



Umfassende Definition des Geo- und Umweltmonitoring aus den nachbergbaulichen Erfahrungen im Ruhrgebiet

Tobias Rudolph¹, Xiaoxuan Yin² & Peter Goerke-Mallet^{1*}

Rudolph, T., Yin, X. & Goerke-Mallet, P. (2023): Umfassende Definition des Geo- und Umweltmonitoring aus den nachbergbaulichen Erfahrungen im Ruhrgebiet. [Advanced definition of the geo- and environmental monitoring from the post-mining experience in the Ruhr region.] – Z. Dt. Ges. Geowiss., 173: 513–531, Stuttgart.

Kurzfassung: Der Lebenszyklus der Bereitstellung von Georessourcen von der rechtlichen Genehmigung zur Aufsuchung, über den Prozess der Gewinnung bis hin zum Rückbau von Standorten ist ein zeitlich langer Prozess und hat einen lokalen, regionalen sowie überregionalen Einfluss. Die Ergebnisse mehrerer Projekte zeigen die Notwendigkeit der Integration der Methoden des Umwelt- und Geomonitoring zur raumzeitlichen Überwachung. Hierbei spielt die Fusion und das Upscaling mehrerer Geodatenebenen eine wichtige Rolle. Die Projektbeispiele zeigen die multisensorale Zusammenführung der Satellitenfernerkundung mit Kopterbefliegungen und In-situ-Sensoren. Denn nur durch die Betrachtung des gesamten Bereitstellungsprozesses von Georessourcen können die notwendigen Erkenntnisse aus der Endphase für zukünftige Bereitstellungsprozesse genutzt werden.

Auch zeigen die Projektergebnisse die Wichtigkeit, die Veränderungen in den lokalen klimatologischen Bedingungen (u. a. Niederschlag) zu berücksichtigen. Die Projekte verdeutlichen, dass das Geo- und Umweltmonitoring neben der Dokumentation der eigentlichen raumzeitlichen Veränderungen auch die Möglichkeit von Projektsteuerungen bietet. Dies macht eine Erweiterung der Definition des Geo- und Umweltmonitorings, aber auch der Umsetzung der Maßnahmen notwendig. Zusammenfassend zeigt sich aber auch, dass nur durch die Fusion mehrerer Ansätze der Aufbau eines geowissenschaftlichen Prozessverständnisses erreicht wird.

Abstract: The life cycle of the provision of geo-resources from the legal permission for exploration, through the process of extraction, to the decommissioning of sites is a long process in time and has a local, regional as well as supra-regional impact. The results of several projects show the necessity of integrating the methods of environmental and geomonitoring for spatiotemporal monitoring. Here, the fusion and upscaling of multiple geospatial data layers plays an important role. The project examples show the multisensor fusion of satellite remote sensing with copter flights and in-situ sensors. Only by considering the entire provisioning process of georesources, the necessary knowledge from the final phase can be used for future provisioning processes.

In addition, the project results show the importance of considering the effects of changes in local climatological conditions (including precipitation). The projects illustrate that in addition to documenting the actual spatiotemporal changes, geospatial and environmental monitoring offers the possibility of project controls. This necessitates an expansion of the definition of geo- and environmental monitoring, but also the implementation of measures. In summary, however, it is also apparent that only through the fusion of several approaches the development of a geoscientific understanding of processes is achieved.

Schlüsselwörter: Geomonitoring, Umweltmonitoring, Georessourcen, Fernerkundungsdaten, In-situ-Sensoren, Geodaten

Keywords: geomonitoring, environmental monitoring, georesources, remote sensing, in-situ sensors, geodata

1. Einführung

Der Lebenszyklus der Bereitstellung von Georessourcen von der rechtlichen Genehmigung, über den Prozess der Aufsuchung bis hin zum Rückbau von Standorten zur Gewinnung und untertägigen Speicherung von Georessourcen ist ein zeitlich langer Prozess und hat einen lokalen, regionalen sowie überregionalen Einfluss. Hierbei sind verschiedene An-

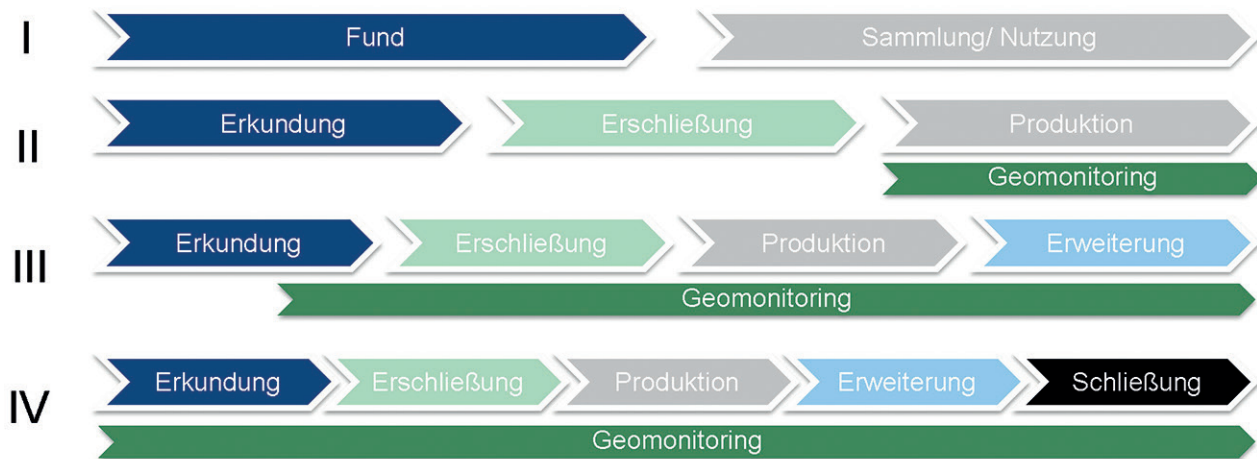
sätze zum Aufbau eines Prozessverständnisses erforderlich, um die Interaktion von Natur und Mensch, aber auch die Sozioökonomie im Lebenszyklus der Georessourcen zu verstehen. Die Komplexität der räumlichen Verteilung, die Ausdehnung und die Überlagerung der Beeinflussungen, deren dynamische Variationen im Lauf der Zeit mit allerdings langfristigen Auswirkungen, stellen die Notwendigkeit der Überwachung von solchen Prozessen dar (Abb. 1). Somit er-

*Anschriften der Autoren:

¹Forschungszentrum Nachbergbau (FZN) der Technischen Hochschule Georg Agricola (THGA), Herner Str. 45, 44787 Bochum, Germany (tobias.rudolph@thga.de / peter.goerke-mallet@thga.de)

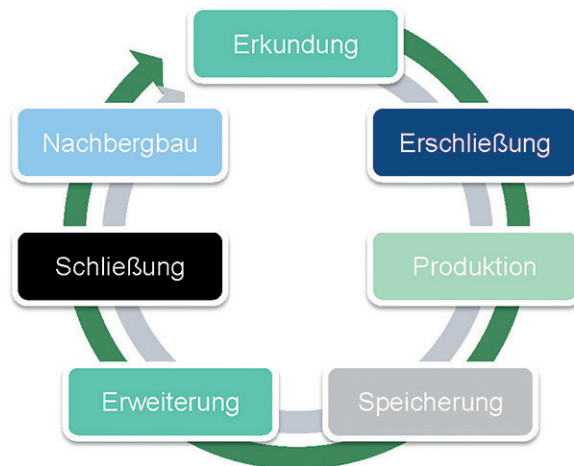
²Ehemals Forschungszentrum Nachbergbau (FZN) der Technischen Hochschule Georg Agricola (THGA)

Initiale Prozesse zur Bereitstellung von Georessourcen



Aufbau eines Lebenszyklus Georessourcen

V



Aufbau eines integrierten Lebenszyklus Georessourcen

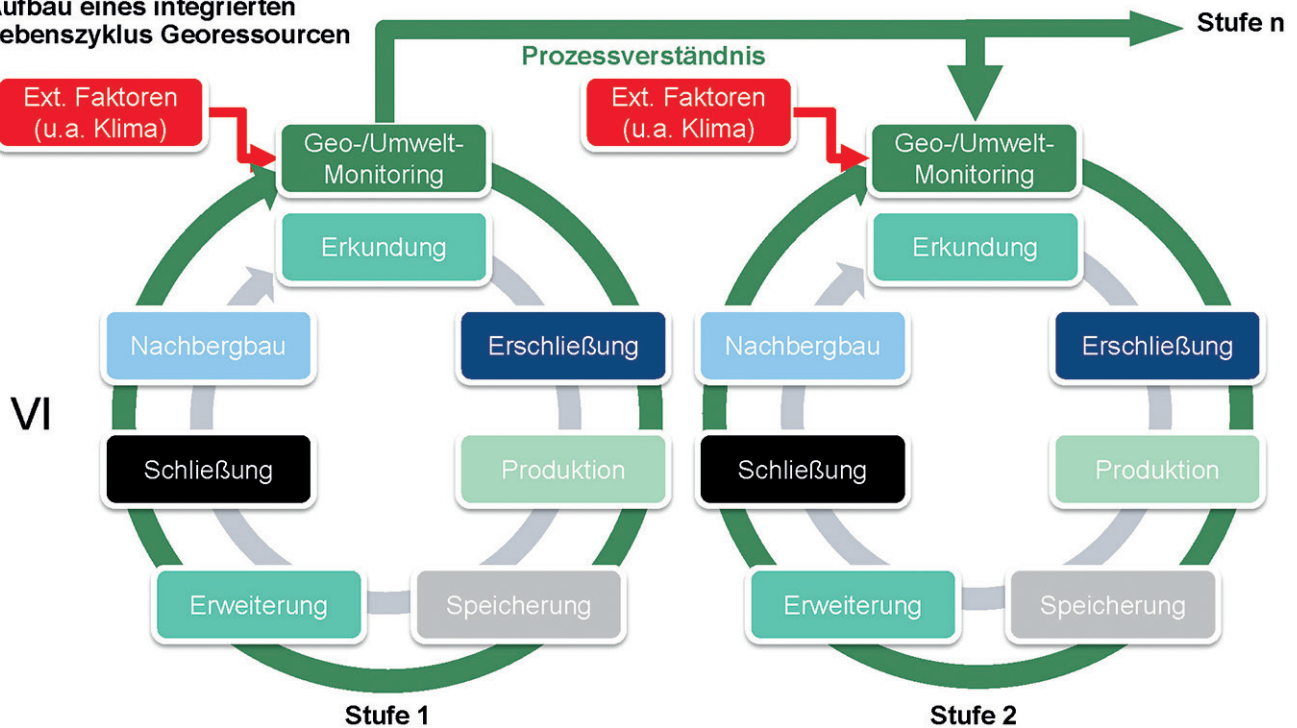


Abb. 1: Darstellung der Entwicklung vom Prozess der Bereitstellung von Georessourcen hin zum integrierten Lebenszyklus (I–VI = zeitliche Entwicklung mit I = (prä-)historische Phase und VI = moderne Umsetzung).

Fig. 1: Schematic illustration of the development of the process of providing georesources to the integrated life cycle (I–VI 0 temporal development with I = (pre-)historic phase and VI = modern application).

arbeitet diese Veröffentlichung eine umfassende Definition des Begriffes des Geo- und Umweltmonitoring, um so den aktuellen technischen Herausforderungen (u. a. Verfügbarkeit von Werkzeugen, Geodaten) gerecht zu werden.

So zeigt die Entwicklung der Überwachung, dass hier eine kontinuierliche Weiterentwicklung stattgefunden hat. Nach der Frühphase von Fund und Sammlung/Nutzung zeigte Georg Agricola in seinem grundlegenden Handbuch des Berg- und Hüttenwesens „De re metallica“ erstmalig die Betreiberverantwortung und das Geomonitoring auf (Abb. 1: I–II; [Agricola 1556](#)). Insbesondere im ersten Buch mit der Überschrift „Vom berg- und hüttenmännischen Beruf und seinem Nutzen“ befasst Agricola sich mit den Argumenten der bergbaukritischen Öffentlichkeit. Seine Analyse zu den bergbauinduzierten Schäden in der Umwelt und dem Nutzen, den bergbauliche Aktivitäten in der Gesellschaft stiften, kann als Ansatz zu einem Geomonitoring und Risikomanagement verstanden werden. Die weitere zeitliche Entwicklung und die Etablierung eines Bergrechts führten zur Notwendigkeit der Überwachung und mündeten im Bundesberggesetz und den entsprechenden Verordnungen (u. a. [Markscheider-Bergverordnung 2020](#); Abb. 1: III–V; [BBergG 1980](#)). So zeigt sich, dass die Erkenntnisgewinne aus den Bereitstellungsprojekten über die Jahrhunderte in die Erweiterung der Aspekte des bergbaulichen Lebenszyklus aufgenommen und einzelne Erkenntnisse nicht mehr isoliert betrachtet wurden. So wurden beispielsweise Maßnahmen zum Geomonitoring implementiert (Abb. 1: III–V). Die hier im Schwerpunkt liegenden geowissenschaftlich-technischen Faktoren, also die geomontanen Fragestellungen, wie zum Beispiel Bodenbewegungen oder Vernässungen, werden mittels des Monitorings auf abiotische und biotische Veränderungen an der Tagesoberfläche, aber auch im Untergrund, überwacht. Moderne Entwicklungen setzen diese Überwachung zusätzlich in den Kontext der veränderten klimatologischen Bedingungen und erweitern das Geomonitoring hin zum Umweltmonitoring (Abb. 1: VI). Auch führt die Vernetzung dazu, dass die Erkenntnisgewinne unmittelbar auf die Folgeprojekte zur Bereitstellung von Georessourcen übertragen werden (Abb. 1: VI). So zeigt sich, dass nach den frühen Phasen der Bereitstellung von Georessourcen ohne eine direkte Überwachung, heute das Geo- und Umweltmonitoring ein integraler Bestandteil des bergbaulichen Lebenszyklus ist.

Daher sind verschiedene Werkzeuge mit einer unterschiedlichen räumzeitlichen Auflösung und Genauigkeit anzuwenden, die über den Prozess der Überwachung adaptiert

werden. Hieraus lässt sich ein Chancen-Risiko-Management für einen Standort entwickeln. Das sich daraus ableitende Prozessverständnis kann auch für unterschiedliche Beteiligungsformate zur Einbindung der Öffentlichkeit genutzt werden. Ein mögliches Ziel ist, nach Beendigung der Bereitstellung von Georessourcen wieder eine naturnahe Kulturlandschaft zu schaffen. Nur durch die zyklische Betrachtung des Geo- und Umweltmonitorings können die über den Prozess gewonnenen Erkenntnisse wieder in neuen Projekten genutzt und somit der nachbergbauliche Einfluss minimiert werden (Abb. 1: VI, mit der Entwicklung von Stufe 1 zur Stufe 2, Stufe n).

2. Herausforderungen im Lebenszyklus von Georessourcen

Der Begriff der Georessourcen umfasst alle energetischen und nicht-energetischen Rohstoffe, das Medium Wasser sowie die Geothermie. Die Nutzung von Georessourcen ist systemimmanent bezogen auf das Leben von Menschen und die Funktionsfähigkeit von Volkswirtschaften. Aus aktueller Sicht ist auf die Dynamik hinzuweisen, die mit der zunehmenden Weltbevölkerung, der Globalisierung und der Bekämpfung des Klimawandels verbunden ist ([Goerke-Mallet & Melchers 2022](#)). Mit der Formulierung der Agenda 2030 durch die Vereinten Nationen und den 17 Zielen der nachhaltigen Entwicklung haben sich die Rahmenbedingungen der Bereitstellung von Georessourcen substanziell verändert. Auf die sich im Lebenszyklus von Georessourcen ergebenden Herausforderungen muss zwingend reagiert werden. Die sich vollziehenden Prozesse sind im Sinne einer verbesserten Umsetzung und einer erweiterten Definition des Geo- und Umweltmonitorings zu analysieren.

Die aktive und ehemalige Bereitstellung von Georessourcen bedeutet einen vielfältigen Eingriff in die Umwelt- und Kulturlandschaft. Die dadurch verursachten Veränderungen stellen geomontane Herausforderungen im untertägigen Bereich, an der Tagesoberfläche und in der Atmosphäre dar. Alle Veränderungen bedeuten eine langfristige, jedoch sich ständig wandelnde Auswirkung über die aktive Bereitstellung von Georessourcen hinaus und stellen somit ein inhärentes Risiko für den Menschen dar. Die Vielzahl der geomontanen Herausforderungen ist aber für die unterschiedlichen Formen in der Bereitstellung von Georessourcen, wie zum Beispiel von Kohle- bis zu Bergwerken für Fluidbergbau, oftmals vergleichbar ([Goerke-Mallet et al. 2017](#); Tab. 1). Die hieraus sich ableitenden sozioökonomischen Einflussgrößen sind ebenfalls sehr weitreichend, aber nicht Teil dieser technischen Betrachtung.

Eine typische Herausforderung in der aktiven Bereitstellung von Georessourcen ist die Flächeninanspruchnahme (z. B. über eine Fläche von mehreren Quadratkilometern) und der damit verbundene Einschnitt in die Landnutzung und die Veränderung der Kulturlandschaft (Veränderung von Geo-/Ökosystemen). Oft erfolgt die Flächeninanspruchnahme über lange Zeiträume (Jahrzehnte bis Jahrhunderte). Während der gesamten Nutzungszeit können jedoch auch

Tab. 1: Alphabetische Darstellung der geomontanen Herausforderungen für die unterschiedlichen Unternehmen im Georessourcen-Lebenszyklus (nach Goerke-Mallet et al. 2017).

Table 1: Alphabetical representation of geomontane challenges for different producers in the georesources life cycle (after Goerke-Mallet et al. 2017).

	Kohle- bergbau		Minera- lischer Bergbau		Fluidbergbau				
	Steinkohle	Braunkohle	Erze	Industriemineralien	Erdöl, Erdgas	Untergroundspeicherung	Sole	Steine-/Erden-Bergbau	Geothermie
Altbergbau (u. a. Pingen, Kuhlen, tagesnaher Abbau)	++	+	++	+	+	+	+	+	
Altlasten/Bodenbelastungen	++	++	++	++	++		++	+	
Ausgasungen	++			+	++				
Belastung Grundwasser	++	++	++	++	++		++		
Belastung Vorfluter	++	++	++	++	++		++		
Bodenbewegungen (Hebung und Senkungen)	++	++			+	+	+	+	+
Bohrlochintegrität (Langzeitintegrität)	+	+		+	++	++	++		++
Böschungsstabilität	+	++	++	++				++	
Einleitstellen von bergbaulich-beeinflusstem Wasser (Anpassung der Umwelt)	++	++		++				+	
Geochemische Umwandlung des beibrechenden Materials (u. a. Sekundärminerale)	+	+	++						
Geochemische Umwandlung (unter Tage)	+		+		+	++			
Grubenwasser	++		++						
Grundwassergewinnung (Prozesswasser)	+	+	+	+			++		
Halden	++	++	++	++				++	
Lagerstättenintegrität					+	+	+		+
Lineare Infrastruktur (u. a. Feldleitungen)		++			++	++	++		
Microseismizität	++			++	+	+	+		++
Offene Wasserflächen (Vernässungen, Senkungsseen, Flutungssee)	++	++						++	
Pflanzengesundheit	++	++	++	++	+	+	+	++	
Polder und Wasserhaltung für Oberflächengewässer, Grundwasser	++								
Natürliche Radioaktivität			++						
Schlammgruben (Tailing Storage Facilities), Bohrschlammgruben	++	+	++		+	+	+		
Staub	++	++	++	++				++	
Störungen, Unstetigkeiten, Ausbisslinien, Erdfälle	++	+	+	++	+	+	+	+	
Tagesanlagen	++	++	++	++	++	++	++	++	+
Tagesbruch	++		+	+					
Tagesöffnungen (u. a. Schächte, Bohrungen)	++				+	+	+		
Veränderung der Landnutzung	++	++	++	++	+	+	+	++	
Verfüllstrecken in Bohrungen					+	+	+		+
Wasserhaltung/ Entwässerung	++	++	++	+				++	

Legende:

+ beeinflusst

++ stark beeinflusst

rot Einfluss von Klimawandel (u. a. Starkregen, Dürre)

Prozesse auftreten, die kleinräumig in kurzer Zeit ablaufen und zyklisch auftreten. Als Beispiel sind die Bodenbewegungen (als Senkungen) im aktiven Betrieb (im Steinkohlebergbau: [Kratzsch 2013](#); in der Geothermie: [Sekiawan et al. 2016](#)) und Hebungen an der Tagesoberfläche im Wiederanstiegsprozess des Grubenwassers ([Melchers et al. 2019](#)) zu nennen.

Die Betrachtung der Ressource Wasser als geomontane Herausforderung umfasst noch weitere zentrale Aspekte. In der aktiven Bereitstellung von Georessourcen muss der operative Betrieb mittels Wasserhaltungen möglich gemacht und die beeinflussten Gebiete trockengehalten werden. Gleichzeitig müssen die anfallenden Wassermengen transportiert, aufbereitet und in Vorfluter abgeschlagen werden ([Wolkersdorfer & Mugova 2022](#)). Auch wird für die unterschiedlichen Gewinnungs- und Verarbeitungsketten Prozesswasser benötigt, das nach der Nutzung über den gleichen Prozessweg in die Vorflut geführt wird. Zudem kann es bei einem unsachgemäßen Umgang mit Georessourcen und deren Ver-

arbeitungsrückständen zu Verunreinigungen und Belastungen der Ressource Wasser kommen. Insbesondere stellen die Belastungen von Grundwasser und Vorflutern abstromig von „Tailing Storage Facilities“ (TSF; [Flores et al. 2021](#)) große Georisiken dar.

Ferner können in der Endphase der Bereitstellung von Georessourcen geomontane Herausforderungen entstehen. Hierzu gehört das Versagen von technischen Installationen und Sicherungen, wie zum Beispiel Zementen als Teil von Füllsäulen/Verfüllabschnitte in Tiefbohrungen ([Tveit et al. 2021](#)) und Schächten ([Strzalkowski 2021](#)) sowie Tagesöffnungen ([Sahu & Lokhande 2015](#)). Zusätzlich führen geänderte gesetzliche und/oder technische Rahmenbedingungen dazu, dass bereits rückgebaute Standorte aus der Bereitstellung von Georessourcen, zum Beispiel dauerstandsichere Füllsäulen, wieder aufgewältigt werden müssen. Auch können aktualisierte Risikobewertungen dazu führen, dass Sanierungen und Sicherungen durchgeführt werden müssen, um die Standortintegrität zu erhalten ([Welz 2017](#)). Diese Sa-



Abb. 2: Schachtkopfsanierung der RAG am Tiefbauschacht Alstaden 2 im Stadtgebiet Oberhausen.

Fig. 2: Shaft head rehabilitation by RAG at the Alstaden 2 underground shaft in the Oberhausen urban area.

nierungen werden umso aufwendiger je komplexer die vorgesehene Nachnutzung der Flächen, zum Beispiel im Stadtgebiet, ist (Abb. 2).

Neben den direkten geomontanen Herausforderungen aus dem eigentlichen Bereitstellungsprozess heraus ist zusätzlich die lokale Beeinflussung durch veränderte klimatische Bedingungen (u. a. veränderte Niederschlagsmengen) zu berücksichtigen (Rüttinger et al. 2020), die auch globale Einflüsse auf die geomontanen Aktivitäten hat (im nationalen Kontext wie Canada: Pearce et al. 2011) (Tab. 1). Die Verschiebung hin zu Extremereignissen mit niederschlagsarmen Zeiträumen bzw. Starkregen-Ereignissen (Liu & Song 2019) führt zu Sonderaufgabestellungen für das Monitoring und dementsprechend auch für die dafür erforderlichen Werkzeuge, die die jeweiligen Einflussgrößen differenzieren zu können.

3. Werkzeuge des Geo- und Umweltmonitorings

Aufgrund der geomontanen Herausforderungen ist es wichtig, dass die Entwicklung eines Monitoring-Programms vor der eigentlichen Inanspruchnahme von Georessourcen durchgeführt wird (sogenannte Nullmessung). Hier sind die Aspekte des Geo- und Umweltmonitorings zu berücksichtigen (Spektrum 2000; Baldenhofer 2022).

Durch den frühzeitigen Einsatz von Monitoringwerkzeugen ist der ursprüngliche, d. h. unbeeinflusste Zustand des Standortes mittels Geodaten zu dokumentieren. Aufgrund der hohen Komplexität des ganzheitlichen Monitorings ist auch zu berücksichtigen, dass ein Monitoring-Programm auf Basis des Erkenntnisgewinns über die Zeit der Bereitstellung von Georessourcen kontinuierlich iteriert, angepasst und weiterentwickelt werden muss. Die Konzeption eines Monitoring-Programmes besteht somit aus mehreren Schritten:

1. Definition des Ziels des Monitorings in Integration mit übergeordneten Zielen (z. B. behördliche und gesetzliche Genehmigungen, gesellschaftlich akzeptierte Vorgaben, äußere Einflussfaktoren wie bspw. der Klimawandel).
2. Festlegung der notwendigen Beobachtungsroutinen, -zeiträume (Regelmäßigkeit und Dauer), der Flächengröße und des Minimums der räumlichen Auflösung, unter Berücksichtigung der räumlich-zeitlichen Variation des Monitoringziels.
3. Auswahl geeigneter Methoden und Werkzeuge und Definition der Konnektivität zwischen den Methoden und Festlegung von führenden Methoden (z. B. markscheiderische Vermessung) unter Berücksichtigung von unternehmerischen Standards, Richtlinien und (Handlungs-) Empfehlungen.
4. Definition von Schwellwerten und Grenzwerten zur Bewertung der Monitoringergebnisse.
5. Definition von Aktions- und Reaktionsprozessen zur Rückkopplung in der Bereitstellung von Georessourcen (z. B. zeitliche Verzögerung in der Grundwassersümpfung von Tagebauen zur Verhinderung weiterer Bodenbewegungen).

Als Fundament für ein Monitoring-Programm sind statische und zum Teil öffentliche Basis-(Geo-)Daten zusammenzustellen und aufzubauen, die auch mit historischen Geodaten und/oder Archivdatensätzen, die gegebenenfalls unter modernen Gesichtspunkten in Geoinformationssystemen überarbeitet werden müssen, zu erweitern sind. Ebenfalls sind die operativen (Geo-)Daten aus der unternehmerischen Nutzung zu integrieren. Gegebenenfalls ist auch eine Erweiterung um kommerzielle Geodaten (u. a. räumlich hochauflösende Fernerkundungsdaten) notwendig.

Mit diesen Grundlagen erfolgt der eigentliche Aufbau eines Monitoring-Programms in mehreren Anwendungsphasen. Hierbei gilt es, das Programm kontinuierlich nach den aktuellen Arbeitsplänen und den laufenden Aktivitäten in der Bereitstellung von Georessourcen anzupassen (Rudolph 2019):

1. Erkundungsphase, mit der Anwendung der initial festgelegten Methoden über kurz- bis mittelfristige Zeiträume.
2. Erschließungsphase, mit der Auswertung der Ergebnisse der initialen Methoden und Anpassung und/oder Erweiterung der Methoden über mittelfristige Zeiträume.
3. Produktionsphase, mit der optimalen Anwendung und Integration der Methoden über mittel- bis langfristige Zeiträume.
4. Abschlussphase, ggf. mit Reduktion der Methoden auf ein notwendiges (genehmigungs-)rechtliches und technisches Minimum über langfristige Zeiträume und die finale Beendigung des Geomonitorings.

Beim Geo- und Umweltmonitoring sind eine Vielzahl an direkten und indirekten Methoden anzuwenden (Abb. 3). Alle Methoden decken unterschiedliche Aspekte in

- zeitlicher Auflösung und Abdeckung,
- räumlicher Auflösung und Abdeckung,
- Messauflösung und -bereich sowie
- Genauigkeiten (Präzision)

ab und liefern somit kein gesamtheitliches Monitoringergebnis.

Durch die Integration der Ergebnisse der einzelnen Phasen entwickelt sich ein Monitoringkreislauf, der dann in einem gesamtheitlichen Prozessverständnis mündet (Abb. 1: VI). Mit diesen Ergebnissen entsteht eine Risikobeurteilung, um die geomontanen Herausforderungen bearbeiten und steuern zu können. Somit erfolgt auch eine Inwertsetzung der Basis-(Geo-)daten hin zu Monitoring-Geodaten.

Im Kontext der Festlegung der führenden Methode während der Bereitstellung von Georessourcen ist der rechtliche Rahmen zu berücksichtigen. Hierzu wird in der Bundesrepublik Deutschland der Rechtsrahmen durch das Bundesberggesetz (BBergG 1980) geschaffen. Insbesondere für Gewinnungsbetriebe sieht das Bundesberggesetz die Führung eines Risswerks durch einen Markscheider (Bergvermessungsingenieur/Bergnotar) vor, der von der zuständigen Behörde anerkannt sein muss. Im Rahmen seines Geschäftskreises kann der Markscheider Tatsachen mit öffentlichem Glauben bekrunden. Die bergbaubezogene Arbeit des Markscheiders ist mit der Tätigkeit des Öffentlich bestellten Vermessungsingenieurs (ÖbVI) vergleichbar. Neben öffentlichen Aufga-

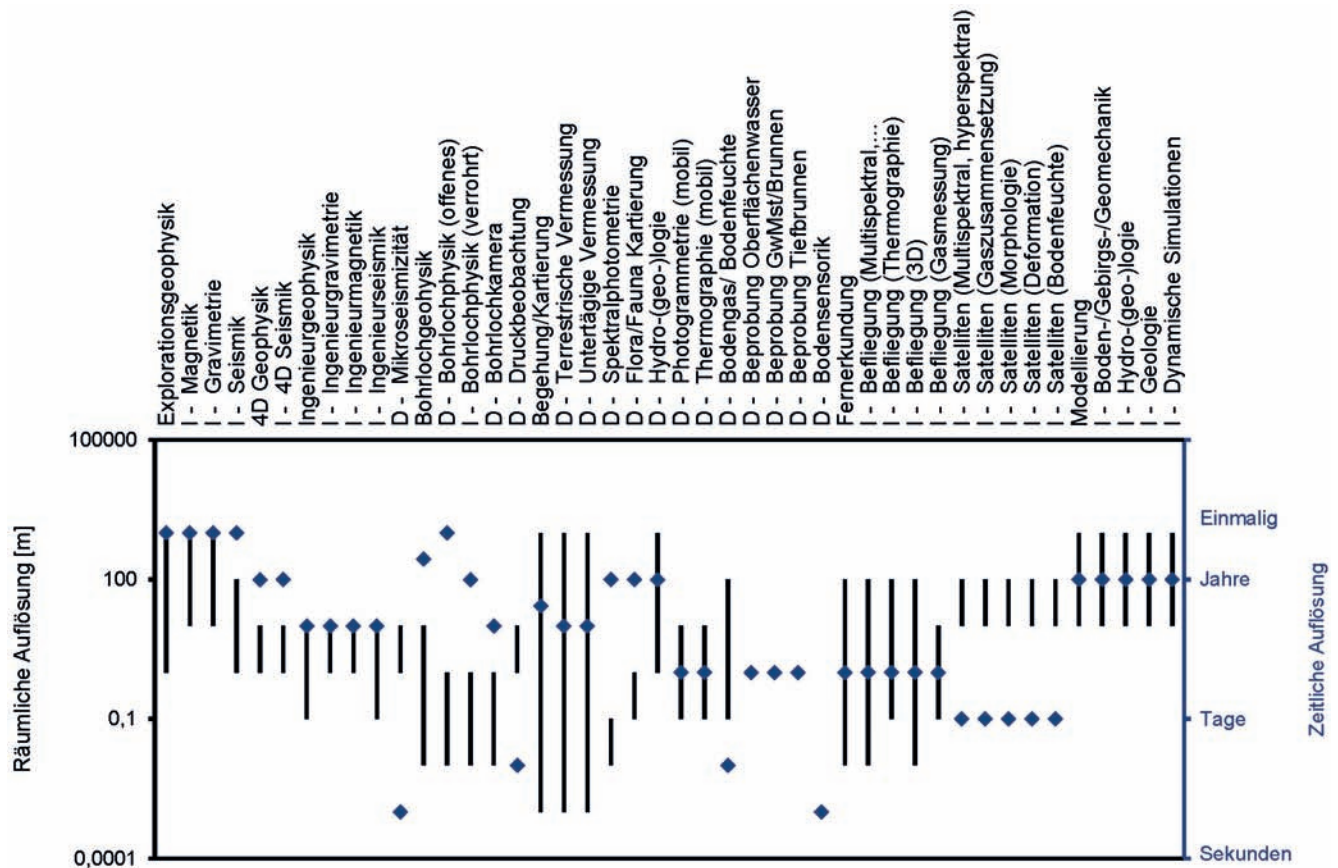


Abb. 3: Darstellung der räumlichen und zeitlichen Auflösung der unterschiedlichen Methoden des Geo- und Umweltmonitorings. Schwarze Linie = Bandbreite der räumlichen Auflösung; blaue Raute = zeitliche Auflösung; I = indirekte Methoden; D = direkte Methode.

Fig. 3: Illustration of the spatial and temporal resolution of the different methods of geo- and environmental monitoring. Black line = width of the spatial resolution; blue diamond = temporal resolution; I = indirect methods; D = direct method.

ben (u. a. Grundstücksvermessung) nimmt der ÖbVI auch privatrechtliche Aufgaben aus dem Bereich der Ingenieur-geodäsie wahr. Dies gilt auch für den Markscheider, der als Angestellter eines Bergbauunternehmens u. a. Bergschäden reguliert, Genehmigungsverfahren führt und Aufgaben in der Öffentlichkeitsarbeit wahrnimmt.

Die vom Markscheider im Risswerk vorgenommene Dokumentation des gesamten bergbaulichen Geschehens über und unter Tage stellt eine besondere Form des Geomonitorings dar, es wird sozusagen just-in-time durchgeführt. Das Risswerk gewährleistet einen langfristigen Zugang zu den dokumentierten Informationen, da es nach Einstellung des Betriebes bei der zuständigen Behörde (Bergbehörde) dauerhaft einsehbar archiviert wird. Tatsächlich hat Deutschland, von wenigen anderen Ländern abgesehen, hier ein Alleinstellungsmerkmal, dass seine Qualitäten aus der Sicht der Öffentlichkeit gerade in der Nachbergbauphase entwickelt. Die in der operativen bergbaulichen Phase generierten markscheiderischen Informationen zu Bodenbewegungen, Bergehalten, Unstetigkeiten und potenziell bruchauslösendem Bergbau haben nach der Stilllegung des Bergwerks für die öffentliche Sicherheit eine erhebliche Relevanz.

Neben der Integration der markscheiderischen Vermessung im Geo- und Umweltmonitoring ist es zusätzlich immer notwendig, dass direkte und indirekte Methoden kombiniert werden. Nur durch die Kombination von Vor-Ort Messungen mit indirekten Methoden sind aussagekräftige Interpretationen möglich. So ist beispielsweise die indirekte Ableitung der Bodenfeuchte mittels der Radar-Fernerkundung nur durch punktuelle, quasi-kontinuierliche Vor-Ort Messungen der Bodenfeuchte und einer hydro-(geo-)logischen Begehung und Kartierung validierbar.

4. Fusion von nachbergbaulichen Geodaten – Ergebnisse aus dem Ruhrgebiet

Der Mehrwert der Fusion von verschiedenen Monitoring-Geodaten lässt sich durch die Erfahrung mit mehreren Projekten vom FZN an der THGA zeigen. Im Projekt „DigitalTwin – Integriertes Geomonitoring“ werden für einen ehemaligen Standort der Gewinnung von Georessourcen die modernen Interpretationen, in Form von geologi-



Abb. 4: Verschiedene Ebenen der Datenintegration im Projekt DigitalTwin (nach Pawlik et al. 2022b).

Fig. 4: Different levels of data integration in the DigitalTwin project (after Pawlik et al. 2022b).

schen Modellen zum Deckgebirge oberhalb der Lagerstätte mit den Methoden der Multispektralanalyse aus Kopter- und Satellitendaten kombiniert. So entsteht ein räumlicher, digitaler Zwilling („Spatial Digital Twin“, SDT) für einen Nachbergbaustandort. Die Studie „Climate Change – Monitoring und Management (C2M2)“ überprüft die Machbarkeit der Fusion von bodenstationären Sensoren, Satellitendaten und Luftbildaufnahme mittels Kopterbefliegung im Bereich der Polderbewirtschaftung von bergbaulich-beeinflussten Gebieten. Das Projekt „Multisensorale Erdbeobachtung für ein nachhaltiges Poldermanagement (MUSE)“ greift die Ansätze auf und liefert hier tiefere Erkenntnisse in der zusätzlichen Anwendung der Radar-Fernerkundungsdaten.

Das Projekt „Digital-Twin – Integriertes Geomonitoring“ entwickelt eine Forschungsmethodik für das Geomonitoring von Bergbaufolgeprozessen am Beispiel des stillgelegten Steinkohlenbergwerks Prosper-Haniel (nördlich der Stadt Bottrop). Ein wichtiger Aspekt beim Geomonitoring von Bergbaufolgelandschaften ist der Einsatz und die Integration von modernen Forschungsmethoden, die es ermöglichen, die Ursachen für im Rahmen von Beobachtungen erfassten Phänomene zu analysieren. Denn im Untersuchungsgebiet er-

folgte die untertägige Gewinnung von energetischen Rohstoffen, und es erfolgt immer noch die tagesnahe Gewinnung von Sand und Kies sowie die Bewirtschaftung des Grundwassers.

Das Projekt fusioniert die Daten aus Satellitenbeobachtungen von ESA und NASA sowie aus eigenen Kopterflügen, sowie aufgearbeiteten geologischen und bergbaulichen Daten zum Untergrund, die möglichst über die gesamte Dauer der Bergbautätigkeit sowie die Nachbergbauphase gesammelt werden. Die Abb. 4 zeigt das Prinzip des für dieses Projekt vorgesehenen Geomonitorings durch die Integration von mehreren Ebenen. Aufgrund der Komplexität der Fragestellung durch die Zusammenführung von unter- und über-tätigen Ansätzen ist es auch notwendig Expertenwissen aus vielfältigen Bereichen einzubinden.

Beim Aufbau eines statischen Untergrundmodells sind das markscheiderische Risswerk, Daten zur geologischen Erkundung des Untergrundes und Bohrlochberichte sowie geo- und petrophysikalische Messungen zu berücksichtigen. Durch die Kopplung dieser Daten mit modernen Methoden, wie beispielsweise mobilen GIS-Anwendungen ist es möglich, die bereits gewonnenen Ergebnisse vor Ort zu überprü-

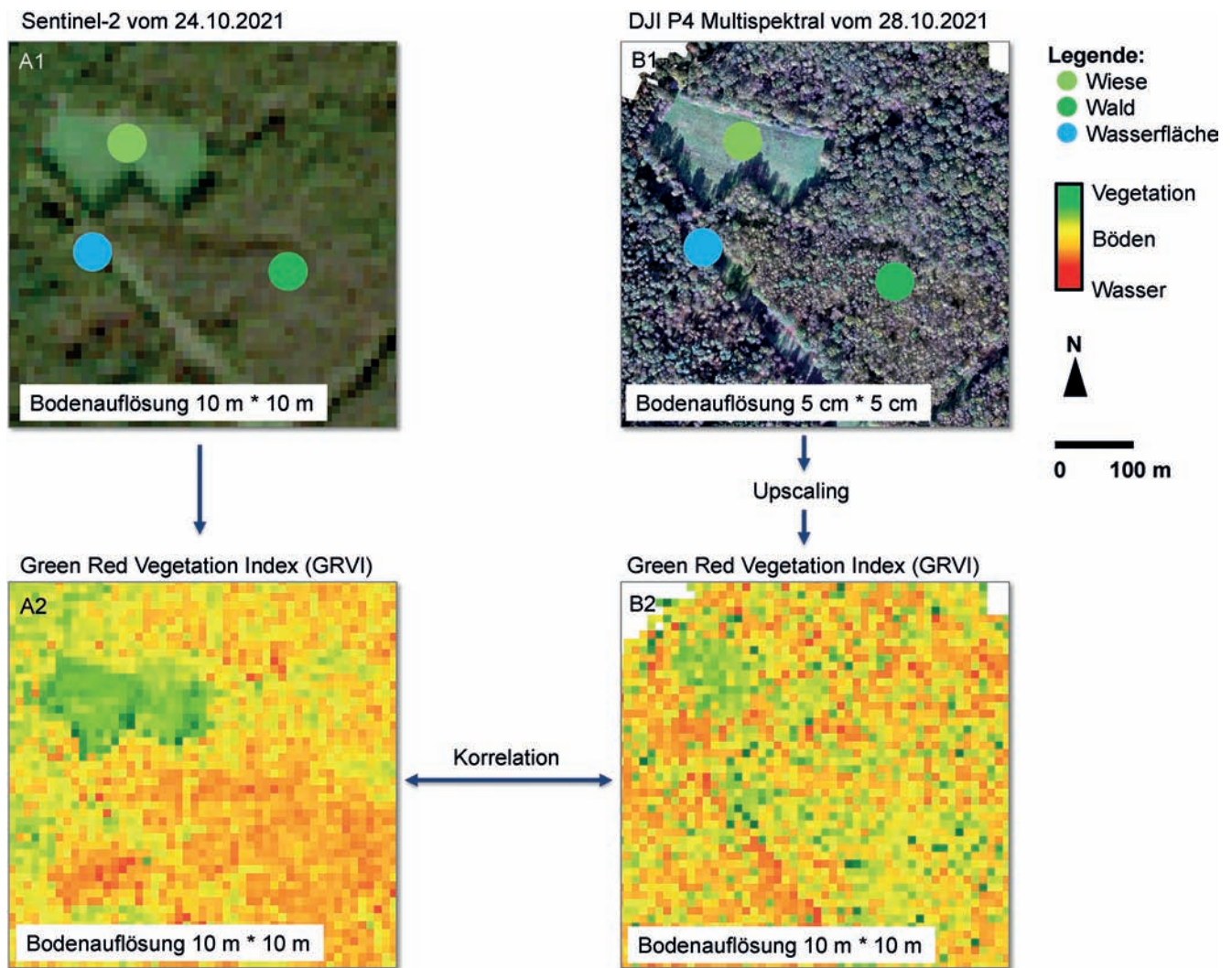


Abb. 5: Upscaling und Korrelation von Kopter- und Satellitendaten (nach Pawlik et al. 2022a).

Fig. 5: Upscaling and correlation of copter and satellite data (after Pawlik et al. 2022a).

fen und Veränderungen an der Erdoberfläche durch sich wiederholende Aufnahmen zu dokumentieren (Abb. 4).

Hierbei ist eine umfassende Integration und ein Upscaling von Geodaten, insbesondere der Befliegungsdaten, notwendig. Diese Kopplung ist notwendig, um beispielsweise kleine, sich in der Entstehung befindliche Wasserflächen (z. B. Senkungsseen), zu identifizieren, die ansonsten aufgrund des Baumbewuchses und der Auflösung der Satellitenfernerkundungssysteme nicht erkennbar wären (Abb. 5). Auch ist die Kopplung notwendig, um dominante multispektrale Rückstreuung in den unterschiedlich aufgelösten Sensoraufnahmen zu identifizieren.

Die Machbarkeitsstudie „Climate Change – Monitoring und Management (C2M2)“ greift diese Grundlagen auf und zeigt wie die Fusion der Methoden aus Kopterbefliegungen, Satellitenfernerkundung, In-situ-Messungen und Vor-Ort-Expertenwissen zum Erfolgsmonitoring von Renaturierungsmaßnahmen genutzt werden kann. Durch eine Renatu-

rierung soll die Wasserführung so wiederhergestellt werden, dass auf die Fauna und Flora möglichst wenig Einfluss genommen wird und sich die Landschaft auf natürliche Weise einstellt. Ob dazu genügend Wasser aus dem Einzugsgebiet über die lokalen Vorfluter geliefert wird und mit welcher Dynamik das geschieht, ist aktuell nicht klar. Das Ziel dieser integrierten Studie war es, mittels der Zeitreihenanalysen Analysen zu Veränderungen in der Bodenfeuchte durchzuführen. Die Herausforderung der Machbarkeitsstudie liegt in der unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Auflösung und Abdeckung sowie der unterschiedlichen Messauflösung der angewendeten Methoden. In diesem Zusammenhang wurde betrachtet, wie Wetter bedingte Dürreperioden und Starkregenereignisse Renaturierungsmaßnahmen beeinflussen (Bernsdorf et al. 2022). Die Dynamik wird sich langfristig durch die veränderten Wetterbedingungen ändern, reagiert jedoch auch kurzfristig auf Extremereignisse wie Starkregen oder Dürreperioden.

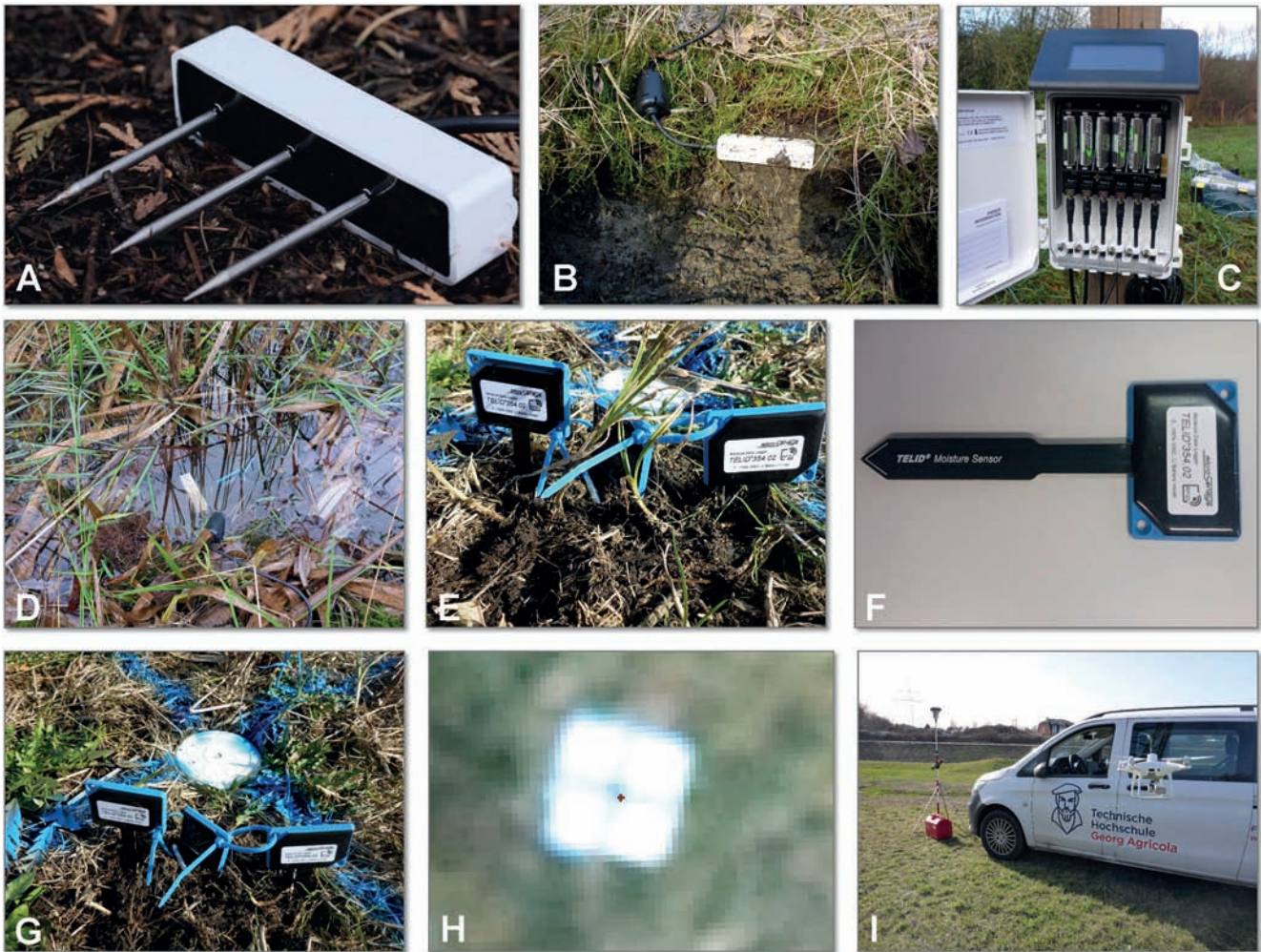


Abb. 6: Bodenfeuchtesensoren im Projekt C2M2. Details siehe Kapitel 4.

Fig. 6: Soil moisture sensors in the C2M2 project. For details see chapter 4.

Auch wurden in der Studie die bergbaulichen Einflüsse für das Gebiet des Vorfluters Boye (nördlich der Stadt Bottrop) und deren Wechselwirkungen mit dem Renaturierungserfolg durch die Kombination von Monitoringmethoden aus verschiedenen Ebenen betrachtet. Der Vorfluter Boye entspringt in der Kirchheller Heide und mündet nach mehreren Kilometern in den Fluss Emscher. Für mehrere für die Wasserwirtschaft repräsentative Gebiete entlang der Boye wurden Vor-Ort Sensoren zur Aufzeichnung der Bodenfeuchte ausgelegt. Zusätzlich wurden monatliche Multispektral-Sensor-Kopterbefliegungen (RGB, nahes Infrarot, thermisches Infrarot) durchgeführt und diese mit Sentinel-1- (Bodenfeuchte) und Sentinel-2- (multispektral) Datensätzen verschnitten. Zusätzlich wurden die Gebiete bodenkundlich und hydrologisch kartiert.

Im Rahmen der Validierung der Fernerkundungsdaten wurden in dieser Machbarkeitsstudie Bodensensoren ausgelegt (Abb. 6). Hierbei kamen an zentralen Standorten die Teros-Sensoren der Firma Meter zum Einsatz (Abb. 6: A–C), wohingegen im flächigen Einsatz die Telid-Sensoren der

Firma Microsensys genutzt wurden (Abb. 6: D–F). Die Telid-Sensoren sind preisgünstig und haben einen kleinen Datenlogger, der mittels eines NFC-Lesekopfes ausgelesen werden kann. Alle Sensoren waren IP68-klassifiziert, sodass lokale Überschwemmungsereignisse kein Problem dargestellt haben (Abb. 6: D). Von beiden Sensortypen wurden die Parameter Bodenfeuchte und Bodentemperatur in einem 6-Stunden-Intervall gemessen. Alle Sensoren wurden geodätisch eingemessen und in das geodätische Landesnetz eingehängt, um so Bezugspunkte für die Kopterbefliegungen und die Fernerkundungsdaten zu haben (Abb. 6: G–I). Damit wurde auch die Vergleichbarkeit der sich wiederholenden Kopterbefliegungen sichergestellt.

Die Interpretation der Messergebnisse zeigt, dass die Vor-Ort Analyse ein zentrales Werkzeug für die Auswertung der Fernerkundungsdaten ist. Eine besondere Herausforderung stellt hierbei das Upscaling der Messergebnisse der Bodenfeuchtesensoren dar, um repräsentative Messwerte für die monatlichen Kopterbefliegungen zu erzielen (Abb. 7). Es zeigte sich, dass die Bodenstrukturen als Bodentyp sehr ho-

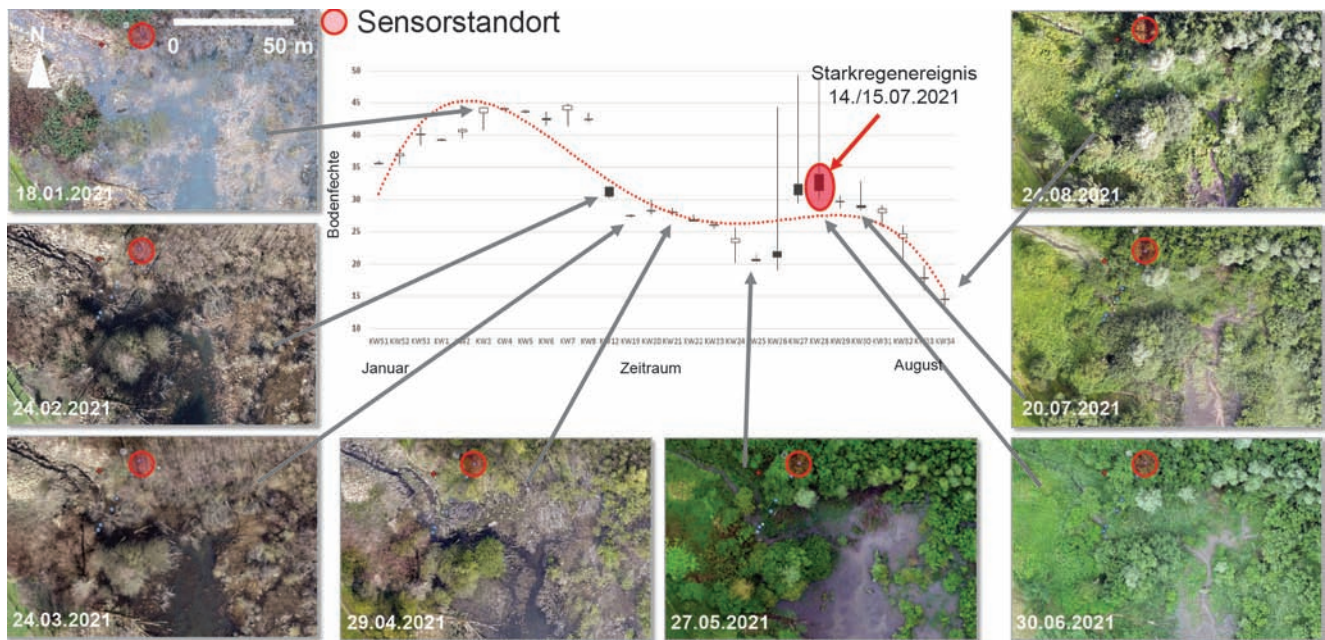


Abb. 7: Darstellung der zusammengefassten Bodenfeuchtesensoren und Vergleich mit den Ergebnissen der monatlichen Kopterbefliegungen für ein Arbeitsgebiet.

Fig. 7: Plot of summarised soil moisture sensors and comparison with the results of the monthly copter aerial surveys for one working area.

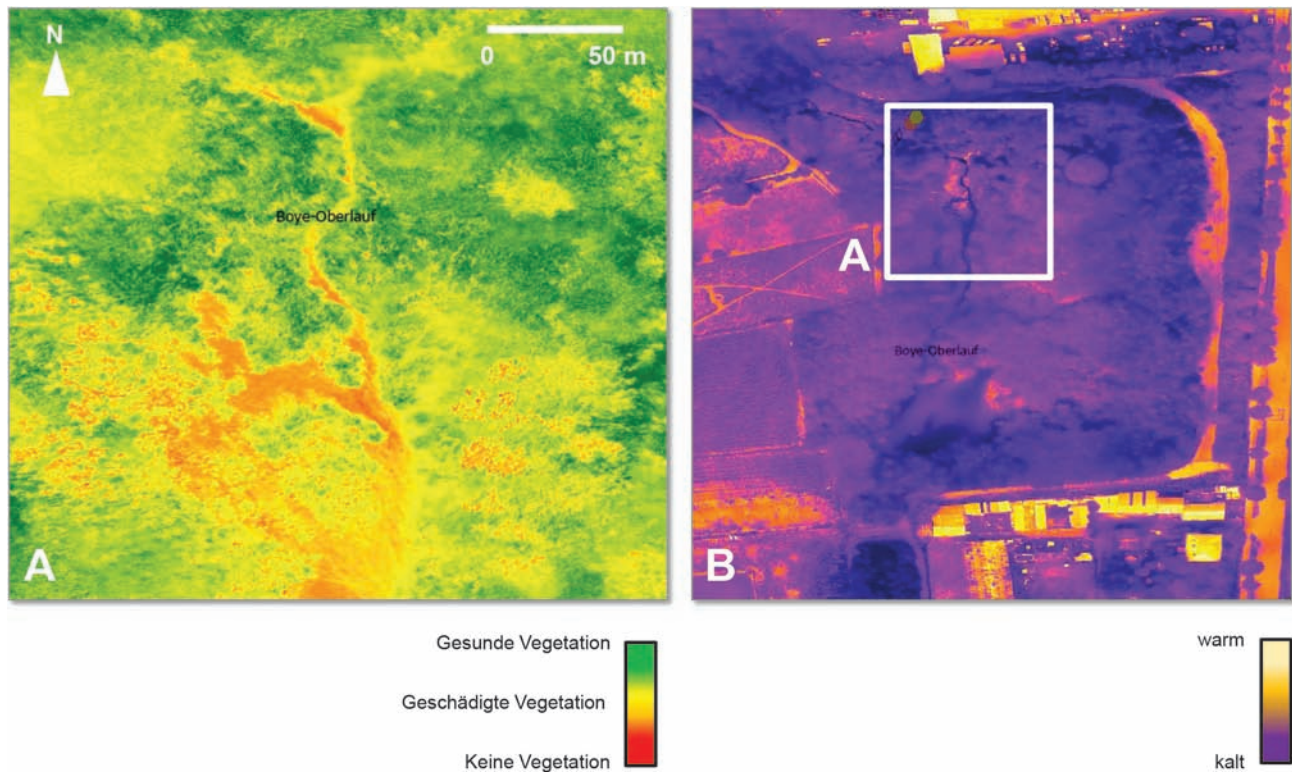


Abb. 8: Vergleichende Darstellung des Vegetationsindex (A) und einer Thermographiebefliegung (B) vom September 2021 für ein Arbeitsgebiet (nach Bernsdorf et al. 2022).

Fig. 8: Comparative plot of vegetation index (A) and a thermographic survey (B) from September 2021 for one working area (after Bernsdorf et al. 2022).

mogen sind, aber großen lokalen Veränderungen (z. B. Wurzelgänge, Spuren des Edaphons) unterliegen, sodass eine einfache Extrapolation in die Fläche nicht möglich ist. Aus dem Vergleich der optischen Luftbilder mit den Sensor-gestützten Aufnahmen im nahen Infrarot und thermalen Infrarot zeigten sich sehr deutlich die Heterogenitäten des Bodens und der Vegetation (Abb. 8). So kann ein erhöhter Wassergehalt im Boden durch das abweichende thermische Verhalten deutlich gemacht werden (Abb. 8B, hellere Farben im Bildzentrum von Kasten A).

Das Projekt „Multisensorale Erdbeobachtung für ein nachhaltiges Poldermanagement (MUSE)“ vertieft die Datenfusion und nutzt hierbei insbesondere die Werkzeuge der Radarfernerkundung, um so mittels Zeitreihenanalysen flächige Aussagen zu Bodenfeuchteveränderungen treffen zu können. Dies ist insbesondere in bergbaulich induzierten Polderregionen von Interesse, da hier von zwei Seiten in den Wasserhaushalt eingegriffen wird. Auf der einen Seite erfolgt ein Management des Grundwassers und auf der anderen Seite ein Management der Vorfluter. Nur so lassen sich naturnahe Grundwasserflurabstände und die Abflussbedingungen aufrechterhalten. Im Kontext der veränderten Niederschlagsmengen stellt sich somit die Frage, inwieweit die Beanspruchung der hydro-(geo-)logischen Verhältnisse in der Wasserhaltung verändert werden kann. So hat das Projekt MUSE mehrere Zielsetzungen:

1. Multisensorale Erfassung der Umweltveränderungen in Poldergebieten.
2. Nutzung von Fernerkundungsdaten, Koptern und In-situ-Messungen/Sensoren sowie der aktuellen und historischen Bergwerksdokumentation und Kartenwerke.
3. Aufbau eines Prozessverständnisses zwischen Klima, Umweltzuständen und Poldergebieten.
4. Empfehlungen zur nachbergbaulichen Wasserhaltung im Kontext von veränderten klimatologischen Bedingungen (u. a. Niederschlagsmengen).

Das Untersuchungsgebiet umfasst das Bergsenkungsgebiet der Kirchheller Heide nördlich der Stadt Bottrop. In diesem Gebiet liegen unter anderem die beiden Senkungsseen Pfingstsee und Weihnachtssee (Abb. 9). Beide Seen entstanden Anfang der 2000er Jahre. Um nun die hydro-(geo-)logischen Einflussfaktoren zu verstehen, ist es wichtig, dass eine umfassende historische Analyse durchgeführt wird (Abb. 9: A–C), so müssen auch die ursprünglichen hydraulischen Verhältnisse verstanden werden (Abb. 9: B). Als Ausgangspunkt für die nachbergbaulichen Bedingungen in der Wasserhaltung muss zusätzlich die komplette Bergbauhistorie bekannt sein (Abb. 9: D). Auch müssen aktuelle Höhenmodelle, die die Bergbaubeeinflussung nachzeichnen, eingebunden werden, um die wirklichen morphologischen Veränderungen zu dokumentieren (Abb. 9: E).

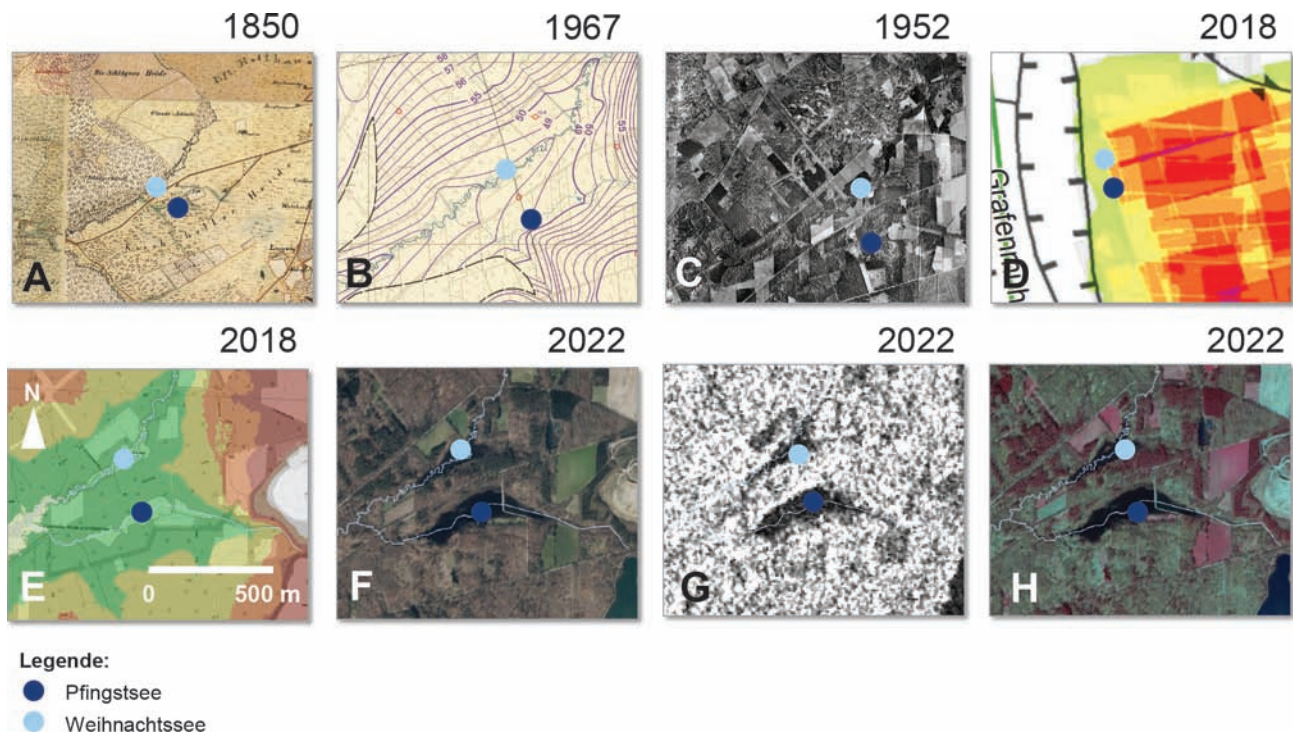


Abb. 9: Exemplarische Darstellung der genutzten Datensätze (Birk 1967; RAG AG & IHS 2018; RVR 2022; TIM-Online 2022). Details siehe Kapitel 4.

Fig. 9: Exemplary presentation of data sets used (Birk 1967; RAG AG & IHS 2018; RVR 2022; TIM-Online 2022). For details see chapter 4.

Mit dieser umfassenden Geodatengrundlage sind dann die Fernerkundungsdaten zu korrelieren und zu bewerten. Hierzu gehören Zeitreihenanalysen von optischen Sensoren mit digitalen Luftbildern aus der Landesbefliegung NRW (Abb. 9: F), Kartierungen von offenen Wasserflächen mittels Radar-Fernerkundung (Sentinel-1; Abb. 9: G) sowie multispektrale Auswertungen in Hinblick auf die Pflanzenvitalität (Abb. 9: H).

5. Interpretation

Die gezeigten Anwendungsbeispiele geben einen umfassenden Einblick in die Möglichkeiten des Geo- und Umweltmonitorings. Das Projekt „DigitalTwin – Integriertes Geo-monitoring“ zeigt, dass es auch nach der Beendigung der eigentlichen Bereitstellung von Georessourcen wichtig ist, noch einmal abschließend ein kombiniertes Unter-Tage- und Über-Tage-Verständnis aufzubauen. Die Fusion unterschiedlicher Datensätze in Raum und Zeit sowie der Integration von Methoden der Fernerkundung (Satellit und Kopter) zeigt, dass sich nur so abschätzen lässt, ob die Effekte an der Tagesoberfläche natürlichen oder bergbaulichen Ursprungs sind (Abb. 10). Nur so sind die Ursachen von Erscheinungen, wie zum Beispiel die Erdstufen und Diskontinuitäten, die sich beispielsweise in der Vegetation zeigen, interpretierbar (Abb. 4).

Die Abb. 10 zeigt eine räumlich unterschiedliche Bodenbewegung, wobei die geometrische Lage der Bodenbewegung in Abb. 10: A der strukturgeologischen Ausrichtung und damit der Darstellung in der geologischen Modellierung

entspricht. Somit gilt es zu beurteilen, ob die Bewegung im Umfeld (Abb. 10: B) eine geotechnische Ausgleichsbewegung oder ein lokales Phänomen ist. Bei diesem lokalen Phänomen könnte es sich auch um eine aufgrund des fehlenden Niederschlags bedingte Austrocknung handeln, die zu Stabilitätsproblemen im Bereich der Böschung führte. Ein Einfluss von einer tagesnahen Gewinnung von Sand und Kies konnte durch die Integration der Geodaten und eine Begehung im Umfeld ausgeschlossen werden.

Die Interpretation zeigt außerdem, dass sich die Komplexität der Effekte aus der Bereitstellung von Georessourcen nur durch die Fusion mit mehreren Methoden abbilden lässt (Tab. 2). Weiterhin wird deutlich, dass die Berücksichtigung von Klima- und Wetterdaten wichtig ist.

Das Projekt „Climate Change – Monitoring und Management (C2M2)“ geht in der Interpretation der Geodaten einen Schritt weiter und ermöglicht es für die kritische Georessource Wasser aufzuzeigen, wie ein Erfolgsmonitoring von Renaturierungsmaßnahmen von Vorflutern möglich ist. Durch die Fusion verschiedener raumzeitlicher Ebenen von Geodaten war es erstmalig möglich, für den Vorfluter Boye die Interaktion von Hydro-(geo-)logie mit der Tagesoberfläche und der Vegetation in bergbaulich beeinflussten Gebieten zu zeigen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Regionen von Vorflutern einem starken saisonalen Wandel unterliegen und hier die wiederholten Veränderungen in den Niederschlagsmengen einen unmittelbaren Einfluss haben.

Das Projekt zeigt auch erstmalig den Einfluss von Extremwetterereignissen auf kleine Vorfluter. So konnte ein starker Sedimentaustrag (helles Sediment auf dem Gewässerboden) aufgrund eines Starkregenereignisses am

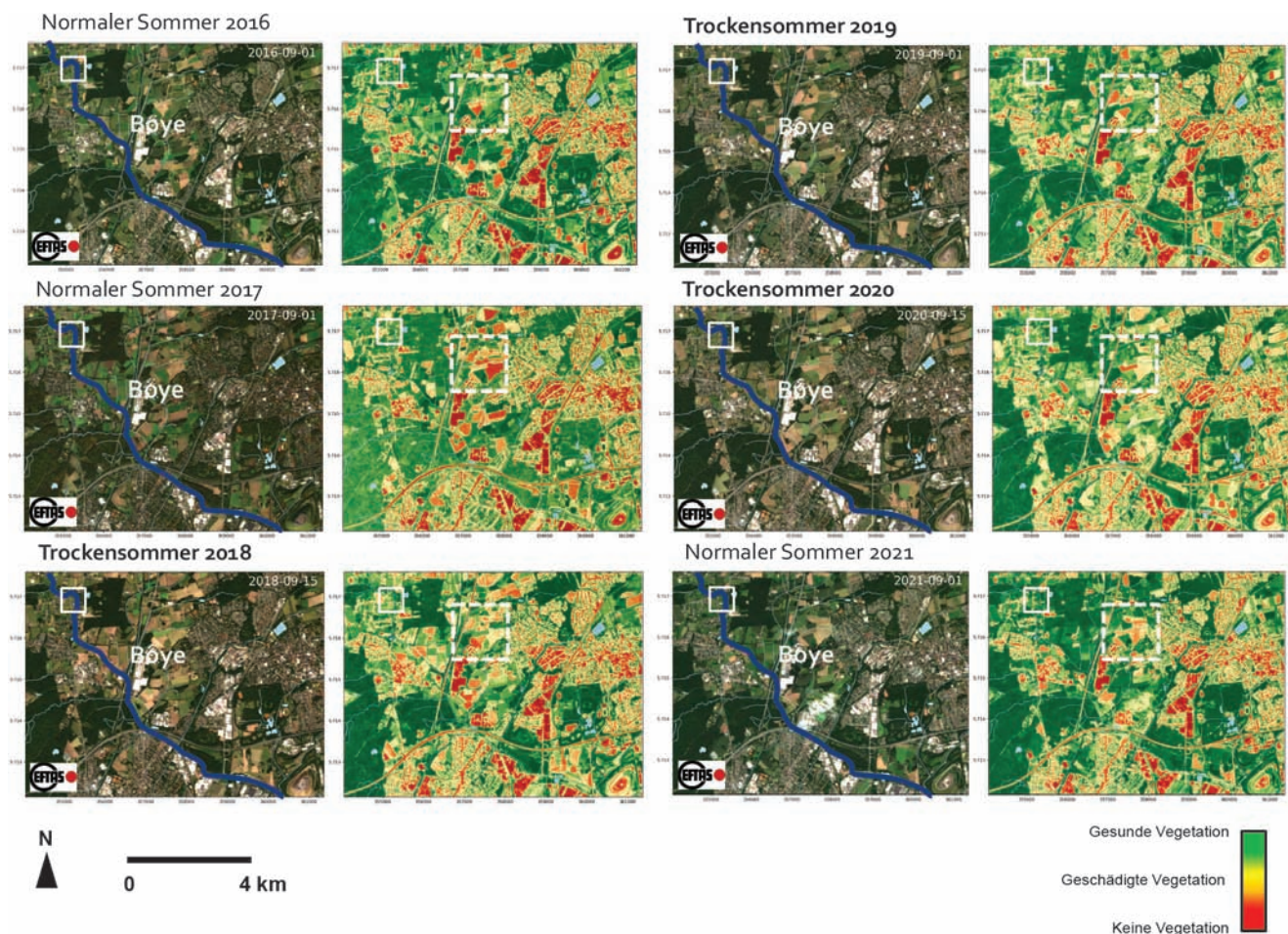


Abb. 10: Bodenbewegungen im Außenbereich der Kirchheller Heide außerhalb der eigentlichen Gewinnungsbereiche.

Fig. 10: Soil movements in the outer area of Kirchheller Heide outside the actual extraction areas.

Tab. 2: Effekte der bergbaulichen Beeinflussung und Methoden des Geomonitorings (nach Pawlik et al. 2022b).**Table 2:** Effects of mining influence and methods of geomonitoring (after Pawlik et al. 2022b).

Auswirkungsanalyse	Methodik
Bodenbewegung	Markscheiderische Vermessung, Großflächige Satelliteninterferometrie (z. B. Sentinel-1) Deckgebirgsmodell/Modell der Deckschichten, Großflächige multispektrale Analyse in Hinblick auf Vegetationsveränderungen (z. B. Landsat, Sentinel-2), Klima- und Wetterdaten für lokale Veränderungen
Ausstreichen von Störungen an der Tagesoberfläche	Markscheiderische Vermessung, Großflächige Satelliteninterferometrie (z. B. Sentinel-1) Deckgebirgsmodell, Großflächige Multispektralanalyse (z. B. Landsat, Sentinel-2) und lokale Multispektralanalyse (z. B. Kopterflüge)
Veränderungen in der Vegetationsgesundheit	Markscheiderische Vermessung, Großflächige Satelliteninterferometrie (z. B. Sentinel-1) Deckgebirgsmodell, Großflächige Multispektralanalyse (z. B. Landsat, Sentinel-2) und lokale Multispektralanalyse (z. B. Kopterflüge), Klima- und Wetterdaten für lokale Veränderungen
Veränderungen in Poldergebieten	Veränderungen in der Bodenfeuchte auf der Grundlage der Satellitenfernerkundung (z. B. Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat)
Vor-Ort-Analyse und Dokumentation	Mobile GIS Anwendungen

**Abb. 11:** Vergleich von RGB-Luftbildern mit dem Vegetationsindex aus Sentinel-2-Daten (Geobasis NRW 2022; Sentinel Hub 2022). Weißer Rahmen = Arbeitsgebiet in Abb. 8.**Fig. 11:** Comparison of RGB aerial images with vegetation index from Sentinel-2 data (Geobasis NRW 2022; Sentinel Hub 2022). White frame = working area in Fig. 8.

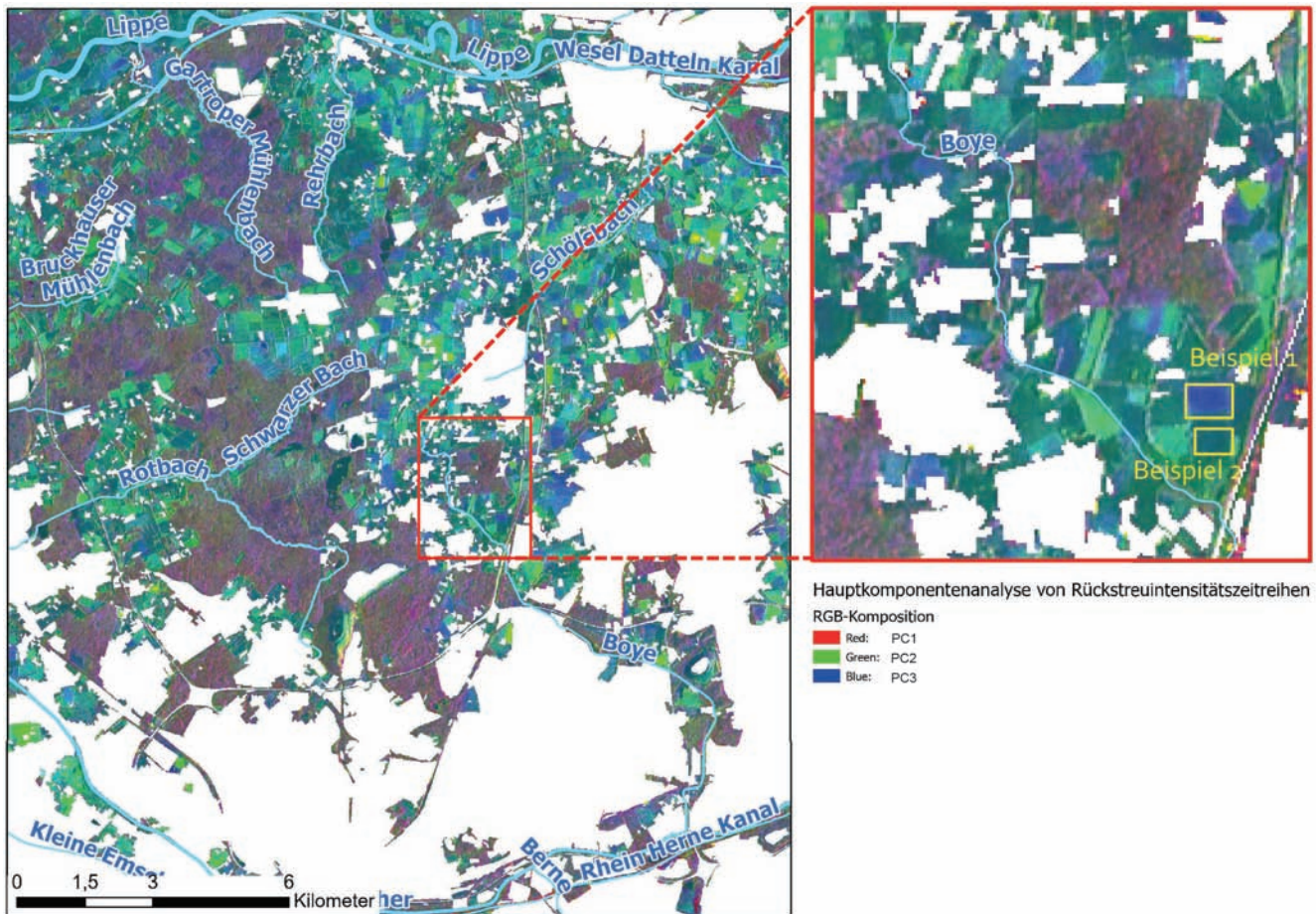


Abb. 12: Verschiedene zeitliche Veränderungen der Rückstreuintensität aus S1-Aufnahmen in 2018 (relative Orbit 139, VV-Polarisation), dargestellt durch unterschiedliche Farben der RGB-Komposition von den drei Hauptkomponenten (PC1–3) einer Hauptkomponentenanalyse mit den größten Varianzen.

Fig. 12: Various temporal changes in backscatter intensity from S1 images in 2018 (relative orbit 139, VV polarisation), represented by different colours of the RGB composition of the three principal components (PC1–3) with the largest variances obtained by a principal component analysis.

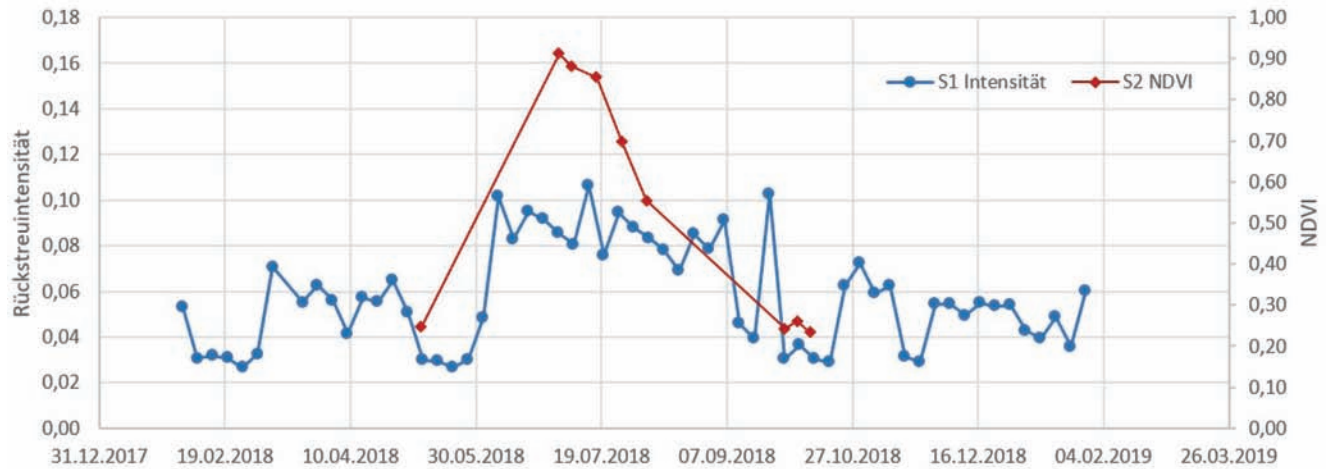
14./15. Juni 2021 mit einer Befliegung am 20. Juni 2021 dokumentiert werden (Abb. 7). Der hohe Sedimentaustrag deutet darauf hin, dass es zu einer tief greifenden Veränderung in der Renaturierungsmaßnahme gekommen ist, die weiter über die Zeitreihe beobachtet werden muss. Es hat sich sehr deutlich gezeigt, dass die Nutzung und Analyse von In-situ-Komponenten durchaus zum besseren Verständnis der Satellitendaten führen kann. So lieferten die lokalen Kopterbefliegungen Interpretationshinweise für die multispektralen Satellitendaten und ermöglichten damit erst die Detailinterpretation von zeitlich hochauflösenden Geodaten und die Differenzierung von Wetterphänomenen mit reduziertem Niederschlag (Abb. 11). Der Einfluss ist über die Verteilung und Häufigkeit der geschädigten Vegetation (rötliche Farbe in dem gestrichelten Rahmen in Abb. 11) über die Zeitreihe der Jahre 2016 bis 2021 mit dem Auftreten der Trockensommer in den Jahren 2018 bis 2020 erkennbar.

Die Schwierigkeiten in der Korrelation zwischen den Ergebnissen der Befliegungsdaten, und im Weiteren der Sentinel-1-Daten (Bodenfeuchte), mit den Bodenfeuchtesensoren zeigt aber auch, dass solche Daten ohne ein Vor-Ort-Kennntnis nicht sicher interpretierbar sind (Bernsdorf et al. 2022). Weitere Schwierigkeiten bestehen in der Ausbildung der Vegetation sowie der Pflanzengesundheit über den Jahreslauf. Nur durch eine geowissenschaftliche Fusion der Sensordaten und eine Berücksichtigung der räumlichen Messbereiche (x, y, z) ist eine umfassende Bewertung möglich.

Das Projekt „Multisensorale Erdbeobachtung für ein nachhaltiges Poldermanagement (MUSE)“ geht technisch noch einen Schritt weiter und nutzt die Daten aus der Radarfotografie quantitativ zur räumlichen Beurteilung von Klassen der Bodenfeuchte-Indikatoren.

Die zeitlichen Änderungen von Oberflächenparametern (Bodenfeuchte, Bodenrauheit, Baumkronenstruktur, Vegeta-

Beispiel 1



Beispiel 2



Abb. 13: Gemittelte Zeitreihen der S1-Intensität (blau) und S2-NDVI (rot) der Beispielflächen in Abb. 12.

Fig. 13: Averaged time series of the S1 intensity (blue) and S2-NDVI (red) of the sample areas in Fig. 12.

tionswassergehalt usw.) spiegeln sich in der Radarrückstreuung wieder, während der Index Vegetationsvitalität („Normalized Density Vegetation Index“ = NDVI) das Wachstum der grünen Vegetation repräsentiert. Über Zeitreihenanalysen lassen sich somit die Hinweise auf weitere Veränderungen, wie zum Beispiel der Bodenfeuchte, ermitteln. In Abb. 12 stellen sich die verschiedenen zeitlichen Veränderungen der Rückstreuintensität der Sentinel-1-Zeitreihen (02.02.2018 bis 28.01.2019) durch verschiedene Farben dar.

Diese Analyse liefert den ersten Überblick über charakteristische Veränderungen der Oberflächenparameter. Werden die gemittelten Intensitätszeitreihen der zwei Beispielflächen (Abb. 13) zusammen mit den Zeitreihen des aus wolkenfreien Sentinel-2-Szenen berechneten NDVI dargestellt (Abb. 14), kann die Korrelation zwischen den beiden Indizes optische anhand der sichtbaren Vegetation zum Beispiel

im Sommer (Juli bis September; Abb. 14) wahrgenommen werden.

Bei einem hohen NDVI ist die Bodenbedeckung mit dichten Pflanzen zu vermuten, deren Veränderung hauptsächlich durch die Rückstreuung des Radarsignals repräsentiert wird. Für die Ermittlung von Bodenfeuchte ist die Zeitreihenbetrachtung der Radarrückstreuung anhand der verschiedenen Bodenbedeckung zu differenzieren. Unter Verwendung von oberflächennahen Bodenfeuchtesensoren und lokalen geowissenschaftlichen Kartierungen zur Bodenkunde sowie oberflächennahen Geologie ist die Ableitung und Interpretation der Bodenfeuchte in der Fläche möglich.



Abb. 14: Sentinel-2-Echtfarben-Darstellung über dem Gebiet der ausgewählten Zeitreihenbeispiele (mit gelben Rahmen markiert).

Fig. 14: Sentinel-2 true colour images over the area of the selected time series samples (marked with yellow frames).

6. Erweiterung der Definition des Geo- und Umweltmonitorings

Mittels der dargestellten Ergebnisse lässt sich für den Lebenszyklus von Georessourcen feststellen, dass eine umfassende Definition des Geo- und Umweltmonitoring von geomontanen Herausforderungen notwendig ist. Aktuell definieren wissenschaftliche Arbeiten nur Teilaspekte der Begriffe (Spektrum 2000; Kretschmann 2020; Benndorf 2021; Baldenhofer 2022) oder legen unterschiedliche Schwerpunkte (Perminov 2021; Sulzer et al. 2022). Denn das Geo- und Umweltmonitoring ist nicht nur eine deskriptive Untersuchung/Überwachung, sondern bietet Werkzeuge zur Steuerung von geomontanen Prozessen. Diese erweiterte Definition unterstützt auch die weiteren Schritte zur Planung und Umsetzung.

Die umfassende Definition lautet:

Bei dem Geo- und Umweltmonitoring in der Bereitstellung von Georessourcen handelt es sich um eine kontinuierlich andauernde oder zeitweise Untersuchung (Datenerhebung über mindestens zwei Zeitpunkte) oder punktuelle Messung und die daraus entstehende Überwachung (zeitliche Weiterführung der Untersuchung). Hierbei werden die raumzeitlichen Veränderungen und Wechselwirkungen in einem Geo-/Ökosystem bzw. eines seiner Bestandteile oder eines abiotischen und biotischen Prozesses überwacht. Zum Aufbau eines integrierten Prozessverständnisses ist vorab

eine unbeeinflusste Messung (Nullmessung) empfehlenswert. Dies ist wichtig, um weitere externe Prozesse wie zum Beispiel den Einfluss des Klimawandels zu verstehen.

In der geomontanen Überwachung werden somit die Wechselwirkungen und Veränderungen in den Räumen (z. B. Biosphäre, Lithosphäre, Atmosphäre) zur Bereitstellung von Georessourcen betrachtet. Hierbei sind die zeitliche Auflösung und Abdeckung, die räumliche Auflösung und Abdeckung, die Messauflösung und der Messbereich sowie die Genauigkeiten (Präzision) der genutzten Geodaten zu berücksichtigen. Die Umsetzung erfolgt mittels der Fusion von naturwissenschaftlich-technischen Ergebnissen aus vielfältige Fachrichtungen. Es sind unter anderem die Fernerkundung, die Klimatologie und die Atmosphärenforschung, die Geodäsie und das Markscheidewesen, die Biologie, die Bodenkunde, (Lagerstätten-)Geologie, Hydro-(geo-)logie, Hydro-(geo-)chemie, (Bohrloch-)Geophysik, Lagerstättenkunde, aber auch die Geoinformatik und das Geodatenmanagement zu nennen. Hierzu gehören auch weitere angegliederte Fachrichtungen aus dem MINT-Bereich (wie Chemie, Physik und Ingenieurwissenschaften).

Somit ist ein weiterer wichtiger Teil des multi-sensor, multi-temporalen und multi-räumlichen Geo- und Umweltmonitorings die Festlegung von Schwellwerten und Grenzwerten zur Bewertung der Monitoringergebnisse. Denn nur durch diese Werte können im aufbauenden Risikomanagement geeignete (Gegen-)Maßnahmen zur Steuerung einge-

leitet werden, die wieder einen Einfluss auf die Ausführung des Programmes zum Geo- und Umweltmonitoring haben. Damit zeigt sich, dass eine kontinuierliche Anpassung der Maßnahmen des Geo- und Umweltmonitorings notwendig ist.

7. Zusammenfassung

Die aktuellen gesellschaftlichen Entwicklungen machen auch zukünftig eine aktive Bereitstellung von Georessourcen notwendig. Hierbei sind neben den geo- und naturwissenschaftlich-technischen Aspekten auch die sozioökonomischen Aspekte zu berücksichtigen. Daher ist es notwendig, dass die Bereitstellung von Georessourcen durch ein umfassendes Überwachungsprogramm, d. h. einem Programm zum Geo- und Umweltmonitoring begleitet wird. Nur durch ein hochgradig technisch integriertes sowie digital umgesetztes Untersuchungs- und Überwachungsprogramm ist es möglich, dass ein Prozessverständnis zu den beobachteten Veränderungen aufgebaut wird. Das Projekt „DigitalTwin – Integriertes Geomonitoring“ zeigt die Notwendigkeit der Weiterführung des Geo- und Umweltmonitoring über die Beendigung der Bereitstellung von Georessourcen hinaus. Auch zeigt das Projekt die Schwierigkeiten in der räumlichen und zeitlichen Fusion von mehrdimensionalen Geodaten. Das Projekt „Climate Change – Monitoring und Management (C2M2)“ liefert die Erkenntnis, dass die aus der Bereitstellung von Georessourcen beeinflusste und wieder renaturierte Kulturlandschaft überwacht werden muss, um so die Zielvorgabe des Wiederherstellens eines naturnahen Raumes zu erreichen. Die Zeitreihenanalyse der Einflüsse des Klimawandels spielt hierbei eine wichtige Rolle. Das Projekt „Multisensorale Erdbeobachtung für ein nachhaltiges Poldermanagement (MUSE)“ nutzt in den sehr wasserempfindlichen Gebieten der Polder die Fusion von In-situ-Sensoren mit Radar-Fernerkundungsdaten. Hier lassen sich räumliche und zeitliche Wechselwirkungen zwischen dem Einfluss der ehemaligen Bereitstellung von Georessourcen, dem Grundwasserstand und Wetter-/Klimadaten erkennen.

Die drei Projekte liefern ein geowissenschaftliches Prozessverständnis für Räume der aktiven und ehemaligen Bereitstellung von Georessourcen. Die Anwendungsergebnisse zeigen, dass dabei eine hohe Integration der Methoden des Geo- und Umweltmonitorings notwendig ist. Des Weiteren wird deutlich, dass also über den Lebenszyklus der Bereitstellung von Georessourcen sehr viele unterschiedliche Methoden des Monitorings angewendet werden müssen. Im Ergebnis wird eine Transparenz in komplexen geowissenschaftlichen Vorgängen geschaffen, die die Grundlage für eine weitere öffentliche Beteiligung liefert. Hiermit wird die gesellschaftliche Betreiberverantwortung komplett.

8. Danksagung

Die Autoren danken der RAG-Stiftung, Essen, für die Förderung der Projekte „DigitalTwin – Integriertes Geomonitoring“ (Fkz.: 20-0013) und „Multisensorale Erdbeobachtung für ein nachhaltiges Poldermanagement (MUSE)“ (Fkz.: 2021-0002). Auch bedanken sich die Autoren für die Bereitstellung von Datensätzen bei der RAG AG, Essen. Ein ausdrücklicher Dank gilt der Emschergenossenschaft/Lippeverband für die Förderung der Machbarkeitsstudie „Climate Change – Monitoring und Management (C2M2)“ (Fkz.: V2020141) und die Bereitstellung von Datensätzen. Auch wird der Firma Eftas, Münster, für die gute Forschungskooperation in den Projekten gedankt. Ohne die Unterstützung wären die Arbeiten nicht möglich gewesen.

Die Autoren danken den Reviewer dieses Artikels für die wertvollen Hinweise zu diesem Text. Auch danken die Autoren den Herausgebern für die Möglichkeit der Veröffentlichung des Textes.

9. Interessenerklärung

Die Autoren erklären, dass sie keine konkurrierenden Interessen haben.

10. Schriftenverzeichnis

- Agricola, G. (1556). *De re metallica – Zwölf Bücher vom Berg- und Hüttenwesen* [Nachdruck der Erstausgabe 2006]. Wiesbaden: VDI-Verlag.
- Baldenhofer, K. (2022). *Lexikon der Fernerkundung*. <https://www.fe-lexikon.info>
- BBergG (1980). *Bundesberggesetz vom 13. August 1980*. <https://www.gesetze-im-internet.de/bbergg/>
- Benndorf, J. (2021). Geomonitoring und Markscheidewesen als integrativer Teil des Umweltmanagements in der Rohstoff- und Energiebranche – zukünftige Aufgaben. *Allgemeine Vermessungsnachrichten*, 7, 237–247.
- Bernsdorf, B., Phyu, K. Z., & Rudolph, T. (2022). Climate change – Management and monitoring – Boden- und In situ-Sensordaten als Schlüssel zum Prozessverständnis. *Mining Report Glückauf*, 158(1), 32–52. <https://mining-report.de/climate-change-management-and-monitoring-boden-und-in-situ-sensordaten-als-schlüssel-zum-prozessverstaendnis>
- Birk, F. (1967). *Hydrologische Karte des Rheinisch-Westfälischen Steinkohlenbezirkes; Blatt Lohberg Nr. 167a. Maßstab 1:10.000*. Krefeld: Geologischer Dienst NRW.
- Flores, H., Lorenz, S., Jackisch, R., Tusa, L., Contreras, I. C., Zimmermann, R., & Gloaguen, R. (2021). UAS-based hyperspectral environmental monitoring of acid mine drainage affected waters. *Minerals (Basel)*, 11(2), 182. <https://doi.org/10.3390/min11020182>
- GeoBasis NRW (2022). *Produkte und Dienstleistungen*. https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/wir-ueberuns/index.html
- Goerke-Mallet, P., & Melchers, C. (2022). Der bergbauliche Lebenszyklus und die Agenda 2030 der Vereinten Nationen – eine

- Nachhaltigkeitsanalyse. *Mining Report Glückauf*, 158, 59–71. <https://doi.org/10.48771/a8cx-dr76>
- Goerke-Mallet, P., Pakzad, K., Cavdar, N., Melchers, C., Mütterthies, A., & Perl, J. (2017). *Innovative Monitoring-Verfahren im Nachbergbau: Überblick, Potentiale, Erfahrungen*. 18. Geokinematiker Tag des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie, 10.–12. Mai 2017, Freiberg. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:105-qucosa-226414>
- Kratzsch, H. (2013). *Bergschadenkunde* (962 S.). Berlin: Springer.
- Kretschmann, J. (2020). Research areas in post-mining. *Mining Report Glückauf*, 2, 146–156.
- Liu, Y., & Song, W. (2019). Influences of extreme precipitation on China's mining industry. *Sustainability (Basel)*, 11(23), 6719. <https://doi.org/10.3390/su11236719>
- Markscheider-Bergverordnung – MarkscheiderBergV (2020). *Verordnung über markscheiderische Arbeiten und Beobachtungen der Oberfläche*. In der Fassung der Bekanntmachung vom 21. Juli 2020 (BGBl. I S. 1702).
- Melchers, C., Westermann, S., & Reker, B. (2019). *Evaluierung von Grubenwasseranstiegsprozessen im Ruhrgebiet, Saarland, in Ibbenbüren sowie weiteren deutschen Steinkohlenrevieren und dem angrenzenden Ausland* (132 S.). Bochum: Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums. https://fzn.thga.de/wp-content/uploads/sites/4/2021/02/Berichte-zum-Nachbergbau_Heft1_Evaluierung-Grubenwasseranstiege_encoded.pdf
- Pawlik, M., Haske, B., Bernsdorf, B., Rudolph, T., & Benndorf, J. (2022a). Analyse des Zustands der Vegetation auf dem Gelände des stillgelegten Bergwerks Prosper-Haniel anhand von multispektralen Satellitenbildern der Sentinel-2 Mission und Drohnenflüge. *Marktscheidewesen* 1/2022, 37–44.
- Pawlik, M., Gellendin, M., Bernsdorf, B., Rudolph, T., & Benndorf, J. (2022b). Digital-Twin – How to Observe Changes and Trends on the Post-Mining Areas? *International Journal of Earth & Environmental Sciences*, 7, 1–13. <https://doi.org/10.15344/2456-351X/2022/195>
- Pearce, T. D., Ford, J. D., Prno, J., Duerden, F., Pittman, J., Beaumier, M., . . . Smit, B. (2011). Climate change and mining in Canada. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 16(3), 347–368. <https://doi.org/10.1007/s11027-010-9269-3>
- Perminov, N. A. (2021). Geomonitoring of structural safety of unique underground sewage facilities operating for a long term in difficult soil and anthropogenic conditions of the megacity. *Journal of Physics: Conference Series*, 1928(1), 012020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1928/1/012020>
- RAG & IHS (2018). *WP Prosper-Haniel - Bewertung des Einwirkungspotentials von Bodenbewegungen, Grubenwasseranstieg bis ca. -630 m NHN, Gebaute Mächtigkeiten, Zeichnungs-Nr.: 181-10-007*. https://extra.bra.nrw.de/filebase/20_07_06_abp_prosper-haniel/13_Bodenbewegungen_IHS/IHS_13.7%20-%20Bodenbewegungen%20Gutachten.pdf
- Rudolph, T. (2019). *Digital Twin – Integriertes Geomonitoring weiterentwickelt* (S. 344–363). Tagungsband Bergbau, Energie und Rohstoffe 2019. Übergang zu neuen Zeiten, 11.–13. September, Technische Hochschule Georg Agricola, Bochum. Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger Verlag.
- Rüttinger, L., van Ackern, P., Lepold, T., Vogt, R., & Auberger, A. (2020). *Impacts of climate change on mining, related environmental risks and raw material supply*. Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Report No. FB000279/ENG. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_106-2020_impacts_of_climate_change_on_mining_related_environmental_risks_and_raw_material_supply.pdf
- RVR – Regionalverband Ruhr (2022). *Geoportal RVR*. <https://www.luftbilder.geoportal.ruhr>
- Sahu, P., & Lokhande, R. D. (2015). An investigation of sinkhole subsidence and its preventive measures in underground coal mining. *Procedia Earth and Planetary Science*, 11, 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.06.009>
- Sektiawan, A., Prasetyo, G. A., Adli, D. P., & Yudianto E. (2016). *Subsidence: Causes, effects, and mitigations in geothermal field*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 42. 5th ITB International Geothermal Workshop (IIGW2016) 28 March to 2 April 2016, Bandung, Indonesia. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/42/1/012022>
- Sentinel Hub (2022). *Sentinel Hub EO Browser*. <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>
- Spektrum (2000). *Lexikon der Geowissenschaften*. Heidelberg: Spektrum.
- Strzałkowski, P. (2021). Sinkhole hazard caused by inactive mining shafts as illustrated by a selected example. *Pure and Applied Geophysics*, 178(5), 1697–1707. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02716-z>
- Sulzer, W., Lindbichler, P., Seier, G., & Gspurning, J. (2022). Geomonitoring of a large landslide at the Lärchberg / Murau (Austria) with selected geospatial technologies. *Acta Geobalcanica*, 8(3), 85–91. <https://doi.org/10.18509/AGB218-30851>
- TIM-Online (2022). <https://www.tim-online.nrw.de/tim-online2>
- Tveit, M. R., Khalifeh, M., Nordam, T., & Saasen, A. (2021). The fate of hydrocarbon leaks from plugged and abandoned wells by means of natural seepages. *Journal of Petroleum Science Engineering*, 196, 108004. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108004>
- Welz, A. (2017). *Risikomanagement der Bergbehörde NRW für tagsbruchverursachende Hinterlassenschaften des Bergbaus*. https://www.lvbb-nrw.de/attachments/article/110/5_Welz_NACHBergbauzeit%202017_THGA.pdf
- Wolkersdorfer, C., & Mugova, E. (2022). Effects of mining on surface water. *Encyclopedia of Inland Waters*, 4, 170–188. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819166-8.00036-0>

Manuscript received: 29.03.2022

Revisions required: 04.10.2022

Revised version received: 07.11.2022

Accepted for publication: 10.11.2022