

Anwendung der Fernerkundung in der Exploration und im Haldenmonitoring im südlichen Afrika

Christian Mielke, Christian Rogass, Nina Boesche, Hermann Kaufmann, Luis Guanter
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Remote sensing is an integral part of mineral exploration and mine waste monitoring today. The pool of geoscientific applications for remote sensing is rapidly growing with the advent of new spaceborne sensors such as the hyperspectral EnMAP (Environmental Mapping and Analysis Program) and the multispectral Sentinel-2 missions. The main advantage of hyperspectral data is the capability to identify surface materials via their characteristic absorption features, casually called “the spectral fingerprint” and map their spatial distribution. These characteristic absorption features can be used e.g. to map the abundance of rare earth elements, or map mineral assemblages that are characteristic for sulfide ore deposits. In addition to that, mine waste material can be characterized and mapped. South Africa and Namibia with their long mining history provide excellent natural laboratories for the development of new geoscientific applications for mineral exploration and environmental monitoring, due to the large areas affected by tailings dams and the large and remote desert areas, which hold the potential for new mineral deposit sites. Hyperspectral airborne data is widely used in South Africa and Namibia. However, it is too sparse and too expensive for certain applications such as the environmental monitoring of tailings sites. A combination of multispectral and hyperspectral spaceborne sensors has shown its potential to bridge this apparent gap in mine waste mapping and monitoring.



Namibia und Südafrika sind zwei Länder im südlichen Afrika, die ein ausgezeichnetes natürliches Labor für die wissenschaftliche Entwicklung und den Einsatz neuer, vor allem satellitengestützter Fernerkundungsanwendungen darstellen. Der wichtigste Grund für den Einsatz von Fernerkundungsmethoden in diesen Ländern liegt in der großen räumlichen Ausdehnung der von Bergbauaktivität betroffenen Flächen. Dies wird im Foto links deutlich. Hierbei handelt es sich um eine Halde mit Resten aus der Goldgewinnung in der Nähe von Klerksdorp in Südafrika. Um Johannesburg wurden in mehr als 100 Jahren Goldbergbauaktivität unzählige Halden abgelagert und umgelagert, die einen elementaren Bestandteil dieses urbanen Großraums bilden. Der Platinabbau, der schon seit 90 Jahren entlang eines Teils des Bushveld-Komplexes durchgeführt wird (Abb. 1, grau umrandeter Bereich), stellt den zweiten bedeutenden Bergbauzweig in dieser Region dar. In den genannten Großräumen leben laut Statistiken der südafrikanischen Regierung insgesamt rund 17 Mio. Menschen, die potenziell gesundheitlichen Risiken durch Haldenabfälle ausgesetzt sind.

Mögliche Folgeprobleme, die durch jahrzehntelangen Bergbau im südlichen Afrika verursacht werden, sind Kontaminationen von Luft, Wasser und Boden, z. B. durch Lösung, Transport und Anreicherung von Schwermetallen. Dies ist besonders in Ländern mit einer zunehmend angespannten Wasserversorgungslage, wie in Südafrika, von elementarer Bedeutung. Eine Überwachung der Bergbauaktivitäten und der Haldenlandschaften mittels neuester Satellitenmissionen, wie z. B. EnMAP, bei dem das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ die wissenschaftliche Leitung inne hat, und Sentinel-2, kann hierbei helfen, sich abzeichnende Probleme wie z. B. saure Minenabwässer und die Ausbreitung von Haldenmaterial in die Umgebung frühzeitig zu erkennen und diesen rechtzeitig entgegenzuwirken. Damit trägt das GFZ dem Anspruch der Entwicklung neuester Technologien und Methoden und deren Einsatz zum Wohle der Gesellschaft Rechnung. Zusätzlich kann durch eine enge Zusammenarbeit mit der Wirtschaft, wie z. B. in den Bereichen Exploration und Abbau von Bodenschätzen, durch den gezielten Einsatz und die Entwicklung neuester Methoden in der abbildenden Spektroskopie eine Minimierung des ökologischen Fußabdrucks erreicht werden, der zusätzlich eine Steigerung der Kosteneffizienz im

Links: Beprobung einer Goldabraumhalde in Stilfontein nahe Klerksdorp, Südafrika (Foto: C. Mielke, GFZ)

Left: Soil sampling on top of gold mine tailings dam in Stilfontein near Klerksdorp, South Africa

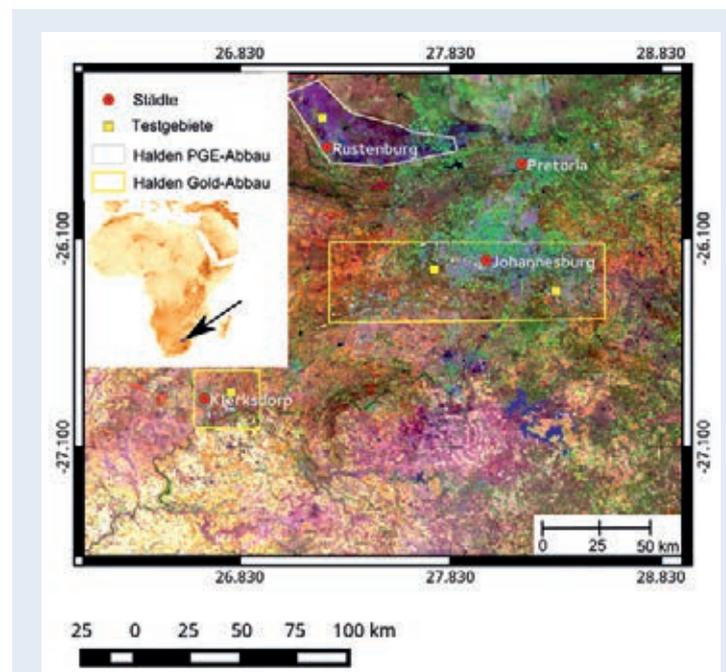


Abb. 1: Landsat 8 OLI-Falschfarbaufnahme (Rot: 2200 nm, Grün: 860 nm, Blau: Grün) des Großraums Rustenburg, Pretoria und Johannesburg mit einer Darstellung der räumlichen Verbreitung von Haldengebieten aus dem Gold- und Platinabbau (PGE: Elemente der Platingruppe)

Fig. 1: Landsat 8 OLI false color composite (Red: 2200 nm, Green: 860 nm, Blue: Green) of the Rustenburg-Pretoria-Johannesburg urban area outlining the spatial distribution of gold and platinum tailings (PGE: Platin Group Elements)

Abbau bewirkt. Die Anwendung der abbildenden Spektroskopie führt darüber hinaus auf allen Skalen (Mikroskop, Labor, Aufschluss, Flugzeug und Satellit) zu einem klareren Abbild des Systems Erde und seiner Prozesse.

Die Fernerkundung und die abbildende Spektroskopie können durch Ihre Fähigkeit, Oberflächenmaterialien zu detektieren und Flächenkonzentrationsgradienten aufzuzeigen, wertvolle Hinweise über die Art des Haldenmaterials sowie über dessen räumliche und zeitliche Verteilung liefern. Eine flächenhafte, berührungsfreie Untersuchung von geologischen Objekten, wie z. B. Aufschlüssen, kann durch den Einsatz von abbildenden Spektrometern erreicht werden. Dabei kommen Zeilenscanner wie das HySpex-System zum Einsatz. Seine Messkameras arbeiten im sichtbaren Bereich und nahen Infrarot (VNIR 400-1000 nm) und im kurzwelligen Infrarot (SWIR 1000-2500 nm). Die flächenhafte Aufnahme des Objekts wird durch die Rotation



Kontakt: C. Mielke
(chmielke@gfz-potsdam.de)

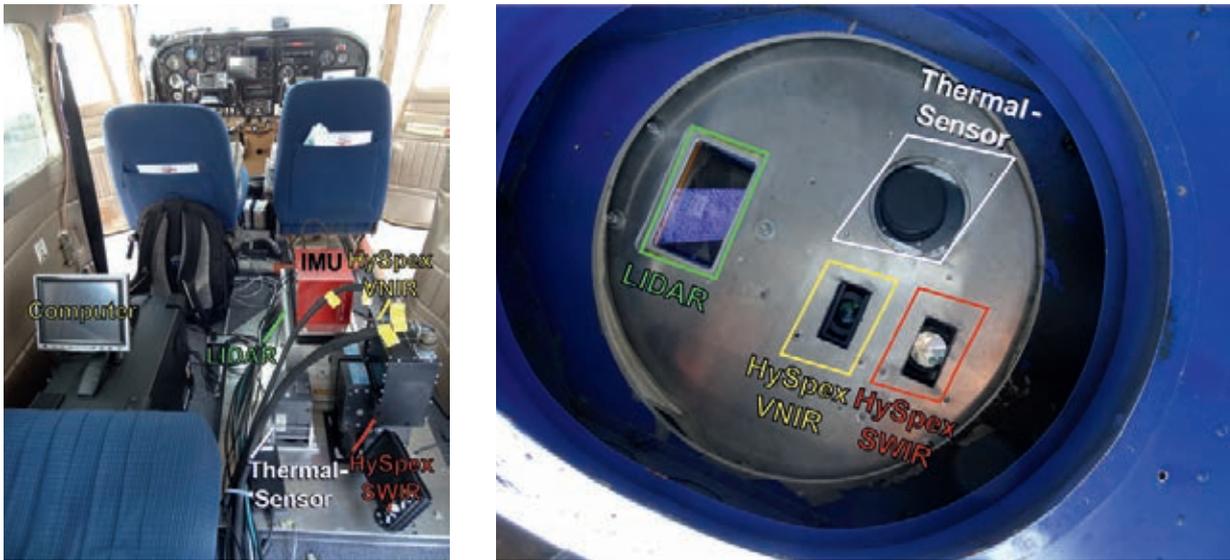


Abb. 2: Abbildende Spektrometersysteme (GFZ-HySpex, Zeilenscanner) im Flugbetrieb, hier in Zusammenarbeit mit der MILAN Geoservice GmbH, mit einem Laserscanner (LIDAR) zur Aufnahme des Geländes. Zusätzlich wird eine Thermalkamera eingesetzt. Rechts: Sensoren auf der Flugzeugunterseite (Fotos: M. Brell, GFZ)

Fig. 2: GFZ-HySpex (line-scanner) in flight-mode here in close cooperation with the MILAN Geoservice GmbH, additionally equipped with a laser-scanner (LIDAR) to capture the terrain information. Additionally a thermal infrared camera is used. Right: Sensors on the under-surface of the aircraft

der Sensorköpfe realisiert. Diese Messkameras können auch für den Flugbetrieb genutzt werden (Abb. 2). Neueste abbildende Spektrometer, wie die Cubert UHD-185, sind zudem in der Lage, ein flächenhaftes, spektrales Abbild des Aufschlusses in einem singulären Scanschritt zu erzeugen. Die spätere Analyse der so gewonnenen Spektren geschieht mit Hilfe von materialspezifischen, charakteristischen Absorptionsbanden, umgangssprachlich auch als „spektraler Fingerabdruck“ bezeichnet. Dieser Fingerabdruck ist eine eindeutige spektrale Eigenschaft, die repräsentativ für bestimmte Materialgruppen (Vegetation, Gesteine, Metalle, etc.) und auch deren einzelne Stoffe, Moleküle und Elemente ist. Dieser wird durch Absorption von Licht im solar-reflektiven Bereich von 350 bis 2500nm infolge Interaktion mit den Oberflächenmaterialien verursacht. Diese Absorptionssignaturen werden in einer Datenbank erfasst, der sogenannten Spektralbibliothek (Swayze, 2014). Ein mathematischer Abgleich dieser spektralen Datenbank mit unbekanntem Spektren aus abbildenden Spektrometern an Board von Flugzeugen oder Satelliten ermöglicht eine flächenhafte Charakterisierung des Oberflächenmaterials einer gesamten Region (Kokaly, 2012; Rogass et al., 2012). Um die Vergleichbarkeit von Bibliotheksspektren, die im Labor gewonnen wurden, mit den Fernerkundungsdaten zu ermöglichen, sind umfangreiche geometrische und radiometrische Korrekturen nötig (Guanter et al., 2009). Die durch diese Operationen gewonnene Messgröße ist die Reflektanz, welche, vereinfacht dargestellt, das Verhältnis zwischen der von dem Objekt ausgehenden Strahlung zu der einfallenden Strahlung bezeichnet. Die Reflektanz enthält somit

materialspezifische Informationen für alle Oberflächenmaterialien, die mit der Spektralbibliothek verglichen werden können, wie in den Abb. 3 und 4 beispielhaft dargestellt.

Ergebnisse der fernerkundlichen Untersuchungen im südlichen Afrika

Der Einsatz flugzeuggetragener, abbildender Spektrometer kann in den Ländern des südlichen Afrikas aufgrund des hohen logistischen Aufwands und der damit verbundenen hohen Kosten nur lokal und zeitlich begrenzt erfolgen (Mielke et al., 2014). In diesen Gebieten sind daher für die fernerkundlichen Anwendungen vor allem Satellitensensoren aufgrund der oben benannten Kosteneffizienz von Vorteil. Diese Sensoren müssen für eine Anwendung z. B. in der räumlichen Überwachung eine ausreichende zeitliche Auflösung und räumliche Abdeckung bieten, wie beispielsweise die „State of the Art“-Sensoren der NASA Hyperion (hyperspektral) und Landsat 8 OLI (multispektral) sowie die zukünftigen Sensoren EnMAP (Environmental Mapping and Analysis Program, hyperspektral; Kaufmann et al., 2006) und Sentinel-2 (multispektral; Mielke et al., 2014). Diese werden über eine „freie Daten“-Politik verfügen und sind somit als Datenquelle für Anwendungen in Schwellenländern, wie dem südlichen Afrika, geeignet. Zusätzlich bieten hyperspektrale Satellitendaten, wie z. B. von EnMAP, die Möglichkeit zur schnellen, großflächigen Charakterisierung der Oberflächenmineralogie in schwer zugänglichen, ariden Gebieten, wie in der Grenzregion von Südafrika und Namibia.

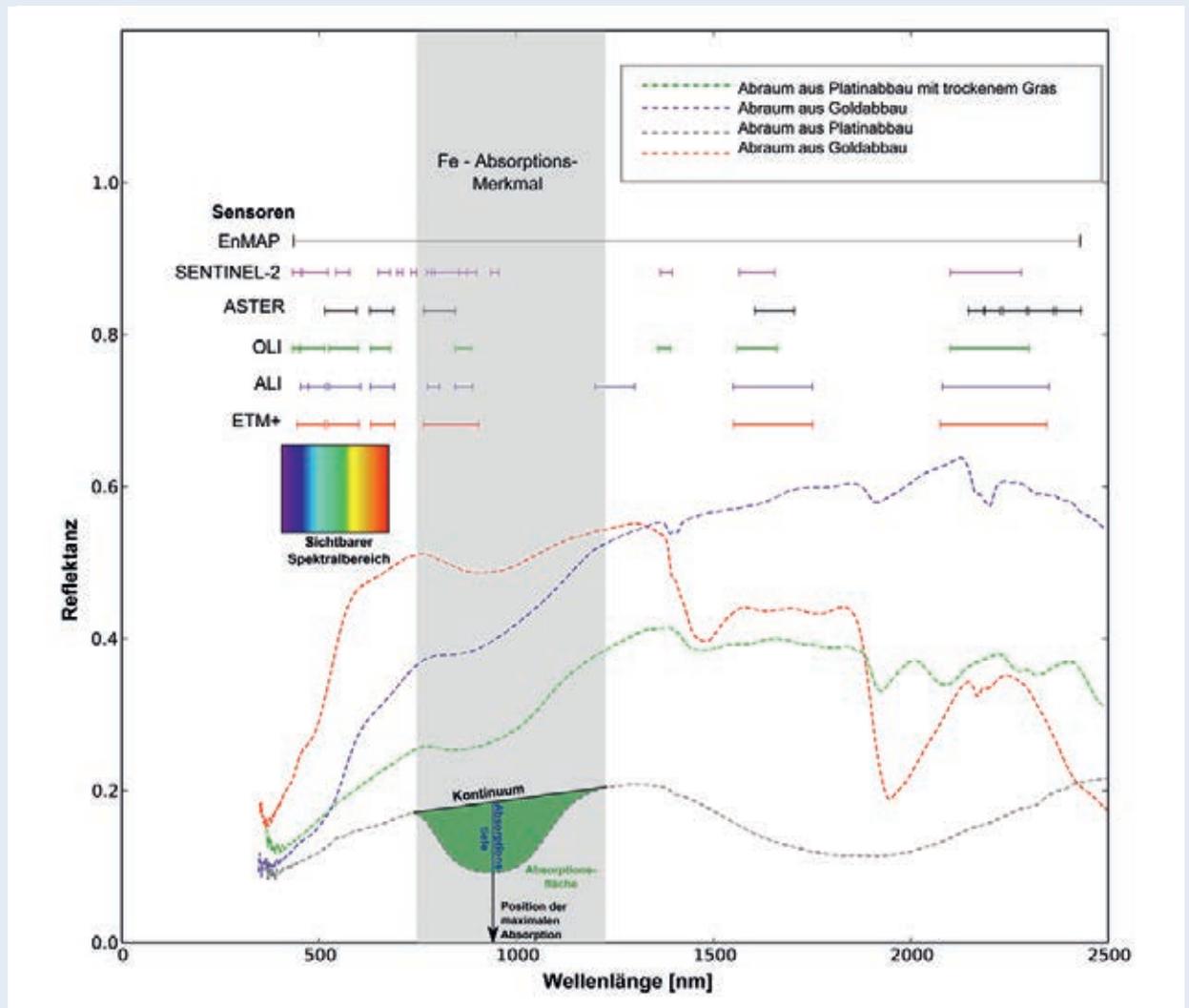


Abb. 3: Illustration des „spektralen Fingerabdrucks“ anhand von Spektren aus dem Platinbergbau nahe Rustenburg, Südafrika. Zur Erkennung des Oberflächenmaterials wird die Position des Absorptionsmaximums sowie Form der Absorptionsfläche ausgewertet (grüne Fläche). Die Absorptionstiefe kann zur Bestimmung des flächenhaften Anteils eines Materials herangezogen werden. Die grüne Kurve zeigt beispielsweise ein Mischspektrum des reinen Haldenmaterialspektrum (grau) mit einem Spektrum trockener Vegetation (grün). Die Eisenabsorptionsbande (Konkavität der Kurven im Bereich um 900 nm, hervorgehoben durch graue Unterlegung) des Haldenmaterials ist noch deutlich im grün dargestellten Spektrum erkennbar. Weiterhin sind die Positionen und Bandbreiten der spektralen Kanäle einiger wichtiger multispektraler Sensoren abgebildet. EnMAP bietet als einziger der hier dargestellten hyperspektralen Sensoren den Vorteil einer kontinuierlichen spektralen Abbildung der Oberfläche, im Unterschied zu den stark spektral vereinzelt Kanälen der multispektralen Sensoren.

Fig. 3: Illustration of the spectral fingerprint, using spectra from platinum tailings near Rustenburg South Africa. The position of the absorption maximum and the feature area and shape (green feature area) is used to identify the surface material. The absorption depth can be used to semi-quantify the abundance of a certain material. The green curve shows a mixed spectrum of dry vegetation with the tailings dam material. The grey curve shows a pure spectrum of the tailings material without vegetation. The iron absorption feature at 900 nm (the concavity in the Spectra highlighted by the grey shaded area) is caused by electron transitions in the material. The iron absorption feature is even visible in the mixed spectrum (green curve). The position and bandwidth of selected multispectral sensors is shown above with their sparse and patchy spectral coverage compared to the continuous spectral coverage of a hyperspectral sensor such as EnMAP.

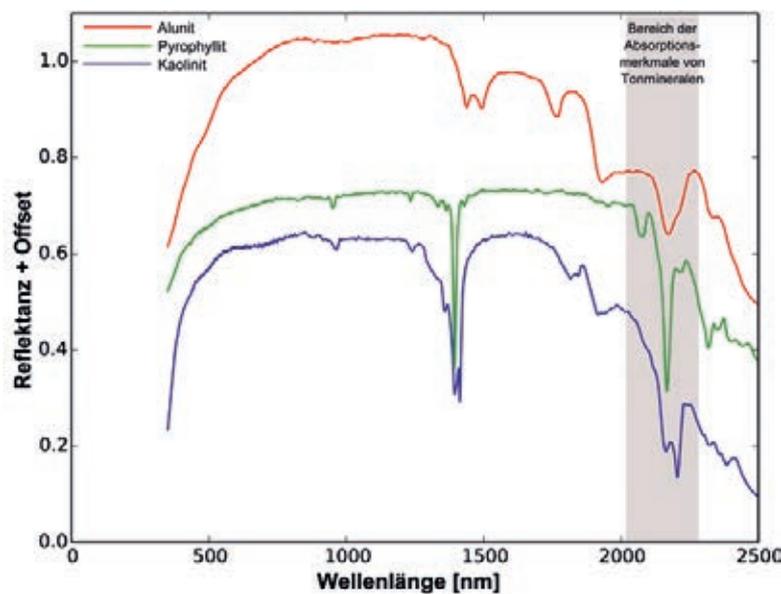


Abb. 4: Darstellung von Tonmineralspektren, welche unter anderem zur Detektion von hydrothermalen Alterationszonen um Lagerstätten herangezogen werden. Zur überlagerungsfreien Darstellung wurden die Spektren entlang der Reflektanzachse versetzt.

Fig. 4: Spectra of clay minerals, which are used for the detection of hydrothermal alteration zones around ore deposits. Offset along the reflectance curve for clarity.

Anwendung der Spektroskopie in der Exploration

Die fernerkundliche, spektrale Identifikation von Mineralen und die Möglichkeit der Erstellung mineralogischer Karten sind besonders für Explorationsunternehmen interessant, da so große Lizenzgebiete in geringer Zeit untersucht werden können. Feldkampagnen und Explorationsbohrungen können gezielter geplant und eine hohe Kosten-/Nutzeneffizienz erzielt werden. Abbildung 5 zeigt die Verteilung größerer Lagerstätten und ihrer Metalle im Gebiet des unteren Orange River an. Hier wurden Feldarbeiten des GFZ im Rahmen des EnMAP-Projekts durchgeführt, um eine geologische mapping-Software (EnGeoMAP) zu entwickeln und zu validieren. Dazu wurde die Kupferlagerstätte Haib River im Süden Namibias näher untersucht. Das Hauptaugenmerk bei dieser Lagerstätte liegt in der Erkennung von Alterationszonen, d. h. Zonen, in denen das Ausgangsgestein durch geochemische Prozesse im Zusammenhang mit hydrothermalen Fluidphasen verändert wurde, z. B. im Zuge der Mineralisation in der Erdkruste oder nahe der Erdoberfläche. Hierbei kommt es zu einer chemischen Umbildung des Ausgangsgesteins, beispielsweise kann in einem Quarz-Feldspat-Porphyr der Feldspat (Plagioklas) zu Serizit (Hellglimmer) und Tonmineralen umgewandelt werden. Mit diesem Prozess kann auch eine Ausfällung von Eisensulfiden, wie beispielsweise Pyrit und kupferhaltige Sulfide wie Bornit, Chalkosin und Chalkopyrit, verbunden sein. Im Zuge der Verwitterung dieser Erzminerale kommt es zur Bildung sekundärer Kupferminerale, wie Malachit, Azurit und Chrysocolla. Weiterhin werden durch die Oxidation sekundäre Eisenminerale wie Hämatit, Goethit und

Jarosit gebildet. Da diese Minerale, wie Tonminerale, sekundäre Eisenminerale und Glimmer, sich gut über ihren spektralen Fingerabdruck identifizieren lassen, können sie auf mögliche Vorkommen von Erzmineralen hindeuten (Abb. 6). Diese Ergebnisse der fernerkundlichen Untersuchungen ermöglichen Bergbauunternehmen zielgerichtete Explorationsprogramme, die die Eingriffe in die natürliche Landschaft auf ein nötiges Minimum reduzieren. Das führt zu einer Verminderung des ökologischen Fußabdrucks dieser Programme und damit auch zu einer Kostenersparnis.

Abbildende Spektroskopie zur Überwachung von Abraumhalden im südlichen Afrika

Nach dem Abbau und der chemischen Extraktion des Gold- und Platinerzes aus dem Gestein bleiben oft größere Haldenlandschaften zurück, die, bedingt durch ihre mineralogisch-geochemische Zusammensetzung, Schwermetalle enthalten können. Um die daraus resultierenden gesundheitlichen Risiken besser abschätzen und begrenzen zu können, ist es wichtig, die räumliche Ausdehnung von Abraumhalden und den möglichen Materialeintrag in ihre unmittelbare Umgebung zu überwachen. Im Großraum von Johannesburg (Goldabbau) und um Rustenburg (Platinabbau) ist eine Überwachung nur mit Hilfe einer Kombination von hyperspektralen und multispektralen Satellitensensoren umsetzbar, da selbst hyperspektrale Sensoren neuester Generation, wie z. B. EnMAP, nur eine begrenzte räumliche Abdeckung bieten werden (30 km Streifenbreite).

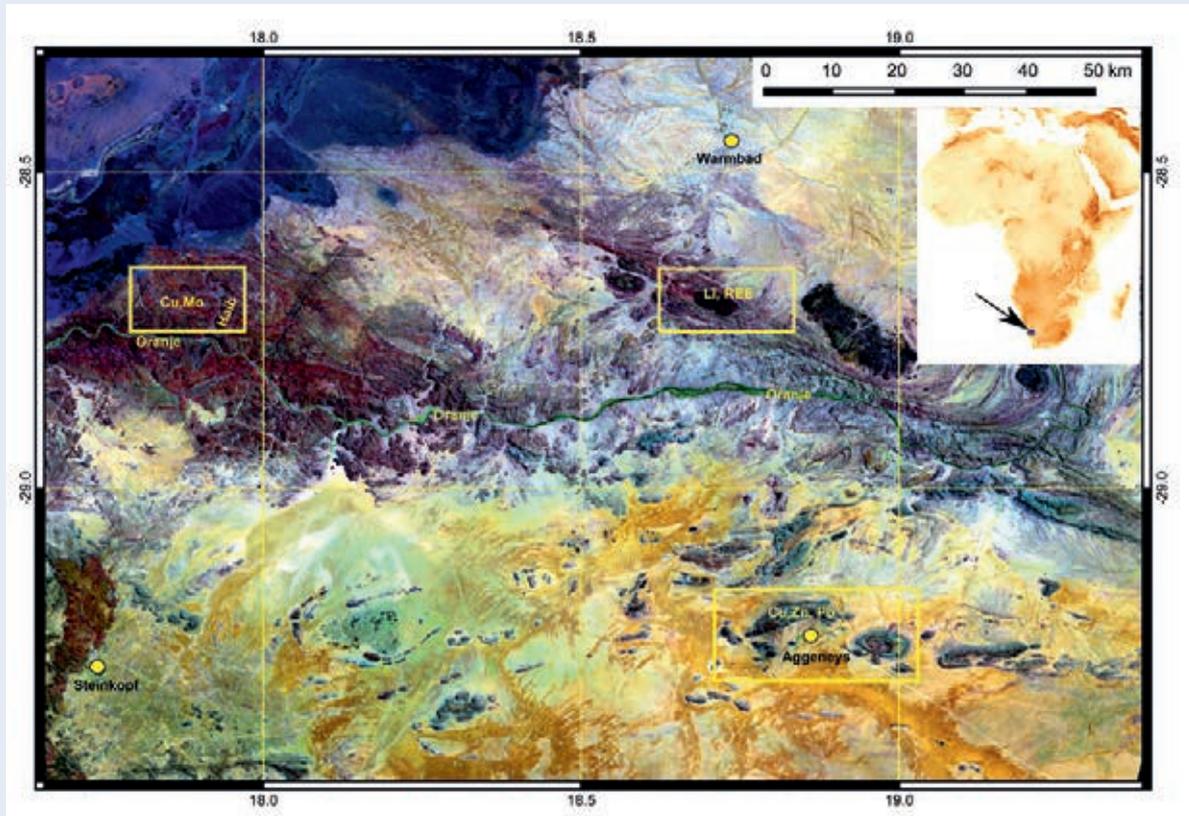


Abb. 5: Landsat 8 OLI-Falschfarbaufnahme (Rot: 2200 nm, Grün: 860 nm, Blau: Rot) in der Grenzregion des Oranje-Flusses, der hier die Grenze zwischen Südafrika im Süden und Namibia im Norden bildet. Eingezeichnet sind die drei wichtigsten Lagerstätten in dieser Region: Aggeneys (Cu, Zn, Pb) im Süden, der Haib-Komplex (Cu, Mo) im Westen und die Tantalite Valley-Pegmatite (Li, REE) im Osten.

Fig. 5: Landsat 8 OLI false color composite (Red: 2200 nm, Green: 860 nm, Blue: Red) showing the Namibian South African border region at the Orange River with the three most important mineral deposit sites of this region: the Aggeneys Cu, Zn, Pb deposit in the south, the Haib Cu, Mo complex in the west and the Tantalite Valley Li, REE pegmatite in the east.

Da aber mit den qualitativ hochwertigen hyperspektralen Daten Oberflächenmaterialien sehr gut identifiziert werden können, ist eine Kombination mit den räumlich ausgedehnten multispektralen Daten von Vorteil, weil diese für eine genauere Materialidentifikation aufgrund ihrer geringeren spektralen Auflösung nur bedingt oder gar nicht einsetzbar sind. Daher kann ein komplementäres Zusammenspiel von multispektralen Systemen wie Sentinel-2, die große Flächen abdecken, und hyperspektralen Systemen wie EnMAP, die spektral sehr viel genauere Daten liefern, von entscheidendem Vorteil sein. So ist z. B. der breite Fingerabdruck von eisenhaltigen Mineralen wie Bronzit, Hämatit, Goethit und Jarosit auch mit den multispektralen Sensoren sichtbar, die die breite Eisenabsorptionsbande nahe 900 nm spektral auflösen. Durch die Tiefe des lokalen Minimums des Spektrums nahe 900 nm (Eisenabsorptionsbande in Abb. 3), in Bezug auf die benachbarten lokalen Maxima (Schultern der

Absorptionsbande), kann nun auf die Anwesenheit von eisenhaltigen Mineralen geschlossen werden. Dies kann auch durch multispektrale Systeme geschehen, welche das Spektrum an den entscheidenden Stellen (Absorptionsbanden und Schultern von Absorptionsbanden) abtasten. So kann z. B. in Abb. 7 durch die Tiefe des spektralen Fingerabdrucks (Absorption) in Relation zu der Höhe einer interpolierten Gerade zwischen den Schultern der Absorptionsbande die mögliche Verbreitung des Haldenmaterials in der Umgebung und damit verbunden eine mögliche Schwermetallbelastung kartiert werden (Mielke et al., 2014).

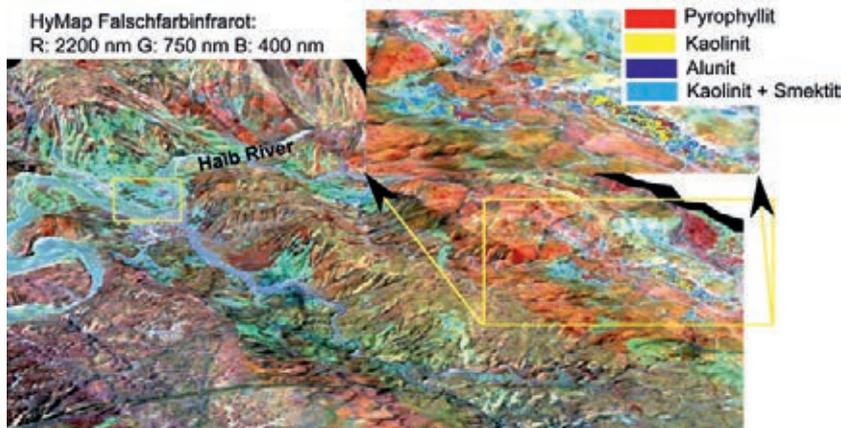


Abb. 6: Aus flugzeuggestützten HyMap-Daten dargestellte 3D-Ansicht der Kernzone des Haib River-Komplexes (R: 2200 nm, G: 750 nm, B: 400 nm). Gelb umrandete Bereiche: aus hyperspektralen Daten detektierte Alterationszonen, die auf eine mögliche Anwesenheit von Sulfiderzen schließen lassen

Fig. 6: 3d view of the core zone of the Haib River complex from airborne HyMap imaging spectrometer data (R: 2200 nm, G: 750 nm, B: 400 nm). The overlay shows alteration zones that may indicate the presence of sulfide ore (yellow boxes).

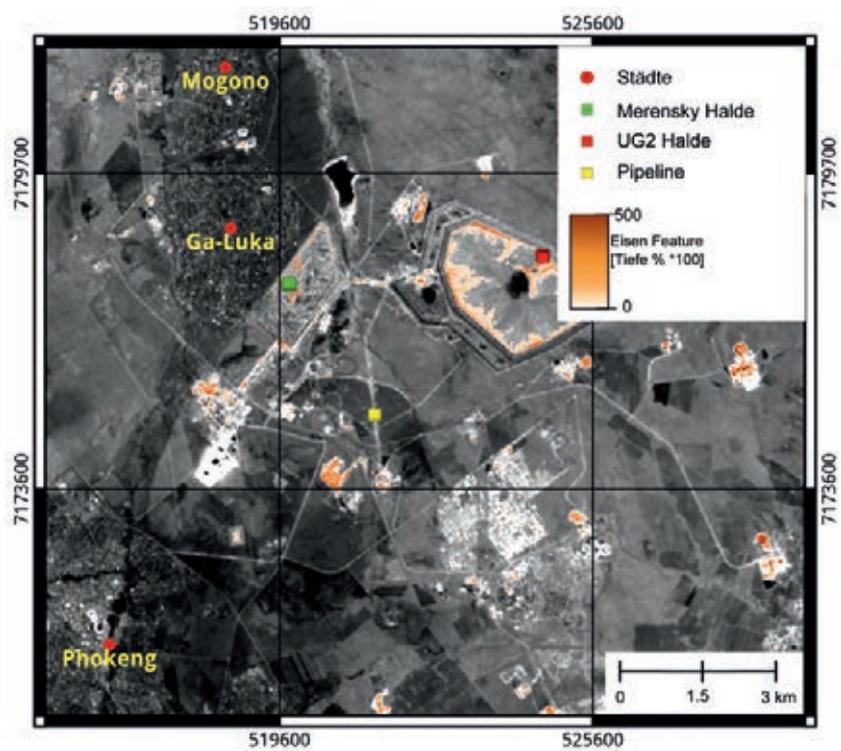


Abb. 7: Landsat 8 OLI mit überlagerter Eisen-Absorptionstiefe (IFD) nach Mielke et al. (2014). Spektrale In-situ-Messungen im Gelände und Beprobungen zeigen, dass sich die räumliche Verteilung von Haldenmaterial gut durch die IFD kartieren lässt. Als mineralogischer Proxy dient hierbei Bronzit, der eine starke Absorption im Bereich um 900 nm verursacht.

Fig. 7: Landsat 8 OLI overlay with an Iron Feature Depth map (IFD) after Mielke et al. (2014), calculated from Landsat 8 data. The spatial distribution of the tailings material can be mapped quite well using the IFD. Bronzite serves as the major mineralogical proxy causing a strong absorption band around 900 nm.

Zusammenfassung und Ausblick

Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass satellitengestützte Fernerkundungssensoren für geowissenschaftliche Fragestellungen insbesondere in Schwellenländern für ein Monitoring großer Flächen in dynamischen Gebieten, wie z. B. in Bergbauregionen, bestens geeignet sind. Daneben bieten sie für nationale geologische Dienste und Bergämter ein unverzichtbares flächenhaftes Werkzeug zur Identifizierung möglicher neuer Explorationsgebiete.

In Zukunft kann ein Einsatz der abbildenden Spektroskopie im Nahbereich auf Drohnen sowie im Tagebau und beim Scannen und Analysieren von Bohrkernen mineralogische Informationen in fast Echt-Zeit liefern. Dies kann zu einer erheblichen Kostenersparnis beim Abbau von Erzen führen. Zudem kann so der Flächenverbrauch minimiert und der Eingriff in Ökosysteme und den Lebensraum des Menschen auf ein Minimum reduziert werden.

Das im südlichen Afrika erworbene wissenschaftliche Know-how für den Einsatz der Spektroskopie bei der Exploration und der Überwachung von Abraumhalden lässt sich nach weiterführenden Arbeiten auch auf geowissenschaftliche Problemstellungen in Deutschland bzw. auch weltweit übertragen. Hierbei kann insbesondere eine enge Verzahnung von Wissenschaft (Wissenserwerb, Methodenentwicklung und Validation) und Wirtschaft (Sensorbau, Softwareentwicklung und Vermarktung) bei entsprechender finanzieller und politischer Unterstützung einen entscheidenden Vorsprung für den Wissenschafts- und Wirtschaftsstandort Deutschland bedeuten. Die in Deutschland entwickelte hyperspektrale Satellitenmission EnMAP wird mit dieser modernen Technik neue Einblicke in großskalige geowissenschaftliche Prozesse liefern.

Literatur

- Swayze, G. A., Clark, R. N., Goetz, A. F. H., Livo, K. E., Breit, G. N., Kruse, F. A., Sutley, S. J., Snee, L. W., Lowers, H. A., Post, J. L., Stoffregen, R. E., Ashley, R. P. (2014): Mapping Advanced Argillic Alteration at Cuprite, Nevada, Using Imaging Spectroscopy. – *Economic Geology*, 109, 5, 1179-1221. DOI: <http://doi.org/10.2113/econgeo.109.5.1179>
- Mielke, C., Bösch, N., Rogaß, C., Kaufmann, H., Gauert, C., de Wit, M. (2014): Spaceborne Mine Waste Mineralogy Monitoring in South Africa, Applications for Modern Push-Broom Missions: Hyperion/OLI and EnMAP/Sentinel-2. - *Remote Sensing*, 6, 8, p. 6790-6816. DOI: <http://doi.org/10.3390/rs6086790>
- Kokaly R. F. (2012): Spectroscopic remote sensing for material identification, vegetation characterization, and mapping. – In: Shen, S. S., Lewis, P. E. (Ed.), *Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XVIII*, (Proceedings of SPIE; 8390) Bellingham, Wash.: SPIE, 839014. DOI: <http://doi.org/10.1117/12.919121>
- Rogaß, C., Segl, K., Mielke, C., Fuchs, Y. (2013): EnGeoMAP - A geological mapping tool applied to the EnMAP mission. - *EARSel eProceedings*, 12, 2, p. 94-100. DOI: <http://doi.org/10.12760/01-2013-2-02>
- Guanter, L., Segl, K., Kaufmann, H. (2009): Simulation of Optical Remote-Sensing Scenes With Application to the EnMAP Hyperspectral Mission. - *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47, 7, p. 2340-2351. DOI: <http://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2011616>
- Kaufmann, H., Segl, K., Chabrillat, S., Hofer, S., Stuffer, T., Müller, A., Richter, R., Schreier, G., Haydn, R., Bach, H. (2006): A Hyperspectral Sensor for Environmental Mapping and Analysis (Invited paper), *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2006) & 27th Canadian Symposium on Remote Sensing (Denver, Colorado, USA 2006)*.