Peter Goerke-Mallet
Christian Melchers
Andreas Müterthies

Innovative Monitoring Measures in the Phase of Post-Mining

Mining activities often influence huge areas which can only be observed efficiently with remote sensing methods. Recently the European Programme of Earth Observation Copernicus began to offer the opportunity to pursue this monitoring with innovative attempts in the production phase as well as in the post-mining phase. The combination of spatial data gained from satellite-supported sensors allows a precise verification of mining-induced environmental impacts with high resolution in time and space. This paper describes early experiences with innovative monitoring measures and discusses the perspectives of a sustainable mining process. It is based on the presentation of the first author on the Congress of the International Mine Water Association (IMWA) 2016 in Leipzig/Germany (1).

Innovative Monitoring-Maßnahmen im (Nach-)Bergbau

Bergbauliche Aktivitäten beeinflussen oftmals große Areale, die nur mit Methoden der Fernerkundung leistungsfähig beobachtet werden können. Seit kurzem bietet das Europäische Programm zur Erdbeobachtung Copernicus die Möglichkeit, mit innovativen Ansätzen das Monitoring sowohl in der Gewinnungs- als auch in der Nachbergbauphase zu betreiben. Die Verknüpfung der Daten der satellitengestützten Sensoren, also der Weltraum-Komponente, mit weiteren Daten aus der In-Situ-Komponente ermöglicht eine räumlich und zeitlich hochaufgelöste Darstellung der Umweltauswirkungen bergbaulicher Prozesse. Der Beitrag beschreibt erste Erfahrungen mit innovativen Monitoringmaßnahmen und setzt sich mit den Perspektiven zur Gewährleistung eines nachhaltigen Bergbaus auseinander. Er basiert auf der Präsentation des erstgenannten Verfassers auf der Tagung der International Mine Water Association (IMWA) 2016 in Leipzig (1).

1 Introduction

Mining processes worldwide are a subject of a life cycle that begins with granting mining rights and licences, then continues with the exploration and production stages, and ends with the closure of the mine. What follows is the stage of post-mining which stretches over a very long period of time depending on the complexity of the previous mining activities.

The challenges of post-mining involve factors of the environment, structural change, society and economy (Figure 1). In summary, there are impacts on the elements water, soil and air. The drainage of mine water affects the hydrochemistry of the receiving waters. Shaft constructions, mining works close to the surface and large-scale underground cavities can cause instabilities at the ground surface. The air pathway at coal heaps and settling ponds is potentially polluted by dusting.

Such problems are international problems. They also encompass the conversion of former mine works surfaces, funding of the withdrawal and a successful management of structural change in the mining regions. In many cases, the challenges mentioned have already occurred during the production stage (2).

Sustainable management of post-mining can only be successful if the future closure of a mine is already envisaged when

1 Einleitung

Bergbauliche Prozesse unterliegen weltweit einem Lebenszyklus, der mit der Erteilung der Bergbauberechtigung beginnt und über die Explorations- und Produktionsphase bis zur Stilllegung reicht. Es schließt sich die Phase des Nachbergbaus an, die je nach Komplexität des bergbaulichen Geschehens einen sehr langen Zeitraum umfassen kann.

Die Herausforderungen des Nachbergbaus betreffen die Faktoren Ökologie, Strukturwandel, Gesellschaft und Ökonomie. Zusammengefasst sehen sich die ehemaligen Bergwerksstandorte mit Einflüssen auf die Medien Wasser, Boden und Luft konfrontiert (Bild 1). Die Ableitung von Grubenwasser beeinflusst die Hydrochemie der Vorfluter. An Schächten, über oberflächennahem Abbau und über großen untertägigen Hohlräumen kommt es zu Instabilitäten der Tagesoberfläche. Der Luftpfad wird an Halden und Absetzteichen durch Staubabwehungen belastet.

Diese Probleme sind international. Das gilt auch für die Konversion bergbaulich genutzter Flächen, für die Finanzierung des Rückzugs und für den erfolgreichen Strukturwandel in Bergbauregionen. Die genannten Herausforderungen stellen sich in vielen Fällen schon während der Produktionsphase (2).

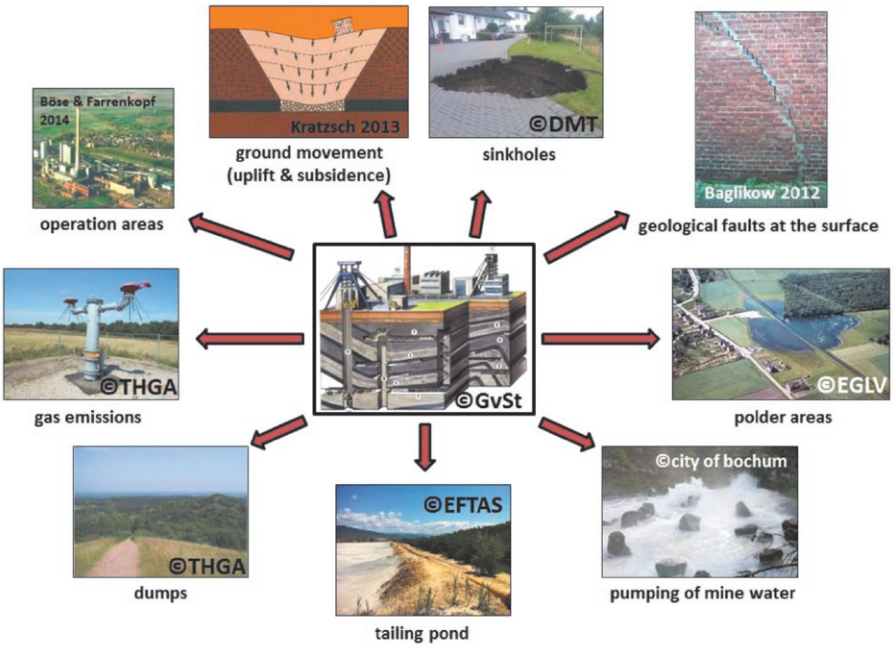

Fig. 1. Action fields connected to post-mining. // Bild 1. Herausforderungen im Nachbergbau. Source/Quelle: THGA

planning mining activities. To achieve this, monitoring of the mining environment and the mining impact on its surroundings is required. The centre of the monitoring process is the element of water as this element is continuously changed in its mineralisation by the mining water drainage. Thus, the water bodies affected are facing changes in their plant and animal life. Ground movements at the surface lead to changes in the depth to water table and thus to changes in the vegetation. Pumping measures to keep open-pit mines dry have a similar effect.

In Germany the responsibility of the last mining company for how to cope with the closure and post-mining phases is clearly defined by German mining law and by rulings of the supreme court. But other nations also have developed an awareness of the necessity to properly organise the mining heritage and the opportunities and risks that emerge from that.

Such a responsible management with the opportunities and risks of (post-)mining requires a comprehensive understanding of the relevant processes where possible. In science and technology, it is common practice to observe, to measure, to develop models and to later compare the actual situation to the model. Based on that, the models can and will be revised and improved.

The term monitoring has been established for such regulated cycles, not only in technology. Referring to the initial situation described, the question arises what mining objects and activities are concerned, what is their impact on the environment and what potential observation procedures can be applied.

A typical specific feature of mining processes is the fact that they eat up and impact large areas and that they are operated over long periods of time. Contrary to that, there are certain processes that happen on a small scale and in a short period of time. One example of such local impacts are the discontinuity zones at tectonic faults or subsidence at shaft constructions. The latter ones, looking at the speed at which they occurred, are similar to e. g. the breaks of dams at tailing lakes. Consequently,

Die nachhaltige Bewältigung des Nachbergbaus gelingt nur dann, wenn im Rahmen der Bergbauplanung die zukünftige Stilllegung ständig antizipiert wird. Dazu bedarf es eines spezifischen Monitorings des bergbaulichen Umfelds und der Auswirkungen des Bergbaus auf seine Umgebung. Im Zentrum des Monitorings steht das Medium Wasser, weil es durch die bergbauliche Wasserhaltung häufig in seiner Mineralisation verändert wird. Damit gehen in den betroffenen Gewässerkörpern Veränderungen der Flora und Fauna einher. Bergbauliche Bodenbewegungen an der Tagesoberfläche führen zu Änderungen des Flurabstands und damit zu Veränderungen in der Vegetation. Ähnlich wirken sich Pumpmaßnahmen zur Trockenhaltung von Tagebauen aus.

In Deutschland ist die Verantwortung des letzten Bergbauunternehmers für die Bewältigung der Stilllegungs- und Nachbergbauphase bergrechtlich und höchstrichterlich klar definiert. Aber auch andere Bergbaunationen entwickeln zunehmend ein Gespür für die Notwendigkeit eines geordneten Umgangs mit den Bergbaufolgen und den sich daraus entwickelnden Chancen und Risiken.

Der verantwortungsvolle Umgang mit den Chancen und Risiken des (Nach-) Bergbaus setzt ein möglichst umfassendes Verständnis der relevanten Prozesse voraus. In den Naturwissenschaften und der Technik ist es üblich, zu beobachten, zu messen, Modellvorstellungen zu entwickeln und Soll-Ist-Abgleiche vorzunehmen. Anschließend werden die Modelle verbessert.

Für diesen Regelkreis hat sich nicht nur in der Technik der Begriff des Monitorings etabliert. Bezogen auf die beschriebene Ausgangslage stellt sich zunächst die Frage nach den bergbaulichen Objekten und Tätigkeiten, ihren Auswirkungen auf die Umwelt und den potentiellen Beobachtungsverfahren.

Ein häufiges Spezifikum bergbaulicher Prozesse ist die Inanspruchnahme und Beeinflussung großer Flächen und die Langfristigkeit. Demgegenüber vollziehen sich bestimmte Vorgänge kleinräumig und schnell. Ein Beispiel für lokale Erscheinungen

Fig. 2. Sentinel 1A and Sentinel 2A (© ESA) // Bild 2. Sentinel 1A und Sentinel 2A (© ESA). Source/Quelle: THGA

we need to search for methods and combine such methods that achieve a high score and reliability regarding the process to be monitored.

2 Copernicus Programme

At this point the space strategy of Germany's federal government issued in 2010 gains new impetus. This strategy states explicitly that space travel has become an essential point for business, science, politics and society at large. Special emphasis is placed on the importance space travel has for innovation, growth, the job market, standard of living and environmental protection. One example of how this strategy is implemented is the Copernicus Programme launched by the European Union (EU) and the European Space Agency (ESA). Copernicus provides an up-to-date and high-performing infrastructure for earth observation and geo-information services. This project aims at supplying high-resolution data of remote sensing for both space and time. The Copernicus Programme provides free environmental data to its users.

Copernicus has seen the development of the Copernicus Sentinels – seven satellite missions that were especially developed for this programme and that monitor space. They are at the heart of the space component (Figure 2). The earth observation satellite Sentinel 1A has been in the orbit since April 2014 and supplies data on ground movements and parameters of soil physics. The Sentinel-1-mission is designed as a two-satellite constellation. Sentinel 1B was launched in April 2016.

In June 2015 Sentinel 2A was launched according to schedule and Sentinel 2B in March 2017. These satellites are equipped with multi-spectral sensors that generate images of the land surface. These images are used to analyse land coverage and land use.

Sentinel 3A has been in its orbit since February 2016. It carries a number of instruments to observe the surfaces of land mass and oceans.

The Sentinel satellites move in polar orbits at a height of approximately 700 to 800 km. Their observations cover nearly every point on the earth's surface every five days. In their final stage, the satellites are supposed to be used in pairs. The Copernicus Programme is aimed at reliability and sustainability. Until 2020, approximately another ten satellites are going to be launched and plans have already begun to continue this programme far beyond the year 2027.

sind Unstetigkeitszonen an tektonischen Störungen oder Tagesbrüche an Schächten. Letztere haben hinsichtlich der Eintrittsgeschwindigkeit Gemeinsamkeiten u.a. mit dem Bruch von Dämmen an Tailingbecken. Die Suche gilt daher Verfahren bzw. der Kombination von Verfahren mit hoher Trefferquote und Zuverlässigkeit bezüglich des zu überwachenden Prozesses.

2 Copernicus-Programm

An dieser Stelle kommt die Raumfahrtstrategie der Bundesregierung aus dem Jahr 2010 in den Fokus. Darin wird zum Ausdruck gebracht, dass sich die Raumfahrt zu einem unverzichtbaren Bereich für Wirtschaft, Wissenschaft, Politik und die Gesellschaft entwickelt hat. Hervorgehoben wird ihre Bedeutung für Innovationen, Wachstum, Arbeitsplätze, Lebensqualität und Umweltschutz. Eine konkrete Ausfüllung dieser Strategie stellt das Copernicus-Programm der Europäischen Union (EU) und der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) dar. Copernicus schafft eine moderne und leistungsfähige Infrastruktur für die Erdbeobachtung und Dienstleistungen der Geoinformation. Das Projekt ist auf die Bereitstellung zeitlich und räumlich hochauflösender Fernerkundungsdaten ausgerichtet. Den Nutzern werden die Umweltdaten aus dem Copernicus-Programm kostenlos zur Verfügung gestellt.

Eigens für Copernicus werden sieben Satellitenmissionen, die Copernicus Sentinels (deutsch: Wächter) entwickelt. Sie bilden das Herzstück der Weltraumkomponente. Der Erdbeobachtungssatellit Sentinel 1A ist seit April 2014 im Orbit und liefert Daten über Bodenbewegungen und bodenphysikalische Parameter (Bild 2). Die Sentinel-1-Mission besteht aus zwei baugleichen Satelliten. Sentinel 1B wurde im April 2016 gestartet.

Im Juni 2015 wurde Sentinel 2A planmäßig gestartet und Sentinel 2B folgte im März 2017. Diese Satelliten verfügen über multispektrale Sensoren, die Bilder der Landoberfläche erzeugen. Diese werden zur Analyse der Landbedeckung und –nutzung eingesetzt.

Sentinel 3A befindet sich seit Februar 2016 in seiner Umlaufbahn. Er trägt verschiedene Instrumente zur Beobachtung der Land- und Ozeanoberflächen.

Die Sentinel-Satelliten befinden sich auf polaren Umlaufbahnen in einer Höhe von etwa 700 bis 800 km. Sie decken mit ihren Beobachtungen alle fünf Tage nahezu jeden Punkt der Erdoberfläche ab. Die Satelliten werden im Endausbauzustand paarweise eingesetzt. Das Copernicus-Programm ist auf Verlässlichkeit und

One major topic in this context is of course "Big Data". Indeed, the Sentinel satellites generate gigantic amounts of data that have to be processed, provided to users and, in particular, stored for a long period of time. By 2018 alone, the data volume will have risen to approximately 18 PB.

Together with EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH, Münster/Germany, and other partners, the Research Institute of Post-Mining of the Technical University Georg Agricola (THGA), Bochum/Germany, works on the use of satellite data for remote sensing and for monitoring actual processes of post-mining. The focus lies on the following aspects: the hydro-chemical balance of lakes and rivers, the ground water level, the land use, the land coverage and the ground movements. Regarding the potential that is offered by the Copernicus Programme and the reliability of the data supply, monitoring can be innovated by linking the information generated by the satellite-supported sensors with terrestrial expertise, something that is called the in-situ component. This process can help to mitigate the risks of post-mining and to strengthen its opportunities, e.g., providing new use and value to the old mining infrastructure to generate renewable energies.

In March 2017 the National Forum for Remote Sensing and Copernicus "Copernicus@work" took place in Berlin. The Research Institute of Post-Mining together with EFTAS organized the workshop "Copernicus for Mining". The aim was to discuss the capabilities of the Copernicus Programme for the different tasks during the life cycle of a mine with other experts. The result was, that it is absolutely necessary to deal with the accuracy, the precision and the reproducibility of the outputs of satellite data for remote sensing. Without the transparency it is impossible to convince the users of monitoring measures with regard to the application of this specific method.

3 Monitoring

As part of an ongoing research project, the Research Institute of Post-Mining is currently compiling an extensive catalogue of which monitoring methods are currently available for previous and new mining activities. Another objective is to utilise published information to describe how those individual methods

Langfristigkeit angelegt. Bis zum Jahr 2018 sollen noch weitere zehn Satelliten ihre Arbeit aufnehmen, und es gibt heute schon Planungen zur Fortführung des Programms weit über das Jahr 2027 hinaus.

Ein herausragendes Stichwort ist in diesem Zusammenhang „Big Data". In der Tat erzeugen die Sentinel-Satelliten gigantische Datenmengen, die gehandhabt, für die Nutzer bereitgestellt und vor allem langfristig gespeichert werden müssen. Allein bis zum Jahr 2018 wird das Datenvolumen auf etwa 18 PB angewachsen sein.

Das Forschungszentrum Nachbergbau der Technischen Hochschule Georg Agricola (THGA), Bochum, arbeitet gemeinsam mit der EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH, Münster, und weiteren Partnern an der Nutzung der Satellitendaten zur Fernerkundung und zum Monitoring konkreter nachbergbaulicher Prozesse. Im Fokus stehen die Hydrochemie von Gewässern, der Bodenwassergehalt, die Landnutzung, die Landbedeckung und Bodenbewegungen. Angesichts der Potentiale des Copernicus-Programms und der Verlässlichkeit der Datenbereitstellung wird die Verknüpfung der von den satellitengestützten Sensoren generierten Informationen mit terrestrischer Expertise – der In-situ-Komponente – zu einer Innovation des Monitorings führen. Damit können die Risiken des Nachbergbaus reduziert und die Chancen, wie die Inwertsetzung der bergbaulichen Infrastruktur u.a. zur Gewinnung regenerativer Energien, verbessert werden.

Im März 2017 wurde in Berlin unter dem Motto „Copernicus@work" das Nationale Forum für Fernerkundung und Copernicus veranstaltet. Gemeinsam mit dem Deutschen Dachverband für Geoinformation e.V. (DDGI), dem Deutschen Markscheider Verein e.V. (DMV) und EFTAS organisierte das Forschungszentrum Nachbergbau den Workshop „Copernicus for Mining". Ziel war es, mit anderen Fachleuten über die Möglichkeiten zu diskutieren, die das Copernicus-Programm für die verschiedenen Aufgaben im Verlauf des bergbaulichen Lebenszyklus bietet. Als Fazit kann festgehalten werden, dass es unbedingt notwendig ist, sich mit der Genauigkeit, der Aussagekraft und der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse der satellitengestützten Fernerkundung zu beschäftigen. Ohne diese Transparenz ist es kaum möglich, die Nutzer von Monitoring-Verfahren von diesem besonderen Messverfahren zu überzeugen.

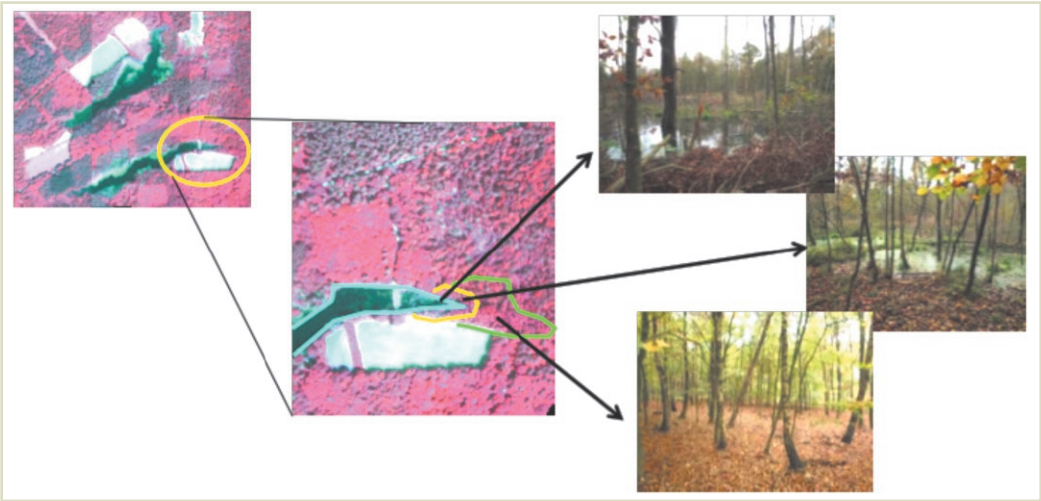

Fig. 3. Flooding stages in Kirchheller Heide. AISA-Eagle airborne sensor infrared composition. Photos taken in October 2012.
Bild 3. Flutungsstadien in der Kirchheller Heide. AISA-Eagle airborne sensor infrared composition. Fotos aufgenommen im Oktober 2012. Source/Quelle: THGA (nach (3), modifiziert)

can be used and how efficient they are. As a second step, selected methods shall be tested on practical examples. The third phase sees the development of recommendations for the selection and appropriate combination of such methods to meet specific requirements.

3.1 The Space Component

Which options are provided and what can actually be expected from those data that the satellite-supported earth observation provides with?

The following examples are extracted from the R&D project GMES4Mining (www.gmes4mining.de). They demonstrate the potential of Copernicus for the monitoring of mining-induced environmental impacts.

The study site Kirchheller Heide, a heath located in the northern part of the Ruhr district, was used in GMES4Mining to develop change detection methods for water bodies and soil moisture due to mining-related ground movement.

3 Monitoring

Das Forschungszentrum Nachbergbau erarbeitet im Rahmen eines laufenden Forschungsvorhabens einen möglichst vollständigen Katalog der aktuell verfügbaren Monitoring-Verfahren für den Alt- und Nachbergbau. Ziel ist es ferner, die Einsetzbarkeit und Leistungsfähigkeit der einzelnen Verfahren auf der Basis publizierter Informationen zu beschreiben. In einem zweiten Schritt sollen ausgewählte Verfahren an Praxisfällen getestet werden. Die dritte Phase besteht in der Erarbeitung von Empfehlungen für die Auswahl und die Kombination von Verfahren für spezifische Anforderungen.

3.1 Weltraum-Komponente

Welche Möglichkeiten und Erwartungen verknüpfen sich nun mit den Daten, die im Rahmen der satellitengestützten Erdbeobachtung zur Verfügung gestellt werden?

Die folgenden Beispiele sind dem Forschungs- und Entwicklungsprojekt GMES4Mining (www.gmes4mining.de) entnommen. Sie sollen das Potential der Copernicus-Daten zum Monitoring des

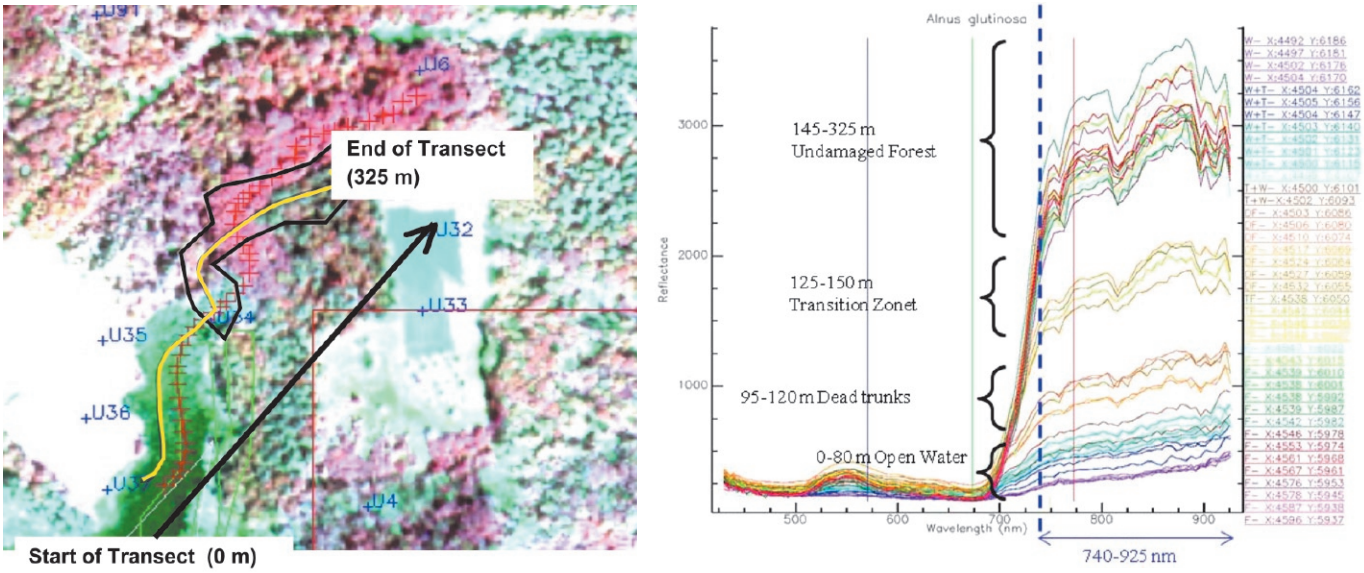

Fig. 4. Vegetation damage transect at study site Kirchheller Heide ranging from open water body to undamaged forest. AISA-Eagle airborne sensor data as graphs and Sentinel 2 bands as vertical lines.
Bild 4. Vegetationsschaden-Transekt im Testgebiet Kirchheller Heide ausgehend von der offenen Gewässerfläche bis zum ungeschädigten Wald. AISA-Eagle-Daten als Graphen und Sentinel 2-Bänder als vertikale Linien. Source/Quelle: THGA (nach (3), modifiziert)

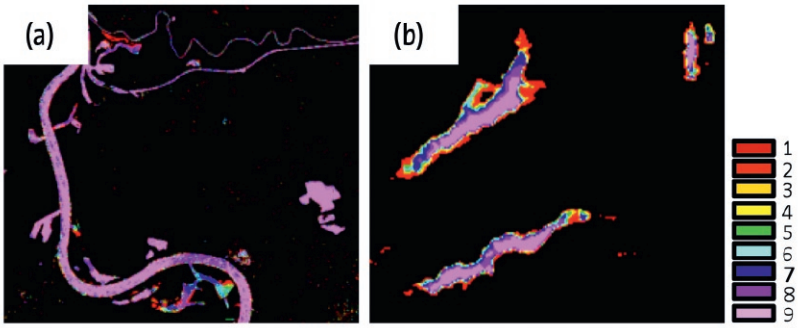

Fig. 5. Results of the change detection using nine RapidEye images between April 2009 and September 2012 for the Ruhr Valley/Germany (a). Known flooded area in Kirchheller Heide/Germany (b).
Bild 5. Ergebnisse der Veränderungsdetektion durch Nutzung von neun RapidEye- Aufnahmen zwischen April 2009 und September 2012 des Ruhrtals (a). Bekannte Polderfläche in der Kirchheller Heide (b).
Source/Quelle: THGA (nach (3), modifiziert)

Mine-related flooding can be evaluated either directly by monitoring changes in water distribution or indirectly by observing changes in vegetation provoked by changes in soil moisture and water emergence. The sudden emergence of water in surface in a relative short time generates a unique pattern in the surrounding vegetation that can help in discriminating mine-related flooded areas from other types of water bodies. This information cannot be retrieved from the simple observation of changes in water distribution (3).

GMES4Mining evaluated the effects of emerging waters in vegetation. Plants around mine-related flooded areas often simply die, and rings of trees in different stages of decay can be observed (Figure 3).

Different stages of vegetation damage can be clearly differentiated by analysis of the hyperspectral dataset of the AISA-Eagle sensor (Figure 4). Nevertheless, an expensive aerial flight campaign can be replaced by the Copernicus Sentinel 2 mission data, which have been available free of charge since 2015. The vertical lines in Figure 4 represent the relevant infrared bands of Sentinel 2.

In addition to the analysis of vegetation damages, change detection of open water bodies can also be carried out with the help of Copernicus data. Water masks calculated with low albedo and using a threshold based on the data histogram can be summed up together in order to detect water bodies that experienced changes during the monitoring period. In low albedo water masks, water bodies are represented by a value of 1, and everything else by a value of 0. Therefore, water bodies in this accumulated low albedo raster are represented by values different to 0. Water bodies which did not experience changes in the given time frame, independently of their nature – natural or human-made, rivers, ports, lakes, etc. – present the maximum value (value 9 in Figure 5) and can be discarded. Water bodies that changed – including mine-related flooded areas – are represented in the intermediate values of Figure 5. The result of this exploration – accumulated low albedo masks – highlights not only mine-related flooding, but can be evaluated by experts in order to decide which areas are potential mine-related flooded areas and to discard other events, i. e. enlargement of a port, change of river beds.

Mining activities do cause ground movement. The use of satellite-supported remote sensing methods allows to implement monitoring of such ground movements without local installations being necessary. Since the TerraSAR-X radar satellites were launched in 2007, the ground resolution has been reduced to less than 1 m.

bergbaulich verursachten Einflusses auf die Umwelt verdeutlichen.

Die Testfläche Kirchheller Heide befindet sich im nordwestlichen Bereich des Ruhrgebiets. Sie wurde im Rahmen von GMES4-Mining genutzt, um Methoden zur Erkennung von Veränderungen an Wasserkörpern und im Boden-Wasser-Gehalt infolge bergbaulicher Bodenbewegungen zu entwickeln.

Ein bergbaubedingter Wasseranstieg kann direkt durch die Beobachtung der Veränderung der Wasserverteilung bewertet werden. Die indirekte Beobachtung basiert auf Veränderungen der Vegetation, die auf Änderungen des Boden-Wasser-Gehalts und dem Anstieg des Wasserspiegels beruhen. Das plötzliche Auftreten von Wasser an der Tagesoberfläche ruft in der betroffenen Vegetation besondere Erscheinungsbilder hervor, die zur Unterscheidung von Senkungsseen und anderen Wasserkörpern genutzt werden können. Diese Information kann durch die einfache Beobachtung der Wasserverteilung nicht erzielt werden (3).

GMES4Mining bewertete die Auswirkungen von ansteigenden Wasserspiegeln bei der Vegetation. Im Umfeld von bergbaulich bedingten Wasserflächen sterben Pflanzen oftmals einfach ab und Gruppen von Bäumen in unterschiedlichen Schadensstufen des Verfalls lassen sich beobachten (Bild 3).

Unterschiedliche Stadien der Schädigung der Vegetation lassen sich auf der Basis der Analyse von hyperspektralen Daten des Sensors des Satelliten AISA-Eagle deutlich abgrenzen (Bild 4). Tatsächlich kann der hohe Aufwand für Befliegungen durch Daten der Sentinel-2-Mission ersetzt werden. Diese stehen seit dem Jahr 2015 kostenfrei zur Verfügung. Die vertikalen Linien in Bild 4 repräsentieren die relevanten Infrarot-Bänder von Sentinel 2.

Zusätzlich zur Analyse der geschädigten Vegetation können mit den Copernicus-Daten Veränderungen an offenen Wasserflächen detektiert werden. Um Wasserkörper zu bestimmen, die in der Beobachtungsperiode eine Flächenveränderung erfahren haben, können Reflexionsänderungen genutzt werden. Bei geringer Reflexion von Wasserflächen werden diese mit dem Wert 1 und alle anderen mit dem Wert 0 repräsentiert. Die Wasserkörper sind daher im zusammengefassten Reflexionsraster versehen mit Werten, die von 0 abweichen. Wasserkörper, die im vorgegebenen Zeitraum unabhängig von ihrem Typ – natürlich oder anthropogen, Fluss, Hafen, See u. a. – keine Veränderung erfahren, ergeben einen maximalen Wert (Wert 9 in Bild 5) und können verworfen werden. Wasserkörper, die sich verändern – einschließlich bergbaubedingter Wasserflächen – werden durch mittlere Werte in Bild 5 wiedergegeben. Das Ergebnis dieser Untersuchungen hebt nicht nur bergbaubedingte Wasseranstiege hervor. Vielmehr können Fachleute die Ergebnisse nutzen, um zu bestimmen, welche Bereiche auf Bergbau-Einfluss oder auf anderen Ursachen beruhen, z. B. Erweiterung eines Hafens, Wechsel in Flussläufen.

Subsidences that are determined by radar interferometry receive the abbreviation PSInSAR. In urban areas a sufficient number of reflectors, known as Persistent Scatterers (PS), are available. In rural regions, artificial radar reflectors, e.g., corner reflectors, can be erected.

Radar interferometry is an appropriate option for monitoring large-scale surfaces. Ground movement monitoring of larger areas, e.g. the entire Ruhr area, at high temporal frequencies is an option, not at least because of the higher intake capacity of the Copernicus radar mission Sentinel 1, which will enable a repeat rate of one to five days for radar interferometric measurements relying on two satellites of identical construction.

3.2 The In-situ Component

The Copernicus Programme provides a definition of in situ that is wider than that of other contexts. Here, the in-situ component refers to observation systems that are not operated in space. Such systems are, e.g., the following:

- surveying results of geodesy and mine-surveying;
- air-based remote sensing instruments;
- site inspection;
- photography and photogrammetry;
- meteorological measuring facilities;
- probes at weather balloons or
- measuring buoys, stream gauging devices.

Likewise, information products that are derived from such observations are part of the in-situ component. Those include, e.g.:

- digital topographic maps;
- digital elevation models;
- ortho-photos;
- road networks;
- topical maps (e.g. forest areas, settlements, water bodies) or
- mining charts.

The in-situ component is decisively shaped by the expertise of the specialists involved. The transparency of the available data is of importance, too. In this context, the information platforms of geo-data infrastructure play a special part. One example to be referred to here is the GEOportal NRW. This platform allows all users simple research and visualisation of the geo-basis and specialist geo-data provided by the State Administration of North Rhine-Westphalia and also accommodates a specialist portal called "Hazardous underground potentials". This portal provides information on the spread of underground hazards that are caused by geological and mining factors.

4 Outlook

The Research Institute of Post-Mining was founded as an initiative of the RAG-Stiftung, Essen/Germany, a foundation set up by the legal successor of the German mining company, RAG. The foundation also endowed a professorship to support both the research institute and the master study programme "Geo-Engineering and Post-Mining" (4).

Against the background of the phasing out of the German hard-coal mining sector, the RAG-Stiftung pursues the aim to ensure the qualification and availability of specialists who are need-

Bergbauliche Aktivitäten führen zu Bewegungen an der Tagesoberfläche. Mithilfe von satellitengestützten Fernerkundungsverfahren lässt sich ein Monitoring der Bodenbewegungen ohne Installationen vor Ort umsetzen. Die Bodenauflösung ist seit der Inbetriebnahme des TerraSAR-X Radarsatelliten im Jahr 2007 auf unter 1 m reduziert.

Radarinterferometrisch können Setzungen/Senkungen u.a. mit der PSInSAR-Methode gemessen werden. In städtischen Bereichen stehen genügend Reflektoren, sogenannte Persistent Scatterer (PS) zur Verfügung. In ländlichen Regionen können künstliche Radarreflektoren, sogenannte Corner-Reflektoren aufgebaut werden.

Für das Monitoring großer Flächen bietet sich die Radarinterferometrie an. Für ein zeitlich hochfrequentes Bodenbewegungsmonitoring größerer Flächen, wie z.B. dem gesamten Ruhrgebiet, eignet sich u.a. wegen der höheren Aufnahmekapazität die Copernicus-Radarmission Sentinel 1, die mit zwei baugleichen Satelliten mit ein- bis fünftägiger Wiederholrate radarinterferometrische Messungen ermöglicht.

3.2 In-Situ-Komponente

Der Begriff „in situ" wird im Copernicus-Programm weiter gefasst als in anderen Zusammenhängen. Hier versteht man unter dem Begriff der In-Situ-Komponente die Beobachtungssysteme, die nicht im Weltraum betrieben werden. Dies sind beispielsweise:

- geodätisch-markscheiderische Vermessungen,
- luftgestützte Fernerkundungsinstrumente,
- Begehungen,
- Fotografie, Fotogrammetrie,
- meteorologische Messeinrichtungen,
- Sonden an Wetterballonen oder
- Messbojen, Flusspegel.

Auch Informationsprodukte, die auf Basis solcher Beobachtungen erstellt werden, zählen dazu. Beispiele sind:

- digitale topographische Karten,
- digitale Höhenmodelle,
- Orthofotos,
- Straßennetze,
- thematische Karten (z.B. Waldgebiete, Siedlungen, Gewässer) oder
- bergbauliche Karten.

Die In-Situ-Komponente wird ganz wesentlich von der Expertise der eingebundenen Fachleute bestimmt. Von Bedeutung ist die Transparenz der verfügbaren Daten. In diesem Zusammenhang spielen die Informationsplattformen in der Geodateninfrastruktur eine besondere Rolle. Als Beispiel soll hier das GEOportal NRW dienen. Es ermöglicht allen Nutzern eine einfache Recherche und Visualisierung der Geobasis- und Geofachdaten der Landesverwaltung. Das Fachportal „Gefährdungspotenziale des Untergrundes" stellt Informationen über die Verbreitung geologisch und bergbaulich bedingter Untergrundgefährdungen bereit.

4 Ausblick

Das Forschungszentrum Nachbergbau ist auf Initiative der RAG-Stiftung an der THGA gegründet worden. Zum Aufbau des Forschungszentrums und des Masterstudiengangs „Geoingenieur-

ed to manage the perpetual tasks that mining has left. Moreover, intensive work and research need to be done at the knowledge base of post-mining.

Mining processes help to supply people with resources – in other words, mining is nearly as old as humankind itself. Facing the development of the world's population and of technological advancement there will be mining done in future around the world. Whereas the operation of any underground or opencast mine is necessarily time-bound, the impact the activities have on the environment can be of a much longer time period or even infinite.

Thus, it needs to be the aim to organise the post-mining process of former and current mine activities in an environmentally acceptable manner. The knowledge of how such mining processes impact the environment will enable us to plan, monitor and control processes so that they will become more and more sustainable.

In this context, monitoring is of particular importance. Only high-performance monitoring methods allow for a comprehensive understanding of processes and systems. Today, innumerable methods are available for observing mining facilities and operations as well as the environmental impact of those. Their efficiency has to be tested and developed further time and again. New methods have to be assessed for their applicability in (post-) mining. At the moment, this requirement holds especially true for the enormous potential that satellite-supported earth observation encompasses.

As initial examinations have shown, the data available from the Copernicus Programme can be put to value. The monitoring of ground movements caused by landslides, sinkholes, subsidence or fluctuations of (mine) water levels is almost ready for practical use. Changes in the depth to water tables and their impact on vegetation can also be observed and interpreted.

What needs to be done now is to purposefully bundle the numerous monitoring measures regarding the individual issues to be tackled and to combine those measures with the anthropogenic expertise. That is exactly what the innovative approach will focus on.

wesen und Nachbergbau" hat sie eine Professur gestiftet (4).

Vor dem Hintergrund der Beendigung des deutschen Steinkohlenbergbaus verfolgt die RAG-Stiftung das Ziel, dass für die Bewältigung der damit zusammenhängenden Ewigkeitsaufgaben die erforderlichen Fachleute ausgebildet werden und dem Arbeitsmarkt zur Verfügung stehen. Daneben soll intensiv an der Wissensbasis des Nachbergbaus geforscht und gearbeitet werden.

Bergbauliche Prozesse dienen der Rohstoffversorgung der Menschen. Der Bergbau ist also nahezu so alt wie die Menschheit selbst. Angesichts der Entwicklung der Weltbevölkerung und der Technik wird es auch in der Zukunft weltweit bergbauliche Aktivitäten geben. Nun ist der Betrieb eines Bergwerks oder eines Tagebaus zwangsläufig auf Zeit angelegt. Der Einfluss auf die Umwelt kann aber durchaus sehr langfristig bis ewig sein.

Es muss Ziel sein, die Nachbergbauphase des früheren und des heutigen Bergbaus, ebenso wie die bergbaulichen Prozesse in der Zukunft umweltverträglich zu organisieren. Das Wissen über den Einfluss bergbaulicher Aktivitäten auf die Umwelt ermöglicht es, die Prozesse so zu planen, zu überwachen und zu steuern, dass sie zunehmend nachhaltig sind.

In diesem Zusammenhang kommt dem Monitoring eine besondere Bedeutung zu. Nur mithilfe leistungsfähiger Monitoringverfahren lässt sich ein möglichst umfassendes Prozess- und Systemverständnis erreichen. Heute stehen unzählige Verfahren zur Beobachtung bergbaulicher Anlagen und Betriebe und ihrer Umweltauswirkungen zur Verfügung. Ihre Leistungsfähigkeit muss immer wieder geprüft und weiterentwickelt werden. Neue Verfahren sind auf ihre Anwendbarkeit im (Nach-) Bergbau zu testen. Dies gilt aktuell in besonderer Weise für die enormen Potentiale der satellitengestützten Erdbeobachtung.

Wie erste Untersuchungen gezeigt haben, lassen sich die im Rahmen des Copernicus-Programms verfügbaren Daten in Wert setzen. Die Überwachung von Bodenbewegungen infolge von Hangrutschungen, Erdfällen, Tagesbrüchen oder Schwankungen des (Gruben-)Wasserstands ist nahezu praxisreif. Änderungen des Flurabstandes mit Auswirkungen auf die Vegetation lassen sich beobachten und interpretieren.

Es gilt, die Vielzahl der Monitoringmaßnahmen gezielt auf die jeweilige Problemstellung zu fokussieren und die Ergebnisse unterschiedlicher Verfahren miteinander und mit der anthropogenen Expertise zu kombinieren. Genau darin besteht der innovative Ansatz.

References / Quellenverzeichnis

(1) Goerke-Mallet, P.; Melchers, C.; Müterthies, A.: Innovative monitoring measures in the phase of post-mining. IMWA 2016, Leipzig, Abstracts S. 570–577.

(2) Melchers, C.; Goerke-Mallet, P.; Henkel, L.; Hegemann, M.: Experiences with mine closure in the European coal mining industry: An overview of the situation in Germany, and adjacent regions. Conference Mine Closure 2015, Vancouver, Canada.

(3) Garcia-Millan, V. E.; Müterthies, A.; Pakzad, K.; Teuwsen, S.; Benecke, N.; Zimmermann, K.; Kateloe, J.; Preuße, A.; Helle, K.; Knoth, C.: GMES4Mining – GMES-based Geoservices for Mining to Support Prospection and Exploration and the Integrated Monitoring for Environmental Protection and Operational Security. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 02/2014, 159 (2): S. 66–73.

(4) Melchers, C.; Goerke-Mallet, P.: Research Institute of Post-Mining, TFH Georg Agricola University of Applied Sciences, Bochum – Strategies, Activities and Research Priorities. Mining Report Glückauf (151) Heft 6, S. 474–479.

Authors / Autoren

Prof. Dr.-Ing. Peter Goerke-Mallet und Prof. Dr. rer. nat. Christian Melchers, Forschungszentrum Nachbergbau, Technische Hochschule Georg Agricola (THGA), Bochum, Dr. rer. nat. Andreas Müterthies, EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH, Münster