

Hernan Flores  
Tobias Rudolph  
Stefan Möllerherm

## Hyperspectral Sensing to Boost AMD Monitoring in Post-Mining Scenery

The evolving hyperspectral sensors have become a big ally for a large range of applications in remote sensing for the monitoring of a variety of earth ecosystems and processes (natural and anthropogenic). The processes occurring within the mining life cycle are not an exception. Hyperspectral sensors have been widely used in a large number of applications ranging from exploration, operation and post-mining. In this work, the authors explore particularly the use of hyperspectral methods to contribute to the monitoring of one of the most important environmental phenomena that many mining operations might

face: acid mine drainage (AMD). Failure of accurately monitoring and remediation of such complex, leads to long-term impacts on ecosystems and human health, in addition to significant financial consequences and reputational damage to operators. Hyperspectral imagery represents one solution to enhance the quality of classical geochemical analyses in post mining-related contaminated scenarios, which can increase the overall accuracy of the monitoring, allowing frequent and multi-temporal observations to detect risk areas and take fast corrective actions.

## Hyperspektralerkundung zur Steigerung der Überwachung saurer Grubenwässer in Nachbergbauregionen

Die sich kontinuierlich entwickelnden Hyperspektralsensoren sind zu einem wichtigen Verbündeten bei einer Vielzahl von Anwendungen in der Fernerkundung zur Überwachung verschiedener (natürlicher und anthropogener) Ökosysteme und Prozesse der Erde geworden. Die Prozesse, die innerhalb des Lebenszyklus des Bergbaus auftreten, sind keine Ausnahme. Hyperspektralsensoren werden in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt, die von der Exploration über den Betrieb bis hin zum Nachbergbau reichen. In dieser Arbeit untersuchen die Autoren insbesondere den Einsatz von hyperspektralen Methoden, um zur Überwachung eines der wichtigsten Umweltphänomene beizutragen, mit denen viele Bergbaubetriebe

konfrontiert sein könnten: Acid Mine Drainage (AMD). Das Versagen einer genauen Überwachung und Sanierung eines solchen Komplexes führt zu langfristigen Auswirkungen auf Ökosysteme und die menschliche Gesundheit, zusätzlich zu erheblichen finanziellen Folgen und Reputationsschäden für die Betreiber. Hyperspektrale Bildgebung stellt eine Lösung dar, um die Qualität klassischer, geochemischer Analysen in kontaminierten Nachbergbauszenarien zu verbessern, was die Gesamtgenauigkeit der Überwachung erhöhen kann und häufige und multitemporale Beobachtungen ermöglicht, um Risikobereiche zu erkennen und schnelle Korrekturmaßnahmen zu ergreifen.

### Environmental monitoring of AMD

Acid mine drainage (AMD) is an environmental phenomenon that can occur either by the natural exposition of sulfate metals to weathering conditions or as a consequence of certain mining activities. Lottermoser (1) defines AMD as a process whereby low pH mine water is formed from the oxidation of sulfide minerals. These acidic and metal-enriched waters can negatively affect the natural ecosystem's quality and aquatic life. Mainly impacted areas are rivers, lakes, estuaries, and coastal waters. Its advancement can take years or decades and can continue spatially increasing for centuries (1). Therefore, such an environmental problem needs to be carefully monitored and ideally remediated.

### Umweltüberwachung von AMD

Acid Mine Drainage (AMD) ist ein Umweltphänomen, das entweder durch die natürliche Exposition von Sulfatmetallen gegenüber Witterungsbedingungen oder als Folge bestimmter Bergbauaktivitäten auftreten kann. Lottermoser (1) definiert AMD als einen Prozess, bei dem Grubenwasser mit niedrigem pH-Wert aus der Oxidation von Sulfidmineralien gebildet wird. Diese sauren und mit Metallen angereicherten Gewässer können die Qualität des natürlichen Ökosystems und das Leben im Wasser negativ beeinflussen. Hauptsächlich betroffene Gebiete sind Flüsse, Seen, Flussmündungen und Küstengewässer. Ihr Vorschreiten kann Jahre oder Jahrzehnte dauern und sich über Jahrhunderte räumlich ausdehnen (1). Daher muss ein sol-

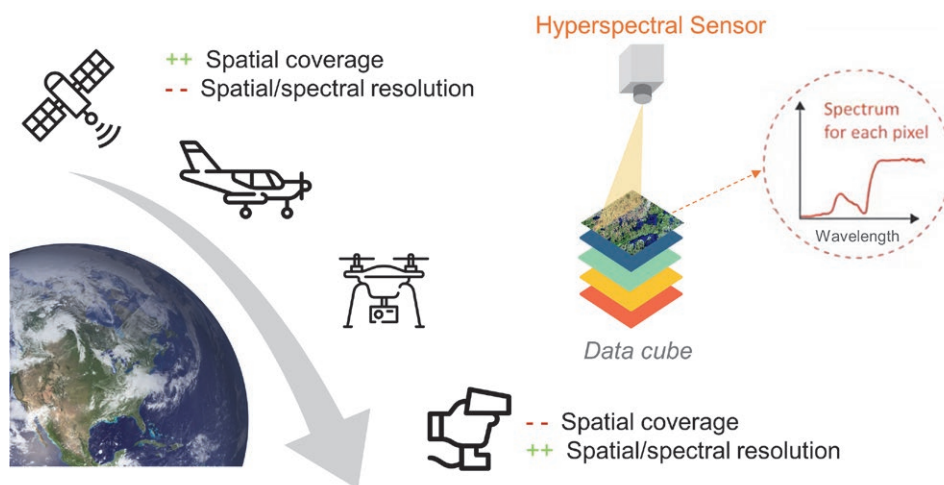


Fig. 1. Downscaling (multi-scale) scheme for hyperspectral sensing from high spatial coverage of satellite based sensors to high spectral resolution of drone-borne/terrestrial sensors and hyperspectral data cube scanning general concept.

Bild 1. Downscaling-Schema (mehrskali) für Hyperspektralerkundung von der hohen räumlichen Erfassung satellitenbasierter Sensoren zur hohen spektralen Auflösung (drohngestützt oder von Sensoren auf der Erde übertragen) und dem allgemeinen Konzept des hyperspektralen Datenwürfel-Scannings. Source/Quelle: THGA

Several efforts have been applied in order to monitor the spatial distribution of contamination by AMD, commonly involving systematic sampling and laboratory analysis of stream sediment followed by interpolation of the results in assembled distribution maps (2, 3) however, such approaches can be time-consuming, costly, and with limited spatial coverage.

The environmental monitoring of such complex and diverse adverse effects on earth ecosystems requires frequent and multi-temporal observations. Active control can serve as an effective method for successful conservation or rehabilitation of natural systems. In this sense, remote sensing tools have been widely used in many environmental investigations since the technique enables the use of digital imaging sensors to reveal key information from a distance, typically from satellite or aircraft (4). Thus, traditional monitoring studies based only on certain ground-sampling locations can be expanded to large areas from derived aerial-image products. In general, optical spectral analysis refers to the measurement of matter-light interactions as a function of their energy. More specifically, this comprehends any radiation that is emitted, reflected or transmitted from the investigated target (5). The development of new generations of sensors made it possible to examine processes on earth, beyond the visible spectrum of the human eye. Commonly, these devices can acquire data in different wavelength ranges – from the ultraviolet to the far-infrared spectrum of electromagnetic radiation – and have evolved from spectral over multispectral to hyperspectral sensors for different kinds of earth's surface investigations.

The trend toward progress for higher spectral resolution (hyperspectral remote sensing) has grown in the last decades. While the majority of space-borne sensors traditionally used for geologic remote sensing like ASTER or Landsat contains information in only a few wavelengths or bands, hyperspectral sensors are able to provide a continuous spectrum for each pixel of the dataset (6). Currently, hyperspectral sensors are employed in a wide range of spatial dimensions (scales) according to the platform used for data acquisition, e.g., satellite, airborne, up to lab-scale sensing for detailed-mineralogical analyses (Figure 1). The emergent use of unmanned aerial systems (UAS), like multi-copters, and new-generation lightweight hyperspectral sensors have become a tool to collect data at a higher spatial resolution than some of their aircraft and satellite counterparts, resulting in greater precision (higher spatial resolution of a scene and enabling the investigation of up to

ches Umweltproblem sorgfältig überwacht und idealerweise behoben werden.

Um die räumliche Verteilung der Kontaminierung durch AMD zu überwachen, wurden mehrere Anstrengungen unternommen, die in der Regel systematische Probenahmen und Laboranalysen von Flusssedimenten beinhalten, gefolgt vom Interpolieren der Ergebnisse in zusammengestellten Verteilungskarten (2, 3). Solche Ansätze können jedoch zeitaufwendig, kostspielig und mit begrenzter räumlicher Abdeckung sein.

Die Umweltüberwachung solch komplexer und vielfältiger nachteiliger Auswirkungen auf die Ökosysteme der Erde erfordert häufige und multitemporale Beobachtungen. Aktive Kontrolle kann als effektive Methode zur erfolgreichen Erhaltung oder Rehabilitation natürlicher Systeme dienen. In diesem Sinne werden Fernerkundungswerkzeuge in vielen Umweltuntersuchungen häufig eingesetzt, da die Technik die Verwendung digitaler Bildgebungssensoren ermöglicht, Schlüsselinformationen aus der Ferne, üblicherweise von Satelliten oder Flugzeugen, anzuzeigen (4). So können traditionelle Geländeüberwachungen, die nur auf bestimmten Orten der Bodenprobenahme basieren, aus abgeleiteten Luftbildprodukten auf große Flächen ausgeweitet werden. Im Allgemeinen bezieht sich die optische Spektralanalyse auf die Messung von Materie Licht Wechselwirkungen als Funktion ihrer Energie. Genauer gesagt, umfasst dies jede Strahlung, die vom untersuchten Ziel abgegeben, reflektiert oder übertragen wird (5). Die Entwicklung neuer Generationen von Sensoren hat es ermöglicht, Prozesse auf der Erde jenseits des für das menschlichen Auge sichtbaren Spektrums zu untersuchen. Üblicherweise können diese Geräte Daten in verschiedenen Wellenlängenbereichen erfassen – vom ultravioletten bis zum ferninfraroten Spektrum elektromagnetischer Strahlung – und haben sich von spektralen über multispektrale zu hyperspektralen Sensoren für verschiedene Untersuchungsarten der Erdoberfläche entwickelt.

Der Trend zum Fortschritt für eine höhere spektrale Auflösung (hyperspektrale Fernerkundung) hat in den letzten Jahrzehnten zugenommen. Während die Mehrheit der weltraumgestützten Sensoren, die herkömmlicherweise für die geologische Fernerkundung verwendet werden, wie ASTER oder Landsat, Informationen in nur wenigen Wellenlängen und Teilspektren enthält, sind hyperspektrale Sensoren in der Lage, ein kontinuierliches Spektrum für jedes Pixel des Datensatzes bereitzustellen (6). Derzeit werden

a few centimeters sized pixels) (7). In this article, some studies will be reviewed that have taken advantage of hyperspectral imaging to monitor AMD occurrence, mineralogy and related geochemistry.

### From spectral to hyperspectral sensors

The main purpose of hyperspectral remote sensing – also known as imaging spectrometry or imaging spectroscopy – is to measure quantitatively the components of the Earth System from calibrated (radiance, reflectance or emissivity) spectra acquired as images in many, narrow and contiguous spectral bands (6). Hyperspectral sensors can capture data from the visible through the near-infrared wavelength ranges over a determined terrestrial surface of the earth. Collected data results in a three-dimensional data-cube composed of a set of pixels represented as vectors, containing the measurement corresponding to a specific wavelength (8). This provides the opportunity to query a plottable spectral signature for each spatial position on a surface. The accompanying amount of information results in much larger data sizes compared to polychromatic or multispectral imagery (9). The vector size is equal to the number of bands or spectral channels. In opposition to multispectral data, which usually acquire up to tens of bands, hyperspectral data channels are able to collect several hundreds of contiguous bands along the spectral axis (6).

Regardless the scale of acquisition, hyperspectral sensors bring higher spectral resolution, in comparison to multispectral sensors, offering higher accuracy to detect targets and characterize earth surface processes. In Figure 2, it is possible to distinguish the differences between a common Red Green Blue (RGB) composite, a multispectral dataset and the hyperspectral. The visualization format of any spectral dataset is similar, regardless the covered wavelength range, scanned specimen or area, and the spectral process underlying. A spectral imaging dataset is composed by three dimensions with at least one, even indistinct, value defining the measured signal intensity along at least two spatial and one spectral axis (9).

### Multi-scale approach in post-mining applications

Mining wastes are quite heterogeneous compared with other industry sectors due to their quantity, mineralogical formation, and their properties. It varies depending on the mineral preparation and enrichment process applied. Waste in mines is usually stored in dumpsites and slurry ponds, while it is stored in some mineral sites in the form of post-leaching ore piles. As introduced early AMD can occur in these waste sites and if superficially dumped, when iron sulfide in coal mines or sulfur in base metal mines, can undergo into oxidation conditions (10). With the removal of ore from the ground exposure of sulfides to water and oxygen in air takes place, in turn, the oxidation processes of pyrite  $\text{FeS}_2$  associated with iron, coal, and sulfur deposits can produce an acidic environment (1).

Particularly, the visible to shortwave infrared electromagnetic range has been widely used to monitor AMD mineralogy at mining surroundings since iron and also REE present strong and narrow absorption features in the visible to near infrared (VNIR). Mine waste dumps, pit-lakes, stockpiles and tailings generally contain high dissolved iron and sulfate content normally associated with this kind of metalliferous drainage, which makes possible to provide qualitative and (semi-)

hyperspektrale Sensoren in einer Vielzahl von räumlichen Dimensionen (Skalen) entsprechend der für die Datenerfassung verwendeten Plattform eingesetzt, z.B. Satellit, luftgestützt, bis hin zur Labormessung für detailliert mineralogische Analysen (Bild 1). Der aufkommende Einsatz von unbemannten Luftsystemen (UAS) wie Multikoptern und leichten Hyperspektralsensoren der neuen Generation ist zu einem Werkzeug geworden, um Daten zu sammeln mit einer höheren räumlichen Auflösung als einige ihrer Flugzeug- und Satellitengegenstücke, was zu höherer Genauigkeit führt (höhere räumliche Auflösung einer Szene und die Untersuchung von bis zu wenigen Zentimeter großen Pixeln) (7). In diesem Artikel werden einige Studien bewertet, die Hyperspektralbildgebung genutzt haben, um AMD-Vorkommnisse, die Mineralogie und die damit verbundene Geochemie zu überwachen.

### Von spektralen zu hyperspektralen Sensoren

Der Hauptzweck hyperspektraler Fernerkundung – auch bekannt als abbildende Spektrometrie oder abbildende Spektroskopie – besteht darin, die Komponenten des Erdsystems aus kalibrierten (Strahldichte, Reflexion oder Emissionsgrad) Spektren, die als Bilder in vielen, engen und zusammenhängenden Spektralbändern aufgenommen wurden, quantitativ zu messen (6). Hyperspektrale Sensoren können Daten aus dem sichtbaren Wellenlängenbereich des nahen Infrarots über eine bestimmte terrestrische Oberfläche der Erde erfassen. Die gesammelten Daten ergeben einen dreidimensionalen Datenwürfel, der aus einer Reihe von Pixeln besteht, die als Vektoren dargestellt werden und die Messung enthalten, die einer bestimmten Wellenlänge entspricht (8). Dies bietet die Möglichkeit, eine grafisch darstellbare Spektralsignatur für jede räumliche Position auf einer Oberfläche abzufragen. Die damit einhergehende Informationsmenge führt zu viel größeren Datenumfängen im Vergleich zu polychromatischen oder multispektralen Bildern (9). Die Vektorgröße entspricht der Anzahl der Bänder oder Spektralkanäle. Im Gegensatz zu multispektralen Daten, die normalerweise bis zu Dutzende von Bändern erfassen, sind hyperspektrale Datenkanäle in der Lage, mehrere hundert zusammenhängende Bänder entlang der Spektralachse zu sammeln (6).

Unabhängig vom Umfang der Erfassung bieten Hyperspektralsensoren im Vergleich zu multispektralen Sensoren eine höhere spektrale Auflösung und eine höhere Genauigkeit bei der Zielerkennung und der Charakterisierung von Prozessen auf der Erdoberfläche. Bild 2 zeigt die Unterschiede zwischen einem gemeinsamen Rotgrünblau (RGB)-Komposit, einem multispektralen und einem hyperspektralen Datensatz. Das Visualisierungsformat jedes Spektraldatensatzes ist ähnlich, unabhängig vom abgedeckten Wellenlängenbereich, der gescannten Probe oder Fläche und dem zugrunde liegenden spektralen Prozess. Ein spektraler Abbildungsdatensatz besteht aus drei Dimensionen mit mindestens einem, auch undeutlichen Wert, der die gemessene Signalintensität entlang mindestens zweier räumlicher und einer spektralen Achse definiert (9).

### Multiskale Herangehensweise in Nachbergbauanwendungen

Bergbauabfälle sind im Vergleich zu anderen Industriezweigen aufgrund ihrer Menge, mineralogischen Bildung und Eigenschaften recht heterogen. Sie variieren je nach angewendetem Mineralauf-

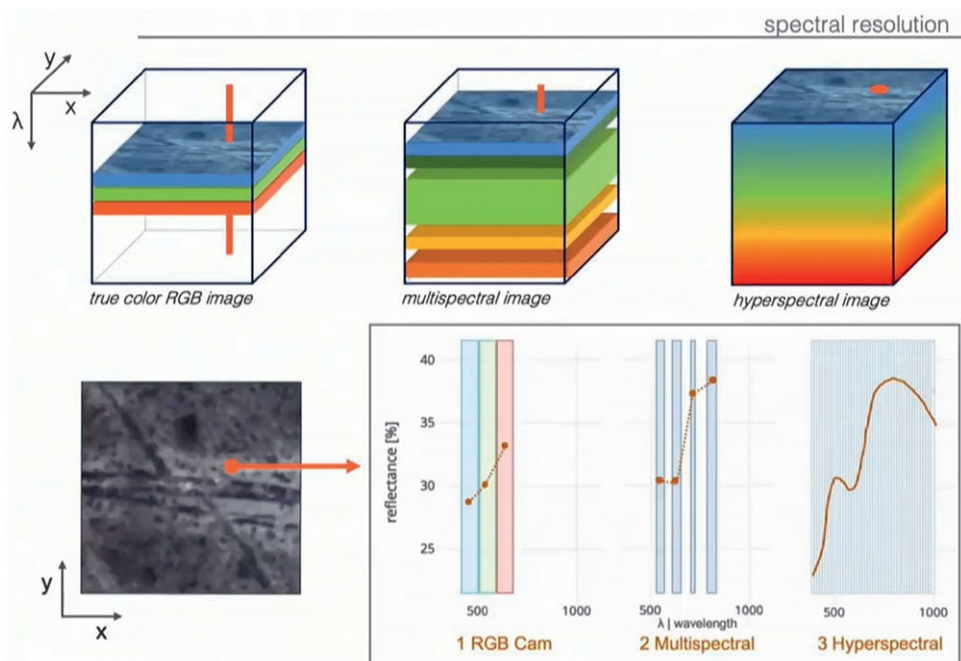


Fig. 2. Schematic examples on different levels of dimensionality of spectral data with  $x, y, \lambda$  being  $x$  and  $y$  the spatial and  $\lambda$  the spectral (modified from (9)). // Bild 2. Schematische Beispiele auf verschiedenen Dimensionsebenen spektraler Daten mit  $x, y, \lambda$ , wobei  $x$  und  $y$  die räumliche und  $\lambda$  die spektrale Achse darstellen (angepasst von (9)).

quantitative information on the composition, characteristics and spatial distribution of AMD processes. The characteristics of drainage waters may present high concentrations of metals and ions such as iron, manganese, aluminum, and sulfate. Elements like zinc, cobalt, lead, chromium and copper are commonly found in trace concentrations (11). These elements react with the surrounding environment, and in conjunction with other abundant ions, lead to the precipitation of a broad list of secondary minerals, which are not exclusive to mine tailings and AMD waters, having also been found in high saline environments regardless of pH values (12).

### Satellite-airplane scale

Several studies have shown the benefits of remote sensing data for many environmental monitoring purposes. In relation to AMD, some studies have demonstrated the feasibility to use field and imaging spectroscopy for the detection of minerals containing metals as contamination proxies in mining areas (2, 13). Another attempt to map iron-bearing minerals with satellite data was performed by Swayze et al. (14) including validation studies with XRD and field spectroscopy. Montero et al. studied the characteristics of waste rock associated with acid drainage for protecting water reservoirs (15), while Sares et al. focused on indirect pH estimations of an AMD-stream by identifying iron-bearing minerals precipitated on the stream bed (16).

Most recently, hyperspectral sensors have been used in the study of mine tailings using airborne platforms (17, 18). These studies focused on the responsible minerals of acid formation in tailings and the distribution of the secondary minerals, e.g., jarosite, ferrihydrite, goethite/hematite, as indicators of the degree of environmental pollution using reflectance spectroscopy (19). Quick mineral diagnosis of short-lived thin-crusts concentrating

bereitungs- und Anreicherungsprozess. Abfälle in Bergwerken werden in der Regel auf Halden oder in Schlammteichen gelagert, während sie an einigen Mineralstandorten in Form von ausgelagerten Halden gelagert werden. Wie bereits angeführt, kann dort AMD auftreten und bei Aufhebung an der Tagesoberfläche mit Eisensulfid in Kohle- oder Schwefel in Basismetallbergwerken in Oxidationsbedingungen übergehen (10). Mit der Gewinnung von Erz aus dem Boden kommt es zu einer Exposition von Sulfiden gegenüber Wasser und Luftsauerstoff, wodurch wiederum die Oxidationsprozesse von Pyrit ( $\text{FeS}_2$ ) im Zusammenhang mit Eisen-, Kohle- und Schwefelablagerungen ein saures Milieu erzeugen können (1).

Insbesondere der sichtbare bis kurzwellige infrarote elektromagnetische Bereich wird häufig zur Überwachung der AMD-Mineralogie in Bergbaugruben eingesetzt, da Eisen und auch REE starke und enge Absorptionsmerkmale im sichtbaren bis nahen Infrarot (VNIR) aufweisen. Bergbahalden, Tagebaurestlöcher und Aufbereitungsrückstände enthalten im Allgemeinen einen hohen Gehalt an gelöstem Eisen und Sulfat, der normalerweise mit dieser Art der metallhaltigen Entwässerung verbunden ist, was qualitative und (semi-)quantitative Informationen über die Zusammensetzung, Eigenschaften und räumliche Verteilung von AMD-Prozessen ermöglicht. Die Eigenschaften von Grubenwässern können hohe Konzentrationen von Metallen und Ionen wie Eisen, Mangan, Aluminium und Sulfat aufweisen. Elemente wie Zink, Kobalt, Blei, Chrom und Kupfer kommen häufig in Spurenkonzentrationen vor (11). Diese Elemente reagieren mit der Umgebung und führen in Verbindung mit anderen reichlich vorhandenen Ionen zur Ausfällung einer breiten Liste von Sekundärmineralien, die nicht ausschließlich in Bergbaurückständen und AMD-Wasser vorkommen, sondern auch in stark salzhaltigen Umgebungen unabhängig von pH-Werten gefunden wurden (12).

males im sichtbaren bis nahen Infrarot (VNIR) aufweisen. Bergbahalden, Tagebaurestlöcher und Aufbereitungsrückstände enthalten im Allgemeinen einen hohen Gehalt an gelöstem Eisen und Sulfat, der normalerweise mit dieser Art der metallhaltigen Entwässerung verbunden ist, was qualitative und (semi-)quantitative Informationen über die Zusammensetzung, Eigenschaften und räumliche Verteilung von AMD-Prozessen ermöglicht. Die Eigenschaften von Grubenwässern können hohe Konzentrationen von Metallen und Ionen wie Eisen, Mangan, Aluminium und Sulfat aufweisen. Elemente wie Zink, Kobalt, Blei, Chrom und Kupfer kommen häufig in Spurenkonzentrationen vor (11). Diese Elemente reagieren mit der Umgebung und führen in Verbindung mit anderen reichlich vorhandenen Ionen zur Ausfällung einer breiten Liste von Sekundärmineralien, die nicht ausschließlich in Bergbaurückständen und AMD-Wasser vorkommen, sondern auch in stark salzhaltigen Umgebungen unabhängig von pH-Werten gefunden wurden (12).

### Satelliten-Flugzeug Maßstab

Mehrere Studien haben den Nutzen von Fernerkundungsdaten für viele Umweltüberwachungszwecke gezeigt. In Bezug auf AMD haben einige Studien die Machbarkeit nachgewiesen, Feld- und Bildgebungsspektroskopie zum Nachweis metallhaltiger Mineralien als Kontaminierungsproxies in Bergbaugebieten einzusetzen (2, 13). Ein weiterer Versuch, eisenhaltige Mineralien mit Satellitendaten abzubilden, wurde von Swayze et al. (14) durchgeführt, einschließlich Validierungsstudien mit XRD und Feldspektroskopie. Montero u.a. untersuchten die Eigenschaften von Abfallgestein im Zusammenhang mit saurer Entwässerung zum Schutz von Gewässern (15), während Sares u.a. sich auf indirekte pH-Schätzungen eines AMD-Stroms konzentrierten, indem sie eisenhaltige Mineralien identifizierten, die aus dem Bachbett ausgefällt wurden (16).

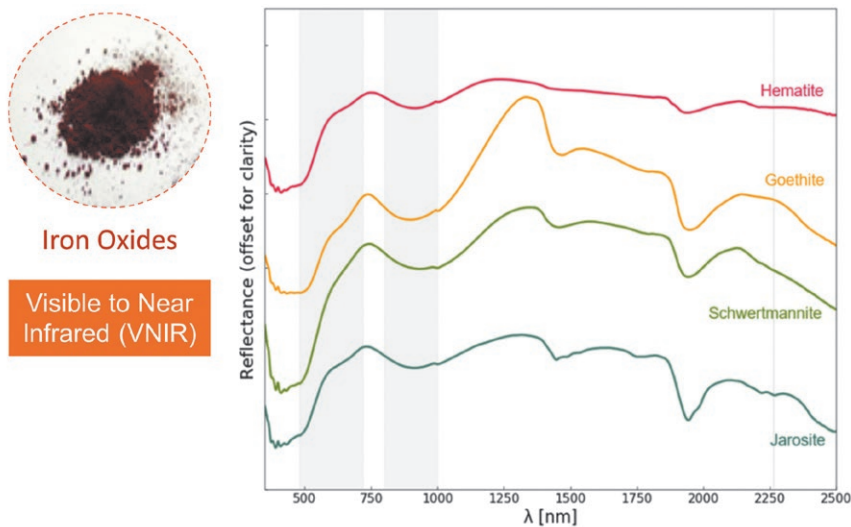


Fig. 3. Spectral curves for the main secondary iron-minerals typically of AMD (hematite, goethite, jarosite and schwertmannite), indicating prominent absorption features of each, using the spectral library of Crowley et al. (20). // Bild 3. Spektralkurven der hauptsächlich in AMD vorkommenden Sekundäreisenminerale (Hämatit, Goethit, Jarosit und Schwertmannit), welche die jeweiligen starken Absorptionseigenschaften mittels der Spektralbibliothek von Crowley et al. (20) zeigen.

metals by means of high spectral resolution imagery has been gathered in a spectral library for AMD minerals by Crowley et al. (20). Over river sediments and vegetation, visible-near-infrared spectroscopy has been researched by Clevers und Kooistra (21).

Each mineral provides a unique spectral signature that allows distinguishing between them. In this sense, Figure 3 shows reflectance for four of the main distinctive iron-secondary minerals related to AMD production (goethite, jarosite, hematite, and schwertmannite).

Spectral curves reveals distinctive absorption features depths of each iron mineral. Two regions are gray-shaded in Figure 3 to analyze the shapes and wavelength positions of each mineral in the charge transfer (ligand to metal charge transfer) transition and those triggered by the crystal field effects (transitions of electrons from lower to higher energy states) (22). Hematite characteristically has a narrower absorption at wavelengths surrounding 880 nm, while goethite has a broader feature with wavelengths around 920 nm or greater (22). This feature associated with crystal field absorption around 900 nm is also found in the jarosite and schwertmannite spectral curves. However, the charge transfer shoulders around 650 nm, associated with the charge transfer of change to Fe<sup>3+</sup> and change to Fe<sup>2+</sup> (23) allow further distinction for schwertmannite which has no known inflection point at 650 nm and spectral peak location at 738 nm (20).

The peak location at 720 nm and a small distinctive absorption feature at 2.264 nm confirms spectral identification for jarosite. Several minerals have been collected in so-called spectral libraries for validation purposes by the USGS spectral library (24) and Crowley Library for AMD minerals (20).

Large mining operation vicinities have been monitored by means of remote sensing imagery. Davies and Calvin have studied the Leviathan lake from mine tailings (25) and the spectral behavior of surface waters (26), while Swayze et al. studied the Venir pile in California/USA (14). The Iberian Pyrite Belt (IPB) in south-

In jüngster Zeit wurden hyperspektrale Sensoren bei der Untersuchung von Bergwerksrückständen mit luftgestützten Plattformen eingesetzt (17, 18). Diese Untersuchungen konzentrierten sich auf die für Säurebildung in Aufbereitungsrückständen verantwortlichen Mineralien und die Verteilung der Sekundärminerale, z. B. Jarosit, Ferrihydrit, Goethit/Hämatit, als Indikatoren für den Grad der Umweltbelastung mittels Reflexionsspektroskopie (19). Die schnelle Mineraldiagnose von kurzlebigen dünnen Bodenkusten, die Metalle mittels hochauflösender Bilder konzentrieren, wurde in einer Spektralbibliothek für AMD Mineralien von Crowley et al. (20) gesammelt. Anhand von Flusssedimenten und Vegetation wurde die VNIR-Spektroskopie von Clevers und Kooistra (21) erforscht.

Jedes Mineral bietet eine einzigartige spektrale Signatur, die es ermöglicht, sie zu unterscheiden. In diesem Sinne zeigt Bild 3 den Reflexionsgrad für vier der wichtigsten charakteristischen sekundären Eisenminerale im Zusammenhang mit der AMD-Produktion (Goethit, Jarosit, Hämatit und Schwertmannit).

Spektralkurven zeigen die charakteristischen Absorptionsmerkmale jedes Eisenminerals. Zwei Bereiche sind in Bild 3 grau schattiert, um die Formen und Wellenlängenpositionen jedes Minerals im Ladungstransfer (Liganden- zu Metallladungstransfer) und diejenigen, die durch die Kristallfeldeffekte (Übergänge von Elektronen von niedrigeren zu höheren Energiezuständen) ausgelöst werden, zu analysieren (22). Hämatit hat charakteristischerweise eine enge Absorption bei Wellenlängen um 880 nm, während Goethit eine breitere Eigenschaft mit Wellenlängen um 920 nm oder mehr aufweist (22). Dieses Merkmal, das mit der Kristallfeldabsorption um 900 nm verbunden ist, findet sich auch in den Jarosit- und Schwertmannit-Spektralkurven. Die Ladungstransferabsätze um 650 nm, die mit dem Ladungstransfer von change to Fe<sup>3+</sup> und change to Fe<sup>2+</sup> (23) verbunden sind, erlauben jedoch eine weitere Unterscheidung für Schwertmannit, der bei 650 nm keinen bekannten Wendepunkt und bei 738 nm einen spektralen Höchstpunkt aufweist (20).

Der Höchstpunkt bei 720 nm und ein kleines markantes Absorptionsmerkmal bei 2,264 nm bestätigen die spektrale Identifizierung für Jarosit. Mehrere Mineralien wurden in sogenannten Spektralbibliotheken zu Validierungszwecken durch die USGS-Spektralbibliothek (24) und die Crowley-Bibliothek für AMD-Mineralien (20) gesammelt.

Große Bergbauumgebungen werden schon lange mittels Fernerkundungsbildern überwacht. Davies und Calvin haben den Leviathan-See anhand von Aufbereitungsrückständen (25) und dem spektralen Verhalten von Oberflächengewässern (26) untersucht, während Swayze et al. die Venir-Halde in Kalifornien/USA untersuchten (14). Der Iberische Pyritgürtel (IPB) in Südspanien war auch ein Zielgebiet für viele Fernerkundungs- und Aufbaustudien im Zusammenhang mit der AMD-Chemie (27, 28). Das AMD-Phänomen im Sokolov-Bergbauggebiet in der Tschechischen Republik wurde im Allgemeinen von Murad und Rojik (12) und mittels luftgestützter Hyperspektraldaten von Kopačková und Hladíková (29) zur Bestimmung von Wasseroberflächenparametern im Wasser untersucht.

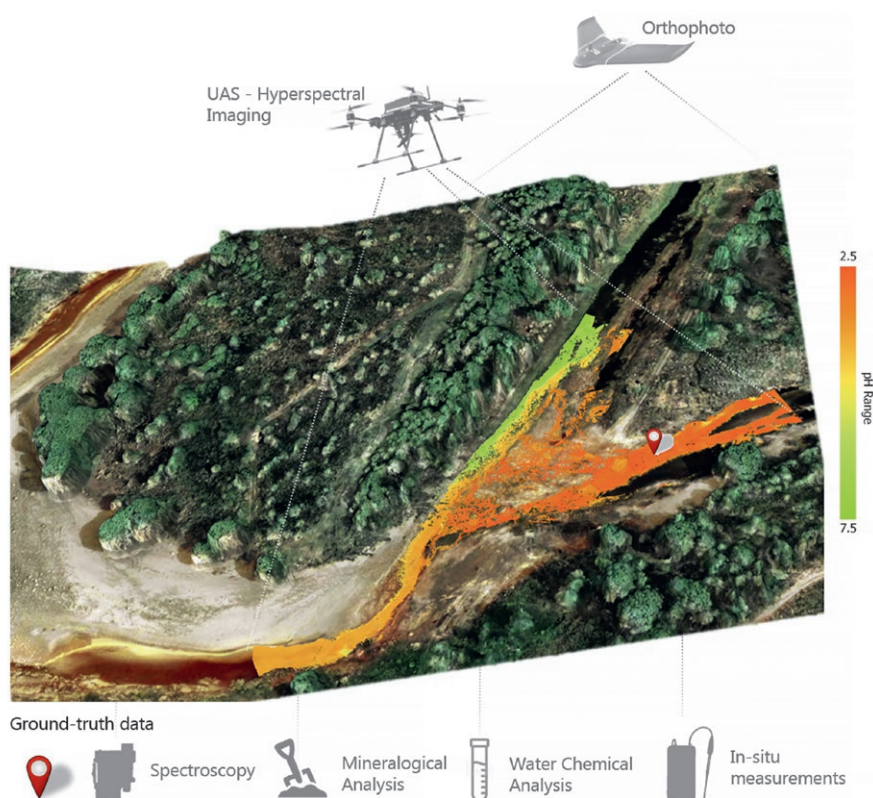
ern Spain has been also a target area for many remote sensing and compositional studies related to AMD chemistry (27, 28). The Sokolov mining district of the Czech Republic AMD phenomenon has been generally studied by Murad and Rojik (12) and by means of airborne hyperspectral data by Kopačková and Hladíková (29) for determining water surface parameters in water.

### Unmanned Aerial Systems (UAS) scale

The emergent use of unmanned aerial systems (UAS), like multi-copters coupled with lightweight hyperspectral sensors has become a tool to collect data at a higher spatial resolution than most of aircraft and satellite counterparts, resulting in greater precision (higher spatial resolution of a scene enabling the investigation of down to a few centimeters pixel size) (7). Most recently Jackisch et al. (30) implemented the use of UAS-hyperspectral imaging for high-resolution, multi-temporal mapping of proxy minerals for AMD in the Sokolov lignite region, Czech Republic, while Flores et al. (31) has focused mapping not only mineralogy but also hydrogeochemical properties to assess the extent of AMD in Odiel and Tintillo waters, in the Iberian Pyrite Belt in southern Spain. In this study, several techniques have been combined to produce high resolution maps (Figure 4), a machine learning approach using regression has been used to fuse geochemical data from validation points at the field with the hyperspectral dataset. Also a 2.5 photo-

### Unbemannte Flugsysteme (UAS) Maßstab

Der aufkommende Einsatz von unbemannten Flugsystemen (UAS), wie Multikoptern in Verbindung mit leichten Hyperspektralsensoren, ist zu einem Werkzeug geworden, um Daten mit einer höheren räumlichen Auflösung als die meisten Flugzeug- und Satellitengegenstände zu sammeln. Dies führt zu höherer Genauigkeit (höhere räumliche Auflösung einer Szene, welche die Untersuchung von bis zu wenigen Zentimetern Pixelgröße ermöglicht) (7). Zuletzt setzten Jackisch et al. (30) den Einsatz von UAS-Hyperspektralbildgebung für die hochauflösende, multitemporale Kartierung von AMD-Proxy-Mineralien in der Braunkohlenregion Sokolov/Tschechische Republik um, während Flores et al. (31) sich nicht nur auf die Kartierung der Mineralogie, sondern auch auf hydrogeochemische Eigenschaften konzentrierten, um das Ausmaß der AMD in den Gewässern Odiel und Tintillo im iberischen Pyritgürtel in Südspanien zu bewerten. In dieser Studie wurden mehrere Techniken kombiniert, um hochauflösende Karten zu erstellen (Bild 4). Ein maschineller Lernansatz unter Verwendung von Regression wurde verwendet, um geochemische Daten von Bewertungspunkten im Feld mit dem hyperspektralen Datensatz zu vereinen. Auch ein photogrammetrisches 2,5-Modell wurde mithilfe der Structure-from-Motion (SfM) Stereophotogrammetrie erstellt, um ein digitales Oberflächenmodell (DSM) zu berechnen.



### Labormaßstab

Zusätzlich zum luftgestützten Überwachungsansatz wurden Hyperspektralsensoren in mehreren Laboranwendungen zur mineralogischen Charakterisierung und AMD-Vorhersage eingesetzt. Die sogenannten geoumweltbezogenen Risiken wurden verwendet, um das Potential für die AMD-Bildung auf der Grundlage von Kernprotokollierung, statischen chemischen Tests, bulk- und hyperspektralen mineralogischen Techniken zu bewerten (32). Um AMD-Treiber der Versauerung in der Deponie Schleenhain zu identifizieren, wurden die Bereiche Sichtbar-Nah-Infrarot (VNIR) und Kurzwellen-Infrarot (SWIR) vom TRIM4Post-Mining – einem vom Forschungsfonds für Kohle und Stahl (RFCS) geförderten Horizon 2020-Projekt – zum Nachweis von sekundären Eisenoxiden, -hydroxiden und -sulfaten in Braunkohlenabfallgut untersucht. Zu diesem Zweck wurden zwei Hyperspektralsensoren (FX10 und FX17 vom Hersteller Specim, Spectral Imaging Ltd.) verwendet, um einen Teil des VNIR und SWIR aus den verfügbaren Proben zu erlangen.

Für das hyperspektrale Scannen ist keine Probenvorbereitung erforderlich. Ein Teil jeder Probe wurde auf ein weißes Blatt Papier direkt unter die Kamera gelegt. Der Halter, in dem die Probe lag, bewegt sich in horizontaler Richtung und die Zeilenkamera erfasst das hyperspektrale Bild ähnlich einem Förderband. Erreicht wird dies mit der in Bild 5 dargestellten schie-

Fig. 4. 2.5D surface model representation of the AMD affected waters in southern Spain. Base layer are the combination of the orthophoto on top of the DSM and the produced regression-pH map for the river flow path (not drawn to scale). Modified from (31).

Bild 4. 2.5D-Oberflächenmodelldarstellung der von AMD betroffenen Gewässer in Südspanien. Basisschichten sind die Kombination aus dem Orthophoto auf dem DSM und der erstellten Regressions-pH-Karte für den Flusspfad (nicht maßstabsgetreu gezeichnet). Angepasst von (31).

grammetric model was constructed using Structure-from-motion (SfM) Stereophotogrammetry to compute a digital surface model (DSM).

### Laboratory Scale

In addition to the airborne monitoring approach, hyperspectral sensors have been widely used on multiple laboratory scale applications for mineralogical characterization and AMD prediction. The so called geoenvironmental risks, has been used to evaluate the potential for AMD formation based on core logging, static chemical testing, bulk- and hyperspectral mineralogical techniques (32). As means of identifying AMD drivers of acidification in Schleenhain dump, the visible-near infrared (VNIR) and short wave infrared (SWIR) regions have been investigated by the TRIM4Post-Mining – a Horizon 2020 project funded by the Research Fund for Coal and Steel – for the detection of secondary iron oxides, hydroxides and sulfates in lignite waste dump material. For this purpose, two hyperspectral sensors (FX10 and FX17; from manufacturer Specim, Spectral Imaging Ltd.) has been used to acquire part of the VNIR and SWIR on the available samples.

No sample preparation is needed for the hyperspectral scanning. A portion of each sample was set on a white paper-sheet directly under the camera. The holder where the sample lay, moves

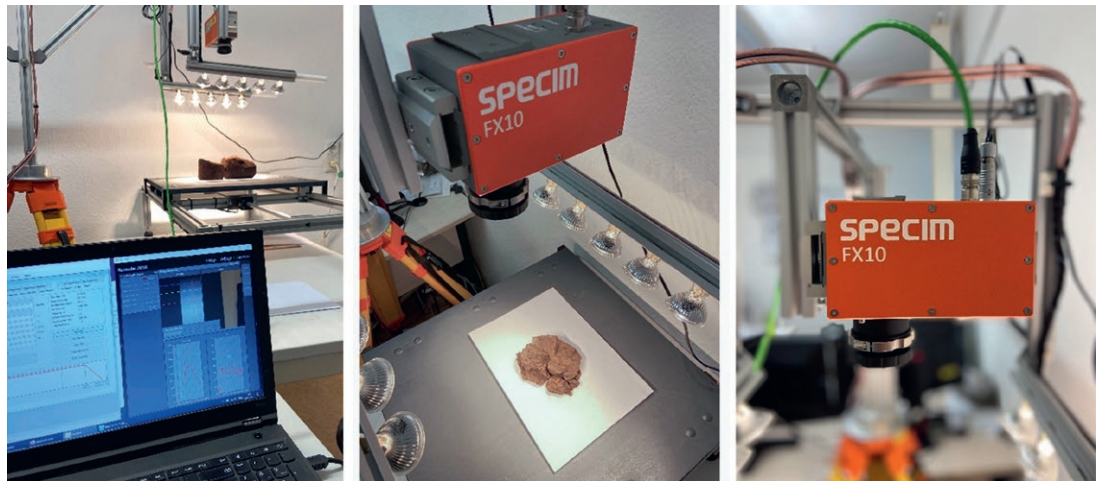


Fig. 5. Experimental set-up for hyperspectral scanning of Schleenhain and Peres samples in TRIM4Post-Mining EU Project. Bild 5. Versuchsaufbau für das hyperspektrale Scannen der Proben aus Schleenhain und Peres im TRIM4Post-Mining EU-Projekt. Photos/Fotos: THGA, TU Bergakademie Freiberg/Institute of Markscheidewesen and Geodesy

nenartigen Konstruktion zusammen mit steuerbarem Motor. Der Objektstisch bewegt sich je nach Position richtungsweisend mit einstellbarer Geschwindigkeit nach rechts oder links.

Im Allgemeinen sollten alle hyperspektralen Untersuchungen von Auswertungsmaßnahmen begleitet werden, bei denen punktuelle Spektralmessungen an diskreten und strategischen Punkten des untersuchten Gebiets durchgeführt werden müssen, sowie von der Einbeziehung weiterer geochemischer/geophysikalischer Datensätze zur Unterstützung der Spektralmethode. Bild 6 zeigt eine Klassifikationskarte, die über gescannte Proben zur Bewertung des von AMD betroffenen Gebiets in der Braunkohlenregion Sokolov erstellt wurde (30). Genaue Informationen über die Zusammensetzung der Bergwerksabfälle sind von grundlegender Bedeutung, um die Reaktionsschemata zu verstehen, die mit der AMD-Produktion verbunden sind und für die geochemische Modellierung benötigt werden. Primäre Sulfide, die anfällig für AMD sind, müssen entweder identifiziert oder sekundäre Eisen-Nebenprodukte nach Verwitterungseffekten erkannt werden, um Risikobereiche zu lokalisieren und angemessene Minderungs- oder Präventionsroutinen bereitzustellen, bevor der beste Nachbergbauplan ausgewählt wird.

### Fazit

Zusammen mit der hohen Nachfrage nach Rohstoffen in post-industriellen Gesellschaften gehen das Abfallaufkommen und alle Aufgaben in Bezug auf dessen effizientes Management und Risikobewertungen einher. Folglich ist eine genaue und konstante Überwachung der Gelände- oder Vegetationsbedeckung von Halden im Nachbergbaumanagement oft aus zwei verschiedenen Gründen erforderlich:

1. zur Überwachung und Vermeidung nachteiliger Auswirkungen von Gefahren und
2. um den Erfolg der Wiederherstellung zu bewerten.

Hyperspektrale Daten bieten mehrere Vorteile als Ergänzung zu herkömmlichen Umweltüberwachungsstudien. Die Entwicklung hin zu leichteren und kleineren Sensoren ermöglicht eine einfachere Integration der Hyperspektraltechnologie in verschiedene Phasen der Abfallwirtschaft im Bergbau. Sie könnte zudem während des

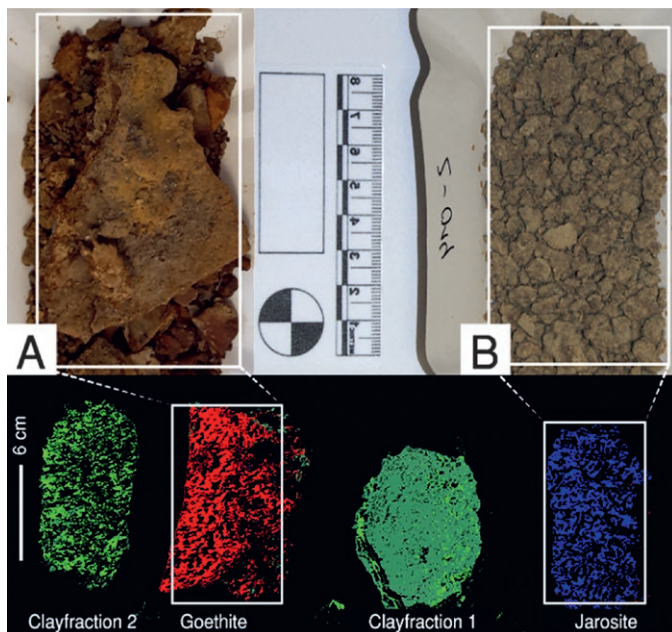


Fig. 6. Spectral mapping using supervised classification from Litov AMD in the Sokolov lignite region. Modified from (30). Bild 6. Spektralkartierung mithilfe überwachter Klassifikation der Litov-AMD in der Sokolov-Braunkohlenregion. Angepasst von (30).

in a horizontal direction and the line scan camera captures the hyperspectral image similar to a conveyor belt. This is achieved with the rail-like construction shown in Figure 5 together with a controllable motor. The stage moves directionally depending on the position with adjustable speed to the right or to the left depending on the position.

In general all hyperspectral surveys, should be accompanied by validation campaigns, in where point spectral measurements have to be done in discrete and strategic spots of the investigated area, as well as the incorporation of further geochemical/geo-physical datasets to support the spectral method. Figure 6 shows a classification map created over scanned samples for validation from AMD affected site in the Sokolov lignite region(30). Accurate compositional information of the mine waste materials is fundamental to understand the reaction schemes associated to AMD production and needed for geochemical modelling. Either by identifying primary sulfides prone to AMD or detecting secondary-iron sub products after weathering effects needs to be analyzed in order to locate risk areas, and provide adequate mitigation or prevention routines, prior to select the best post-mining plan.

### Conclusions

Together with the high demand for raw materials in post-industrial societies comes the waste generation and all the task concerning their efficient management and risk assessments. In this sense, accurate and constant monitoring on terrain or vegetation cover of spoil banks is often required for two different reasons in post-mining management:

1. to monitor and prevent adverse effect of hazards; and
2. to assess restoration success.

Hyperspectral data brings several advantages as a complement to traditional environmental monitoring studies. The development towards lighter and smaller sensors, allows easier incorporation of hyperspectral technology into different stages of mine waste management. It could be used, rather during active mining to identify potential lithologies hosting minerals prone to AMD and forecast adverse effects, or in post-mining scenarios to target affected areas and continuous monitor restored areas. Traditional monitoring of soils and water quality is mainly based on the chemical analysis of samples routinely collected over the year and on the physical parameters of the groundwater measured by instruments located in the flow path. These tasks can be expensive, time-consuming and controlled by access limitations to the areas. In general, UAS mapping compared to ground surveying represents a reduction in the time employed on acquiring data. Furthermore, UAS allow reaching locations that may be difficult to access, are under protected status or that involve personal security risks for terrestrial-sampling. Regardless the scale, hyperspectral sensors allow repeatability and recurrent data-acquisition. Therefore, multi-temporal analysis is feasible and may allow constant monitoring of sensible ecosystems. Although many instruments with higher spectral resolution and wider wavelength range have been developed. This equipment is too heavy, fragile, and costly to be mounted on UAS. Several efforts have been made on satellite development to increase their spatial resolution by enhancing band acquisition efficiency and making data available in open-source systems.

aktiven Bergbaus verwendet werden, um potentielle Lithologien zu identifizieren, die Mineralien beinhalten, die anfällig für AMD sind, und nachteilige Auswirkungen vorherzusagen, oder in Nachbergbauszenarien, um betroffene Gebiete ins Visier zu nehmen und wiederhergestellte Gebiete kontinuierlich zu überwachen. Die traditionelle Überwachung der Böden und der Wasserqualität basiert hauptsächlich auf der chemischen Analyse von Proben, die routinemäßig im Lauf des Jahres gesammelt werden, und auf den physikalischen Parametern des Grundwassers, die von Instrumenten in der Fließrichtung gemessen werden. Diese Aufgaben können teuer, zeitaufwendig und durch Zugriffsbeschränkungen zu den Gebieten beeinflusst werden. Im Allgemeinen stellt die UAS-Kartierung im Vergleich zur Bodenvermessung eine Verringerung des Zeitaufwands für die Datenerfassung dar. Darüber hinaus ermöglichen sie es, Orte zu erreichen, die möglicherweise schwer zugänglich oder geschützt sind oder persönliche Sicherheitsrisiken für terrestrische Probenahme beinhalten. Unabhängig von der Größenordnung ermöglichen Hyperspektralsensoren Wiederholbarkeit und wiederkehrende Datenerfassung. Daher ist eine multitemporale Analyse machbar und kann eine kontinuierliche Überwachung sensibler Ökosysteme ermöglichen. Obwohl viele Instrumente mit höherer spektraler Auflösung und breiterem Wellenlängenbereich entwickelt wurden, ist diese Ausrüstung zu schwer, zerbrechlich und teuer, um auf UAS montiert zu werden. Bei der Satellitenentwicklung wurden mehrere Anstrengungen unternommen, um ihre räumliche Auflösung zu erhöhen, indem die Bandbreitenerfassungseffizienz verbessert und Daten in Open-Source-Systemen verfügbar gemacht wurden.



*This project has received funding from the Research Fund for Coal and Steel under grant agreement No 899278*



## References / Quellenverzeichnis

- (1) Lottermoser, B. (2003). Mine Water, In Mine wastes. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-05133-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-05133-7_3)
- (2) Ferrier, G. (1999): Application of imaging spectrometer data in identifying environmental pollution caused by mining at Rodaquilar/Spain. *Remote Sensing of Environment*, 68 (2), pp 125–137. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00105-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00105-9)
- (3) Kemper, T.; Sommer, S. (2002): Estimate of heavy metal contamination in soils after a mining accident using reflectance spectroscopy. *Environmental Science and Technology*, 36 (12), pp 2742–2747. <https://doi.org/10.1021/es015747j>
- (4) Christopherson, J. B., Ramaseri Chandra, S. N.; Quanbeck, J. Q. (2019): 2019 Joint Agency Commercial Imagery Evaluation – Land remote sensing satellite compendium: U.S. Geological Survey. U.S. Geological Survey Circular 1455, 191 p
- (5) Clark, R. N. (1999): Spectroscopy of Rocks and Minerals and Principles of Spectroscopy. Manual of Remote Sensing. In: *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing* (Vol. 3).
- (6) van der Meer, F. D.; van der Werff, H. M. A.; van Ruitenbeek, F. J. A.; Hecker, C. A.; Bakker, W. H.; Noomen, M. F.; van der Meijde, M.; Carranza, E. J. M.; de Smeth, J. B.; Woldai, T. (2012): Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review. In: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14 (1), pp 112–128. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.08.002>
- (7) Booyens, R.; Gloaguen, R.; Lorenz, S.; Zimmermann, R.; Nex, P. A. M. (2020): Geological Remote Sensing. In: *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, 2nd ed., Vol. 64, pp. 267–274. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12127-X>
- (8) Benediktsson, J. A.; Ghamisi, P. (2015): Spectral-Spatial Classification of Hyperspectral Remote Sensing Images. Artech House.
- (9) Lorenz, S. (2019): The Need for Accurate Pre-processing and Data Integration for the Application of Hyperspectral Imaging in Mineral Exploration. [urn:nbn:de:bsz:105-qucosa2-358808](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:105-qucosa2-358808)
- (10) Dold, B. (2017): Acid rock drainage prediction: A critical review. In: *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 172, pp. 120–132. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.09.014>
- (11) Gitari, W. M.; Petrik, L. F.; Etchebers, O.; Key, D. L.; Okujeni, C. (2008): Utilization of fly ash for treatment of coal mines wastewater: Solubility controls on major inorganic contaminants. In: *Fuel*, 87(12), pp 2450–2462. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.03.018>
- (12) Murad, E.; Rojik, P. (2005): Iron mineralogy of mine-drainage precipitates as environmental indicators: review of current concepts and a case study from the Sokolov Basin, Czech Republic. In: *Clay Minerals*, 40 (4), pp 427–440. <https://doi.org/10.1180/0009855054040181>
- (13) Farrand, W. H.; Harsanyi, J. C. (1997): Mapping the distribution of mine tailings in the Coeur d'Alene River Valley, Idaho, through the use of a constrained energy minimization technique. In: *Remote Sensing of Environment*, 59(1), pp 64–76. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00080-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00080-6)
- (14) Swayze, G. A.; Smith, K. S.; Clark, R. N.; Sutley, S. J.; Pearson, R. M.; Vance, J. S.; Hageman, P. L.; Briggs, P. H.; Meier, A. L.; Singleton, M. J.; Roth, S. (2000): Using imaging spectroscopy to map acidic mine waste. In: *Environmental Science and Technology*, 34 (1), pp 47–54. <https://doi.org/10.1021/es990046w>
- (15) Montero, I. C.; Brimhall, G. H.; Alpers, C. N.; Swayze, G. A. (2005): Characterization of waste rock associated with acid drainage at the Penn Mine, California, by ground-based visible to short-wave infrared reflectance spectroscopy assisted by digital mapping. In: *Chemical Geology*, 215 (1–4 SPEC. ISS.), pp 453–472. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.045>
- (16) Sares, M.; Hauff, P.; Peters, D.; Coulter, D. (2004): Characterizing Sources of Acid Rock Drainage and Resulting Water Quality Impacts Using Hyperspectral Remote Sensing—Examples from the Upper Arkansas. *Advanced Integration of Geospatial Technologies in Mining Reclamation*, Dec. 7–9, 2004, Atlanta, GA, June 2014.
- (17) Shang, J.; Morris, B.; Howarth, P.; Lévesque, J.; Staenz, K.; Neville, B. (2009): Mapping mine tailing surface mineralogy using hyperspectral remote sensing. In: *Canadian Journal of Remote Sensing*, 35 (June), pp 126–141. <https://doi.org/10.5589/m10-001>
- (18) Richter, N.; Staenz, K.; Kaufmann, H. (2008): Spectral unmixing of airborne hyperspectral data for baseline mapping of mine tailings areas. In: *International Journal of Remote Sensing*, 29 (13), pp 3937–3956. <https://doi.org/10.1080/01431160801891788>
- (19) Choe, E.; van der Meer, F.; van Ruitenbeek, F.; van der Werff, H.; de Smeth, B.; Kim, K. W. (2008): Mapping of heavy metal pollution in stream sediments using combined geochemistry, field spectroscopy, and hyperspectral remote sensing: A case study of the Rodaquilar mining area, SE Spain. In: *Remote Sensing of Environment*, 112 (7), pp 3222–3233. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.017>
- (20) Crowley, J. K.; Williams, D. E.; Hammarstrom, J. M.; Piatak, N.; Chou, I. M.; Mars, J. C. (2003): Spectral reflectance properties (0.4–2.5 µm) of secondary Fe-oxide, Fe-hydroxide, and Fe-sulphate-hydrate minerals associated with sulphide-bearing mine wastes. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 3 (3), pp 219–228. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/03-001>
- (21) Clevers, J. G. P. W.; Kooistra, L. (2012): Using hyperspectral remote sensing data for retrieving canopy chlorophyll and nitrogen content. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5 (2), pp 574–583. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2011.2176468>
- (22) Leybourne, M. I.; Pontual, S.; Peter, J. M. (2008): Integrating Hyperspectral Mineralogy, Mineral Chemistry, Geochemistry and Geological Data at Different Scales in Iron Ore Mineral Exploration. 3, pp 1–10.
- (23) Hunt, G. R. (1977): Spectral Signatures of Particulate Minerals in the Visible and Near Infrared. In: *Geophysics*, 42 (3), pp 501–513. <https://doi.org/10.1190/1.1440721>
- (24) Kokaly, R. F.; Clark, R. N.; Swayze, G. A.; Livo, K. E.; Hoefen, T. M.; Pearson, N. C.; Wise, R. A.; Benzel, W. M.; Lowers, H. A.; Driscoll, R. L.; Klein, A. J. (2007): USGS digital spectral library Version 7. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ds1035>
- (25) Davies, G. E.; Calvin, W. M. (2017a): Mapping acidic mine waste with seasonal airborne hyperspectral imagery at varying spatial scales. In: *Environmental Earth Sciences*, 76 (12), pp 1–14. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6763-x>
- (26) Davies, G. E.; Calvin, W. M. (2017b): Quantifizierung der Eisenkonzentration von synthetischer und in situ vorkommender saurer Bergbaudränge: Eine neue Technik unter Nutzung tragbarer Feldspektrometer. In: *Mine Water and the Environment*, 36 (2), S. 299–309. <https://doi.org/10.1007/s10230-016-0399-z>
- (27) Riaza, A.; Buzzi, J.; García-Meléndez, E.; Carrère, V.; Sarmiento, A.; Müller, A. (2015): Monitoring acidic water in a polluted river with hyperspectral remote sensing (HyMap). In: *Hydrological Sciences Journal*, 60 (6), pp 1064–1077. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.899704>
- (28) Buzzi, J.; Riaza, A.; García-Meléndez, E.; Carrère, V.; Holzwarth, S. (2016): Monitoring of River Contamination Derived from Acid Mine Drainage Using Airborne Imaging Spectroscopy (HyMap Data, South-West Spain). *River Research and Applications*, 32 (1), pp 125–136. <https://doi.org/10.1002/rra.2849>
- (29) Kopačková, V.; Hladíková, L. (2014): Applying spectral unmixing to determine surface water parameters in a mining environment. *Remote Sensing*, 6 (11), pp 11204–11224. <https://doi.org/10.3390/rs6111204>
- (30) Jackisch, R.; Lorenz, S.; Zimmermann, R.; Möckel, R.; Gloaguen, R. (2018): Drone-borne hyperspectral monitoring of acid mine drainage: An example from the Sokolov lignite district. *Remote Sensing*, 10 (3). <https://doi.org/10.3390/rs10030385>
- (31) Flores, H.; Lorenz, S.; Jackisch, R.; Tusa, L.; Cecilia Contreras, I.; Zimmermann, R.; Gloaguen, R. (2021): Uas-based hyperspectral environmental monitoring of acid mine drainage affected waters. In: *Minerals*, 11 (2), pp 1–25. <https://doi.org/10.3390/min11020182>
- (32) Parbhakar-Fox, A.; Fox, N.; Jackson, L.; Cornelius, R. (2018): Forecasting geoenvironmental risks: Integrated applications of mineralogical and chemical data. In: *Minerals*, 8 (12). <https://doi.org/10.3390/min8120541>

## Authors / Autoren

Hernan Flores M. Sc., Prof. Dr. rer. nat. Tobias Rudolph, Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Stefan Möllerherm, Forschungszentrum Nachbergbau (FZN), Technische Hochschule Georg Agricola (THGA), Bochum