

Marcin Pawlik, Tobias Rudolph, Bodo Bernsdorf,
Peter Goerke-Mallet, Michael Hegemann, Maik Gellendin

Digital Twin – Integrated Geomonitoring

One of the main challenges facing us today is the environment and how to protect it. Mining activities over the years have had an enormous impact on the three environmental elements water, soil and air. Ground movements in mining areas can be observed both during the mineral winning phase and after this has ended. This phenomenon may affect the water balance of a region as a rise in the groundwater level can lead to “water stress” in plants, which in turn can manifest itself in reduced vitality.

The “Digital Twin – Integrated Geomonitoring” project, which is being funded by the RAG-Stiftung (no. 20-0013), uses innovative methods and research instruments in order to gain a clear understanding of the processes that are associated with environmental changes and to present the results of the research in a transparent way. The integration of data from geological modelling based on geological, hydrogeological and mining archive maps as part of a data fusion exercise will help identify the position of tectonic faults and areas at increased risk of subsidence and settlement. With the support of satellite images, spatial-temporal and

multispectral analyses can be carried out in order to show the environmental changes taking place in the region concerned. These space-time analyses used satellite data collected by the Landsat 4, 5, 7, 8, 9 and Sentinel 2 missions and allowed the target area to be visualised over a period of years from 1984 to the present day. Drone flights and in-situ measurements using mobile GIS were deployed in order to check the results. Drone flights have a higher spatial resolution than satellite images and changes taking place within a certain area become more visible as a result. A mobile GIS application on a smartphone or tablet makes it possible to screen an area in situ by collecting data in the form of terrain descriptions and images.

Amalgamating these investigations in combination with the scientific experience that has been built up by the Research Center of Post-Mining (FZN) at TH Georg Agricola University (THGA), Bochum/Germany, leads to a better appreciation of events and provides more transparency when it comes to understanding the transformation processes taking place in the environment.

Digital Twin – Integriertes Geomonitoring

Eine der wesentlichen Herausforderungen besteht heutzutage darin, den Zustand der Umwelt zu schützen. Bergbauliche Tätigkeiten haben erhebliche Auswirkungen auf die Umweltkomponenten Wasser, Boden und Luft. Bodenbewegungen können in Bergbaugebieten sowohl während als auch nach der Mineralgewinnung beobachtet werden. Dies wirkt sich auf den Wasserhaushalt einer Region aus, da der Anstieg des Grundwasserspiegels zu sogenanntem Wasserstress bei Pflanzen führen kann, der sich in einer verminderten Vitalität äußert.

Das Projekt „Digital Twin – Integriertes Geomonitoring“, finanziert durch die RAG-Stiftung (Nr. 20-0013), nutzt innovative Methoden sowie Forschungsinstrumente, um die mit den Umweltveränderungen einhergehenden Prozesse umfassend zu verstehen und die Forschungsergebnisse transparent darzustellen. Die Integration von Daten der geologischen Modellierung auf Grundlage geologischer, hydrogeologischer und bergbaulicher Archivkarten im Sinne einer Datenfusion ermöglichen die Lagebestimmung tektonischer Verwerfungen und potentiell setzungsgefährdeter Gebiete. Zusammen mit der Verwendung von Satellitenbildern können räumlich-zeitliche und multispektrale

Analysen durchgeführt werden, welche die Umweltveränderungen in der Region aufzeigen. Für die räumlich-zeitlichen Analysen wurden die Satellitenmissionen Landsat 4, 5, 7, 8, 9 und Sentinel 2 verwendet. Sie ermöglichen die Darstellung des Untersuchungsgebiets von 1984 bis heute. Zur Überprüfung der Ergebnisse wurden Drohnenflüge und In-situ-Messungen mit Hilfe eines mobilen GIS eingesetzt. Drohnenflüge besitzen eine höhere räumliche Auflösung als Satellitenbilder, sodass Veränderungen in einem bestimmten Gebiet sichtbar gemacht werden können. Eine mobile GIS-Anwendung auf einem Smartphone oder Tablet ermöglicht die Überprüfung eines Gebiets vor Ort durch die Erfassung von Daten in Form von Geländebeschreibungen und Bildern.

Die Zusammenführung dieser Untersuchungen in Verbindung mit den wissenschaftlichen Erfahrungen am Forschungszentrum Nachbergbau (FZN) der Technischen Hochschule Georg Agricola (THGA), Bochum, schaffen ein besseres Verständnis und bieten mehr Transparenz, um die Veränderungsprozesse in der Umwelt zu verstehen.



Fig. 1. Examples of spoil-tip reuse in Bottrop: a) Spoil tip on Beckstraße (with the tetrahedron viewing platform), b) Haniel spoil tip with the “totem” artwork and outdoor theatre.

Bild 1. Beispiele zur Nachnutzung der Halden in Bottrop: a) Halde Beckstraße (Aussichtspunkt Tetraeder), b) Halde Haniel mit Kunstwerk „Totem“ am Bergtheater auf der Halde. Photos/Fotos: M. Pawlik



Fig. 2. Examples of mining-related damage: Gregor school in Bottrop-Kirchhellen (a), repairs to a cracked wall surface, Langer Weg (b), scarred road surface.

Bild 2. Beispiele von Bergschäden: Gregorschule in Bottrop-Kirchhellen (a), sanierter Wandzerrungsris, Langer Weg (b), Zerrungen im Straßenbelag. Photos/Fotos: M. Pawlik (a), M. Hegemann (b)

1 Introduction

The Ruhr Basin, which is in the west of Germany, developed over the years into one of Europe’s foremost industrial regions. Here the mining industry has left a visible legacy in the form of countless spoil tips that have been restored to nature and assimilated into the landscape as recreational areas. Many of these sites have been provided with viewing platforms (Figure 1a) and attractive works of art (Figure 1b).

Mining has had a huge impact on its local environment, not only when the industry was in full swing but also after the mines closed. Ground movements affect buildings (Figure 2a) and streets (Figure 2b) – but most of all they impact on the water balance. The result in some polder areas is insufficient water runoff due to the fact that the direction of flow is disrupted and in some cases

1 Einführung

Das Ruhrgebiet befindet sich im westlichen Teil Deutschlands und hat sich im Lauf der Jahrzehnte zu einer der größten Industrie-Regionen in Europa entwickelt. Die Auswirkungen des Bergbaus sind heute u. a. in Form zahlreicher Bergehalden sichtbar, die sich als rekultivierte Naherholungsgebiete ins Landschaftsbild einfügen. Viele von ihnen besitzen Aussichtsplattformen (Bild 1a) oder attraktive Kunstwerke (Bild 1b).

Der Bergbau hat sowohl während als auch nach Abschluss der Tätigkeiten erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt in der Umgebung. Bodenbewegungen wirken auf Gebäude (Bild 2a) und Straßen ein (Bild 2b). Aber vor allem beeinflussen sie den Wasserhaushalt. In einigen Gebieten (Poldern) kommt es zu einem mangelnden Wasserabfluss, weil die Fließrichtung gestört und teilweise umgekehrt wurde. Um das Problem der Entwässerung zu lösen, wurde im Ruhrgebiet ein System von Pumpstationen eingesetzt (1). Würden die Pumpwerke in den Poldern abgeschaltet, wäre der größte Teil des Ruhrgebiets überflutet (2).

Durch den langjährigen und umfangreichen Steinkohlenabbau ist das gesamte Ruhrgebiet von Bodenbewegungen betroffen. So betragen die zwischen 1892 und 2010 erfassten Bergsenkungen in Teilbereichen mehr als 20 m (3).

Das letzte stillgelegte Steinkohlenbergwerk im Ruhrgebiet war 2018 das Bergwerk Prosper-Haniel (4) (Bild 3). Dessen Abbaubereiche (Bild 4) sind Teil der Untersuchungen im Projekt „Digital Twin – Integriertes Geomonitoring“. Das in diesem Projekt angewandte Konzept des integrierten Geomonitorings ist eines der innovativsten und modernsten Forschungsmethoden für das Verständnis nachbergbaulicher Prozesse.

Entsprechend der Richtlinie 2011/92/EU der Europäischen Union (EU) sind alle durch den Bergbaubetrieb auftretenden Veränderungen, die Auswirkungen auf die Umwelt und den Menschen haben können, zu beachten (6).



Fig. 3. Mine shafts 9 (a) and 10 (b) at Prosper-Haniel colliery. Bild 3. Schächte 9 (a) und 10 (b) des Bergwerks Prosper-Haniel. Photos/Fotos: M. Pawlik

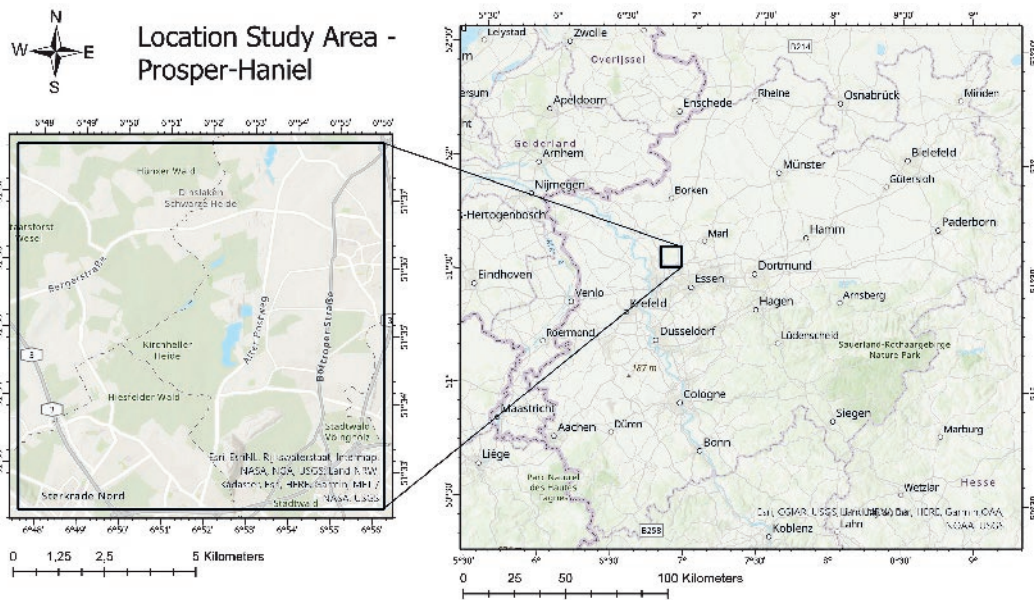


Fig. 4. Location of the project study area (5).
Bild 4. Lage des Forschungsgebiets (5).

even reversed. In order to solve the drainage problem a system of pumping stations was established in the Ruhr coalfield area (1). If the pumps serving the polder meadows were turned off a major part of the Ruhr Basin would be flooded (2).

Extensive hard coal mining over many years has meant that the entire Ruhr area has been affected by ground movement in some way or another. Between 1892 and 2010, e.g., mining subsidence accounted for sinkages of more than 20 m in the ground level in some parts of the region (3).

The last hard coal mine to close in the Ruhr coalfield was Prosper-Haniel colliery, which ceased production in 2018 (4) (Figure 3). The working boundaries of this mine (Figure 4) form part of the study area used for the “Digital Twin – Integrated Geomonitoring” project. The concept of integrated geomonitoring, as used in this project, is one of the most innovative and up-to-date research methods available for understanding post-mining processes.

European Union Directive 2011/92/EU requires that an assessment be carried out of all changes arising as a result of mining activities that may affect man and the environment (6).

Mining operations can have a major impact on the environmental media, namely water, soil and air (7, 8). The extraction of raw materials will in general have an effect on people, nature and the environment. The complexity of this process is characterised by many different aspects that have to be taken into account when mining processes are being interpreted. Environmental changes, which will occur both during the mining operation and after it has concluded, are continuous and long-term in nature and for this reason integrated long-term monitoring is an important issue. Kretschmann (9) points out that these tasks do not have a fixed timeframe and so can be classed as perpetual obligations.

This also includes the impact on water resources, e.g., as a result of mine dewatering operations for the regional water management bodies. The deep mining of raw materials entails activities that cause ground movements – subsidence, tilt, stretching and compression, as well as uplift due to rising mine-water levels (after the mine is closed) – and these can be associated with changes in vegetation and in a reduction in land usage. Furthermore, the gas emissions that are linked to the mining industry have a damaging

Die Aktivitäten eines Bergbaubetriebs können erhebliche Auswirkungen auf die Umweltmedien Wasser, Boden und Luft haben (7, 8). Die Gewinnung von Rohstoffen hat ganz allgemein betrachtet Auswirkung auf Mensch, Natur und Umwelt. Die hieraus resultierende Komplexität wird durch viele Aspekte gekennzeichnet, die bei der Interpretation von Bergbauprozessen berücksichtigt werden sollten. Die Umweltveränderungen, die sowohl während als auch nach dem Bergbau auftreten, sind kontinuierlicher und langfristiger Natur, weshalb die integrierte Langzeitüberwachung ein wichtiges Thema ist. Kretschmann (9) weist darauf hin, dass diese Aufgaben keinen festen Zeitrahmen haben und daher als Ewigkeitsaufgaben bezeichnet werden können.

Hierzu gehören auch die Auswirkungen auf die Wasserressourcen, z. B. durch Grubenentwässerung im Rahmen der regionalen Wasserwirtschaft. Im Fall der untertägigen Rohstoffgewinnung führen Bergbauprozesse zu Bodenbewegungen – Senkungen, Schiefereien, Zerrungen und Pressungen sowie Hebungen bei Grubenwasseranstieg nach Stilllegung – und damit einhergehend zu Veränderungen der Vegetation und einer Einschränkung der Landnutzung. Darüber hinaus beeinträchtigen die mit dem Bergbau verbundenen Gasemissionen die Ressource Luft. Ein zielgerichtetes Umwelt- und Geomonitoring unter Bergbaufolgebedingungen erfordern ein integriertes, räumliches Überwachungskonzept, das auf verschiedenen Datensätzen basiert, die gesammelt, ausgewertet und interpretiert werden müssen (10,11). Diese beinhalten Informationen, die während des Bergbaus gesammelt wurden, z. B. bergbauliche, geologische oder betriebliche Karten, Bilder von multispektralen und hyperspektralen Satellitensensoren, fotografische Dokumentationen von kopter- oder flugbasierten Luftaufnahmen und In-situ-Sensordaten. Die Analyse solcher heterogener Datensätze bildet die Grundlage für ein besseres Prozessverständnis im Nachbergbau.

Der Artikel gibt einen Überblick über die modernen Umwelt- und Geomonitoring-Methoden, die eine Beobachtung bergbaurelevanter Objekte aus dem All, der Luft, an der Erdoberfläche und unter Tage ermöglichen. Im Hinblick auf multisensorische Beobachtungen mit unterschiedlichen räumlich-zeitlichen Auflösungen wird die Integration der Daten in ein umfassendes System diskutiert.

effect on the natural resource of air. A targeted programme of environmental and geotechnical monitoring calls for an integrated, spatial monitoring concept based on various datasets that have to be collected, analysed and interpreted (10,11). These will contain information that has been acquired during the mining phase, e.g., mining, geological and operational plans, images obtained from multispectral and hyperspectral satellite sensors, aerial documentation provided by copter drones and aircraft and in-situ sensor data. The analysis of these diverse datasets forms the basis for a better understanding of the post-mining processes.

This paper provides an overview of the latest environmental and geotechnical monitoring methods that can track and observe mining-relevant objects from space and from the air, as well as at and below ground level. Given the application of multi-sensor observations with different spatial-temporal resolutions it also discusses how these data can be integrated into a comprehensive system.

2 Methodology

All available data were used in order to gain a full understanding of the phenomenon of post-utilisation. Part of the project involved the preparation of a three-dimensional model of the geo-architecture (see 2.1), this being followed by spatio-temporal analyses based on satellite images from space missions undertaken during the period 1984 to 2022 (see 2.2). Finally, an in-situ review was carried out of the data obtained from the drone flights (see 2.3.1) and of the data collected by mobile GIS (see 2.3.2).

The concept of multidimensional data integration, which is also referred-to as “sensor data fusion“, is explained in articles written by Pawlik et al. (5, 12) and Rudolph et al. (13) and is presented in Figure 5.

2 Methodik

Um die Phänomene der Nachnutzung vollständig zu verstehen, wurden alle verfügbaren Daten verwendet. Ein Teil des Projekts bestand in der Erstellung eines dreidimensionalen Modells der Geoarchitektur (s. 2.1), gefolgt von der Verwendung von Satellitenbildern der Weltraummissionen aus den Jahren 1984 bis 2022 für die räumlich-zeitlichen Analysen (s. 2.2). Abschließend erfolgte die In-situ-Überprüfung der durch Drohnenflüge (s. 2.3.1) gewonnenen Daten und der Datenerfassung mit mobilen GIS (s. 2.3.2).

Das Konzept der multidimensionalen Datenintegration, auch Sensordatenfusion genannt, wird in den Artikeln von Pawlik et al. (5, 12) und Rudolph et al. (13) sowie in Bild 5 vorgestellt.

2.1 Geologische Modellierung

Das Ziel der Arbeit besteht in der Entwicklung und Analyse geowissenschaftlicher 3-D-Untergrundmodelle am ehemaligen Zechensstandort Prosper-Haniel. Die Modelle sollen das Deckgebirge sowohl vor der Kohleförderung als auch zum nachbergbaulichen Zeitpunkt abbilden. Durch die Verknüpfung mit Fernerkundungsdaten lassen sich die untertägigen Prozesse oder Strukturen ggf. nachweisen und ermöglichen dadurch ein besseres Prozessverständnis zu den nachbergbaulichen Veränderungen in dieser Region.

Das Modell bildet sehr hochauflösend und nach aktuellem Kenntnisstand die Untergrundstrukturen und regionalgeologischen Sachverhalte ab. Mit Beginn der quartären Unterkante wird der Übergang vom Oligozän in die Oberkreide flächig ausmodelliert. Anschließend erfolgt die Modellierung der Formationsgrenzen in der Kreide, im Trias sowie im Perm bis zur Darstellung der Karbonoberfläche.

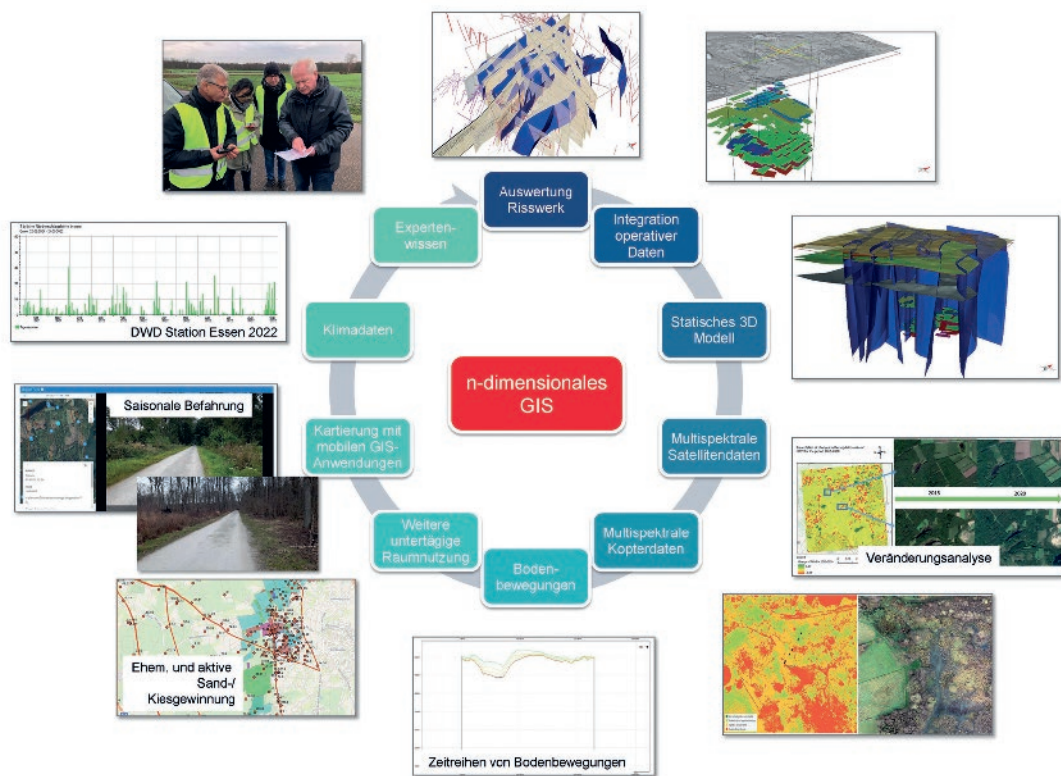


Fig. 5. Methods used for geotechnical and environmental monitoring (13).
Bild 5. Methoden des Geo- und Umwelt-Monitoring (13).

2.1 Geological modelling

The aim of this work is to develop and analyse geoscientific 3D subsurface models of the former Prosper-Haniel mine workings. These models are designed to represent the overburden both prior to coal extraction and also during the post-mining period. Linking up with remote sensing data creates a potential opportunity for identifying the underground processes and structures involved and this can provide a better understanding of the post-mining changes taking place in this region.

The model is able to produce high-resolution images of the subsurface structures and regional-geological situation as based on currently available information. The transition from the Oligocene into the Upper Cretaceous is modelled in two dimensions, beginning with the base of the Quaternary. The model is then further developed to include the formation boundaries in the Cretaceous, Triassic and Permian until it is able to map out the interface with the Carboniferous.

Historical mining documents are a valuable source of data for modelling the deeper levels of the Ruhr area. Existing layout plans, structural maps and isoline maps (Carboniferous surface, Bunter sandstone) were geo-referenced, digitised and interpreted and then combined and compared with current data. In this way it was possible to produce an integrated model of the overburden within the study area (Figure 6):

Data acquisition and research

- Research of map and archive material with geo-referencing where necessary:
 - 40 mine-survey profiles of working districts and lateral roadways (Prosper, Franz Haniel, Jacobi, Lohberg);
 - 19 hydrogeological profiles (HK10, HK25);
 - 35 deep-tectonic profiles (Dorsten major anticline, Emscher major trough);
 - 14 engineering-geological profiles (4406 Dinslaken, 4407 Bottrop);
 - 61 2D-seismic profiles (Lohberg 1952, Kirchhellen 1953, Bottrop 1957, Nordlicht 1958, Prosper-Haniel 1975, Schermbeck 1981).

Eine wertvolle Datenbasis für die Modellierung des tieferen Untergrunds im Ruhrgebiet bieten montanhistorische Unterlagen. Vorhandene Grundrisse, Strukturkarten und Isolinienpläne (Karbonoberfläche, Buntsandstein) wurden georeferenziert, digitalisiert, interpretiert und mit heutigen Daten kombiniert und abgeglichen. So konnte ein integriertes Modell des Deckgebirges im Untersuchungsgebiet erstellt werden (Bild 6):

Erfassung und Recherche von Daten

- Recherche von Karten- und Archivmaterial sowie ggf. Georeferenzierung:
 - 40 markscheiderische Abteilungs- und Richtstreckenprofile (Prosper, Franz Haniel, Jacobi, Lohberg),
 - 19 hydrogeologische Profile (HK10, HK25),
 - 35 Tiefentektonikprofile (Dorstener Hauptsattel, Emscher-Hauptmulde),
 - 14 ingenieurgeologische Profile (4406 Dinslaken, 4407 Bottrop),
 - 61 2-D-Seismikprofile (Lohberg 1952, Kirchhellen 1953, Bottrop 1957, Nordlicht 1958, Prosper-Haniel 1975, Schermbeck 1981).
- Erfassung von Schnittlagen und Strecken aus dem digitalen Flözarchiv NRW.
- Räumliche Lagen- und Tiefentransformation von Profilschnitten und Digitalisierung von Störungslagen und Schichtgrenzen.

Erstellung des Strukturmodells

- Interpretation und Ausmodellierung der Störungsverläufe zum Aufbau untertägiger Strukturen aus unterschiedlichen Darstellungsebenen (Sohlen).

Bohrdatenselektion

- Entwicklung von Datenbankabfragen sowie Auswertung von Bohrungen der Bohrungsdatenbank DABO NRW (GD NRW).
- Qualitative Bewertung der Bohrungseinstufungen.

Modellierung

- Ausmodellierung der Bezugs- und Formationsgrenzen.

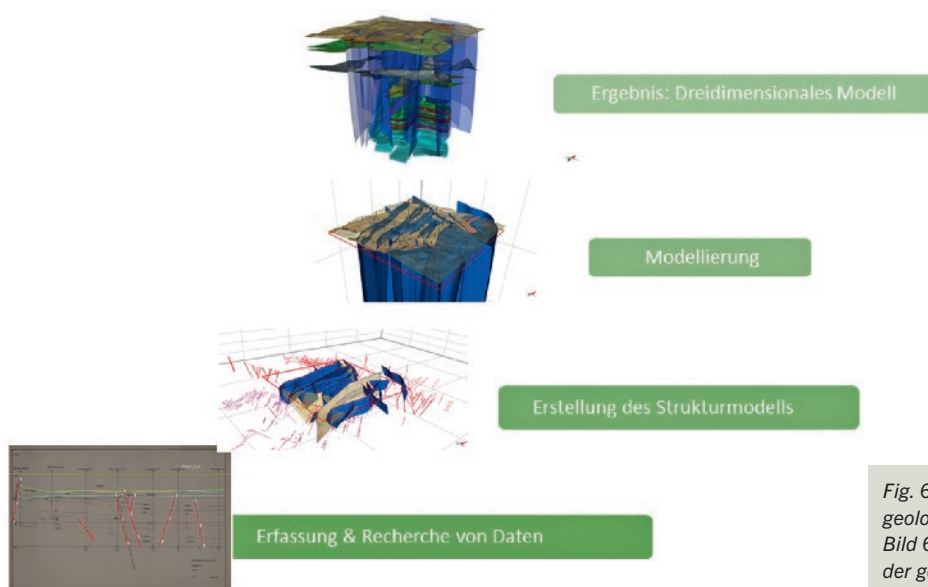


Fig. 6. Research methodology for 3D modelling of the geological structures.
Bild 6. Forschungsmethodik für die 3-D-Modellierung der geologischen Strukturen. Source/Quelle: FZN

- Logging of cutting positions and roadways from the digital seam archive for NRW.
- Spatial position and depth transformation of profile cuts and digitisation of fault positions and layer boundaries.

Creation of the structural model

- Interpretation and modelling of the fault pathways in order to develop underground structures from different presentation levels (horizons).

Drilling data selection

- Processing of database enquiries and evaluation of drillings in the DABO NRW (GD NRW) drill database.
- Qualitative assessment of drilling classifications.

Modelling

- Modelling of reference and formation boundaries.

Additional activities

- Two-dimensional calculation of actual mine subsidence events at certain points in time (2005, 2010, 2015 and 2020) as based on LiDAR data;
- LiDAR analysis aimed at registering mining discontinuities
- small-scale subsidence analyses for referencing spatial-temporal interactions;
- three-dimensional implementation of the height sequences of the reference levelling in the second-order datum point field;
- reconstruction of overall heights and mine workings (winding shaft, lateral roadways) based on a reconstruction of the deposits;
- derivation of various map themes (working thickness, extraction-subsidence ratio, northward migration).

2.2 Remote sensing

Data acquisition is an important project stage, as the results that are ultimately required depend on it (14). Remote-sensing data sources for the Digital Twin project included satellite images obtained by the Landsat (NASA) and Copernicus (ESA) missions. Before the data gathering process began it was therefore necessary to define criteria on the basis of which it would be possible to assess these data in terms of their suitability for the project (12).

Pawlik et al. (12) propose the following criteria:

- Time span: the time series covers the period from 09/1972 (the Landsat 1 mission) to 2023 (the Landsat 7 to 9 and Sentinel 2 missions).
- Time resolution: "The time resolution indicates how often or at which time intervals a sensor is able to record a certain area" (15).
- Spatial cover: The spatial cover is defined by the study area.
- Spatial or geometrical resolution: The spatial or geometrical resolution is a measure of the smallest object that can be distinguished by a sensor. It can be compared to a pixel in a remotely sensed image (15). "The greater the spatial resolution, the more accurate will be the resulting data" (12). Here the spatial resolution will depend on the satellite mission in question.
- Spectral resolution: "The spectral resolution indicates how many spectral bands a sensor can record in at the same time" (16). A knowledge of the individual spectral bands of the satellites

Weitere Tätigkeiten

- Flächige Berechnung der tatsächlichen Bergsenkungen zu den Zeiträumen 2005, 2010, 2015 und 2020 aus LiDAR-Daten,
- LiDAR-Auswertung zur Erfassung bergbaulicher Unstetigkeiten,
- kleinräumige Senkungsanalysen für den Bezug räumlich-zeitlicher Wechselwirkungen,
- dreidimensionale Implementierung der Höhenzeitfolgen des Leitnivelements im Höhenfestpunktfeld 2. Ordnung,
- Rekonstruktion der Bauhöhen und Grubengebäude (Förderschacht, Richtstrecken) auf Basis einer Lagerstättenrekonstruktion,
- Ableitung verschiedener Kartenthemen (Abbaumächtigkeit, Abbau-Senkungs-Verhältnis, Nordwanderung).

2.2 Fernerkundung

Die Datenerfassung ist ein wichtiger Projektabschnitt, da die zu erzielenden Ergebnisse davon abhängen (14). Die fernerkundlichen Datenquellen für das Projekt Digital Twin beinhalteten Satellitenbilder der Landsat- (NASA) und Copernicus- (ESA) Missionen. Daher sollten vor Beginn der Datenerhebung Kriterien festgelegt werden, auf deren Grundlage die Daten im Hinblick auf die Eignung für das Projekt bewertet werden (12).

In Pawlik et al. (12) werden folgende Kriterien vorgeschlagen:

- Zeitraum: Die Zeitreihe deckt den Zeitraum von 09/1972 (Mission Landsat 1) bis 2023 ab (Missionen: Landsat 7 bis 9 und Sentinel 2).
- Zeitauflösung: „Die zeitliche Auflösung gibt an, wie oft oder in welchen Zeitabständen ein Sensor ein bestimmtes Gebiet aufnehmen kann“ (15).
- Räumliche Abdeckung: Die räumliche Abdeckung wird durch das Untersuchungsgebiet definiert.
- Räumliche oder geometrische Auflösung: Die räumliche oder geometrische Auflösung ist das Maß für das kleinste Objekt, das von einem Sensor unterschieden werden kann. Es ist vergleichbar mit einem Pixel in einem Fernerkundungsbild (15). „Je höher die räumliche Auflösung, desto genauer werden die resultierenden Daten“ (12). Die räumliche Auflösung hängt dabei von der jeweiligen Satellitenmission ab.
- Spektrale Auflösung: „Die spektrale Auflösung gibt an, in wie vielen Spektralbändern ein Sensor gleichzeitig aufnehmen kann“ (16). Kenntnisse zu den einzelnen Spektralbändern der Satelliten ermöglichen die Berechnung der Vegetationsindizes. Sie spielen eine wichtige Rolle beim Geomonitoring nachbergbaulicher Fragestellungen (12). Die neuesten Satellitensysteme zeichnen sich durch die beste Anpassung der Spektralbereiche sowohl in Bezug auf die räumliche Auflösung als auch auf die Frequenz der Spektralbereiche für Vegetationsbeobachtungen aus (12,17).
- Wolkenbedeckung: Aufgrund der Wolkenbedeckung wurden nur Satellitenbilder ausgewählt, in denen die Bedeckung gering ausfällt. Das reduziert in Mitteleuropa generell die Datenverfügbarkeit im Bereich der optischen Satellitendaten.

Die Datenerfassung beginnt mit dem Zuschneiden auf einen bestimmten Untersuchungsbereich. Danach erfolgen die Auswahl

enables a calculation to be made of the vegetation indices. The latter play a very important role for the geo-monitoring of post-mining issues (12).

The latest satellite systems are ideal for vegetation observations in that they feature excellent adaptation to the spectral ranges both with regard to spatial resolution and to spectral-range frequency (12,17).

- Cloud cover: Only those satellite images taken under conditions of minimal cloud cover were used for the survey. In central Europe this generally tends to reduce the availability of optical satellite data.

Data gathering begins by cropping the results to fit a specified study area. The evaluation method then has to be selected and adapted to suit the problem at hand. The usual practice is to employ indicators so that additional information can be obtained about a certain aspect by apportioning the data from different spectral channels. When considering vegetation health, e.g., chlorophyll is one of the subject elements that has a vital role to play. Chlorophyll absorbs energy in certain wavelengths and uses photosynthesis to generate carbon for plant growth. However, certain energy-rich wavelengths are reflected in order to protect the plant from overheating (18).

The Digital Twin project analysed three groups of indicators, namely those based on vegetation, soil and water. Pawlik et al. (12) have singled out vegetation indices, which can be useful for observing vegetation development when engaged in the geo-monitoring of mining follow-up processes.

As post-mining processes are of a long-term nature it is extremely important to have a sustained (continuous) geomonitoring regime in place. In this particular study area mining operations lasted from the 1970s to the year 2018 (4, 19), which means that the changes taking place at ground surface can be registered by way of space-time analyses.

The Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) is a vegetation indicator developed by Rouse et al. (20). The NDVI is based on the bands in the red and near-infrared range of the spectrum. The time-series analysis presented in figure 7 illustrates how the landscape of the study area has changed over the years. The top row shows the false-colour images while the bottom row contains the results based on the NDVI. The index presents the values in the range of -1 to 1. According to the classification by Kuechly et al. (18) red colours denote plots of land, streets, buildings and water, while green colours represent the vegetation, the lighter tones indicating a lower plant vitality and the darker tones a very high vitality level.

The changes observed in the study area (Figure 8) could essentially be traced back to:

- colliery spoil tips: the Haniel, Schöttelheide and Töttelberg tips;
- mining subsidence lakes: Weihnachtssee, Pflingstsee and two unnamed subsidence lakes;
- near-surface sand and gravel extraction at the Stremmer and Spickermann sandpits.

2.3 In-situ measurements

Remote sensing data can provide information on large areas while in-situ measurements and observations are more suited to supplying individual measurement results.

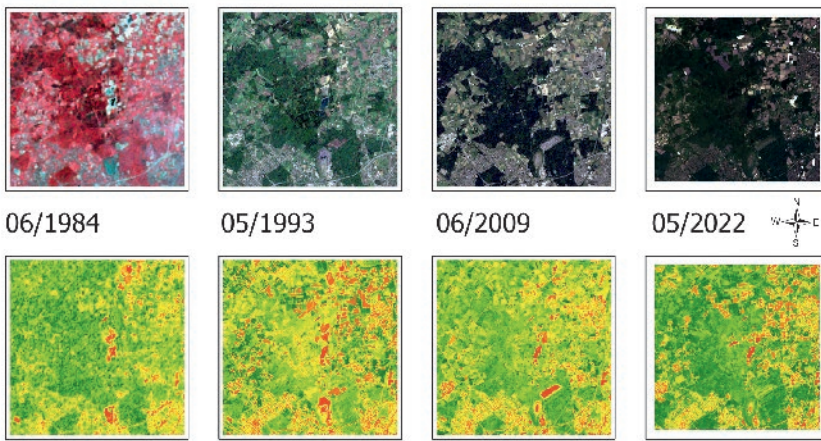


Fig. 7. Spatio-temporal, multispectral analysis – NDVI.
Bild 7. Räumlich-zeitliche, multispektrale Analyse – NDVI. Source/Quelle: FZN

In-situ measurements are an important aspect of the results validation process (21, 22). As well as providing various other remote sensing indicators, analyses based on satellite images supply information about the status of the vegetation. However, in the case of wooded areas these observations are restricted to the upper layers of vegetation, in other words the treetops. The lower layers are not visible and must be surveyed on the ground in order to complete the database. These results are presented in detail in Bernsdorf et al. (21, 22).

In this case the project measurements were taken by drones fitted with a range of cameras, including RGB equipment and multispectral sensors. Mobile GIS was used to record terrain data and in this way to generate “ground truth” information.

2.3.1 The use of drones

Unmanned aerial systems (UAS), commonly referred-to as drones, can carry special sensors that are comparable with those fitted to satellites. However, because of their much higher spatial

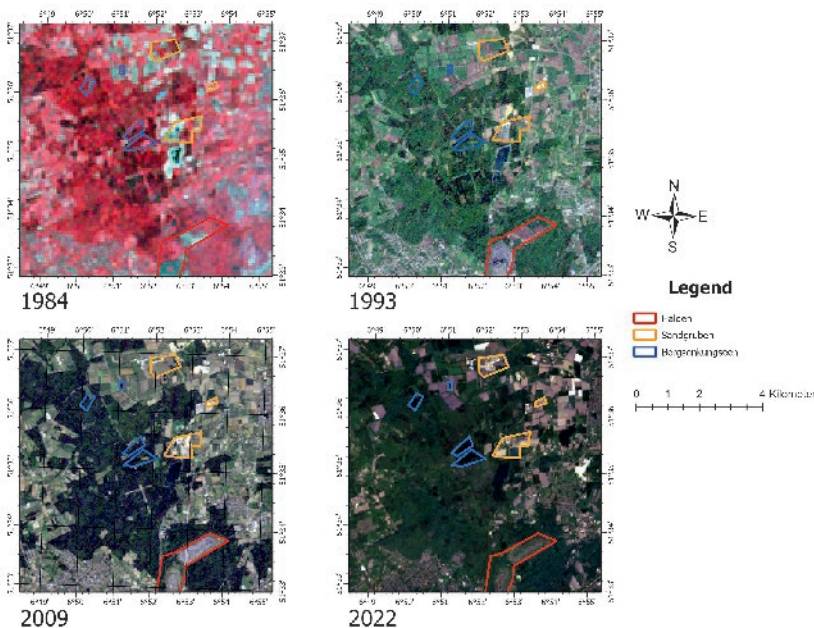


Fig. 8. Changes to the study area between 1984 and 2022.
Bild 8. Veränderungen im Forschungsgebiet von 1984 bis 2022. Source/Quelle: FZN

und Anpassung einer geeigneten Auswertemethode auf die Fragestellung. Üblicherweise werden Indikatoren eingesetzt, bei denen durch die Verrechnung der Daten von verschiedenen spektralen Kanälen Aufschluss über einen Aspekt gewonnen werden kann. Bei der Betrachtung der Vegetationsgesundheit spielt etwa das Chlorophyll als eigentlich betrachteter Gegenstand eine wesentliche Rolle. Chlorophyll absorbiert die Energie in bestimmten Wellenlängen, um über Photosynthese Kohlenstoff für das Pflanzenwachstum zu generieren. Um aber die Pflanze vor Überhitzung zu schützen, werden bestimmte energiereiche Wellenlängen reflektiert (18).

Im Projekt Digital Twin wurden drei Gruppen von Indikatoren analysiert: Vegetations-, Boden- und Wasserindikatoren. Pawlik et al. (12) unterscheiden Vegetationsindizes, die für die Beobachtung

der Vegetation beim Geomonitoring von Bergbaufolgeprozessen nützlich sein können.

Da die nachbergbaulichen Prozesse langfristiger Natur sind, ist ein anhaltendes (kontinuierliches) Geomonitoring äußerst wichtig. Die Bergbautätigkeiten im Untersuchungsgebiet erstreckten sich von den 1970er Jahren bis 2018 (4, 19), sodass mit Hilfe von raum-zeitlichen Analysen die Veränderungen der Bodenoberfläche erfasst werden können.

Der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) ist ein Vegetationsindikator, entwickelt durch Rouse et al. (20). Der NDVI basiert auf den Bändern im roten und nahen Infrarotbereich des Spektrums. In Bild 7 sind die landschaftlichen Veränderungen im Forschungsgebiet in einer beispielhaften Zeitreihe dargestellt. Die obere Reihe zeigt Falschfarbenabbildungen und die untere Reihe die Berechnung des NDVI. Der Index stellt die Werte im Bereich von -1 bis 1 dar. Nach der von Kuechly et al. (18) vorgestellten Klassifizierung stehen rote Farben für Grundstücke, Straßen, Gebäude und Wasser. Grüne Farben stehen für die Vegetation, hellere Farbtöne bedeuten eine geringere Pflanzenvitalität und dunklere Farbtöne eine sehr gute Vitalität.

Die im Forschungsgebiet beobachteten Veränderungen (Bild 8) konnten im Wesentlichen zurückgeführt werden auf:

- Halden: Halde Haniel, Halde Schöttelheide und Halde Töttelberg,
- Bergsenkungsseen: Weihnachtssee, Pflingstsee und zwei namenlose Bergsenkungsseen,
- oberflächennahe Kies- und Sandgewinnung in den Sandgruben: Stremmer und Spickermann.

2.3 In-situ-Messung

Fernerkundungsdaten liefern Informationen für große Gebiete, während es sich bei In-situ-Messungen und -Beobachtungen um punktuelle Messergebnisse handelt.

In-situ-Messungen sind ein wichtiger Bestandteil des Validierungsprozesses der erzielten Ergebnisse (21, 22). Analysen auf der Grundlage von Satellitenbildern liefern neben anderen Fernerkundungsindikatoren Informationen über den Zustand der Vegetation.

resolution drones are better able to produce detailed data. The drone used in this particular project was equipped with special sensors whose channels were equivalent to, and could emulate, those of the Landsat and Sentinel 2 satellites in terms of index deduction.

Drones fitted with multispectral cameras – prevalently red, green, blue, red edge and near infrared – are therefore suitable for gathering data that enable precise calculations to be made of the vegetation indices. The excellent ground resolution of a few centimetres makes for an almost razor-sharp identification and it is even possible to distinguish between individual plants. The copter drone used for the project had a ground resolution of altitude/18.6 (a flight altitude of 100 m produces a ground resolution of 5.3 cm x 5.3 cm per pixel).

Copter flights of this kind can therefore be used for the highly precise recording of the phenomena that occur in a certain area. They can, for example, help us to understand how changes in soil moisture levels can affect the vegetation indices before the less well defined satellite data available for large areas can be processed. This process understanding can be visualised both in 2D and in 3D space.

The paper published by Pawlik et al. (23) includes a résumé of the spectral channel characteristics for the DJI Phantom 4 and Sentinel 2 satellite missions. This shows that the bands recorded by the drone correspond to the spectral bands of the satellite missions or lie within the area of the sensor band width.

When planning to carry out drone flights it is necessary – in certain areas at least – to obtain the permission of the local landowner or site management company. Moreover, the drone operator must comply with national and EU regulations that lay down clear guidelines on the following: flight altitudes, distance to be maintained between the drone and nearby streets and buildings and the need for extreme care when flying close to groups of people. The ability to perform a drone flight will also depend on the prevailing weather conditions (24). As an institution that regularly uses drones for research purposes the Research Center of Post-Mining (FZN) at TH Georg Agricola University (THGA), Bochum/Germany, works closely with the licensing authorities on obtaining exemptions from certain statutory offences and has been issued with the necessary approvals. This arrangement greatly simplifies those spur-of-the-moment missions that have to be undertaken, for example, when a flight has been delayed due to adverse weather conditions.

The investigations conducted by the FZN involved a series of drone flights whose purpose was to produce conventional and multispectral orthophoto maps that were more precise than satellite images. This included using drones to capture images that took account of the relevant configurations in respect of flight altitude, lateral overlap and longitudinal overlap. To achieve this the team used a DJI drone fitted with a Phantom 4 multispectral camera with real-time kinematic positioning (RTK). Thanks to this module it is possible to receive signals from the global navigation satellite systems (GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo) and correction data from the satellite positioning services (SAPOS) operated by the German Ordnance Survey Office. This delivers a spatial positioning accuracy of 2 to 3 cm.

As already mentioned, satellite data have a lower spatial resolution than drone-supplied data. The images provided by

Dabei werden jedoch die oberen Vegetationsschichten im Fall von Wäldern – die Baumkronen – beobachtet. Die unteren Vegetationsschichten sind nicht sichtbar und müssen vor Ort untersucht werden, um den Datensatz zu vervollständigen. Detailliert werden die Ergebnisse in Bernsdorf et al. (21, 22) dargestellt.

Im Projekt wurden für die Messungen Drohnen mit diversen Kameras, insbesondere RGB und Multispektralsensor, eingesetzt. Mit Hilfe des mobilen GIS wurden Geländedaten erfasst, um einen „ground truth“ zu generieren.

2.3.1 Der Einsatz von Drohnen

Das unbemannte Luftfahrtsystem (UAS, gemeinhin Drohne genannt) ist in der Lage, spezielle Sensoren zu tragen, die vergleichbar mit den Sensoren von Satelliten sind. Aufgrund ihrer deutlich höheren räumlichen Auflösung können sie Details jedoch besser wiedergeben. Die im Projekt verwendete Drohne wurde mit speziellen Sensoren ausgestattet, deren Kanäle in Bezug auf die Indexableitung denen des Landsat- und der Sentinel 2-Satelliten entsprechen und diese nachahmen.

Daher sind Drohnen mit Multispektralkameras – verbreitet Rot, Grün, Blau, Red Edge und nahes Infrarot – geeignet, um Daten für die genauen Berechnungen von Vegetationsindizes zu erfassen. Aufgrund der Bodenauflösung können Aussagen quasi „blattscharf“ abgeleitet werden. Einzelne Pflanzen lassen sich durch die hohe Auflösung von wenigen Zentimetern gut unterscheiden. Der im Projekt eingesetzte Kopter besitzt eine Bodenauflösung von Flughöhe/18,6 (bei 100 m Flughöhe resultiert eine Bodenauflösung von 5,3 cm x 5,3 cm pro Pixel).

Mit Hilfe solcher Kopterflüge können daher Phänomene, die in einem bestimmten Gebiet auftreten, sehr genau erfasst werden. Es ist dadurch beispielsweise möglich, ein Verständnis der Auswirkungen von Bodenfeuchteveränderungen auf Vegetationsindizes zu verstehen, bevor man die unschärferen, aber für große Flächen verfügbaren Satellitendaten verarbeitet. Dieses Prozessverständnis kann sowohl im 2-D- als auch im 3-D-Raum visualisiert werden.

In der Veröffentlichung von Pawlik et al. (23) wird eine Zusammenfassung der Spektralkanalcharakteristiken für die DJI Phantom 4- und die Sentinel 2-Satellitenmission vorgestellt, aus der hervorgeht, dass die mit der Drohne erfassten Bänder mit den Spektralbändern der Satellitenmission übereinstimmen oder im Bereich der Sensorbandbreite liegen.

Für die Durchführung von Drohnenflügen ist es – für bestimmte Gebiete – erforderlich, die Zustimmung der jeweiligen Grundstückseigentümer oder -betreiber einzuholen. Darüber hinaus muss der Drohnenbetreiber die nationalen und EU-Vorschriften einhalten, in denen Folgendes eindeutig festgelegt ist: Flughöhen, Abstand der Drohne zu Straßen oder Gebäuden und äußerste Vorsicht beim Fliegen in der Nähe von Menschengruppen. Die Durchführung eines Drohnenflugs ist auch von den vorherrschenden Wetterbedingungen abhängig (24). Als Institution, die regelmäßig Drohnen zu Forschungszwecken einsetzt, hat das Forschungszentrum Nachbergbau (FZN) der Technischen Hochschule Georg Agricola (THGA), Bochum, in enger Zusammenarbeit mit den Genehmigungsbehörden sogenannte Ausnahmegenehmigungen von bestimmten Straftatbeständen erarbeitet und genehmigt bekommen. Dies vereinfacht insbesondere spontane Missionen, wenn sich etwa durch schlechte Wetterbedingungen Flugfenster verschieben.

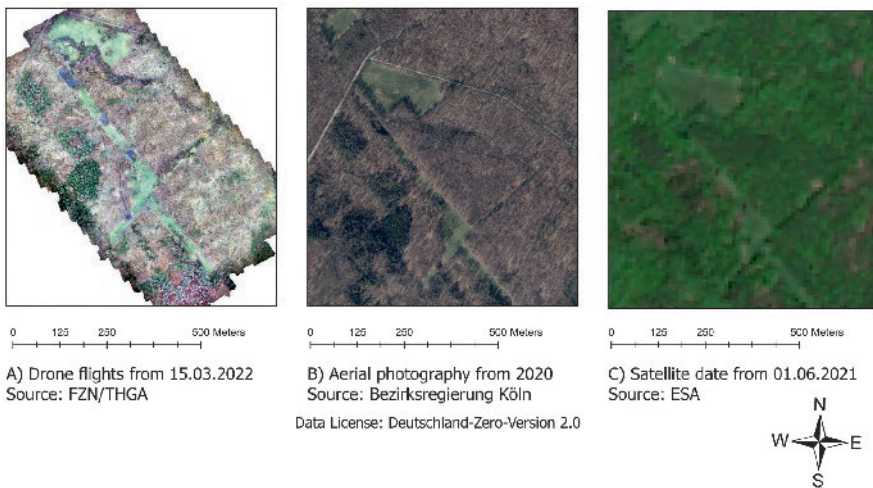


Fig. 9. Spatial resolution a) drone flight (5 cm), b) aerial photo (10 cm) and c) Sentinel 2 (10 m) (25). // Bild 9. Räumliche Auflösung a) Drohnenflug (5 cm), b) Luftbild (10 cm) und c) Sentinel 2 (10 m) (25).

the Sentinel 2 space mission were received in a spatial resolution of 10 m x 10 m per pixel (Figure 9). The examples given in Figure 9 show how drone flights can be used to survey small bodies of water that would not be recognisable on aerial and satellite images.

2.3.2 Mobile GIS

According to Tsou (26) mobile GIS is “an integrated software and hardware framework for access to geodata and geo-services using mobile devices operating via wired or wireless networks”.

The integration of mobile GIS with sensors to measure soil humidity and temperature is described in Bernsdorf et al. (21, 22), Flügge (27) and Pawlik et al. (28). As the soil sensors deployed for areal mapping cannot display data a mobile GIS is used to collect and present the results. This supplements the logger stations and the weather stations with their soil sensors that are connected via wide area networks (WAN). The aim of including a mobile GIS was to compress the measurements from the logger stations on sample areas.

Mobile GIS was also used to verify the results of the subsurface modelling as well as those obtained from the multispectral analyses based on the satellite images. The tectonic outcrop limits of the geological modelling also served as orientation points for the documentation of the in-situ measurements by mobile GIS (Figures 10, 11).

Spatio-temporal analyses based on calculated remote-sensing indices enable observations to be made of changes in the environment. In Pawlik et al. (29) the formation of the subsidence lake is described using calculated indices: the NDVI (Normalised Difference Vegetation Index), GNDVI (Green Normalised Difference Vegetation Index), NDWI (Normalised Difference

Bei den Untersuchungen des FZN wurden eine Reihe von Drohnenflügen durchgeführt, um klassische oder multispektrale Orthophotokarten zu erstellen, die genauer sind als Satellitenbilder. Dies beinhaltete die Erfassung von Bildern mittels der Drohne unter Berücksichtigung der entsprechenden Konfigurationen hinsichtlich Flughöhe, seitlicher Überlappung und Längsüberlappung. Zu diesem Zweck wurde eine DJI-Drohne verwendet, die eine Phantom 4 Multispectral-Kamera mit Echtzeit-Kinematik-Funktion (RTK) besitzt. Dank dieses Moduls ist es möglich, Signale der globalen Navigationssatellitensysteme (GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo) sowie Korrekturdaten vom Satellitenpositionierungsdienst (SAPOS) der deutschen Landesvermessung zu erhalten. Dies ermöglicht eine räumliche Positionsgenauigkeit von 2 bis 3 cm.

Wie bereits erläutert, weisen Satellitendaten eine geringere räumliche Auflösung als Drohnen auf. Die Bildinformationen der Weltraummission Sentinel 2 empfangen in einer räumlichen Auflösung von 10 m x 10 m pro Pixel (Bild 9). Die Beispiele in Bild 9 verdeutlichen durch den Einsatz von Drohnenflügen die Erkundung kleiner Wasserflächen, die auf Luft- und Satellitenbildern nicht zu erkennen sind.

2.3.2 Mobile GIS

Nach Tsou (26) ist ein mobiles GIS „ein integriertes Software- und Hardware-Framework für den Zugriff auf Geodaten und -dienste mit mobilen Geräten über drahtgebundene oder drahtlose Netzwerke“.

Die Integration von mobilen GIS mit Sensoren zur Messung von Bodenfeuchte und -temperatur wird in Bernsdorf et al. (21, 22), Flügge (27) und Pawlik et al. (28) beschrieben. Da die für die flächenhafte Kartierung eingesetzten Bodensensoren keine Daten aufzeichnen können, wurde ein mobiles GIS zur Erfassung und Darstellung der Daten verwendet. Diese ergänzen die Loggerstationen oder diejenigen, die über Wide Area Networks (WAN) angebundenen Wetterstationen mit ihren Bodensensoren.

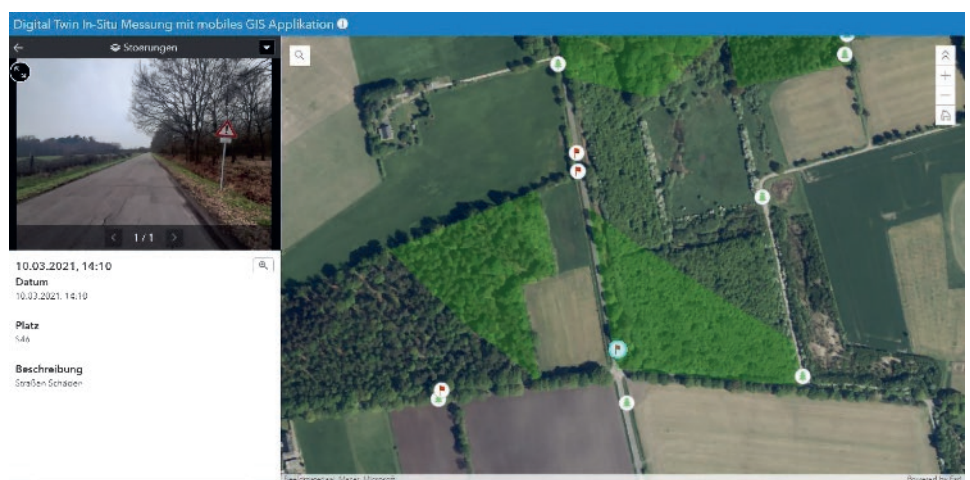


Fig. 10. In-situ measurement using ArcGIS Collector. The green area represents a disturbance zone. Bild 10. In-situ Messung mit ArcGIS Collector. Die grüne Fläche stellt einen Störungsbereich dar. Source/Quelle: FZN

Water Index) and MNDWI (Modified Normalised Difference Water Index) were calculated for the period 1984 to 2021. The study showed that between 2002 and 2012 the NDVI and GNDVI decreased whereas the NDWI and MNDWI increased, this being substantiated by the formation of water bodies in the area. The results were checked by mobile GIS. An example of these findings is shown in Figure 12.

3 Data integration

Post-mining processes constitute an open and complex system that can only be properly understood by consulting all available data. Using methods based on satellite images, drones and in-situ measurements provides results with different spatial and temporal resolutions. Modelling the geological structure in combination with information on past mining activities makes it possible to visualise changes to the Earth's surface. This is needed in order better to understand the processes taking place above ground.

In order to be able to identify global trends and changes it was decided to employ satellite remote sensing so that large areas could be observed with a spatial resolution of 10 to 30 m. Local changes were studied by means of drone missions as these enabled observations to be made with a spatial resolution of just a few centimetres. Here it was found that flights undertaken un-

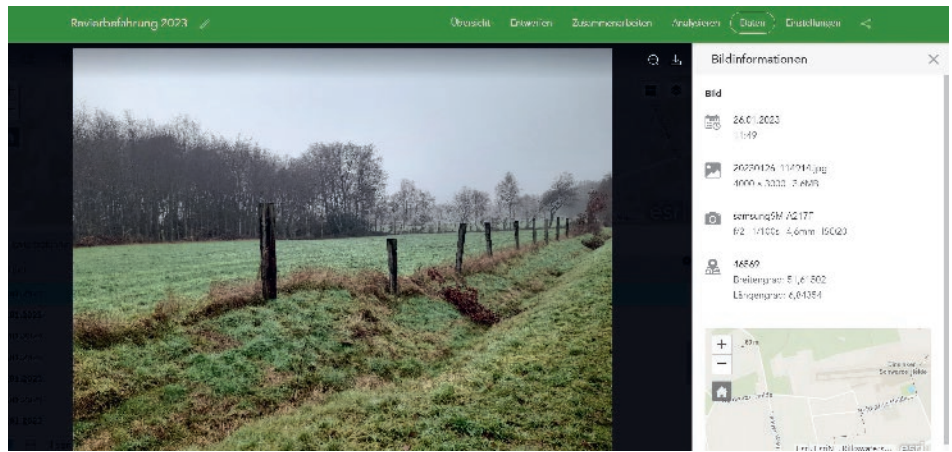


Fig. 11. Discontinuity in the study area. // Bild 11. Unstetigkeit im Untersuchungsgebiet. Source/Quelle: FZN

Das Ziel mit Hilfe eines mobilen GIS war es, die Messungen der Loggerstationen an Beispielflächen zu verdichten.

Das mobile GIS wurde darüber hinaus verwendet, um die Resultate der Untergrundmodellierung als auch der Multispektralanalysen auf Grundlage der Satellitenbilder zu überprüfen. Die tektonischen Ausbissgrenzen der geologischen Modellierung dienten u. a. als Orientierung zur Dokumentation der In-situ-Messungen mittels mobile GIS (Bilder 10, 11).

Räumlich-zeitliche Analysen auf Grundlage berechneter Fernerkundungsindizes ermöglichen die Beobachtung von Veränderungen in der Umwelt. Bei Pawlik et al. (29) wird die Entstehung des Bergseenkungssees anhand der berechneten Indizes beschrieben:

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index, GNDVI – Green Normalized Difference Vegetation Index, NDWI – Normalized Difference Water Index, MNDWI – Modified Normalized Difference Water Index wurden für den Zeitraum von 1984 bis 2021 berechnet. Die Studie zeigte, dass zwischen 2002 und 2012 die NDVI- und GNDVI-Indizes abgenommen haben, während die NDWI- und MNDWI-Indizes gestiegen sind, was die Bildung von Wasserflächen in dem Gebiet belegt. Die Ergebnisse wurden mit Hilfe eines mobilen GIS überprüft. Ein Beispiel für das Ergebnis ist in Bild 12 dargestellt.

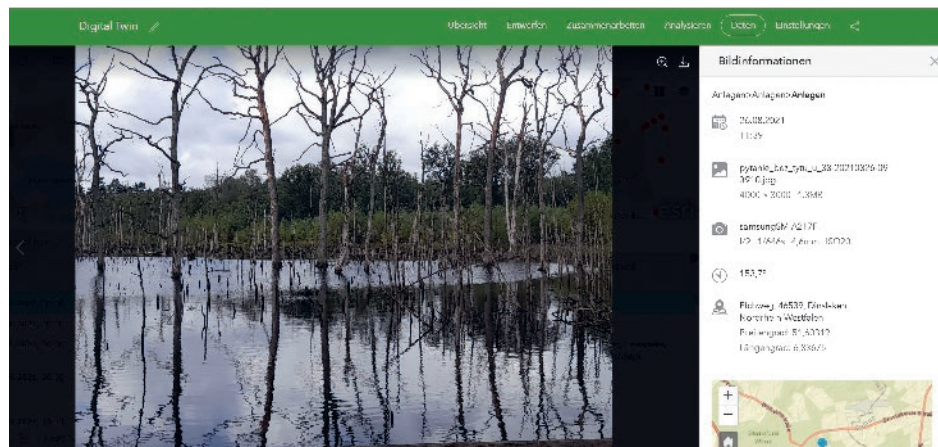


Fig. 12. Mining subsidence lake (25). // Bild 12. Bergsenkungssee (25).

der cloudy skies yielded better quality results than those carried out on sunny days. As the sensors fitted to drones exhibit similar spectral characteristics to those deployed on satellites they can be used for calculating remote sensing indices. One of the indisputable advantages of using drones is their mobility and flexibility, particularly in situations where the reception of data from satellites is not possible due, e.g., to cloud cover or to the repetitive nature of the satellite cycle.

Using data from different time periods enables environmental monitoring to be undertaken on a long-term basis. Satellite images are captured within a few days, depending on the satellite

3 Integration der Daten

Die nachbergbaulichen Prozesse sind ein offenes, komplexes System, für dessen Verständnis alle verfügbaren Daten herangezogen werden müssen. Durch den Einsatz von Methoden, die auf Satellitenbildern, Drohnen und In-situ-Messungen basieren, können Ergebnisse mit unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Auflösung erzielt werden. Die Modellierung der geologischen Struktur in Verbindung mit Informationen über die Bergbautätigkeit ermöglicht es, die Veränderungen an der Erdoberfläche sichtbar zu machen. Das ist notwendig, um die übertägigen Prozesse besser verstehen zu können

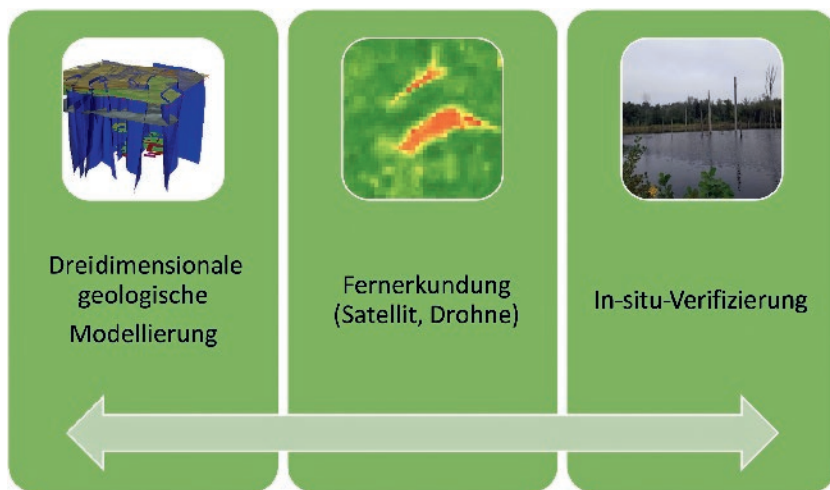


Fig. 13. Data integration in the Digital Twin project.
Bild 13. Datenintegration im Projekt Digital Twin. Source/Quelle: FZN

mission in question, whereas drone flights can be undertaken on the spur of the moment. Validations and additions provided by way of in-situ measurement systems enable confirmation of derived indicators for the monitoring of high-quality objects and object-based information. The positioning accuracy of the various data and the comparability of data exhibiting different degrees of resolution and quality are two of the main challenges to be addressed. It may be necessary to develop local solutions in order to ensure that data that are scaled differently can be properly merged together.

The environmental monitoring and geomonitoring of post-mining processes is a very complex undertaking as it involves all kinds of different factors that are linked together. Understanding and interpreting what is going on is only possible when the post-mining processes are considered as an entire system of interdependent factors (Figure 13). It is therefore extremely important to have raw data and specialist knowledge available in order to be able to interpret the phenomena both below and on the Earth's surface.

4 Summary

To summarise, it can be said that the "Digital twin – integrated geomonitoring" project as presented above is an example of an innovative and interdisciplinary approach to data integration and fusion aimed at interpreting and understanding post-mining processes. While the final results have not yet been made available, it can be seen that the bodies of data acquired from the various sources, containing as they do different levels of temporal, spatial and spectral resolution, will present a challenge for the amalgamation process. When interpreting changes to the environment and the impact these have on the Earth's surface and its buildings and infrastructure it is particularly useful to be able to consult mine plans and mine survey expertise.

The authors have sought to adopt an integrated approach to the challenges outlined above and to reach a comprehensive understanding of the processes involved. This creates the basis that is needed to ensure transparency and solid community engagement.

Um globale Trends und Veränderungen zu erkennen, wurde die Satellitenfernerkundung eingesetzt, mit deren Hilfe große Gebiete mit einer räumlichen Auflösung von 10 bis 30 m beobachtet werden können. Um lokale Veränderungen festzustellen, wurden Drohnenflüge durchgeführt, die Beobachtungen mit einer räumlichen Auflösung von wenigen Zentimetern ermöglichen. Hierbei wurde festgestellt, dass Flüge bei bewölktem Himmel eine bessere Qualität aufweisen als an sonnigen Tagen. Da die Sensoren von Drohnen ähnliche spektrale Eigenschaften aufweisen wie die von Satelliten, können sie zur Berechnung von Fernerkundungsindizes verwendet werden. Ein unbestrittener Vorteil des Einsatzes von Drohnen ist die Mobilität und Flexibilität, wenn der Empfang von Daten von Satelliten, z. B. aufgrund von Bewölkung und des Wiederholungszyklus von Satelliten, nicht möglich ist.

Die Verwendung von Daten aus verschiedenen Zeiträumen ermöglicht ein langfristiges Umweltmonitoring. Satellitenbilder werden, je nach Satellitenmission, innerhalb weniger Tage erfasst, während Drohnenflüge spontan durchgeführt werden können. Validierungen und Ergänzungen durch In-situ-Messsysteme ermöglichen die Bestätigung abgeleiteter Indikatoren zur Überwachung von Objekten mit hoher Qualität und objektbezogener Information. Die Positionierungsgenauigkeit verschiedener Daten und die Vergleichbarkeit von Daten mit unterschiedlicher Auflösung und Qualität ist eine der größten Herausforderungen. Möglicherweise müssen lokale Lösungen entwickelt werden, um eine korrekte Zusammenführung von Daten aus verschiedenen Maßstäben zu gewährleisten.

Das Umwelt- und Geomonitoring nachbergbaulicher Prozesse zeichnet sich durch seine hohe Komplexität aus, da unterschiedliche Faktoren miteinander vernetzt sind. Ihr Verständnis und ihre Interpretation sind nur möglich, wenn die nachbergbaulichen Prozesse als ein ganzes System von voneinander abhängigen Faktoren betrachtet werden (Bild 13). Daher ist es von großer Bedeutung, über Ausgangsdaten und Fachwissen zu verfügen, um die Phänomene unter und auf der Erdoberfläche interpretieren zu können.

4 Fazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das in diesem Artikel vorgestellte Projekt „Digital Twin – Integriertes Geomonitoring“ ein Beispiel für einen innovativen und interdisziplinären Ansatz zur Datenintegration und -fusion für die Interpretation und das Verständnis von Nachbergbauprozessen darstellt. Finale Ergebnisse liegen noch nicht vor, aber die Daten aus mehreren Quellen stellen aufgrund ihrer unterschiedlichen zeitlichen, räumlichen und spektralen Auflösung eine Herausforderung bei ihrer Fusionierung dar. Bei der Interpretation der Veränderungen in der Umwelt und den Auswirkungen auf Tagesoberfläche, Gebäude und Infrastruktur kommt dem bergmännischen Risswerk in Verbindung mit markscheiderischer Expertise eine besondere Bedeutung zu.

Das Autorenteam bemüht sich um eine ganzheitliche Herangehensweise an die beschriebenen Herausforderungen und um ein umfassendes Prozessverständnis. Dieses bildet die Basis für die Schaffung von Transparenz und eine verbindliche Öffentlichkeitsarbeit.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Emschergenossenschaft und Lippeverband: www.eglv.de (Online: 31.01.2023)
- (2) Peters, R. (1999): 100 Jahre Wasserwirtschaft im Revier: die Emschergenossenschaft 1899 – 1999. Verlag Peter Pomp, Bottrop, Essen, 267 S.
- (3) Harnischmacher, S.; Zepp, H. (2013): Bergbaubedingte Höhenänderungen im Ruhrgebiet. Tagungsband: Nachbergbau in NRW.
- (4) Böse, C.; Farrenkopf, M.; Weindl, A. (2018): Kohle-Koks-Öl. Die Geschichte des Bergwerks Prosper-Haniel. Aschendorff Verlag, Münster.
- (5) Pawlik, M.; Gellendin, M.; Bernsdorf, B., Rudolph, T., Benndorf, J. (2022): Digital-Twin – How to Observe Changes and Trends on the Post-Mining Areas? In: International Journal of Earth and Environmental Science 2022, 7: 195 <https://doi.org/10.15344/2456-351X/2022/195>
- (6) Richtlinie 2011/92/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Dezember 2011 über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten (Kodifizierung).
- (7) Goerke-Mallet, P.; Melchers, C.; Mütterthies, A. (2016): Innovative monitoring measures in the phase of post-mining. IMWA 2016, Freiberg/Germany, pp 570 – 577.
- (8) Melchers, C.; Goerke-Mallet, P.; Kleineberg, K. (2016): Elements and Aspects of the Post-Mining Era. In: Mining Report Glückauf (152), issue 3, pp 215 – 223.
- (9) Kretschmann, J. (2015): The sustainable development strategy of the German hard coal mining industry. Proceedings of 7th Sustainable Development in the Minerals Industry Conference (SDIMI), University of British Columbia, Vancouver, Canada, pp 1 – 9.
- (10) Rudolph, T. (2020): Digital Twin – Integriertes Geomonitoring weiterentwickelt. In: Technische Hochschule Georg Agricola, Forschungszentrum Nachbergbau & Deutscher Markscheider Verein (eds.): Tagungsband Bergbau, Energie und Rohstoffe 2019. Übergang zu neuen Zeiten, 11. – 13. September 2019, Technische Hochschule Georg Agricola, Bochum, S. 15 – 22.
- (11) Rudolph, T.; Goerke-Mallet, P.; Melchers, C. (2020): Geomonitoring im Alt- und Nachbergbau. In: ZfV 145 (3), S. 168 – 173. Online verfügbar unter: <https://doi.org/10.12902/zfv-0294-2020>
- (12) Pawlik, M.; Rudolph, T.; Benndorf, J.; Blachowski, J. (2021): Review of vegetation indices for studies of post-mining processes. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 942 012034, 2021, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/942/1/012034>
- (13) Rudolph, T.; Yin, X.; Goerke-Mallet, P. (2022): Advanced definition of the geo- and environmental monitoring from the post-mining experience in the Ruhr region. In: Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften. <https://doi.org/10.1127/zdgg/2022/0335>
- (14) Pawlik, M. (2019): Analysis of changes in the development of a selected area of the city of Wrocław from the 1930s to present times. Unpublished master's thesis, Wrocław University of Science and Technology (in Polish).
- (15) Maj, K.; Pabisiak, P.; Stępień, G.; Wysota, R. (2007): Detekcja a identyfikacja. In: Geodeta, 9, S. 26 – 31 (in Polish).
- (16) Wigggenhagen, M.; Steensen, T. (2021): Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung. 6. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Wichmann.
- (17) 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. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/684/1/012030>
- (18) Kuechly, H. U.; Cozacu, A.; Kodl, G.; Nicolai, C.; Vallentin, C. (2020): Grundlagen der Fernerkundung. Infreihe SAPIENS: Satellitendaten für Planung, Industrie, Energiewirtschaft und Naturschutz, Deutsches GeoForschungszentrum GFZ, Potsdam, 2020.
- (19) RAG Bürgerinformationsdienst: <https://geodaten.rag.de/mapapps/resources/apps/bid/index.html?lang=de> (Online: 31.01.2023).
- (20) 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, nr. E73-106393.93.
- (21) Bernsdorf, B.; Khaing, Z. P. (2023): On the evaluation of in situ sensors in the assessment of process flows in geomonitoring. In: Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, <https://doi.org/10.1127/zdgg/2023/0339>
- (22) Bernsdorf, B.; Rudolph, T.; Pawlik, M.; Bökelmann, S. (2023): Der Einsatz von Mobile GIS und RFID-Sensorik zur Bewertung multispektraler Drohnen-Daten im nachbergbaulichen Geomonitoring. GIS-Science (In der Vorbereitung).
- (23) Pawlik, M.; Haske, B.; Bernsdorf, B.; Rudolph, T.; Benndorf, J. (2022): Analyse des Zustands der Vegetation auf dem Gelände des stillgelegten Bergwerks Prosper-Haniel anhand von multispektralen Satellitenbildern der Sentinel 2-Mission und Drohnenflüge. In: Markscheidewesen 129 (Nr.1), S. 37 – 44.
- (24) Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission vom 24. Mai 2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge.
- (25) Pawlik, M.; Haske, B.; Bernsdorf, B.; Rudolph, T.; Andre, J.; Blachowski, J.; Kujawa, P.; Dynowski, A. (2023): The use of mobile GIS in the scientific research-Case Studies. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. (In Press).
- (26) Tsou, M. H. (2004): Integrated Mobile GIS and Wireless Internet Map Servers for Environmental Monitoring and Management, (the Special Issue on Mobile Mapping and Geographic Information Systems). In: Cartography and Geographic Information Science. 31(3), pp 153 – 165.
- (27) Flügge, P. (2022): Vergleich von Bodenfeuchtesensoren mit herkömmlichen Bodenfeuchtebestimmungen an Proben aus dem Einzugsgebiet der Boye. Bachelorarbeit im Studiengang Geotechnik und Angewandte Geologie, Technische Hochschule Georg Agricola, Bochum, 62 S.
- (28) Pawlik, M.; Haske, B.; Bernsdorf, B.; Rudolph, T. (2022): Mobile GIS as an innovative method for Geomonitoring of post-mining processes. GeoMinKöln 2022 (Poster).
- (29) Pawlik, M.; Rudolph, T.; Bernsdorf, B. (2023): Analysis of changes of the vegetation condition on the area of the closed Prosper-Haniel mine in 1984 – 2021 using multispectral satellite images. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. (In Press).

Authors / Autoren

Marcin Pawlik M. Sc., Forschungszentrum Nachbergbau (FZN), Technische Hochschule Georg Agricola (THGA), Bochum, und Technische Universität (TU) Bergakademie Freiberg, Freiberg, Prof. Dr. rer. nat. Tobias Rudolph, Dr. rer. nat. Bodo Bernsdorf, Prof. Dr.-Ing. Peter Goerke-Mallet und Prof. Dr.-Ing. Michael Hegemann Forschungszentrum Nachbergbau (FZN), Technische Hochschule Georg Agricola (THGA), Bochum, Maik Gellendin, Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen – Landesbetrieb, Krefeld