

## Monitoring wasserhaushaltsrelevanter Prozesse im Bergbau mittels Fernerkundung/Copernicus

Kian Pakzad<sup>1</sup>, Andreas Müterthies<sup>1</sup>,  
Peter Goerke-Mallet<sup>2</sup>, Christian Melchers<sup>2</sup>  
Chia-Hsiang Yang<sup>3</sup>, Uwe Soergel<sup>3</sup>

<sup>1</sup> EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH, Münster

<sup>2</sup> Technische Hochschule Georg Agricola, Forschungszentrum Nachbergbau, Bochum

<sup>3</sup> Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Stuttgart

### ZUSAMMENFASSUNG:

*Im Bergbau ist die Interaktion mit dem Wasserhaushalt von besonderer Bedeutung. Über die Veränderung des Wasserhaushaltes kann beispielsweise auf Auswirkungen des Bergbaus auf die Umgebung, gewollt oder ungewollt, geschlossen werden. Diese Auswirkungen zu detektieren und daraus auf Landschaftsauswirkungen zu schließen, ist eine relevante Fragestellung. Da die zu beobachtenden Gebiete häufig eine große Ausdehnung haben und eine zyklische gebietsabdeckende manuelle Kontrolle häufig sehr kostenintensiv ist, eignet sich die Fernerkundung, die direkte Prozesse auf der Erdoberfläche beobachtet, dazu, ein Monitoring derartiger Gebiete hinsichtlich dieser Prozesse durchzuführen. Dabei können mehrere Faktoren beobachtet werden: Über Radarfernerkundung können Veränderungen der Bodenfeuchte, über spektrale Analysen Veränderungen der Vegetationsvitalitäten ermittelt werden. Über die Interpretationen multispektraler Daten können neue oder vergrößerte Wasserflächen detektiert werden. Zudem besteht die Möglichkeit wassermanagementinduzierte Bodenbewegungen (beispielsweise Hebungen durch Grubenwasseranstieg) mit interferometrischen Radardaten zu detektieren und zu messen. Ein Monitoring mit diesen Verfahren ist für größere Flächen möglich. Als Fernerkundungssensoren eignen sich die Copernicus-Satelliten Sentinel-1 und 2, die zusätzlich den großen Vorteil haben, dass die Daten in kurzen Perioden kostenfrei und operationell verfügbar sind. Im vorliegenden Paper sind mehrere mögliche Monitoringkomponenten beschrieben, die im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben entstanden sind.*

### ABSTRACT:

*Hydrological monitoring is important for mining activities. For example, a change of hydrological conditions might indicate an impact of mining activities in the neighborhood. The detection of such impacts is a relevant task. The observed areas are usually large, and a cyclic manual inspection is often very expensive. Therefore, remote sensing is suitable to*

*do a monitoring of such areas in order to detect different processes. Changes in soil moisture can be detected by looking into backscattering characteristics of radar images, spectrum analysis of optical images is able to assess vegetation vitality. The interpretation of multispectral data is able to show new and enlarged water bodies. Furthermore, ground deformation caused by hydrological changes (for example uplifts as a consequence of increasing pit water) can be detected and measured via radar interferometry. A monitoring with such methods is possible for large areas. As remote sensing sensors the Copernicus-satellites Sentinel-1 and 2 are suitable with the big advantage of providing data in short cycles operationally and free of charge. In this paper various monitoring components are described.*

## **1 Einleitung**

Die Rohstoffversorgung der Menschen ist ohne bergbauliche Prozesse nicht denkbar. Global betrachtet, produzieren bergbauliche Betriebe jährlich etwa 5 t Rohstoffe pro Kopf der Bevölkerung. Hiermit ist unabdingbar auch ein Einfluss auf die Umwelt verbunden. Um die Auswirkungen zu beobachten, zu verstehen und zu beeinflussen bedarf es im gesamten bergbaulichen Lebenszyklus intensiver Monitoringmaßnahmen. Dabei steht das Medium Wasser in einem zentralen Fokus.

Die Analyse der Wechselwirkungen von Bergbau und Hydrologie ist im Hinblick auf die Beendigung des subventionierten deutschen Steinkohlenbergbaus in den Revieren in Nordrhein-Westfalen und im Saarland von besonderer Bedeutung (Melchers et al. 2015). Aus diesem Grund wurde an der THGA auf Initiative der RAG Stiftung vor einigen Jahren das Forschungszentrum Nachbergbau (FZN) gegründet. Im Mittelpunkt der Arbeiten des FZN steht die Mitwirkung an der Bewältigung der Ewigkeitsaufgaben, also der untätigen Wasserhaltung und der Entwässerung der Polderflächen. Ein möglichst umfassendes System- und Prozessverständnis lässt sich nur auf der Basis der Informationen leistungsfähiger Monitoringverfahren erreichen. Die in den letzten Jahren durchgeführten Untersuchungen haben die besonderen Potentiale der satellitengestützten Erdbeobachtung erkennen lassen (Goerke-Mallet et al. 2016). Von erheblicher Bedeutung ist dabei die im Copernicus-Programm favorisierte Kombination der Weltraumkomponente mit der in-situ-Komponente. Hierunter werden fachliche Expertisen, Fachdaten und alle übrigen Sensor-Informationen (airborne und terrestrisch) verstanden. Damit wird eine hochaufgelöste Darstellung der Umweltauswirkungen bergbaulicher Prozesse ermöglicht.

Die aktuellen Arbeiten zur Analyse von hydrologischen Fragestellungen in unterschiedlichen Phasen des bergbaulichen Lebenszyklus werden im Weiteren dargestellt.

## 2 Monitoringkomponenten

### 2.1 Oberirdische Wasserflächen

Mit Copernicus-Daten können Veränderungen an oberirdischen offenen Wasserflächen detektiert werden. Die folgenden Beispiele sind dem Forschungs- und Entwicklungsprojekt GMES4Mining ([www.gmes4mining.info](http://www.gmes4mining.info)) entnommen. Die verwendete Testfläche Kirchheller Heide befindet sich im nordwestlichen Bereich der Ruhrregion. Sie wurde im Rahmen von GMES4Mining genutzt, um Methoden zur Erkennung von Veränderungen an Wasserkörpern und im Boden-Wasser-Gehalt infolge bergbaulicher Bodenbewegungen zu entwickeln.

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

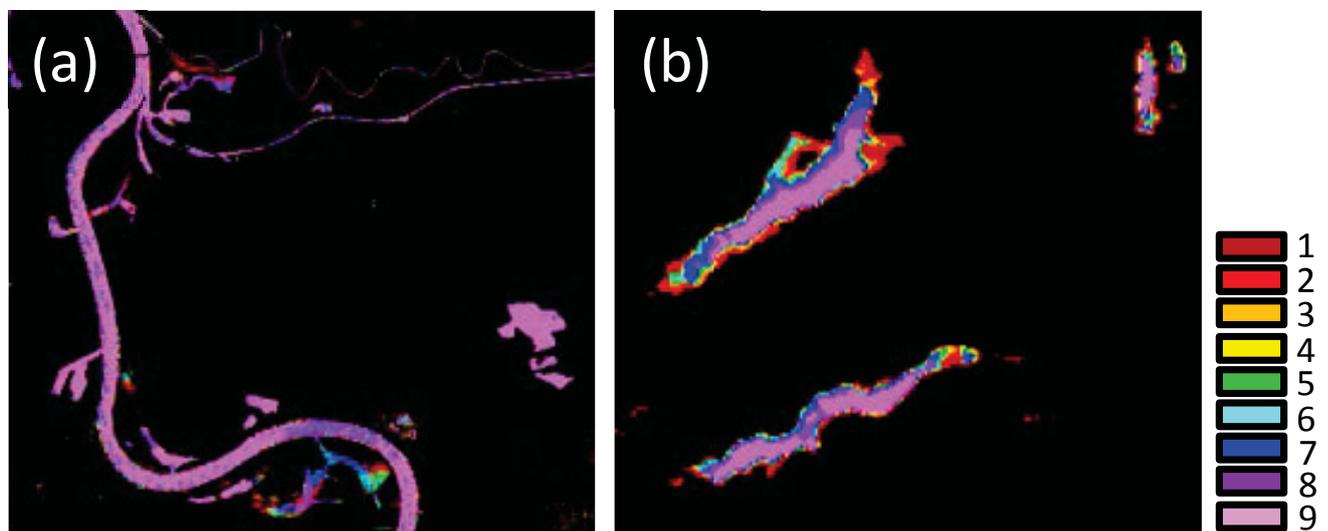


Abb. 1: Ergebnisse der Veränderungsdetektion durch Nutzung von 9 RapidEye Aufnahmen zwischen April 2009 und September 2012 des Ruhr Tals, Deutschland (a). Bekannte Polderfläche in der Kirchheller Heide (b).

Die indirekte Beobachtung von Wasserflächen – und Grundwasserstandsveränderungen basiert dagegen auf Veränderungen der Vegetation, die auf Änderungen des Boden-Wasser-Gehaltes und dem Anstieg des Wasserspiegels beruhen (vgl. hierzu Kap. 2.2). Das plötzliche Auftreten von Wasser an der Tagesoberfläche bzw. im Wurzelraum ruft in der betroffenen Vegetation besondere Erscheinungsbilder hervor, die zur Unterscheidung von Senkungsseen und anderen Wasserkörpern

genutzt werden können. Diese Information kann durch die einfache Beobachtung der Wasserverteilung nicht erzielt werden (Garcia Millan et al. 2014).

## 2.2 Vernässungsbedingte Vegetationsschäden

GMES4Mining bewertete auch die Auswirkungen von Vernässungen auf die Vegetation. Im Umfeld von bergbaulich bedingten Wasserflächen sterben Pflanzen oftmals ab und Gruppen von Bäumen mit unterschiedlichen Schadensstufen lassen sich beobachten (Abb. 2)

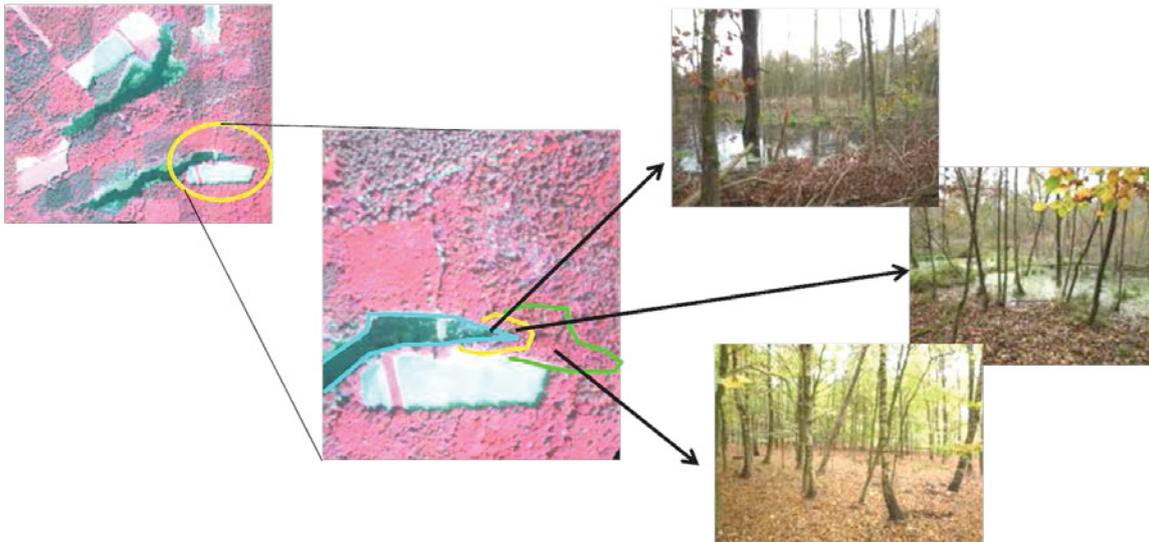


Abb. 2: Vernässungsstadien in der Kirchheller Heide. AISA-Eagle Airborne Sensor Infrarot Darstellung. Fotos aufgenommen im Oktober 2012.

Unterschiedliche Stadien der Schädigung der Vegetation lassen sich deutlich abgrenzen auf der Basis der Analyse von hyperspektralen Daten des Sensors AISA-Eagle (Abb. 3). Tatsächlich kann der Aufwand für aufwendige Befliegungen durch Daten der Copernicus Sentinel-2-Mission ersetzt werden. Diese stehen seit 2015 kostenfrei zur Verfügung. Die vertikalen Linien in Abb. 3 repräsentieren die relevanten Infrarot-Bänder von Sentinel-2.

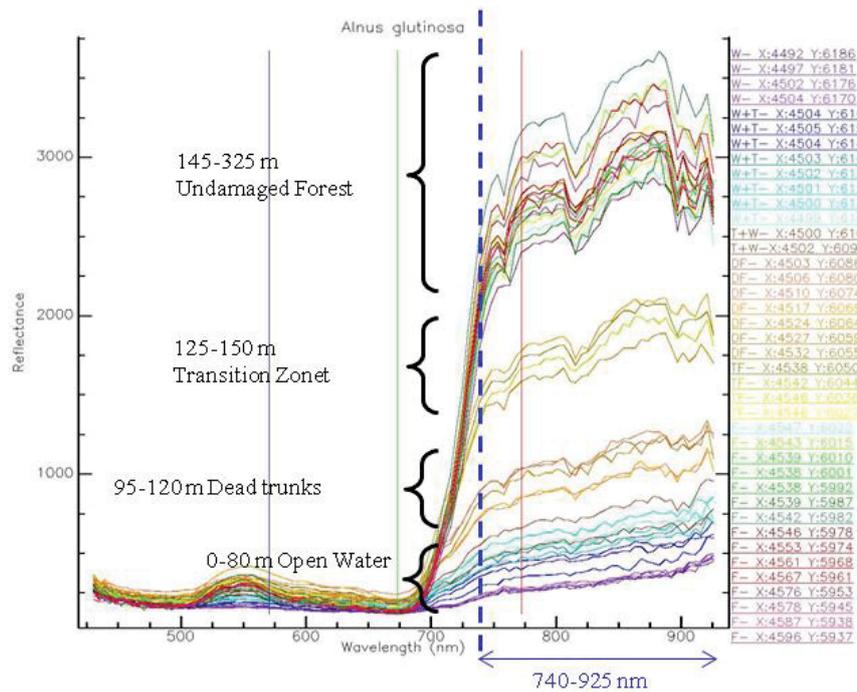
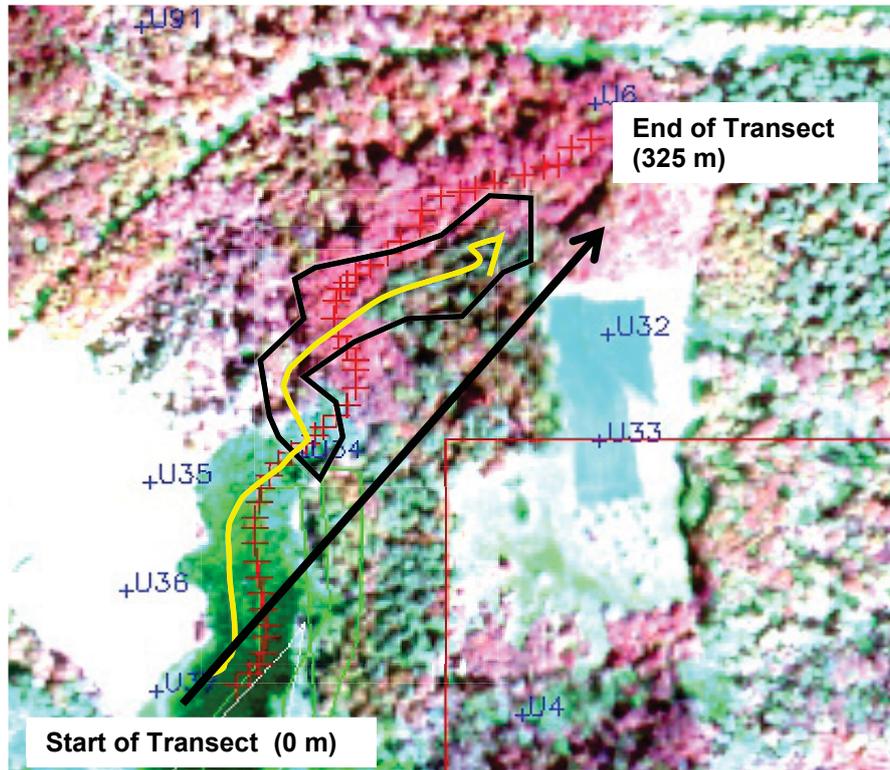


Abb. 3: Vegetationsschaden-Transekt im Testgebiete Kirchheller Heide ausgehend von der offenen Gewässerfläche bis zum ungeschädigten Wald. AISA-Eagle Daten als Graphen und Sentinel-2 Bänder als vertikale Linien.

### 2.3 *Wasserhaushaltsrelevante Informationen aus Radardaten*

Unter den Copernicus-Satelliten befindet sich mit Sentinel-1 ein Radar-Satellit, der sich sehr gut eignet, um verschiedene Informationen zum Wasserhaushalt zu liefern. Ein Radar-Satellit hat im Vergleich zu den optisch aufnehmenden Satelliten den Vorteil, dass er wetterunabhängig ist und somit auch bei Bewölkung eingesetzt werden kann.

In Abb. 4 ist eine Sentinel-1 Aufnahme der Großen Dhünntalsperre dargestellt. Hieran lässt sich zeigen, dass es mit Hilfe von Radarbildern gut möglich ist, die Wasser-Land-Grenze zu bestimmen und den Änderungsverlauf dieser Grenze zu verfolgen.

Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojektes STINGS ([eitrawmaterials.eu/project/stings/](http://eitrawmaterials.eu/project/stings/)) wurden Untersuchungen zum Monitoring von Tailing-Becken durchgeführt. Tailings enthalten die Rückstände aus dem Bergbau und werden in Becken gehalten. Da es in der Vergangenheit bereits zahlreiche Schadensfälle mit Tailing-Becken gegeben hat (Dammbrüche etc.) und das Tailing i.d.R. schädlich für die Umwelt ist, gibt es ein starkes Interesse durch ein Monitoring von Tailing-Becken eventuelle Instabilitäten frühzeitig zu detektieren. Dabei stützt sich eine der Monitoringkomponenten auf satellitenbasierte Radardaten aus Sentinel-1.

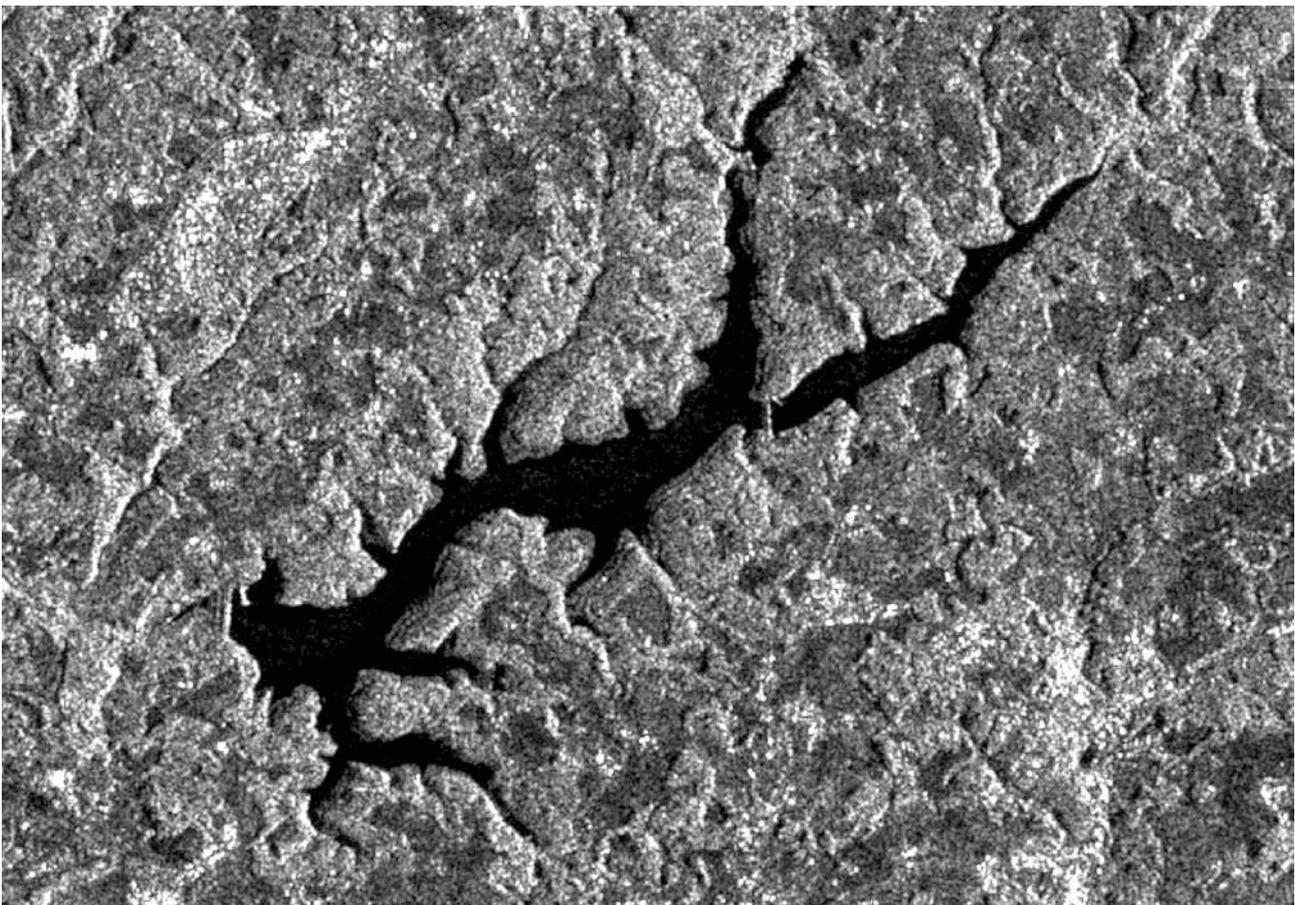


Abb. 4: Radarbild, Sentinel-1, aufgenommen am 17.10.2017, Große Dhünntalsperre

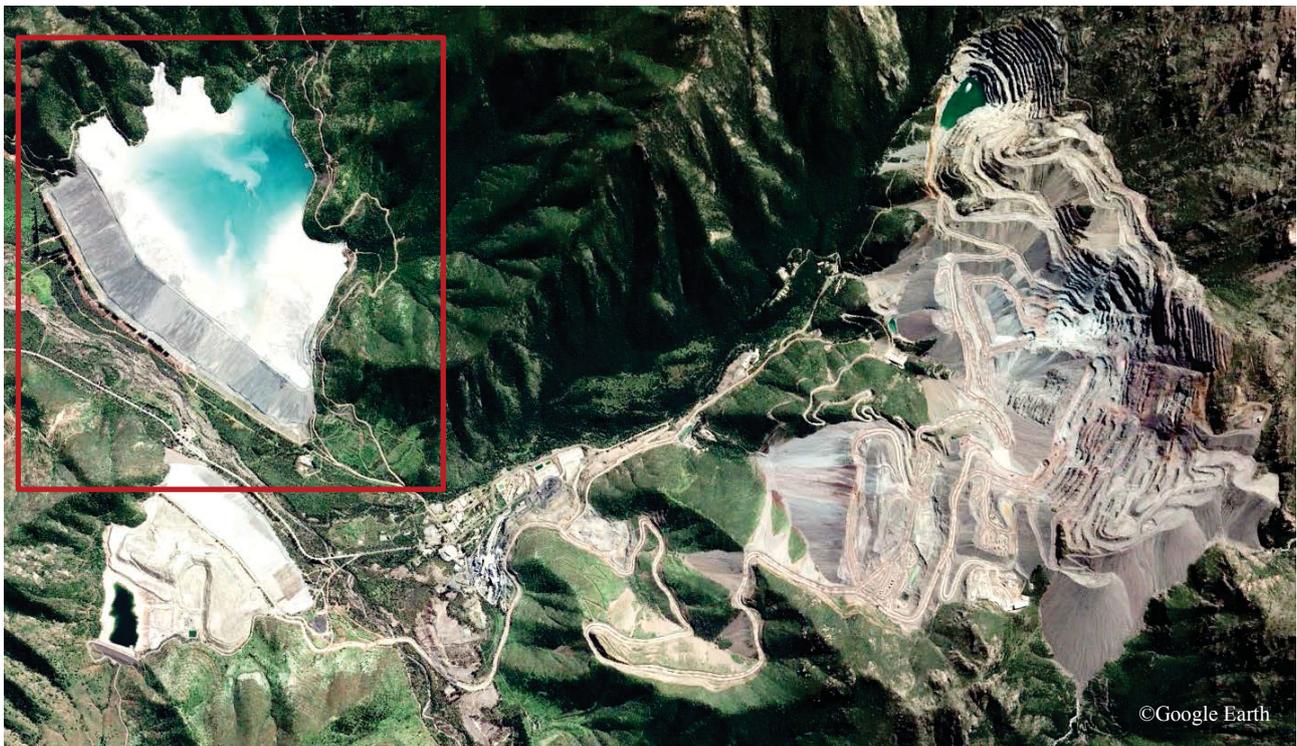


Abb. 5: Bergbaumine El Soldado in Chile, Aufnahme vom 10.06.2017, markiert: Tailing-Becken

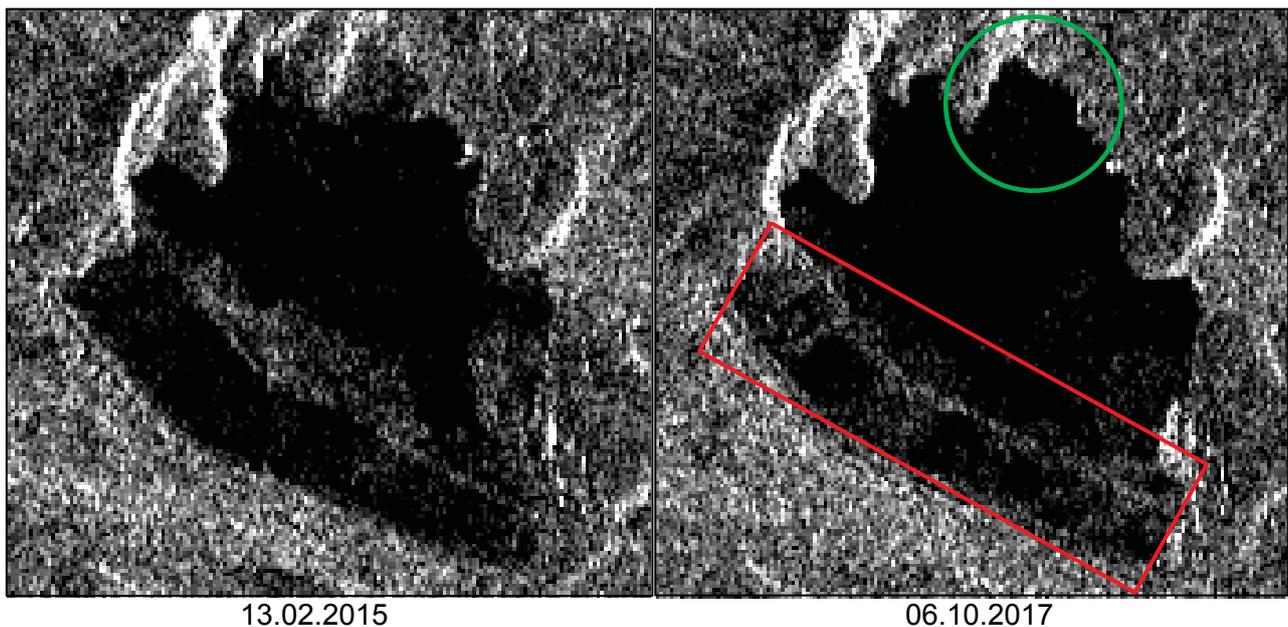


Abb. 6: Sentinel-1-Ausschnitte des Tailing-Beckens in El Soldado für zwei Zeitpunkte

In Abb. 5 ist die Kupfermine El Soldado in Chile dargestellt. In der Abbildung ist das Tailing-Becken markiert. Wie zu erkennen ist besteht es im Südwesten aus einem Sand-Damm, der das Tailing zurückhält. Für das Tailing-Becken ist in Abb. 6 für zwei Zeitpunkte im Abstand von 2,5 Jahren Sentinel-1 Ausschnitte dargestellt. Auch hier ist der unterschiedliche Wasserstand in den Bildern zu sehen: In 2017 kann man den erhöhten Wasserstand insbesondere im nördlichen Bereich erkennen (siehe obere Markierung) an der veränderten Tailing-Land-Grenze.

Wie bereits dargestellt, wirkt sich der Wassergehalt auf das Rückstreusignal der Radarwellen aus, wobei es noch mehrere weitere Einflussfaktoren gibt. Diese Auswirkung führt dazu, dass man durch

ein Monitoring einer Fläche mit Radarbildern eine Änderung der Bodenfeuchte detektieren kann. Dies lässt sich ebenfalls anhand der Abb. 6 zeigen. In der unteren Markierung ist der Tailing-Damm zu erkennen. Über das Rückstreuverhalten des Signals in dem Bereich ist zu erkennen, dass der Sand-Damm im Februar 2015 mit hoher Wahrscheinlichkeit eine höhere Feuchtigkeit aufwies als im Oktober 2017 (der Bereich ist dunkler). Auf diese Art ist es möglich, Veränderungen in der Bodenfeuchte, die beispielsweise aus einer bergbaubedingten Vernässung folgen können, zu detektieren.

Neben der Bestimmung der Wasser-Land-Grenze und einer Abschätzung der Bodenfeuchte können mit Hilfe der Radardaten auch wassermanagementinduzierte Bodenbewegungen detektiert und gemessen werden. So können beispielsweise Hebungen durch Grubenwasseranstiege gemessen werden. In Abb. 7 ist der umgekehrte Fall dargestellt, nämlich eine Senkung, die gemessen wurde an einem Tailing-Damm im rumänischen Baia Mare.

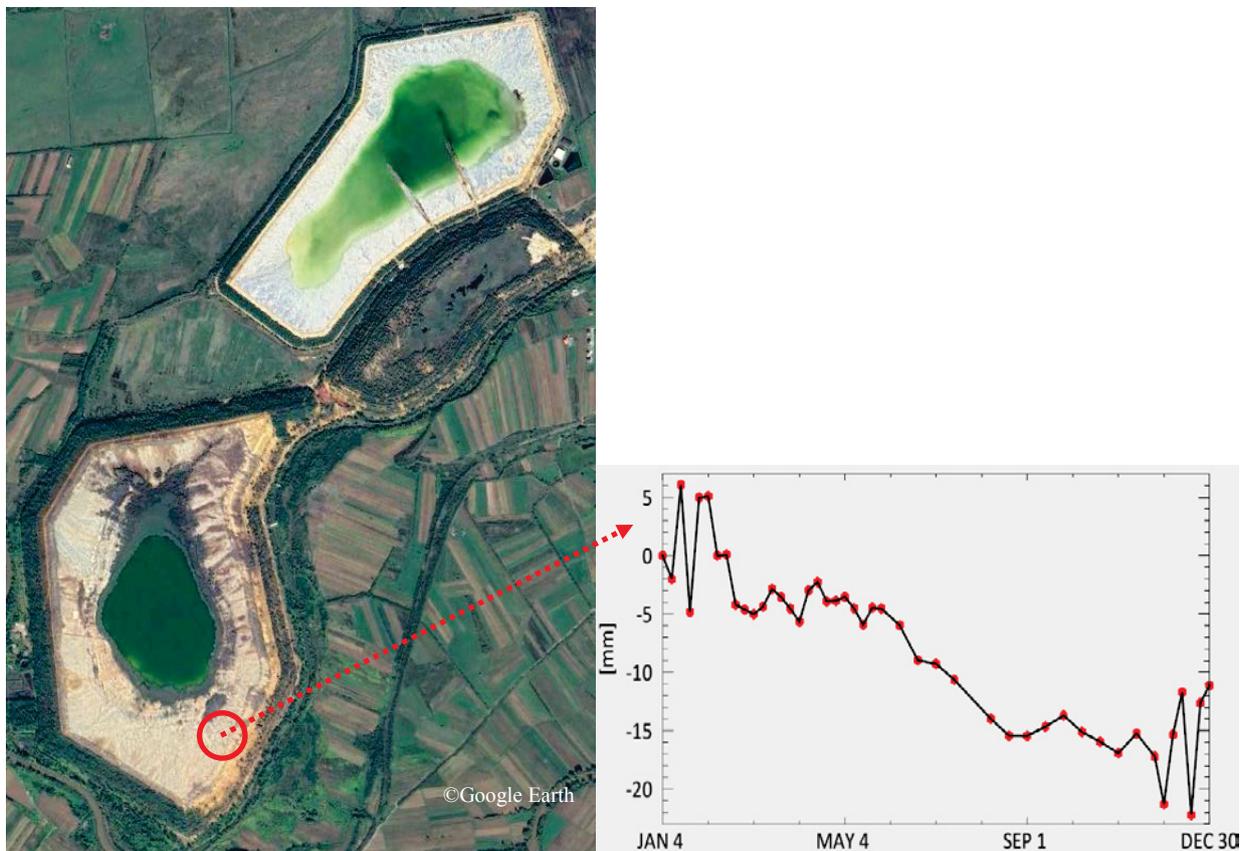


Abb. 7: PSI-Analyse zur Bestimmung der Bodenbewegung am Tailing-Damm im rumänischen Baia Mare für 2017 unter Verwendung von 45 Sentinel-1 Szenen

Zur Messung der Bodenbewegungen wurde die PSI-Methodik (Ferretti et. al. 2001, Kampes 2006) auf 45 Sentinel-1 Szenen angewendet. Für 2017 ist damit eine Senkung von 10-20mm zu beobachten. Im Januar und Dezember sind größere Schwankungen in der berechneten Bewegungsrate zu erkennen, deren Ursachen noch zu prüfen sind.

### 3 Ausblick

Im Rahmen mehrerer laufender Forschungsprojekte werden die Ergebnisse des satellitengestützten Monitorings durch in-situ-Informationen verifiziert. Die Interpretation der Daten der Fernerkundung wird damit schrittweise verbessert. Die enormen Potentiale, die sich aus der Kombination verschiedener Monitoringmaßnahmen, unterschiedlicher Sensoren und fachlicher Expertise ergeben, lassen sich aktuell nur erahnen. Sie zu heben ist das Ziel aller Fachleute, die an der Weiterentwicklung der Erkenntnisse arbeiten. Von zentraler Bedeutung ist dabei der fachliche Austausch und der wissenschaftliche Diskurs.

#### LITERATURVERZEICHNIS

Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F.: Permanent scatterers in SAR interferometry. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans.* 39 (1), 8–20, 2001

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

Goerke-Mallet, P., Melchers, C., Mütterthies, A.: Innovative monitoring measures in the phase of post-mining. *Mining Report* 153, S. 218 – 225, 2016

Kampes, B.: *Radar Interferometry – Persistent Scatterer Technique, Remote Sensing and Digital Image Processing*, vol. 12, Springer, 2006

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