergaan voordat iets zinnigs gezegd kan worden over de geologie. Hiervoor is de zogenaamde 'Zandlopermethode' gebruikt (fig. 12).

De eerste stap is het transformeren van de radiance-data naar reflectance door middel van een atmosferisch model. Vervolgens wordt de ruis in de data gereduceerd met het MNF-algoritme (Minimal Noise Fraction). Hierna vindt er een procedure plaats waarbij de spectraal meest unieke pixels automatisch worden geselecteerd met behulp van de

PPI (Pixel Purity Index). Deze pixels worden geplot in een n-dimensionale scatterplot, waarin pixels die bij elkaar groeperen worden geselecteerd. Van iedere groep wordt het gemiddelde spectrale profiel berekend, dat theoretisch overeen moet komen met die van een bepaald materiaal. Deze 'eindspectra' kunnen worden gebruikt om de totale dataset te classificeren, bijvoorbeeld met het MTMF-algoritme (Mixture Tuned Matched Filtering). Fig. 13 laat voor ieder geselecteerd eindspectrum zien welke pixels in de totale dataset hiermee het beste overeenkomen.

Vergelijking met een geologische kaart brengt naar voren dat ASTER zeer goed in staat is om zandsteen (rood), kalksteen (geel) en mergel (groen) te onderscheiden. Vergelijkingen met laboratoriumspectra zijn echter niet mogelijk vanwege een slechte atmosferische correctie door ontbrekende atmosferische informatie.

### Quickbird

Veel ruimtelijk detail laten Hyperion- en ASTER-data niet zien, daarvoor is de pixelgrootte van respectievelijk 30 en 15 meter te grof. Om naar archeologisch interessante structuren als voormalige irrigatiekanalen te zoeken, moet daarom gebruik gemaakt worden van Quickbird-beelden met hoge resolutie. Deze satelliet sensor neemt waar op vier VNIR-banden met ieder een resolutie van 2,4 meter en bevat daarnaast ook een panchromatische band met een resolutie van 0,6 meter. Quickbird is daarmee momenteel de satelliet met de hoogste ruimtelijke resolutie.

Met de vier VNIR-banden kunnen kleurencombinaties worden gemaakt, zoals te zien is in fig. 14. In dit beeld is de infraroodband (rood geeft vegetatie aan), de zichtbaar-roodband (groen) en de zichtbaar-groenband (blauw) weergegeven in een Rood-Groen-Blauw 'false color composite'. Tevens

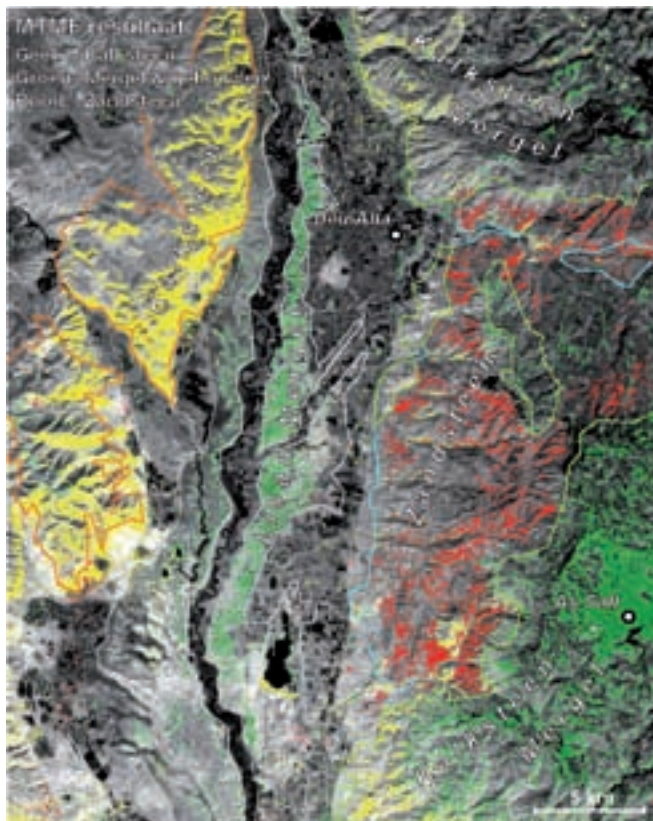


Fig. 12. Spectraal analyseschema, (zandlopermethode). Dit geeft schematisch aan hoe de data eerst worden gereduceerd tot een paar eindspectra, en dan uitbreidt tot spectrale kaarten van de totale dataset.

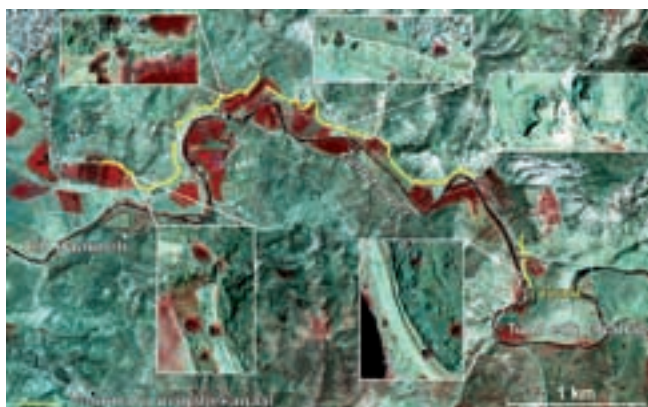
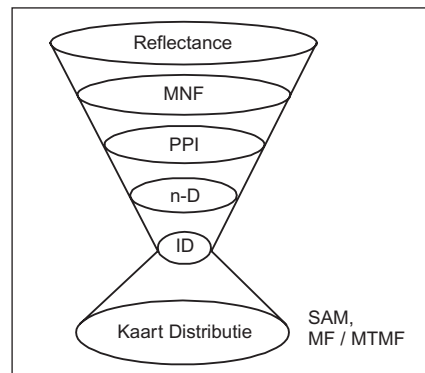


Fig. 14. 'Pan-sharpened' Quickbird-VNIR-beeld van de Zarqa Vallei. Een voormalig irrigatiekanaal is geel gemarkeerd, voor zover te volgen in het beeld zelf.

is dit beeld 'pan-sharpened', dat wil zeggen dat de panchromatische band van hoge resolutie is gecombineerd met de VNIR-banden van iets lagere resolutie tot één kleurenbeeld met de resolutie van de panchromatische band. In het beeld van fig. 14 is een voormalig irrigatiekanaal te herkennen langs de hellingen van de Zarqa Vallei.

### ERS-radar data

Anders dan bij de optische data, zenden radarsatellieten hun eigen elektromagnetische energie uit in korte pulsen. De reflecties van dit signaal worden opgevangen en aan de hand hiervan wordt een radarbeeld gegenereerd. Eén enkel radarbeeld bevat gewoonlijk erg veel ruis (speckle) en weinig terreindetail. Om de radiometrische resolutie te verbeteren, is het mogelijk een groot aantal beelden van hetzelfde gebied te middelen, waardoor een zogenaamde MRM (Multi-image Reflectivity Map) ontstaat. In fig. 15 is de MRM te zien die verkregen is uit 45 radarbeelden van de ERS-satelliet. Hellingen gericht naar de satelliet geven een hogere reflectie dan hellingen afgekeerd van de satelliet en verschijnen daarom wit in het radarbeeld. Door dit schaduw effect zijn zelfs de kleinste woonheuveltjes op de verder vlakke valleibodem zichtbaar gemaakt. Omdat de radar schuin

Fig. 13. Het classificatieresultaat van de Jordaan Vallei laat de belangrijkste geologische formaties zien. Contourlijnen van de geologische kaart zijn boven op het beeld geplott.

kijkt, is de topografie in het radar-beeld vervormd (foreshortening, het omgekeerde van omvalling). De MRM in fig. 15 is hiervoor gecorrigeerd aan de hand van een hoogtemodel, terwijl de uitvergrotingen van de woonheuvels nog de ongecorrigeerde MRM laten zien.

### Gecombineerde analyse

Zoals eerder vermeld zijn optische data vooral geschikt om mineralogische verschillen in kaart te brengen en geven radardata meer inzicht in de terreintextuur. Om de geologische interpretatie te verbeteren, is het mogelijk deze twee datatypen met elkaar te combineren op een manier die vergelijkbaar is met pan-sharpening. Voor het fusieproces is gekozen voor drie ASTER-MNF-banden samen met de ERS-MRM. In de drie ASTER-MNF-banden is de meeste geologische informatie uit de in totaal negen ASTER-VNIR- en SWIR-banden gecombineerd. De ERS-MRM laat vooral de terreintextuur zien, zoals bergruggen, rivierbeddingen en breuklijnen. Het fusieresultaat, gedrapeerd over een hoogtemodel, is zichtbaar in fig. 16. Duidelijk is te zien dat bijvoorbeeld de kalksteenformaties (blauw/paars) zich bevinden bovenop de zandsteenformatie (groen). Waar de kalksteen is weggeërodeerd komt zandsteen tevoorschijn.

### Conclusie

De belangrijkste conclusie is dat aardobservatie (remote sensing) interessante mogelijkheden biedt voor toepassing in de archeologie. De topografische en geologische informatie die door de satellietbeelden geleverd wordt, blijkt van grote waarde voor de archeologie. De Jordaan Vallei zelf is een gebied dat goed bekend is, en de meeste archeologisch interessante objecten die zichtbaar zijn aan het oppervlak, zijn dan ook reeds gedocumenteerd. Ook zijn gedetailleerde geologische kaarten voor dit gebied reeds

ERS - MRM  
Deir Alla regio

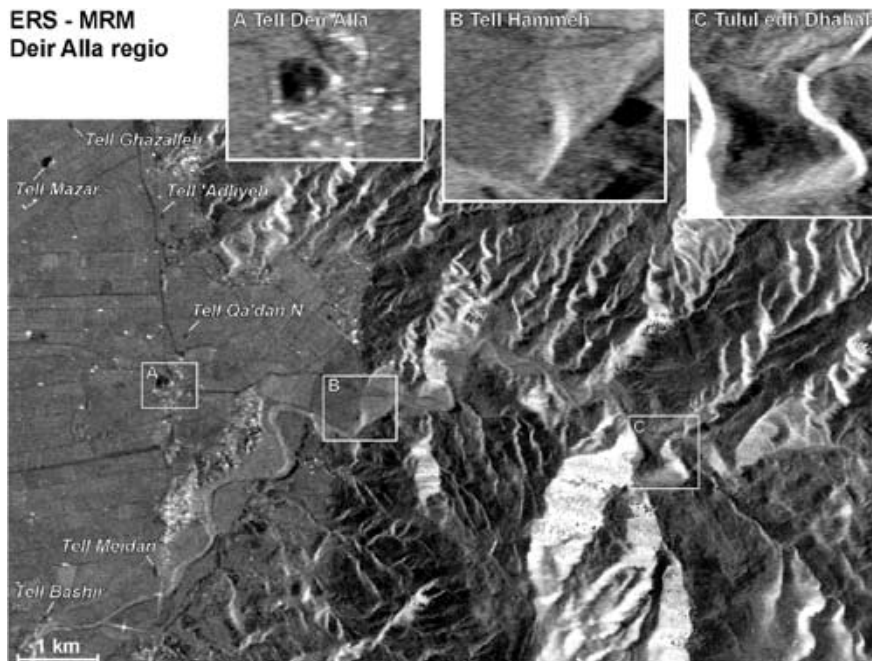


Fig. 15. De ERS-MRM van de omgeving rond Deir Alla laat iedere oude woonheuvel (Tell) in dit gebied zien dankzij het schaduweffect van de radar.

beschikbaar. Nieuwe ontdekkingen zijn in deze studie dan ook niet gedaan. Desalniettemin laten de remote-sensinggegevens zien gebruikt te kunnen worden voor het in kaart brengen van de bekende archeologische objecten. Dit toont interessante mogelijkheden voor hun gebruik in minder bekende gebieden.

### Literatuur

- Dentz, F., *The use of spaceborne remote sensing for archeology: A casestudy on early iron production sites at the Jordan Valley*, Master-scriptie, TU Delft, 2008.

### Samenvatting

#### Het gebruik van remote sensing voor archeologie

Het doel van dit onderzoek was de bijdrage van aardobservatietechnieken voor toepassing in de archeologie vast te stellen. Hiertoe is de omgeving van de Jordaan Vallei in Jordanië onderzocht met een grote verscheidenheid aan aardobservatiedata. De Jordaan Vallei is een gebied waar veel archeologische vondsten zijn gedaan, zoals oude nederzettingen, irrigatiesystemen en overblijfselen van ijzerproductie. Gebruikte datasets zijn onder andere Hyperion, ASTER, Quickbird en ERS. De conclusie is dat met remote sensing de bekende archeologische objecten in kaart gebracht kunnen worden, wat zijn potentie laat zien voor onverkende gebieden.

### Summary

#### The use of Remote Sensing for archeologic

The purpose of this research was to determine the contribution of Earth observation techniques for its application in archaeology. For this goal the Jordan Valley environment was examined with a range of Earth observation data. The Jordan Valley is an area where many archaeological findings are made, like settlements, irrigation systems, and remains of iron production. The used datasets comprise Hyperion, ASTER, Quickbird, and ERS. The conclusion reads that with remote sensing known archeological objects can be charted, which shows its potential for unexplored areas.

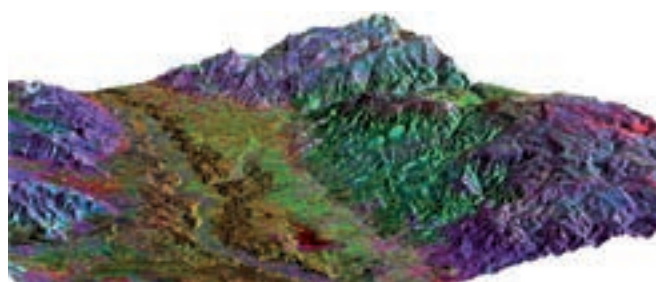


Fig. 16. De ASTER-MNF-banden, gefuseerd met de ERS-MRM en gedrapeerd over een hoogtemodel van de Jordaan Vallei, laten de geologische structuren in dit gebied duidelijk zien.