

Geomonitoring im Alt- und Nachbergbau

Tobias Rudolph, Peter Goerke-Mallet und Christian Melchers

Zusammenfassung

Bergbau im 21. Jahrhundert bedeutet auch Alt- und Nachbergbau, geknüpft immer an die Bewältigung post-montaner Herausforderungen und die Langzeit- und Zukunftsaufgaben. Hiermit einhergehend sind Fragestellungen zu den damit verbundenen Kosten und der Möglichkeit der Weiterentwicklung im Bereich der Standortintegrität und -überwachung. Das Forschungszentrum Nachbergbau der Technischen Hochschule Georg Agricola, Bochum, hat sich zur Aufgabe gestellt, hier Lösungsansätze zu entwickeln.

Daher ist es grundsätzlich unerlässlich, umfassende und integrierte Kenntnisse über die Lagerstätte und die überlagernden Schichten eines jeweiligen Bergbaustandortes zu haben, um so die langfristige Integrität nachweisen zu können. Im Lebenszyklus eines Bergbaustandortes fallen eine Vielzahl von technischen Datensätzen, Informationen und Wissen an, die auch für die alt- und nachbergbaulichen Fragestellungen, aber insbesondere für die Standortüberwachung (Geomonitoring) von entscheidender Wichtigkeit sind und daher umfassend ausgewertet sein müssen. Hierbei kommt der Ansatz des »Digital-Twin«, einem Konzept aus dem Themenbereich »Industrie 4.0«, zur Anwendung. In einem Digital-Twin wird ein gesamter Industrieprozess von der Idee, über die Umsetzung bis zur Wartung und Monitoring sowie dem Rückbau voll digital aufgebaut und ausgewertet. Auf Basis der verfügbaren Geoinformationen wird ein digitaler Zwilling, also ein digitales Abbild/Modell eines aktiven oder ehemaligen Bergbaustandortes erzeugt.

Für das Forschungszentrum Nachbergbau der Technischen Hochschule Georg Agricola, Bochum, besteht in der Umsetzung des »Digital-Twin«-Konzeptes die Möglichkeit, alt- und nachbergbauliche Prozesse zu gestalten und weiterzuentwickeln und somit postmontane Herausforderungen, Langzeit- und Zukunftsaufgaben und die damit verbundenen Kosten und Risiken bewerten und steuern zu können.

Summary

Mining in the 21. Century means also post-mining, linked to the accomplishment of the post-mining challenges and tasks, always connected to cost and the possibility of the further development in the area of mine-site integrity and monitoring.

It is the strategy of the Post-mining Research Center at the Technical University Georg Agricola, Bochum to develop approaches and solutions.

Therefore, it is essential to prove that integrated information and knowledge about the reservoir and the overlying strata is available for the overall integrity of the mine site. In a mine life cycle a huge amount of data, information and knowledge is gathered, which are also for post-mining workflows and especially for the mine site monitoring, the so-called Geomonitoring of importance. This means that these datasets need to be integrated and analysed.

Here, the application of the concept »Digital-Twin«, a concept adopted from the Industry 4.0 complex, in which an overall industry starting with an idea in the planning phase, across the production and maintenance phases down to the abandonment phase is digitally rebuilt, could act as an enabler for the post-mining processes.

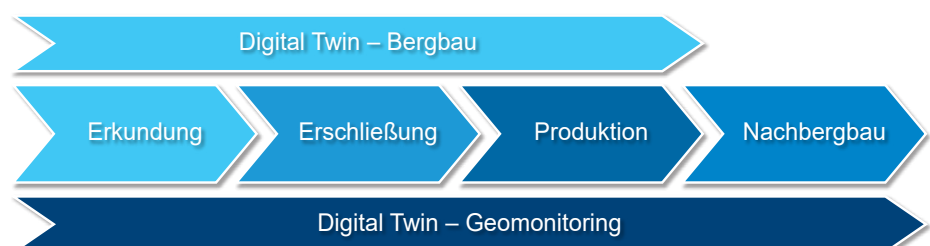
With the application of the concept »Digital-Twin« the Post-mining research center at the Technical University Georg Agricola, Bochum has the unique opportunity to shape and develop further approaches for post-mining processes. This enables further cost control.

Schlüsselwörter: Geomonitoring, Digital Twin, Nachbergbau, Fernerkundung, Ewigkeitsaufgaben, Zukunftsaufgaben

1 Einleitung

Heutzutage dienen Geoinformationen und digitale Anwendungen den Bergbauunternehmen primär dazu, die betriebliche Führung mit dem Abbau des Rohstoffes zu steuern. So lässt sich besser, schneller und kostengünstiger auf äußere Veränderungen reagieren, um so die operative Steuerung zu verbessern. Die anfallenden Geoinformationen umfassen die geophysikalische Erkundung, die Lagerstätte/Lagerstättengeologie aber auch das Monitoring wie zum Beispiel Datensätze aus der Fernerkundung. Diese Datensätze beinhalten zusätzlich die markscheiderische Risswerkaufnahme und weitergehende

Abb. 1:
Das Konzept Digital-Twin im Lebenszyklus Bergbau



Vermessungsergebnisse. Primär ist diese Datenerfassung aber auf die Erkundung, Erschließung und Produktion der eigentlichen Lagerstätte ausgerichtet. Im Rahmen der Betreiberverantwortung (License to operate) und der Betriebsoptimierung (Operational Excellence) kommen nun die modernen Ansätze des Digital-Twin, ein Konzept aus dem Umfeld der Industrie 4.0, zur Anwendung (GE 2019). Eine Anwendung des Konzeptes des Digital-Twin für den kompletten Bergbauzyklus, der auch die alt- und nachbergbaulichen Prozesse umfasst, findet aber aktuell noch nicht statt und muss im Rahmen des Geomonitoring entwickelt werden (Abb. 1).

Bei einem Digital-Twin handelt es sich um die digitale Repräsentanz (digitaler Zwilling) eines physischen (z.B. Bergwerk) oder nicht-physischen Objektes (z.B. frühe Projektidee) aus der realen Welt (GI 2019). Die digitale Repräsentanz ermöglicht einen übergreifenden und standardisierten Austausch von Geoinformationen in einem einheitlichen Format. Hierdurch lassen sich auch umfassende Simulationen und Prognosen vorab oder im Nachgang eines Ereignisses durchführen. Ein Digital-Twin in der Bergbauindustrie hilft nun insbesondere den Abbau und die damit verbundenen Prozesse zu verbessern und weiterzuentwickeln, da unmittelbar reagiert werden kann. Eine wichtige Grundlage stellen hier markscheiderische und vermessungstechnische Datensätze dar. Somit lassen sich zum Beispiel die aktuellen Abbauergebnisse auf Grundlage der Datenbasis der vergangenen Abbautage genau und digital erfassen sowie die weiteren Schritte simulieren. Damit sind weitergehende Prognosen zu treffen, die dann wieder unmittelbar im Abbau eingebunden werden. Da nun der komplette Bergbauprozess digital abgebildet ist, sind somit schnelle Anpassungen und Reaktionen auf veränderliche gesellschaftliche, politische,

wirtschaftliche und genehmigungsrechtliche Rahmenbedingungen möglich. Diese digitale Repräsentanz Bergbau gilt es im Rahmen des Nachbergbaus in Richtung einer digitalen Repräsentanz Geomonitoring weiterzuentwickeln. Damit sind die postmontanen Herausforderungen zu steuern, die Wirkzusammenhänge zu verstehen sowie die Kosten zu kontrollieren. Nur so kann der volle Wert der Geoinformationen ausgeschöpft werden.

Bei den postmontanen Herausforderungen handelt es sich um (Abb. 2):

1. Tagesbruch/ ehemalige Schächte
2. Geologische Störung/ Störungs-Reaktivierungen
3. Poldergebiete
4. (Gruben-)Wasserhaltung
5. Abraumhalden und Absetzbecken
6. Gasemissionen
7. Infrastrukturen/Obertage-Installationen
8. Bodenbewegungen

Durch die Anwendung von integrierten Geomonitoring-konzepten für Alt- und Nachbergbaustandorte können Arbeitsprogramme zur raum-/zeitbezogenen Beobachtung, Kontrolle und Überwachung sowie Bewertung systemrelevanter Prozesse entwickelt werden. Für ein Monitoring-Programm ist es wichtig, dass initial ein Konzept entwickelt wird, welches in der ersten Anwendungsphase auf Basis des Erkenntnisgewinns aus den Geoinformationen adaptiert und kontinuierlich weiterentwickelt wird (Abb. 3). Hierbei handelt es sich um einen Kreislauf, denn die Erfahrungen und Erkenntnisse müssen von Projekt zu Projekt oder von Bergbaustandort zu Bergbaustandort weitergegeben werden.

Es empfiehlt sich somit, mehrphasige Monitoring-Programme mit entsprechenden Revisionspunkten zu

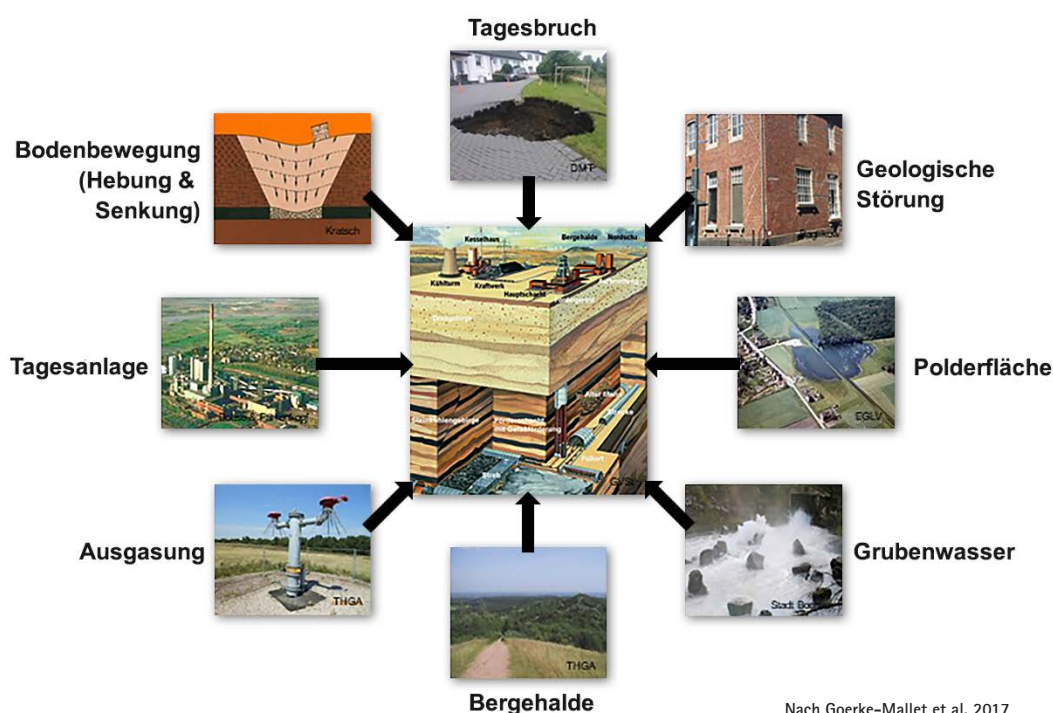


Abb. 2:
Postmontane
Herausforderungen

Nach Goerke-Mallet et al. 2017

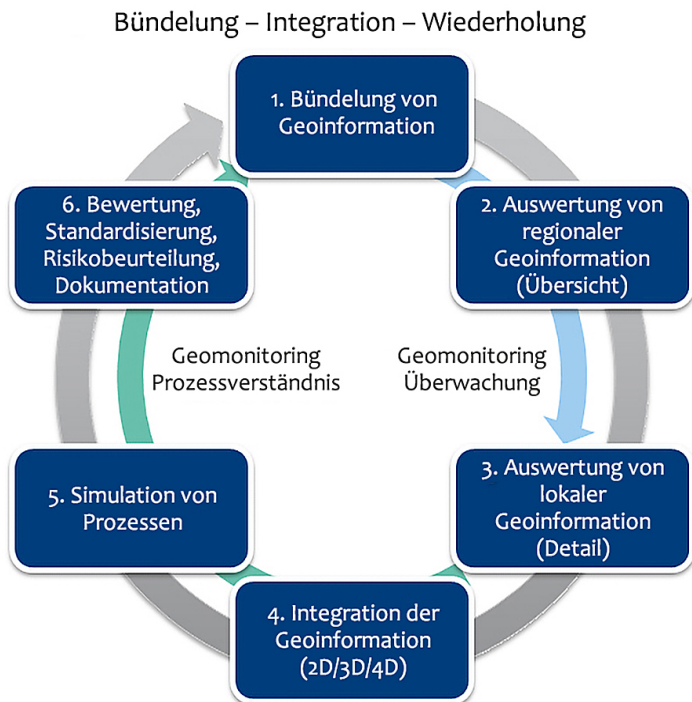


Abb. 3: Integrationskreislauf von Geoinformationen im Bereich des Geomonitoring

entwickeln. Hier muss auch berücksichtigt werden, dass dies aber nur bei einer vollen Integration der Beobachtungsergebnisse möglich ist.

Somit umfasst ein integriertes und weiter entwickeltes Geomonitoring-Konzept folgende Schritte, sowohl in der Konzeption, als auch in der Umsetzung (nach DMV 2014, nach Melchers et al. 2019):

1. Definition des Ziels des Monitorings in der Integration mit übergeordneten Zielen (z.B. Transparenz, behördliche Genehmigungen, gesellschaftlich akzeptiertes Ziel)
2. Auswahl von geeigneten Methoden und Werkzeugen und Definition der Konnektivität zwischen den Methoden und Festlegung von führenden Methoden (Startpunkt zur Implementierung des Konzeptes Digital-Twin)
3. Festlegung von Beobachtungsroutrinen und -zeiträumen (Regelmäßigkeit und Dauer)
4. Berücksichtigung von Standards, Richtlinien und (Handlungs-)Empfehlungen
5. Definition von Ziel-, Warn und Grenzwerten
6. Definition von Aktions- und Reaktionsprozessen für Handlungsoptionen und Kommunikationsmaßnahmen

Mit diesen Grundlagen erfolgt der Aufbau eines Geomonitoring-Programmes und somit entsteht ein Digital-Twin in vier Anwendungsphasen. Das Geomonitoring ist in diesen Phasen kontinuierlich auf Basis der gewonnenen Geoinformationen anzupassen. Bei den vier Phasen handelt es sich um:

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, mit ggf. Reduktion der Methoden auf ein notwendiges Minimum über langfristige Zeiträume und Beendigung des Geomonitoring

Durch die Integration der Ergebnisse der einzelnen Phasen entwickelt sich ein Innovationskreislauf, der dann, beginnend bei der reinen Überwachung des Standortes, in einem Prozessverständnis der nachbergbaulichen Aspekte/Wirkzusammenhänge mündet (Abb. 3). So lassen sich die Ergebnisse auch für eine Risikobeurteilung weiterentwickeln, um so die postmontanen Herausforderungen bearbeiten und steuern zu können.

2 Weiterentwicklung Geomonitoring

Beim Geomonitoring im Alt- und Nachbergbau kann eine Vielzahl an Methoden zur Erzeugung und Verarbeitung von Geoinformationen angewendet werden (Abb. 4). Da keine Methode ein gesamtheitliches Ergebnis im Monitoring eines Bergbaustandortes liefert, ist es absolut notwendig, verschiedene Methoden gleichzeitig zur digitalen Anwendung zu bringen, diese zu iterieren, in einzelne Daten- und Ergebnissilos zu bündeln sowie die Ergebnisse zu integrieren. Als Fundament des Geomonitoring dienen statische Basis-Geoinformationen, die auch mit historischen Geoinformationen und/oder Geoinformationen aus Archiven zu erweitern sind. Die historischen Geoinformationen sind unter modernen Gesichtspunkten zu überarbeiten sowie auszuwerten. Hierauf aufbauend sind zusätzlich Überwachungsdaten mit einer höher frequenten Aufzeichnungsregelmäßigkeit (täglich/wöchentlich/monatlich) bzw. mit real-time-Datensätzen (24/7) sowie Vor-Ort-Datensätze, die sogenannte in-situ-Komponente, einzubinden. Ein Beispiel hierfür sind die dezentralen, kostengünstigen Sensoren zur Überwachung von Altbergbauelementen wie verfüllte Schachtsäulen (Berg et al. 2019) oder untertägige Sensoren zum Grubenwasseranstieg (Witthaus und Melchers 2019).

Man erhält somit eine digitale Abbildung der vorhandenen Gegebenheiten und Prozesse, den sogenannten Digital-Twin Geomonitoring. Die im Folgenden dargestellten Methoden sind in der gesamten Bergbauindustrie übergreifend anwendbar (Abb. 4). Diese Übersichtsdarstellung des Vergleichs der Relevanz ermöglicht die einfache und

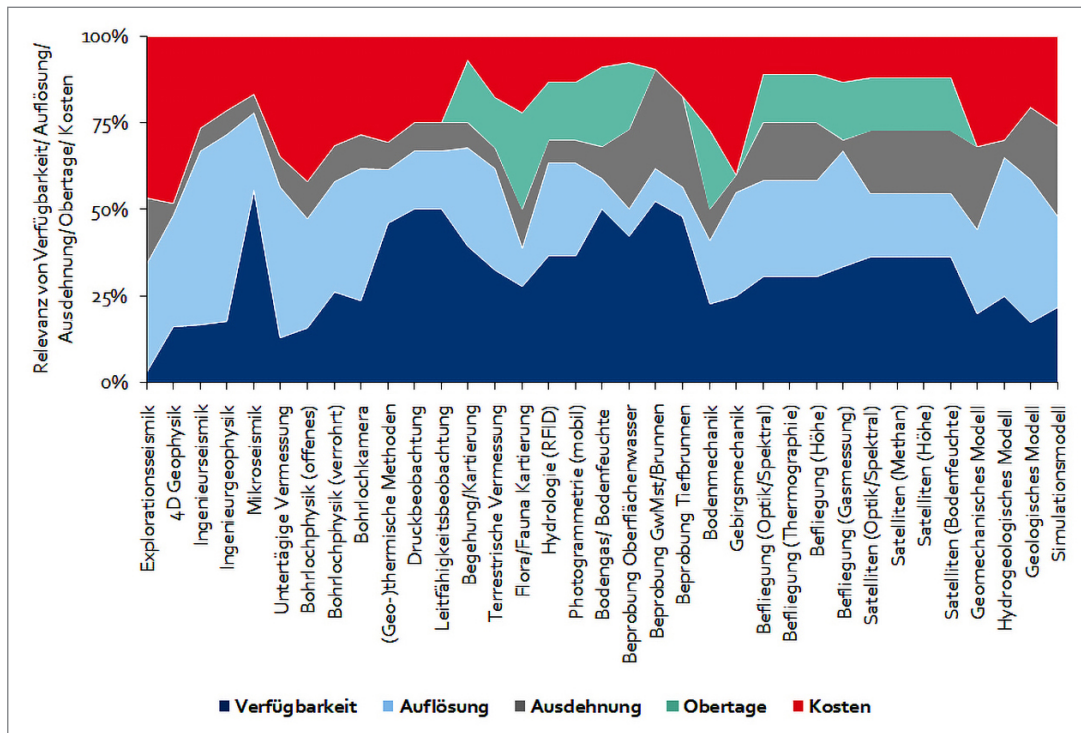


Abb. 4:
Grafische Darstellung des Vergleiches der Relevanz der verschiedenen Methoden des Geomonitoring

schnelle Selektion von mehreren Methoden zum integrierten Geomonitoring.

Es zeigt sich, dass die Anwendung von Explorationsseismik für das Geomonitoring einen sehr guten Einblick in den Untergrund ermöglicht, aber eine der kostenintensivsten Methoden ist und daher auch kaum wiederholt wird (Verfügbarkeit). Mikroseismische Überwachungen des Untergrundes liefern dagegen zeitlich (24/7) und räumlich hochauflösende Datensätze über (Einzel-) Standorte und somit einen guten Einblick in den Untergrund. Diese Methode ist ebenfalls kostenintensiv, da hierfür eine Vielzahl von Sensoren am Standort ausgelegt werden muss. Für die Geodäsie und Geoinformation wichtige Methoden der Erdbeobachtung mittels Satelliten liefern im direkten Vergleich zu vorangegangenen Methoden eine sehr hohe zeitliche Verfügbarkeit (Häufigkeit der Überfliegungen), eine gute räumliche Auflösung und Ausdehnung (Riecken et al. 2019). Es sind außerdem kostengünstigere Methoden (je nach Sensor und Träger), die aber nur auf die Tagesoberfläche, ggf. in die obersten Zentimeter des Bodens (je nach Wellenlänge) gerichtet sind. Diese Beispiele zeigen deutlich, dass keine Methode eine Einzelantwort liefert, sondern immer mehrere Methoden untereinander und zusätzlich auch mit in-situ-Datensätzen zu einem Standort integriert werden müssen. Die Weiterentwicklung ist somit die kontinuierliche, digitale sowie raum-zeitliche Zusammenführung von sehr unterschiedlichen Methoden mit sehr verschiedenen Datensätzen über den gesamten Bergbauzyklus. Gleichzeitig gilt es, die gewählten Ansätze auf Basis der erreichten Ergebnisse ständig weiterzuentwickeln. Nur so entsteht der Digital-Twin Geomonitoring.

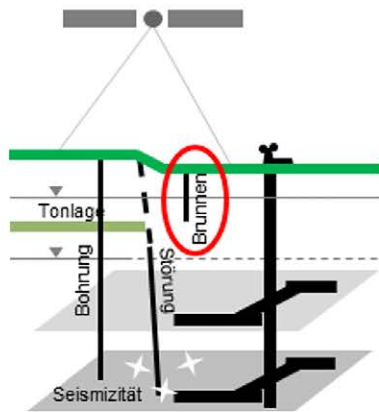
3 Beispiel Digital-Twin Geomonitoring

Am fiktiven Beispiel für den untertägigen Abbau eines Rohstoffes zeigt sich die Möglichkeit einer Weiterentwicklung des klassischen Geomonitoring in Richtung Digital-Twin und Integration der Methoden (Abb. 5). Es zeigt aber auch die Schwierigkeiten bei der initialen Interpretation, wenn nur begrenzte Geoinformationen vorliegen. Die in diesem Beispiel dargestellten Prozesse und Konzepte eines untertägigen Steinkohlebergwerks sind auch auf andere Bergbauzweige übertragbar.

Die Ausgangssituation ist folgende: Es liegen aus der Erschließung des Standortes erste Datensätze vor, die insbesondere zur Beschreibung der Lagerstätte interpretiert worden sind. Nachbergbauliche Fragestellungen lassen sich damit nur begrenzt beantworten, ein Verständnis der Wirkzusammenhänge der postmontanen Herausforderungen ist nur teilweise möglich. In diesem Beispiel wird nun in der Endphase der Produktion des Bergwerkes ein Brunnen abgeteuft und hierbei Methan im Grundwasser detektiert (Abb. 5A). Aufgrund der zu dem Zeitpunkt vorliegenden Datenlage ist die Frage des Auftretens von Methan im Grundwasser eigentlich nur in Korrelation mit der bergbaulichen Aktivität zu sehen.

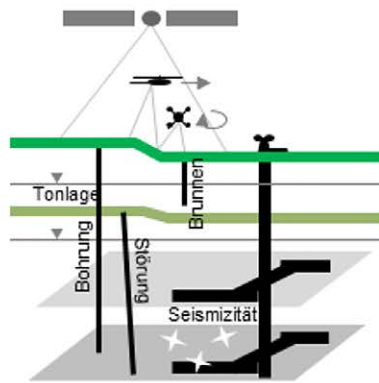
Der frühzeitige Aufbau eines Digital-Twins Geomonitoring, bereits mit Beginn der Erschließung/Produktion des Bergbaustandortes im Beispiel, sowie die Berücksichtigung der Konzepte des Geomonitorings (Kap. 1) hätte zu einer anderen initialen Interpretation geführt. Die im Nachgang durchgeführte Neubewertung der historischen und neuen Geoinformationen ermöglicht eine weiterentwickelte Interpretation (Abb. 5B, Fettdruck). Der

A: Geomonitoring – Initiale Sichtweise von Geoinformationen



Geomonitoring	Ergebnis	Initiale Interpretation
Explorations-seismik	Fokus Lagerstätte	Einzelne 2D Linien ausgewertet
Explorations-bohrung	Tonlage	Deckgebirge, daher nicht korreliert/berücksichtigt
Mark-scheiderisches Risswerk	Entwicklung Bergwerk Bodenbewegung	Dokumentation der Entwicklung des Bergwerkes
Neue Brunnen-bohrung	Methan beim Abteufen	Zerrüttung der Senkungsmulde bringt Methan an die Tagesoberfläche Problem!
Seismische Überwachung	Lokale Ereignisse in der Teufe	Häufung im Bereich des intensiven Abbaus
Satelliten (z.B. Sentinel-1)	Bodenbewegung	Bergbauliche Senkungsmulde

B: Geomonitoring – Integrale Sichtweise von Geoinformationen



Geomonitoring	Ergebnis	Integrierte Interpretation
Explorations-seismik	Lagerstätte, Deckgebirge	Neubewertung, 3D Geo-Modell
Explorations-bohrung, moderne geophys. Vermessung	Regionale Tonlage Lichtwellen-leiterkabel	Geologisches Deckgebirgsmodell, Tonlage regional aushaltend Temperaturmessung für Grubenwasseranstieg
Mark-scheiderisches Risswerk	Entwicklung Bergwerk Bodenbewegung	Integration mit der verfügbaren Geoinformation (verbesserte Störungsdefinition)
Brunnen-bohrung	Methan beim Abteufen	Biogenes Methan im Deckgebirge Neu-Interpretation!
Geomechanik	Regional kompressibles System	Störung, dicht, nicht reaktiviert
Mikro-seismische Überwachung (24/7)	Lokale Ereignisse in der Teufe	Überarbeitung (Geschwindigkeits-Modell) zeigt keine Häufung im Bereich der Störung
UAS	Räumliche Definition der Methangas-austritte	Keine Korrelation der Methangasaustritte mit der Senkungsmulde/Störungsverlauf
CHARM Befliegung	Regional auftretendes Methangas	Überarbeitung zeigt keine lokale Häufung in der Senkungsmulde
Satelliten (z.B. Sentinel-1, Sentinel-2)	Bodenbewegung, Bodenfeuchte, Vegetations-vitalität	Bergbauliche Senkungsmulde, keine Störungskorrelation

Abb. 5: Beispiel für eine Geomonitoring-Analyse mit der initialen (A) und integrierten Sichtweise (B)

Digital-Twin Geomonitoring ist zusätzlich auch um die Erkenntnisse aus der mikroseismischen Überwachung sowie hochfrequente Geoinformationen aus der Fernerkundung wie Satellitenbilder (u.a. Bodenfeuchte, Vegetationsvitalität) und Befliegungen mit Helikopter und UAS (Unmanned Aircraft System, »Drohne«) erweitert worden.

Die Neuinterpretation zeigt, dass das Methan in der Brunnenbohrung auf Prozesse in den Deckschichten zurückzuführen ist und somit in keiner direkten Korrelation mit der bergbaulichen Aktivität steht. Diese Information hat daher einen unmittelbaren Einfluss auf die Planung und ggf. Umsetzung von nachbergbaulichen (Zukunfts-) Aufgaben und die damit verbundenen Kosten.

4 Fazit und Ausblick

Das Konzept des Digital-Twin Geomonitoring mit der Erweiterung um die Methoden des integrierten Geomonitorings ist interdisziplinär und innovativ. Die zur Verfügung stehende umfassende Anzahl an Geomonitoring-Methoden ermöglicht integrierte und raumzeitliche, bis hin zu real-time-Analysen von Alt- und Nachbergbaustandorten.

Die gebündelten und vielfältigen Erfahrungen des Forschungszentrums Nachbergbau an der Technischen Hochschule Georg Agricola, Bochum, bieten die einzigartige Möglichkeit für unterschiedliche Bergwerkstandorte, die verschiedensten Geoinformationen mittels des Konzeptes Digital-Twin Geomonitoring weiterzuentwickeln. So kann das verfügbare Wissen von den Abbaubereichen bis zum Deckgebirge und den Deckschichten genutzt werden. Dies ist auch auf andere Bergbauzweige zu übertragen. Somit ist es möglich, postmontane Wirkzusammenhänge zu identifizieren, zu bewerten und optimierte Handlungsempfehlungen zu entwickeln und damit die Kosten zu kontrollieren.

Literatur

- Berg, B.v., Schmachtenberger, F., Gruchalla, B.v., Wollnik, F., Klač, S., Koschare, A., Schnell, S., Schliebs, J. (2019): Mineberry – remote monitoring of abandoned shaft openings. In: Proceedings of the 39th International Symposium »Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry (APCOM 2019)«, June 4–6, 2019, Wrocław, Poland. 578–585.
- DMV (2014): Empfehlungen zum Monitoring im Altbergbau. www.dmv-ev.de/literatur/regelwerke.html, letzter Zugriff 02/2020.
- GE (2019): Transform your mine into a digital industrial Company. www.ge.com/digital/sites/default/files/download_assets/GE-Digital-Mine-Transform-Your-Mine-Into-A-Digital-Industrial-Company.pdf, letzter Zugriff 02/2020.
- GI (2019): Digitaler Zwilling. Gesellschaft für Informatik e.V. <https://gi.de/informatiklexikon/digitaler-zwilling>, letzter Zugriff 02/2020.
- Goerke-Mallet, P., Melchers, C., Mütterthies, A. (2017): Innovative Monitoring-Maßnahmen im (Nach-)Bergbau. In: Mining Report 153:3, 261–271.
- Melchers, C., Westermann, S., Reker, B. (2019): Evaluierung von Grubenwasseranstiegsprozessen – Projektbericht. In: Berichte zum Nachbergbau, Heft 1.
- Riecken, J., Krickel, B., Gefeller, V., Reifenrath, P. (2019): Nutzung der Radarinterferometrie im geodätischen Raumbezug. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 6/2019, 144. Jg., 354–361. DOI: 10.12902/zfv-0281-2019.
- Witthaus, H., Melchers, C. (2019): Mine water monitoring in abandoned mines at RAG Aktiengesellschaft. In: Wolkersdorfer, C., Khayrulina, E., Polyakova, S., Bogush, A. (Hrsg.): Mine water: Technological and Ecological Challenges. Proceedings of the IMWA 2019 Conference, 15–19 July 2019, Perm, Russia. Perm: Perm State University, 59–67.

Kontakt

Prof. Dr. Tobias Rudolph
Geomonitoring im Alt- und Nachbergbau
Forschungszentrum Nachbergbau – Technische Hochschule Georg Agricola
Herner Straße 47, 44787 Bochum
tobias.rudolph@thga.de

Prof. Dr. Peter Goerke-Mallet
Forschungszentrum Nachbergbau – Technische Hochschule Georg Agricola
Herner Straße 47, 44787 Bochum

Prof. Dr. Christian Melchers
Wissenschaftlicher Leiter
Forschungszentrum Nachbergbau – Technische Hochschule Georg Agricola
Herner Straße 47, 44787 Bochum

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.