Marcin Pawlik, Xiaoxuan Yin,
Bodo Bernsdorf, Tobias Rudolph,
Peter Goerke-Mallet

Application of Modern Geo- and Environmental Monitoring Methods for the Sustainable Management of Geological Resources

The sustainable management of geological resources presents a challenge for environmental and geomonitoring actions with all the diverse tasks and assignments involved, such as water management and the monitoring of environmental changes. Today's geo- and environmental monitoring processes involve the observation of many different factors and use satellite-supported optical remote detection with multispectral or hyperspectral sensors and radar remote sensing. Such methods are able to gather extensive information about the Earth's surface, though with a relatively low spatial and temporal resolution. Using copters as carrier vehicles for various sensors allows relatively flexible mapping to be carried out at any time and in a much higher spatial resolution to an accuracy of a few centimetres. The in-situ sensors can also selectively measure the target quantity directly. The integration of monitoring methods of this kind, in combination with local knowledge and experience, forms the basis for an understanding of environmental changes and the causes that underlie them and serves as an integral step towards public acceptance.

Einsatz moderner Methoden des Geo- und Umweltmonitoring im nachhaltigen Umgang mit Georessourcen

Der nachhaltige Umgang mit Georessourcen fordert das Umwelt- und Geomonitoring mit seinen vielfältigen Aufgaben, wie das Monitoring von Umweltveränderungen und das Wassermanagement, heraus. Moderne Methoden des Geo- und Umweltmonitoring beobachten zahlreiche Aspekte unter Verwendung der satellitengestützten optischen Fernerkundung mit multispektralen bzw. hyperspektralen Sensoren und Radarfernerkundung. Solche Methoden erfassen die großflächigen Informationen der Erdoberflächen allerdings mit relativ groben räumlichen wie auch zeitlichen Auflösungen. Die Nutzung von Koptern als Träger von verschiedenen Sensoren ermöglicht eine zeitlich relativ flexible Aufnahme in einer deutlich höheren räumlichen Auflösung bis zum Zentimeterbereich. Zudem messen die In-situ-Sensoren punktuell direkt die Zielgröße. Die Integration von solchen Monitoringmethoden, zusammen mit den Kenntnissen und Erfahrungen vor Ort, bildet die Grundlage für das Verständnis der Umweltveränderungen sowie der damit verbundenen Ursachen und dient als der integrale Schritt für die öffentliche Akzeptanz.

1 Geomonitoring in the post-mining environment

The sustainable management of georesources is governed by a specific life cycle that begins with the allocation of mining licences and continues with the exploration and mineral extraction stage and the operation of the site before concluding with the mine closure process and the post-mining phase (1). This manner of dealing with geological resources has a huge impact on people, nature and the environment and is an extremely complex issue that involves all kinds of individual factors. It is therefore important to ensure that a continuous programme of spatial monitoring is put in place to detect the resulting environmental changes that occur both during and after the actual operational phase. These changes include the impact of mining operations on water resources, e.g., as a result of mine dewatering activities undertaken as part of regional water management schemes. As far as soil resources are concerned mining processes can result in soil movements in the

1 Geomonitoring im Nachbergbau

Der nachhaltige Umgang mit Georessourcen unterliegt einem bestimmten Lebenszyklus, der mit der Erteilung von Konzessionen (Bergbauberechtigungen) beginnt, gefolgt von der Explorations- und Abbauphase, dem Betrieb des Standorts, dem Schließungsprozess und dem Nachbergbau (1). Dieser Umgang mit Georessourcen hat einen starken Einfluss auf den Menschen, die Natur sowie die Umwelt und ist ein sehr komplexes Thema, welches viele Einzelaspekte umfasst. Ein wichtiges Thema bezüglich der dadurch verursachten Umweltveränderungen, die während und nach dem Betrieb auftreten, ist daher deren kontinuierliches, räumliches Monitoring. Dazu gehören die Auswirkungen auf die Ressource Wasser, z.B. durch Grubenentwässerung im Rahmen des Wassermanagements in der Region. Für die Ressource Boden führen Bergbauprozesse zu Bodenbewegungen (Absenkung, Hebung) und Veränderungen der Vegetation

form of ground subsidence and uplift and can lead to changes in vegetation and land usage. Mining-related gas emissions can also have an impact on air resources. Environmental and geomonitoring in the post-mining era calls for an integrated, spatial monitoring plan based on various datasets that have to be collected, analysed and interpreted (2, 3). These can originate from data that has been acquired during the mining phase, such as mine plans and geological and operational maps, recordings from satellite-supported multispectral and hyperspectral sensors, photo documentation from copter and aircraft flights and data recorded by in-situ sensors. These heterogeneous data records provide the basis for an understanding of the post-mining processes.

This paper presents an overview of the latest environmental and geomonitoring methods that are available for making observations from space and from the air of post mining-relevant objects that are present on the Earth's surface and below ground level. It also discusses the subject of data integration in a comprehensive system in relation to multi-sensor observations in different spatiotemporal resolutions.

2 Satellite-supported remote sensing

Remote sensing is a technique in which specialised sensors are used to obtain data on phenomena, processes and objects from a remote distance (4). The sensors can be mounted on satellites, aircraft or copters. Satellites on different missions orbit the Earth and their sensors regularly scan the Earth's surface and record their changes over the course of time. The satellite data are made available free of charge on online portals such as the non-commercial Copernicus programme that was set up by the European Space Agency (ESA). Copernicus concentrates on a series of Earth-observing Sentinel satellites each with its own specific objective. Sentinel 1, e.g., monitors deformation of the Earth's surface using a synthetic aperture radar (SAR) instrument, while Sentinel 2 identifies changes in vegetation and land use.

2.1 Optical remote sensing

Optical remote sensing covers the visible, the near-infrared and the thermal-infrared range of spectra. Everything that can be observed is based on the radiation emitted by the sun being reflected on to objects. Satellite-mounted sensors record the radiation that is reflected by objects on the Earth's surface, such as buildings, trees and bodies of water. These data are converted into information that can be used for analysing and interpreting the phenomena that occur on the surface of the Earth. One major advantage of satellite data is their massive spatial coverage. However, cloud cover can mean that not all the images recorded by the optical sensors are suitable for use.

Remote sensing can also be used to monitor post-mining activities. This means that in the years ahead it will be possible to apply preventive measures of one kind or another (5). One aspect of the environmental and geomonitoring of post-mining processes involves the observation of changes in vegetation cover based on a calculation of vegetation indices. One of these is the Normalised Difference Vegetation Index – NDVI (6), which extracts information on vegetation cover by combining surface reflections in the red and near-infrared channel. One of the relevant features here is that healthy vegetation absorbs the red component of the

oder Landnutzung. Zudem beeinflussen die bergbaubedingten Gasemissionen die Ressource Luft. Das Umwelt- und Geomonitoring im Nachbergbau bedeutet ein integriertes räumliches Monitoringkonzept, welches auf unterschiedlichen Datensätzen basiert, die erhoben, ausgewertet und interpretiert werden müssen (2, 3). Ausgehend von Daten, die während des Abbaus gesammelt wurden, z.B. bergbauliche, geologische oder operative Karten, Aufnahmen aus satellitengestützten multispektralen und hyperspektralen Sensoren, Fotodokumentationen von Kopter- oder Flugzeugflügen und Daten von In-situ-Sensoren. Diese heterogenen Datensätze bilden die Grundlage für das Verständnis von Nachbergbauprozessen.

In diesem Beitrag wird ein Überblick über die modernen Umwelt- und Geomonitoring-Methoden zusammengestellt, die Beobachtungen der nachbergbau-relevanten Objekte aus dem Weltraum, der Luft, bis an die Erdoberfläche und im Untergrund ermöglichen. In Bezug auf multisensorielle Beobachtungen in verschiedenen raumzeitlichen Auflösungen wird die Datenintegration in einem umfassenden System diskutiert.

2 Satellitengestützte Fernerkundung

Die Fernerkundung ist eine Methode zur Gewinnung von Daten zu Phänomenen, Prozessen und Objekten aus der Ferne mit Hilfe spezialisierter Sensoren (4). Diese können auf Satelliten, Flugzeugen oder Koptern montiert werden. Satelliten verschiedener Missionen umkreisen die Erde und ihre Sensoren scannen regelmäßig die Erdoberfläche und ihre Veränderungen im Lauf der Zeit. Es gibt Webportale, die Satellitendaten kostenlos zur Verfügung stellen, darunter das nicht kommerzielle Copernicus-Programm der Europäischen Weltraumorganisation (ESA). Copernicus konzentriert sich auf eine Reihe von Sentinel-Satelliten mit jeweils eigener Zielsetzung, z.B. Sentinel-1 überwacht Deformationen der Erdoberfläche durch das Radarsystem mit synthetischer Apertur (SAR) und Sentinel-2 erkennt Vegetations- und Landnutzungsänderungen.

2.1 Optische Fernerkundung

Die optische Fernerkundung umfasst den sichtbaren, den nahen Infrarot- und den thermischen Infrarotbereich. Alles, was zu beobachten ist, basiert auf der Reflexion der von der Sonne emittierten Strahlung an Objekten. Sensoren am Satelliten erfassen die Strahlung, die von Objekten auf der Erdoberfläche, z.B. Häusern, Bäumen oder Wasserflächen, reflektiert wird. Solche Daten werden in Informationen umgewandelt, die zur Analyse und Interpretation von Phänomenen auf der Erdoberfläche verwendet werden. Ein wichtiger Vorteil von Satellitendaten ist deren große räumliche Abdeckung. Aufgrund der Wolkenbedeckung sind allerding nicht alle aufgenommenen Bilder aus den optischen Sensoren verwendbar.

Die Überwachung der Nachbergbauaktivitäten ist mit Methoden der Fernerkundung möglich. Dadurch können in Zukunft präventive Maßnahmen eingeleitet werden (5). Ein Aspekt des Umwelt- und Geomonitorings von Nachbergbauprozessen ist die Beobachtung von Vegetationsveränderungen durch Berechnung von Vegetationsindizes. Einer davon ist der NDVI – Normalized Difference Vegetation Index (6), der Vegetationsinformationen extrahiert, indem Oberflächenreflexionen im roten und nahen

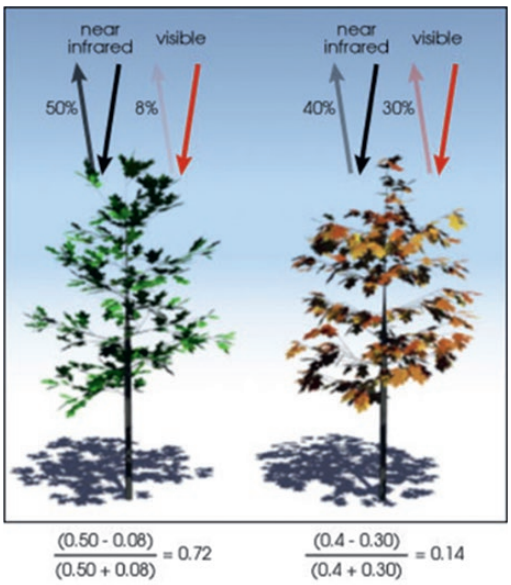

Fig. 1. The NDVI calculated from the visible and the near-infrared light that is reflected by vegetation. Healthy vegetation (left) and unhealthy vegetation (right). The figures below the images denote the NDVI values. (7) // Bild 1. Der NDVI berechnet aus dem sichtbaren und nahen Infrarotlicht, das von der Vegetation reflektiert wird. Gesunde Vegetation (links) und ungesunde Vegetation (rechts). Die Zahlen unter der Abbildung stehen für NDVI-Werte. (7)

sunlight almost completely – it is needed for photosynthesis – and reflects a large part of the incident solar energy in the near-infrared range. The greener the plant the greater is the increase in the reflection factor from the red spectral range to the near-infrared range. Unhealthy vegetation, on the other hand, exhibits a different reflection behaviour (Figure 1).

This characteristic of a healthy vegetation was defined mathematically using the NDVI as follows (6):

$$NDVI = \frac{(\rho^{NIR} - \rho^{RED})}{(\rho^{NIR} + \rho^{RED})}$$

Here ρ^{NIR} corresponds to the reflection value in the near-infrared wavelength range of about 800 to 900 nm and ρ^{RED} represents the reflection value in the red range of about 600 to 700 nm. The individual wavelength ranges depend on the respective satellites and their on-board sensors. The NDVI adopts values of –1 to 1. Water bodies show values close to –1, with the value 0 usually indicating that no vegetation is present. The healthier the vegetation, the higher the value of the NDVI.

Many examples exist where these vegetation indices have been used to monitor changes in vegetation, including in post-mining areas in China (8), the Czech Republic (9, 10), Germany (11), Poland (12), Turkey (13, 14) and the USA (15). These case studies, which used individual vegetation indices, show just how useful and effective indices of this kind can be for monitoring the vegetation cover of post-mining processes.

Another important aspect is the spatiotemporal analysis of satellite images (Figure 2), whereby changes in vegetation and in the associated moisture levels, as occurring in the context of

Infrarotkanal kombiniert werden. Es gibt die Eigenschaft, dass gesunde Vegetation den roten Anteil des Sonnenlichts fast vollständig absorbiert – er wird für die Photosynthese benötigt – und einen sehr großen Teil der einfallenden Sonnenenergie im nahen Infrarot reflektiert. Je grüner die Pflanze ist, desto größer ist der Anstieg des Reflexionsgrads vom roten Spektralbereich zum nahen Infrarot. Im Gegensatz dazu zeigt ungesunde Vegetation ein anderes Reflexionsverhalten (Bild 1).

Diese Eigenschaft einer gesunden Vegetation wurde mit dem NDVI mathematisch wie folgt definiert (6):

$$NDVI = \frac{(\rho^{NIR} - \rho^{RED})}{(\rho^{NIR} + \rho^{RED})},$$

wobei ρ^{NIR} dem Reflexionswert im Nahinfrarot-Wellenlänge-Bereich von etwa 800 bis 900 nm und ρ^{RED} dem Reflexionswert im roten Bereich von etwa 600 bis 700 nm entspricht. Die einzelnen Wellenlängenbereiche hängen vom jeweiligen Satelliten und dem verwendeten Sensor ab. Der NDVI nimmt Werte von –1 bis 1 an. Die Gewässer zeigen Werte nahe –1, der Wert 0 bedeutet normalerweise, dass es keine Vegetation gibt. Je gesünder die Vegetation ist, desto höher wird der Wert des NDVI.

Es gibt viele Beispiele für die Verwendung dieser Vegetationsindizes zur Überwachung von Vegetationsveränderungen in Nachbergbaugebieten in China (8), Tschechien (9, 10), Deutschland (11), Polen (12), der Türkei (13, 14) und den USA (15). Die genannten Fallstudien, bei denen individuelle Vegetationsindizes verwendet wurden, zeigen hierbei die Gültigkeit von Vegetationsindizes bei der Vegetationsüberwachung von Nachbergbauprozessen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die raumzeitliche Analyse von Satellitenbildern (Bild 2), wodurch Veränderungen von Vegetationen bzw. der darauf bezogenen Feuchtigkeit im Zusammenhang mit Nachbergbauprozessen in einem bestimmten Gebiet beobachtet werden können. Ein gutes Beispiel ist der Artikel Padmanaban et al. (11), der mit Hilfe des NDVI exemplarisch zwei Gebiete mit negativen Vegetationsveränderungen und Feuchtgebietsbildung im Bereich der Kirchheller Heide aufzeigte.

2.2 Radarfernerkundung

Radar steht für den englischen Begriff „Radio Detection and Ranging“ und basiert auf dem Messprinzip der Echoortung, bei dem die Echos des gesendeten Signals gemessen werden. Als Träger der Signale werden elektromagnetische Wellen im Mikrowellenbereich von 300 bis –1 GHz verwendet. Ein aktives, bildgebendes Radarsystem ist an einem Flugzeug oder Satelliten montiert, das sich entlang einer geraden Flugbahn in einer Höhe über einer Referenzfläche bewegt.

Die optische Satellitenfernerkundung sammelt Erdbeobachtungsdaten in der Regel aus dem reflektierten Sonnenlicht, in einem vergleichsweise kurzen Wellenlängenbereich von sichtbarem Licht bis hin zu thermischem Infrarot. Daher wird die traditionelle optische Fernerkundung stark von Atmosphäreneffekten wie der Wolkenbedeckung beeinflusst, welche die Fähigkeit zur Erfassung von Informationen von der Erdoberfläche einschränkt. Im Vergleich zu optischen Fernerkundungssystemen sind Radarsysteme aufgrund einer eigenen Strahlungsquelle unabhängig von der Tageszeit der Aufzeichnung. Darüber hi-

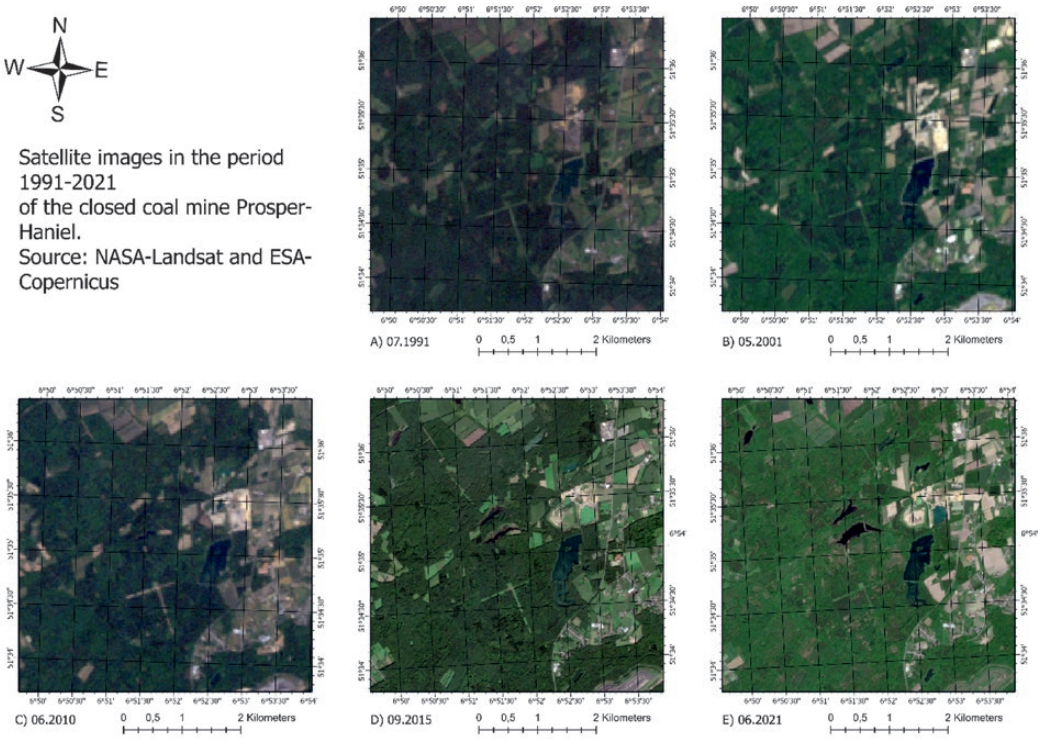

Fig. 2. Satellite images taken during 1991 to 2021 of the closed Prosper-Haniel colliery. Data provided by the Digital Twin project of the THGA.
Bild 2. Satellitenaufnahmen in der Zeit von 1991 bis 2021 des geschlossenen Bergwerks Prosper-Haniel. Datenursprung ist das Projekt Digital Twin der THGA.
Source/Quelle: THGA

post-mining processes, can be observed in a specific area. A good example of this is presented in the paper by Padmanaban et al. (11), who uses the NDVI to point out two areas with negative vegetation changes and marshland formation in and around the Kirchheller Heide nature reserve.

2.2 Radar remote sensing

Radar stands for "Radio Detection and Ranging" and is based on the principle of measurement by echolocation that involves measuring the echos of a transmitted signal. The signal carriers are electromagnetic waves in the microwave range of 300 to –1 GHz. An active imaging radar system is mounted on to an aircraft or satellite that moves along a straight flight path at a certain height above a reference surface.

Optical satellite remote sensing usually gathers Earth observation data from the reflected sunlight, this being done in a relatively short wavelength range that varies from visible light to thermal infrared. Conventional optical remote sensing is therefore very much influenced by atmospheric effects such as cloud cover, as this limits the capacity to gather information about the Earth's surface. Unlike optical remote sensing systems radar-based systems, which have their own radiation source, can operate irrespective of the time of day the recording is taken. Radar remote sensing also uses a relatively larger wavelength that can penetrate the atmosphere. Radar images can also be taken in cloudy conditions.

One of the most widely used methods of satellite-supported radar remote sensing involves the use of a synthetic aperture. This essentially gathers two kinds of information: backscattered intensity and phase position. The intensity of the backscattered radar radiation depends on the physical characteristics of the object surfaces, e.g., roughness and geometry, and on material properties such as moisture content and dielectric characteristics. This information can be used for detecting water bodies (16) naus verwendet die Radarfernerkundung eine relativ größere Wellenlänge, welche die Atmosphäre durchdringen kann. Damit können Radaraufnahmen auch bei Bewölkung durchgeführt werden.

Eine der weit verbreiteten Methoden der satellitengestützten Radarfernerkundung ist das Radarsystem mit synthetischer Apertur. Dadurch werden hauptsächlich zwei Informationen aufgenommen: die Rückstreuintensität und die Phasenlage. Die Intensität der rückgestreuten Radarstrahlung hängt von den physikalischen Eigenschaften der Objektoberflächen ab, z. B. Rauheit und Geometrie sowie den Materialeigenschaften wie Wassergehalt und dielektrische Eigenschaften. Dies kann bei der Detektion von Wasserflächen (16) und der Ermittlung der Bodenfeuchtigkeit (17) verwendet werden. Durch die Detektion von Wasserflächen zu verschiedenen Zeitpunkten können z. B. Überschwemmungsgebiete ermittelt werden, wie Bild 3 zeigt.

Die Phaseninformation ermöglicht eine Analyse über die Veränderung der Längen von Ausbreitungswegen der Radarsignale, die zur Erkennung von Bodenbewegungen oder zur Extraktion des digitalen Höhenmodells verwendet wird. Hierzu dient das Prinzip der SAR-Interferometrie (InSAR), die aus den kohärenten Pixeln zweier SAR-Bilder Phasenunterschiede, das sogenannte Interferogramm, berechnet. Die Phasenunterschiede resultieren aus der Aufnahmegeometrie und den leicht unterschiedlichen Orbitpositionen des Satelliten zu den Aufnahmezeitpunkten, zum anderen aus den Objekthöhen des Geländes und der Objektoberfläche und deren Verformung. Darüber hinaus lösen atmosphärische Effekte zusätzliche Signalverzögerungen aus. Der verbleibende Teil, das Messrauschen, wird mit dem Begriff Rauschen beschrieben. Zur Berechnung der Deformation wird ein Verfahren wie die Differential SAR-Interferometrie verwendet, welche mindestens zwei zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommenen SAR-Datensätze über das gleiche Gebiet verwendet und aus dem

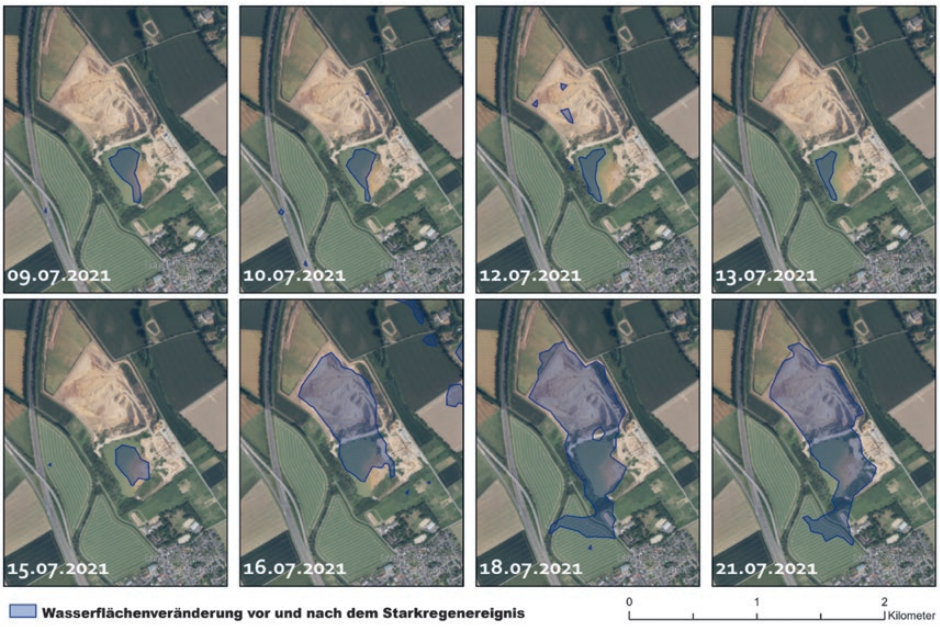

Fig. 3. Schematic representation of a water mask as produced from Sentinel 1 data.
Bild 3. Schematische Darstellung einer Wassermaske, bestimmt aus Sentinel-1 Daten. Source/Quelle: THGA

and determining soil humidity (17). The detection of expanses of water at different times, e.g., can help to identify flooded areas, as Figure 3 shows.

The phase information is used to carry out an analysis of changes in the lengths of the propagation paths of the radar signals and this serves to identify ground movements or extract the digital height model. This is based on the principle of SAR interferometry (InSAR), which is calculated from the coherent pixels of two SAR image phase differences, the so-called interferogram. The phase differences result from the image geometry and the slightly different orbit positions of the satellite at the time of the recording, on one hand, and from the object heights of the terrain and the object surface and its deformation, on the other. Atmospheric effects also cause further signal delays. The remaining component, the measurement noise, is referred-to simply as "noise". Calculating the deformation can be done using differential SAR interferometry, e.g., which uses at least two SAR datasets recorded at different times over the same area and calculates the deformation-related phase components from the interferogram. Figure 4 shows an example of a (non-processed) differential interferogram of a mining-induced subsidence zone. The phase-shift map, which is represented by a recurrent colour scale, shows the movement in the sight line of the satellite.

When using techniques of this kind the decorrelations (noisy area in Figure 3) produce errors in the phase processing and cause spatial data loss. For this reason time series-based procedures like Persistent Scatter Interferometry (PSI) and Small BAseline Subset (SBAS) are being developed for better management of problems of this kind and these are now being employed increasingly for

Interferogramm die verformungsbezogene Phasenkomponente berechnet. Bild 4 zeigt ein Beispiel für ein (unabgewickeltes) differentielles Interferogramm einer bergbaubedingten Senkung. Die Karte der Phasenverschiebung, die mit einer sich wiederholenden Farbskala dargestellt wird, zeigt die Bewegung in der Sichtlinie des Satelliten.

Bei der Verwendung solcher Methoden führen die Dekorrelationen (verrauschter Bereich in Bild 3) zu Fehlern in der Phasenabwicklung bzw. zum räumlichen Datenverlust. Daher werden die zeitreihenbasierten Verfahren wie Persistent Scatter Interferometry (PSI) und Small BAseline Subset (SBAS) im Hinblick auf den besseren Umgang mit dieser Problematik entwickelt und zur Überwachung der Bodenbewegung zunehmend eingesetzt. Während PSI Bewegungszeitreihen nur aus den „hochwertigen" Rück-

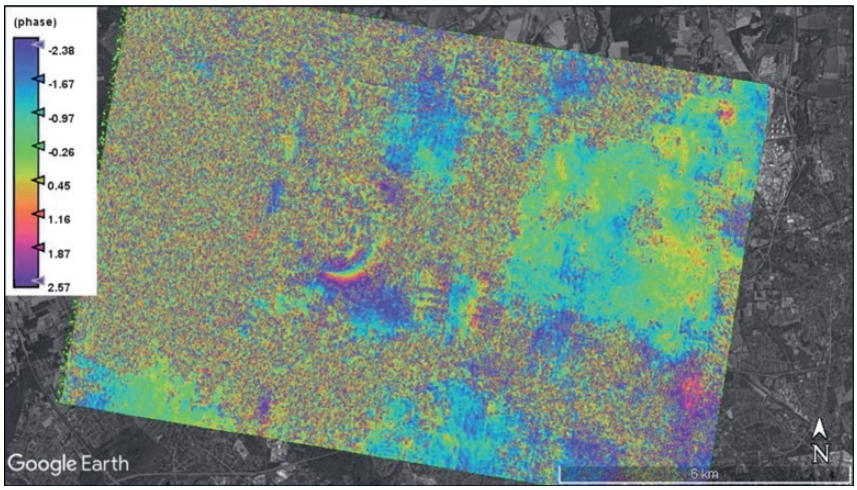

Fig. 4. Filtered differential interferogram of a mining-related subsidence event as identified from Sentinel 1 data (2015.09.04 – 2015.11.15). // Bild 4. Gefiltertes differentielles Interferogramm einer bergbaubedingten Senkungserscheinung, ermittelt aus Sentinel-1-Daten (2015.09.04 – 2015.11.15). Source/Quelle: THGA

monitoring ground movements. While PSI can only establish movement time series from "high quality" backscatterers with longterm-stable and strong backscattering, which are mostly only available in urban zones due to the double-bounce effect of the buildings, SBAS uses the network of highly coherent interferograms so that results can also be obtained in rural areas. In this type of terrain, as in most coalfield and former coalfield areas, the so-called "distributed scatterers" tend to be predominant, these being used in new developments in combination with "persistent scatterers" in order to identify ground movements over wide areas. An abstract explanation of the basic principles involved can be found at Crosetto et al. (18). For geomonitoring work in post-mining terrain radar remote sensing therefore plays an indispensable role due to its special capacity for identifying ground movements occurring over wide areas.

3 Copters

Unmanned aerial vehicle platforms (UAVs, copters and drones) have now entered the data acquisition industry and this technology is becoming increasingly widespread. Techniques of this kind have a number of advantages, including

- shorter and flexible recording times;
- results obtained in high resolution.

Drones are now used increasingly for monitoring and surveying mining areas. Data collection by copters, which is dynamic and certainly more reliable than traditional methods, is an effective way of providing a continuous monitoring regime for post-mining processes.

It should also be noted that as well as offering a number of advantages this monitoring method also has its drawbacks:

- It is dependent on weather conditions (wind, rainfall, temperature).
- Its use is governed by national and EU regulations.
- It relies on GNSS signals (Global Navigation Satellite System).

Using copter aircraft allows different types of sensor to be mounted on the UAV. Passive sensors based on electromagnetic radiation can be used, e.g., in the form of digital cameras. Active sensors, which emit electromagnetic waves to a target on the Earth's surface and then collect the signals, can also be employed on this type of platform, e.g., LiDAR (light detection and ranging). The monitoring of mining processes can be undertaken using the following types of sensing device (19):

- digital cameras;
- multispectral and hyperspectral cameras;
- thermal imaging cameras, gas detectors;
- LiDAR sensors.

This system allows orthophoto maps and thermal analyses to be produced, depending on the sensor equipment (Figure 5) (20, 21, 22). Copters provide a much higher spatial resolution than satellite images. Multispectral cameras (red, green, blue, red edge and NIR) mounted on copters also make it possible to calculate highly-accurate vegetation indices, with the centimetre-precise resolution capacity even allowing a distinction to be made between individual plant types.

streuern mit langzeitstabiler und starker Rückstreuung ermittelt, die aufgrund des Double-Bounce-Effekts von Gebäuden meist nur in städtischen Gebieten verfügbar sind, nutzt SBAS das Netzwerk hochkohärenter Interferogramme, um auch im ländlichen Raum Ergebnisse ermitteln zu können. In diesem Gebiet dominieren, wie auch in den meisten Bergbau- und Nachbergbaugebieten, die sogenannten Distributed Scatter, die in den Neuentwicklungen in Kombination mit Persistent Scatter verwendet werden, um Bodenbewegungen in großen Flächen zu ermitteln. Eine abstrakte Erläuterung des Prinzips dieser Verfahren findet sich bei Crosetto et al. (18). Beim Geomonitoring im Nachbergbau spielt die Radarfernerkundung somit durch die besondere Fähigkeit, z. B. zur flächenhaften Erfassung von Bodenbewegungen, eine unersetzbare Rolle.

3 Kopter

Unmanned aerial vehicle (UAV, Kopter, Drohnen)-Plattformen sind zu einer neuen und immer häufiger verwendeten Methode der Datenerfassung geworden. Sie haben eine Reihe von Vorteilen, darunter

- kürzere und flexible Zeit zur Aufnahme,
- hohe Auflösung der erhaltenen Ergebnisse.

Somit werden Drohnen zunehmend bei der Überwachung und Vermessung von Bergbaugebieten eingesetzt. Dynamisch, aber auch sicher im Vergleich zu traditionellen Methoden, ist die Datenerfassung durch Kopter ein effektiver Weg, um eine kontinuierliche Überwachung der Nachbergbauprozesse zu gewährleisten.

Es ist auch zu beachten, dass diese Überwachungsmethode neben ihren Vorteilen auch ihre Nachteile hat:

- Abhängigkeit von Wetterbedingungen (Wind, Niederschlag, Temperatur),
- beschränkt durch nationale und EU-Vorschriften,
- Abhängigkeit von GNSS-Signalen (Global Navigation Satellite System).

Basiert auf Kopter können verschiedene Sensoren eingesetzt werden, die auf die Kopter montiert werden können. Passive Sensoren basierend auf elektromagnetischer Strahlung sind z. B. Digitalkameras. Aktive Sensoren, die elektromagnetische Wellen an ein Ziel auf der Erdoberfläche aussenden und dann die Signale sammeln, können auch auf dieser Plattform verwendet werden, z. B. LiDAR (Light detection and ranging). Zur Überwachung von Bergbauprozessen werden Sensoren verwendet wie (19):

- Digitalkameras,
- Multispektral- und Hyperspektralkameras,
- Wärmebildkameras, Gasdetektoren,
- LIDAR-Sensoren.

Je nach Sensorausstattung ermöglichen sie die Aufnahmen von Ortophotokarten und thermischen Analysen (Bild 5) (20, 21, 22). Kopter zeigen eine deutlich höhere räumliche Auflösung als Satellitenbilder. Multispektralkameras (rot, grün, blau, red edge und NIR) auf Koptern ermöglichen auch die Berechnung von hochgenauen Vegetationsindizes, wodurch aufgrund der Zentimeterauflösung die Unterscheidung von einzelnen Pflanzen möglich ist.

Thanks to copter flights it is now possible to identify the phenomena occurring in a certain area and to do this both in 2D and also visualised in 3D space. This means that digital surface models can be produced along with the detailed depiction of building models. This technology tool is now being used increasingly in the field of Building Information Modelling (BIM). Commercially available mapping software such as Agisoft Metashape, Pix4D and ESRI's Drone2Map now enable a much better processing of copter images. The results obtained here deliver a very high level of spatial resolution.

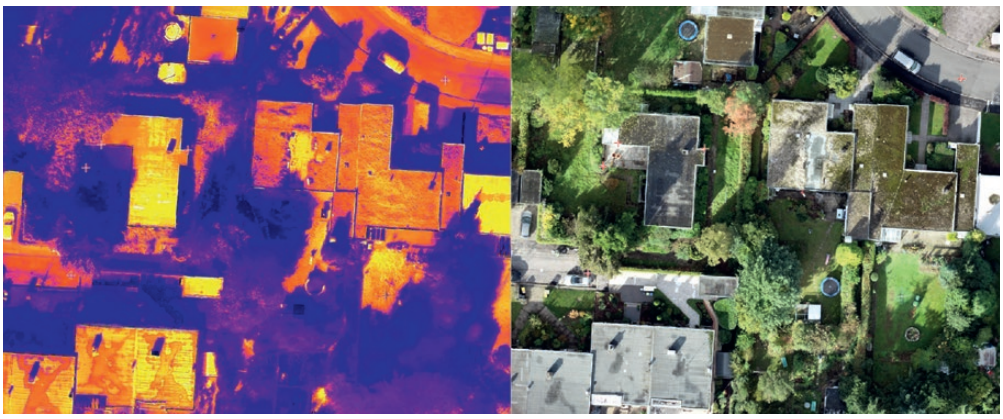

Fig. 5. Schematic thermal image (left) and photograph in normal colour (right) taken in the Dortmund suburb Barop. // Bild 5. Schematisches Thermalbild (links) und Foto in normalen Farben (rechts) aus dem Dortmunder Stadtteil Barop. Photos/Fotos: Benjamin Haske

4 In-situ measurements

In-situ measurements, which are taken directly at the target object at discrete locations either at a particular time or over a particular period, play a vital role in environmental and geomonitoring. Depending on the type and purpose of the in-situ sensor, which includes the spacing between individual sensing units, various geostatistical methods can be used in order to extend the phenomena present in a certain area and blend these with other methods.

By contrast, data from remote sensing devices, while collected over a wide area, are acquired obliquely to the target zone. In the case of optical satellite remote sensing and copter-based optical recording, e.g., sensor images are captured from reflected sunlight. Various indices are used to calculate the quantities of interest from the information collected at different frequencies (see section 2.1). Rather than providing area-wide information the in-situ measurements and observations generally deliver single-spot, direct measurement results that are very important for the environmental and geomonitoring of changes, including those affecting the post-mining environment. Local on-site analysis is a key part of the validation process when it comes to using indices like NDVI to derive information on the vitality of the vegetation and the stress it is undergoing. It should also be borne in mind that only the uppermost layer of vegetation can be registered by the remote sensing process. The lower vegetation layers down to ground level are invisible to nadir image recording and require additional local input by way of site inspections in order to complete the dataset.

Terrestrial measurements obtained from geodesic and mine survey work are of particular importance for the radar interferometric identification of ground movements. InSAR methods only determine movement in the sight line of the satellite, which is not relevant for most applications that require the detection of gravity-oriented three-dimensional surface movement components. Findings determined by radar interferometric means can be validated and/or corrected on the basis of terrestrially determined height changes, e.g., using levelling, and three-dimensional movements measured by GNSS.

Measurements taken by soil moisture sensors (Figure 6) are required for many of the processes that seek to calculate soil mois-

Dank des Einsatzes von Kopter-Flügen ist es möglich, die in einem bestimmten Gebiet auftretenden Phänomene sowohl in 2D als auch visualisiert im 3D-Raum zu ermitteln, was die Darstellung von digitalen Oberflächenmodellen und die detaillierte Abbildung von Gebäudemodellen ermöglicht. Dies wird auch zunehmend in der Building Information Model (BIM)-Technologie verwendet. Kommerziell erhältliche Software von Agisoft Metashape, Pix4D bis Drone2Map von ESRI ermöglicht eine bessere Verarbeitung von Kopteraufnahmen. Die erhaltenen Ergebnisse zeichnen sich durch eine hohe räumliche Auflösung aus.

4 In-situ Messungen

Für das Umwelt- und Geomonitoring sind In-situ-Messungen unersetzbar, welche zu einem bestimmten Zeitpunkt oder Zeitraum an diskreten Orten direkt an den zu messenden Objekten durchgeführt werden. Je nach Art und Verwendungszweck des In-situ-Sensors, z.B. Abstände zwischen den Sensoren, können verschiedene geostatistische Methoden verwendet werden, um Phänomene in einem Gebiet auszuweiten und mit weiteren Methoden zu verschneiden.

Im Gegensatz dazu werden Daten aus der Fernerkundung typischerweise zwar flächenhaft aber indirekt zur Zielgröße gesammelt. Beispielsweise werden bei der optischen Satellitenfernerkundung und bei kopterbasierten, optischen Aufnahmen Sensorbilder aus reflektiertem Sonnenlicht aufgezeichnet. Aus den gesammelten Informationen in verschiedenen Frequenzen werden die interessierenden Größen durch verschiedene Indizes berechnet (s. Kap. 2.1). Statt flächendeckender Informationen liefern die In-situ-Messungen und -Beobachtungen meist punktbezogene aber direkte Messergebnisse, die für das Umwelt- und Geomonitoring von Veränderungen auch im Nachbergbau sehr wichtig sind. Um Informationen über die Vitalität und den Stress der Vegetation durch Indizes wie NDVI abzuleiten, ist die lokale Vorort-Analyse ein wesentlicher Bestandteil des Validierungsprozesses. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass nur die oberste Vegetationsschicht aus der Fernerkundung erfasst werden kann. Die unteren Vegetationsschichten bis auf die Bodenebene sind für die Nadir-Bildaufnahme unsichtbar und erfordern zusätzliche lokale Eingaben von der Standortinspektion, um den Datensatz zu ergänzen.

Fig. 6. Remote sensors for measuring soil moisture being used as part of the C2M2 project. // Bild 6. Dezentrale Sensoren für Bodenfeuchte-Messungen im Rahmen des Projekts C2M2. Source/Quelle: THGA

ture levels using radar remote sensing. Soil sensors of this kind can continuously detect the soil moisture levels present at the sensor point at different depths. The C2M2 project being run at the TH Georg Agricola University (THGA) in Bochum/Germany, e.g., also set out to use this capability to measure and derive the seasonal changes in soil moisture levels. Because of the many different determinants affecting the propagation path of the radar waves it is only possible to a limited extent to completely separate the soil-moisture signal from other factors. The link between the SAR recordings and the appropriate model for deriving soil moisture can only be made when the former are viewed together with the measurements taken over the same period.

As well as serving to verify the results of the image processing stage (the so-called "ground truth") and to adapt the calculation model used for the various indicators, in-situ measurements play a crucial role for many of the target objects. The observation of objects that are below ground level or that are not visible for image recording from above is only possible by taking in-situ measurements. This can include, e.g., groundwater monitoring wells and the taking of samples for soil analysis and mapping purposes. As the monitoring of exposure to pollutants is one of the most important aspects of post-mining survey work it is vital that a network of regular in-situ measurement stations is established for this purpose.

It is also worth mentioning the use of mobile GIS, which enables the recording, updating, logging and display of geodata using a smartphone-based application in the field. When working outdoors the input of data increases the informative value of the target-object description by way of direct observation, something that is not possible on a map or satellite image. Geocoded recordings by mobile GIS can therefore also be used as "ground truth" (Figure 7). In addition to the data described, which may, e.g., be saved in a form document, it is also possible to add attachments in the form of photos. One of the drawbacks of this method is the decrease in positional accuracy of the location established by the GNSS system, e.g., when working in a woodland area.

5 Data fusion for a better understanding of the system

By using methods based on satellites, copters or in-situ measurements is it possible to provide monitoring results with different

Von besonderer Bedeutung für die radarinterferometrische Bestimmung von Bodenbewegungen sind die terrestrischen Messungen aus Vermessungsergebnissen der Geodäsie und des Markscheidewesens. Die InSAR-Methoden bestimmen die Bewegung nur in der Sichtlinie des Satelliten, was für die meisten Anwendungen, die eine Erfassung von schwerkraftorientierten dreidimensionalen Bodenbewegungskomponenten benötigen, nicht von Bedeutung ist. Die radarinterferometrisch ermittelten Ergebnisse können durch die terrestrisch ermittelten Höhenänderungen, z.B. aus dem Nivellement, und den mit GNSS gemessenen dreidimensionalen Bewegungen validiert bzw. korrigiert werden.

Für viele Ansätze zur Berechnung der Bodenfeuchte aus Radarfernerkundung sind Messungen mit Bodenfeuchtesensoren (Bild 6) erforderlich. Mit solchen Bodensensoren ist die kontinuierliche Erfassung der Bodenfeuchte am Sensorpunkt in unterschiedlichen Tiefen möglich. Im Projekt C2M2 z.B. der Technischen Hochschule Georg Agricpola (THGA), Bochum, wurden daraus auch die saisonalen Veränderungen der Bodenfeuchte gemessen und abgeleitet. Aufgrund der zahlreichen Einflüsse auf den Ausbreitungsweg der Radarwellen ist eine vollständige Trennung des durch Bodenfeuchte verursachten Signals von anderen Faktoren nur bedingt möglich. Der Zusammenhang zwischen den SAR-Erfassungen und dem geeigneten Modell zur Ableitung der Bodenfeuchte ist nur möglich, wenn diese zusammen mit den Messungen für den gleichen Zeitraum betrachtet werden.

Neben der Verwendung in der Verifizierung der Ergebnisse der Bildverarbeitung, als die sogenannte Ground Truth, und der Anpassung des Berechnungsmodells der verschiedenen Indikatoren spielen die In-situ-Messungen für manche Messobjekte eine unersetzbare Rolle. Die Beobachtung von Objekten, die sich im Boden befinden oder für Bildaufnahmen von oben nicht sichtbar sind, ist nur durch In-situ-Messungen möglich. Dazu gehören beispielsweise die Grundwassermessstellen und die Bodenanalyse und Kartierung durch Probenahme. Da die Beobachtung der Belastung durch Schadstoffe einer der wichtigsten Aspekte im Nachbergbau ist, ist der Aufbau eines Netzes regelmäßiger In-situ-Messungen notwendig.

Erwähnenswert ist auch die Nutzung des mobilen GIS, welche die Aufnahme, Aktualisierung, Dokumentation und Anzeige von Geodaten mit einer smartphonebasierten Applikation im Feld ermöglicht. Die Dateneingabe während des Feldeinsatzes erhöht die Aussagekraft einer Beschreibung zu den Zielobjekten durch die direkte Beobachtung, welche auf der Karte oder dem Satellitenbild nicht möglich ist. Somit können die geokodierten Aufnahmen des mobilen GIS auch als Ground Truth verwendet werden (Bild 7). Neben den beschreibenden Daten, welche z.B. in Form eines Formulars gesammelt werden können, ist es auch möglich, Anhänge in Form von Fotos hinzuzufügen. Der Nachteil dieser Methode ist die Abnahme der Lagegenauigkeit der mit dem GNSS-System ermittelten Position, z.B. in einem Waldgebiet.

5 Datenfusion zum Verständnis des Systems

Durch den Einsatz von Methoden basierend auf Satelliten, Koptern oder In-situ-Messungen ist es möglich, Monitoring-Ergebnisse mit unterschiedlichen, räumlichen und zeitlichen

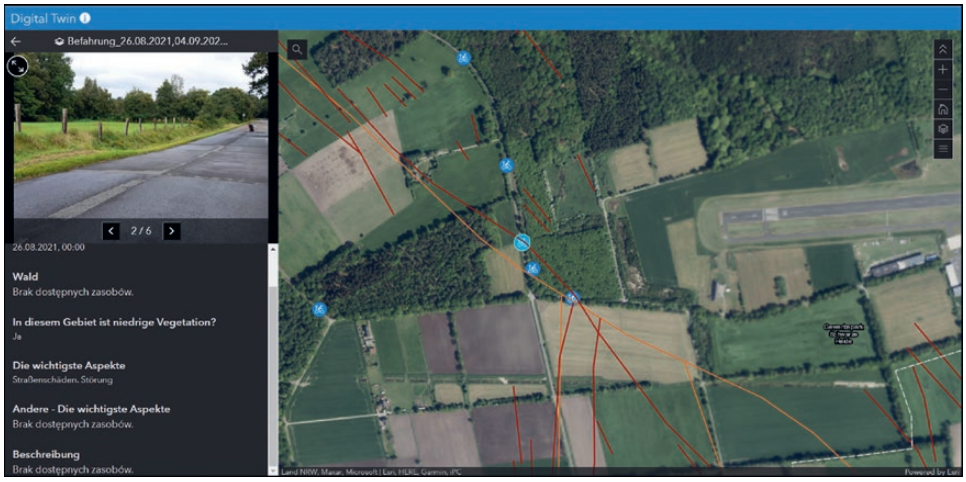

Fig. 7. Exemplary design of a mobile GIS application including an example of road damage. The red and orange lines indicate tectonic irregularities identified from different geodata sources.
Bild 7. Exemplarisches Design einer mobilen GIS-Anwendung einschließlich eines Beispiels für Straßenschäden. Die roten und orangenen Linien zeigen tektonische Unregelmäßigkeiten aus unterschiedlichen Geodatenquellen. Source/Quelle: THGA

spatial and temporal resolutions for various subject areas. Appreciating the post-mining area in its entirety as a complex system, leading to an understanding of the processes involved, is a precondition for the environmental and geomonitoring of the changes taking place. This makes the integration of the different monitoring components a crucial step forwards.

For mapping and quantification work in the field of environmental and geomonitoring the use of satellite remote sensing can provide information over a large area with in most cases a low spatial resolution of a few metres. When using optical satellite remote sensing the presence of cloud cover can result in a complete information loss. Here the deployment of survey copters can significantly improve the local spatial resolution (in cm). The low flight altitude of these UAVs allows them to retain their compatibility even under cloudy, and still, weather conditions. Recordings taken by copter for local survey purposes, which are in comparable spectral ranges and bands and taken over a similar period of time, can be used to complete and improve the resolution results. It is possible to capture data using copter flights within the necessary time frame when satellite recordings cannot be used, or cannot be made, due, e.g., to excessive cloud cover.

The fusion of diverse monitoring data with different temporal resolutions is also of great benefit within the time axis. The repetition cycle for optical satellites takes several days to complete, whereas copter recordings can be undertaken spontaneously. Continuous measurements are possible by deploying in-situ sensors in an object-oriented way. Validations and additions provided by in-situ measurement systems serve to confirm the derived indicators, which are used for monitoring objects to a high quality level, and the object-related information. The positional accuracy of the different types of data and the comparability of data of diverse resolution and quality is one of the greatest challenges. It may be necessary to develop local solutions in order to ensure correct data fusion from the different scaling criteria. The specific attributes of different environmental and geomonitoring techniques are listed in Table 1.

Auflösungen für verschiedene Themengebiete bereitzustellen. Als Voraussetzung für das Umwelt- und Geomonitoring von Veränderungen ist es erforderlich, das Nachbergbaugebiet in seiner Gesamtheit als komplexes System hin zu einem Prozessverständnis zu verstehen. Dies macht die Integration der verschiedenen Überwachungskomponenten zu einem entscheidenden Schritt.

Für die Kartierung und Quantifizierung im Umwelt- und Geomonitoring liefert die Satellitenfernerkundung die Informationen in einem großen Gebiet mit meist geringer räumlicher Auflösung von wenigen Metern. Wolkenbedeckung kann bei der optischen Satellitenfernerkundung zu einem vollständigen Informationsverlust führen. Der Einsatz von Koptern kann hierbei die lokale räumliche Auflösung (in cm) stark verbessern. Die niedrige Flughöhe bietet Kompatibilität auch bei bewölkten aber ruhigen Wetterbedingungen. Zur Ergänzung und Verbesserung der Auflösung im Raum dient die Aufnahme der Kopter in vergleichbaren Spektralbereichen und Bändern zu einem vergleichbaren Zeitraum für lokale Betrachtungen. Es ist möglich, mit Koptern im notwendigen Zeitraum aufzuzeichnen, wenn die Aufnahme von Satelliten nicht verwendet werden kann, z. B. aufgrund der hohen Wolkenbedeckung, oder nicht stattfindet.

Auch in der Zeitachse ist die Fusion verschiedener Monitoringdaten mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung von großem Vorteil. Der Wiederholungszyklus für die optischen Satelliten beträgt einige Tage, während die Kopteraufnahmen spontan betrieben werden können. Kontinuierliche Messungen sind objektbezogen mit In-situ-Sensoren möglich. Validierungen und Ergänzungen durch In-situ-Messsysteme ermöglichen es, die abgeleiteten Indikatoren für die Überwachung von Objekten mit einer hohen Qualität und objektbezogenen Informationen zu bestätigen. Die Positionsgenauigkeit verschiedener Daten und die Vergleichbarkeit von Daten mit unterschiedlicher Auflösung und Qualität ist eine der größten Herausforderungen. Es kann notwendig sein, lokale Lösungen zu entwickeln, um die korrekte Datenfusion aus den verschiedenen Maßstäben zu ge-

Method / Methodik	Advantages / Vorteile	Drawbacks / Nachteile
Optical remote sensing Optische Fernerkundung	+ large observation area großes Beobachtungsgebiet + (often) freely accessible data (häufig) frei zugängliche Daten	– poor spatial resolution (m) geringe räumliche Auflösung (m) – large atmospheric influence großer Einfluss der Atmosphäre – low temporal resolution geringe zeitliche Auflösung
Radar remote sensing Radar- Fernerkundung	+ large observation area großes Beobachtungsgebiet + (often) freely accessible data (häufig) frei zugängliche Daten + little atmospheric influence geringer Einfluss der Atmosphäre	– low spatial resolution (m) geringe räumliche Auflösung (m) – low temporal resolution geringe zeitliche Auflösung
Copter Kopter	+ very high spatial resolution (cm) sehr hohe räumliche Auflösung (cm) + high temporal resolution (on-demand) hohe temporale Auflösung (on-demand)	– small observation area lokale, punktuelle Überwachung – typically no free access typischerweise kein freier Zugang – impacted by atmosphere and weather Einfluss durch Atmosphäre/Wetter
In-situ sensors In-situ- Sensoren	+ high temporal resolution and possibility of continuous measurement hohe temporale Auflösung bis kontinuierliche Messung möglich + on-the-spot information Vor-Ort Kenntnis	– local, selective monitoring lokale, punktuelle Überwachung – typically no free access typischerweise kein freier Zugang – restricted access to objects beschränkter Zugang zu Objekten
Mobile GIS Mobiles GIS	+ high temporal resolution (on-demand) hohe zeitliche Auflösung + on-the-spot information Vor-Ort Kenntnis	– local, selected monitoring lokale, punktuelle Überwachung – impact of atmosphere and weather Einfluss durch Atmosphäre/Wetter – restricted access to objects beschränkter Zugang zu Objekten

Table 1. Comparison of the benefits and drawbacks of different environmental and geomonitoring methods.
Tabelle 1. Vergleich der Eigenschaften der unterschiedlichen Methoden des Umwelt- und Geomonitoring. Source/Quelle: THGA

Many issues of interest arise in connection with environmental and geomonitoring in the post-mining sphere. In this particular field of monitoring there is an added complexity to be taken into account due to the interlinked nature of the resources involved. A proper understanding and associated interpretation can only be realised when the system is recognised and accounted for in its entirety. And this can only be achieved when there is access not just to the relevant body of data but also to the knowledge and experience of experts capable of ensuring that environmental and geomonitoring in post-mining terrain is implemented in a sustainable way.

6 Conclusions

In summing up it has to be recognised that the combination and integration of the different observation methods now available remains key to the application of a successful monitoring strategy aimed at the sustainable management of georesources, especially in the post-mining environment. When dealing with a complex system it is necessary to combine the available resources with different types of data obtained from satellites, survey copters and traditional in-situ sensors. Every method has its advantages and drawbacks. However, by merging what is available it is possible to release the full potential needed to build a comprehensive understanding of how to manage georesources in a sustainable way. This generates contemporary understanding and creates transparency vis-à-vis the public. Innovative environmental and geomonitoring methods are therefore an important factor for public acceptance when it comes to the sustainable management of geological resources.

währleisten. In Tabelle 1 werden die Eigenschaften unterschiedlicher Methoden des Umwelt- und Geomonitorings aufgelistet.

Für das Umwelt- und Geomonitoring im Rahmen des Nachbergbaus können zahlreiche Themen von Interesse sein. Eine zusätzliche Komplexität ist beim Umwelt- und Geomonitoring zu berücksichtigen, welche durch die miteinander verbundene Natur der Ressourcen hervorgerufen wird. Das Verständnis und die damit verbundene Interpretation kann sich nur ergeben, wenn das System als Ganzes erfasst wird. Dazu werden nicht nur die gesammelten Daten benötigt, sondern auch das Wissen und die Erfahrung von Experten, wodurch das Umwelt- und Geomonitoring im Nachbergbau nachhaltig umgesetzt werden kann.

6 Fazit

Zusammengefasst ist die Kombination und Integration unterschiedlicher moderner Beobachtungsmethoden der Schlüssel zu einem erfolgreichen Monitoring im nachhaltigen Umgang mit Georessourcen und insbesondere im Nachbergbau. In einem komplexen System ist die Fusion verfügbarer Ressourcen mit unterschiedlichen Datentypen von Satelliten über Kopter bis hin zu In-situ-Sensoren notwendig. Jede Methode hat ihre Vor- und Nachteile, aber mit ihrer Kombination ist es möglich, das volle Potential für die Entwicklung eines umfassenden Verständnisses für den nachhaltigen Umgang mit Georessourcen aufzubauen. Hierdurch wird ein modernes Verständnis erzeugt und Transparenz für die Öffentlichkeit geschaffen. Daher sind innovative Methoden des Umwelt- und Geomonitorings wichtig für die öffentliche Akzeptanz im nachhaltigen Umgang mit Georessourcen.

References / Quellenverzeichnis

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

(2) Rudolph, T. (2020): Digital Twin – Integrated Geomonitoring Further Developed. In: Kretschmann, J.; Goerke-Mallet, P.; Melchers, C. (2020): Done for Good 2.0, Results in Post-Mining Research, A Compilation of Research Papers by the Research Center of Post-Mining, Technische Hochschule Georg Agricola University, pp. 273–278.

(3) Rudolph, T.; Goerke-Mallet, P.; Melchers, C. (2020). Geomonitoring in Alt- und Nachbergbau. In: zfv 3/2020, pp. 168–173.

(4) Wiggenhagen, M.; Steensen, T. (2021). Guide for Photogrammetry and Remote Sensing. 6th revised and extended edition, Wichmann.

(5) Kretschmann, J.; Nguyen, N. (2020): Research Areas in Post-Mining – Experiences from German Hard Coal Mining. July-December – Journal of the Polish Mineral Engineering Society, pp. 255–262.

(6) Rouse, J. W.; Haas, R. H.; Schell, J. A.; Deering D. W. (1973): Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Prog. Rep. RSC 1978-1, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station.

(7) Simmon, R. (2000): Illustration des NDVI. In: Weier, J. und Herring, D. (2000): Measuring Vegetation (NDVI & EVI) (https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php (Online:18.10.2021).

(8) Ma, B.; Pu, R.; Wu, L.; Zhang, S. (2017): Vegetation Index Differencing for Estimating Foliar Dust in an Ultra-Low-Grade Magnetite Area Using Landsat Imagery. IEEE Access, pp. 8825–8834.

(9) Halounová, L.; Petruchová, J.; Junek, P. (2005). Analysis of reclaimed areas in the Northern Bohemia brown coal open cast mining areas monitored by remote sensing data using cartography tools and GIS. WSEAS Int. Conf. on Remote Sensing, Venice/Italy, 2nd to 4th November, pp. 49–54.

(10) Matejicek, L.; Kopackova, V. (2010). Changes in croplands as a result of large scale mining and the associated impact on food security studied using time-series Landsat images. Remote Sensing 2, pp. 1463–1480.

(11) Padmanaban, R.; Bhownik, A. K.; Cabral, P. (2017). A Remote Sensing Approach to Environmental Monitoring in a Reclaimed Mine Area. In: ISPRS International Journal of Geo-Information 6 (12) 401, pp. 1–14.

(12) Buczyńska, A.; Blachowski J. (2021). Analysis of the vegetation condition on the area of the closed Babina mine in 1989-2019 using multispectral satellite images. IOP Conference Series Earth and Environmental Science 684 012030, pp. 1–13.

(13) Erener, A. (2011): Remote sensing of vegetation health for reclaimed areas of Seyitömer open cast coal mine. In: International Journal of Coal Geology 86, pp. 20–26.

(14) Koruyan, K.; Deliormanli, A. H.; Karaca, Z.; Momayez, M.; Lu, H.; Yalçin, E. (2012): Remote sensing in management of mining land and proximate habitat. In: Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy 112 (7), pp. 667–672.

(15) Raval, S.; Sarver, E.; Shamsoddini, A.; Zipper, C.; Donovan, P.; Evans, D.; Chu, H. T. (2014): Satellite remote sensing-based estimates of biomass production on reclaimed coal mines. In: Mining Engineering 66, pp. 47–53.

(16) Hahmann, T.; Martinis, S.; Twele, A.; Roth, A.; Buchroithner, M. (2008): Extraction of water and flood areas from SAR data. The EUSAR 2008, 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, 2nd to 5th June 2008, Friedrichshafen/Germany, pp. 1–4.

(17) Esch, S.; Korres, W.; Reichenau, T. G.; Schneider, K. (2018): Soil moisture index from ERS-SAR and its application to the analysis of spatial patterns in agricultural areas. In: Journal of Applied Remote Sensing 12(2), 022206.

(18) Crosetto, M.; Monserrat, O.; Cuevas-Gonzàles, M.; Devanthéry, N.; Crippa, B. (2016): Persistent Scatterer Interferometry: A review. In: ISPRS Journal of Photogrammentry and Remote Sensing Band 115, pp. 78–89.

(19) Ren, H.; Zhao, Y.; Xiao, W.; Hu, Z. (2019): A review UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives. In: Int. J Coal Sci Technol 6(3), pp. 320–333.

(20) Bernsdorf, B.; Formaniuk, A.; Rudolph. T. (2020): Possibilities of a method for copter-supported gas leak detection with thermal imaging cameras in industry and hazards prevention. In: Oil Gas – European Magazine, 46th Edition, Issue 4/2020, December, pp. 13–20.

(21) Bernsdorf, B.; Formaniuk, A.; Rudolph, T. (2021): Ein Ansatz zur Detektion von Gaslecks mit Hilfe UAV-gestützter Wärmebildkameras. In: vfdb – Zeitschrift für Forschung, Technik und Management im Brandschutz, 1/2021, pp. 22–31.

(22) Bernsdorf, B.; Rudolph, T.; Goerke-Mallet, P. (2021): Über den Einsatz von Koptern im Bergbau und in der Energiewirtschaft. In: Bergbau – Zeitschrift für Rohstoffgewinnung, Energie und Umwelt 72, S. 15–23.

Authors / Autoren

Marcin Pawlik M. Sc., Dr.-Ing. Xiaoxuan Yin, Dr. rer. nat. Bodo Bernsdorf, Prof. Dr. rer. nat. Tobias Rudolph, Prof. Dr.-Ing. Peter Goerke-Mallet, Forschungszentrum Nachbergbau (FZN), Technische Hochschule Georg Agricola (THGA), Bochum