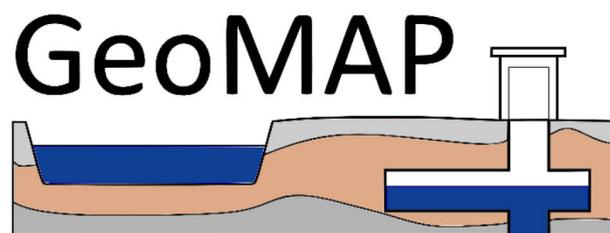


Konferenzband

Abschlusskonferenzband im Projekt GeoMAP

Dynamik und Prozessmodellierung der Grubenflutung in
Bergbaufolgelandschaften Sachsens und Nordböhmens

23.04.2021



Veranstalter

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Pillnitzer Platz 3
01326 Dresden

Kontakt

Maria Ussath
+49 3731 294 1503
Maria.ussath@smul.sachsen.de

Zielsetzung

Im Rahmen des Kooperationsprogramms „Freistaat Sachsen - Tschechische Republik 2014 - 2020“ ist das Projekt GeoMAP initiiert worden. Es dient dem Erfahrungsaustausch über geowissenschaftliche Methoden und Modellierungen als wesentliche Grundlage für weitumfassende Betrachtungen in Bergbaufolgegebieten. Ziel der vier Projektpartner ist es, durch neue Impulse die Ermittlung und Auswertung von Datensätzen und damit die Prognose der diversen Bergbaufolgeerscheinungen zu verbessern. Als Untersuchungsgebiet werden ehemalige Bergbaureviere im Erzgebirge und das Braunkohlenrevier Nordböhmen betrachtet.

Besonderer Schwerpunkt des Projektes liegt auf dem gegenseitigen wissenschaftlichen Austausch zwischen den Projektpartnern. Darüber hinaus soll die Kommunikation zwischen Wissenschaft, Behörden und anderen Einrichtungen und Institutionen verbessert werden. Um dies zu erreichen wurden u.a. vier Konferenzen zu den Themenschwerpunkten der Projektpartner veranstaltet.

Thema dieses Konferenzbandes:

Dieser Konferenzband ist im Zuge der Abschlussveranstaltung des Projekts GeoMAP entstanden. Die Abschlussveranstaltung fand am 23.04.2021 als Online-Veranstaltung statt. Während der Abschlussveranstaltungen präsentierten die internen Projektpartner den neusten Wissensstand zum Thema „Dynamik und Prozessmodellierung der Grubenflutung in Bergbaufolgelandschaften Sachsens und Nordböhmens“. Externe Fachreferenten erweiterten das Themenfeld auf befindliche Gebiete im Saarland und Ruhrgebiet.

Finanzierung

GeoMAP ist ein vom Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und durch Landesmittel des Freistaates Sachsens unterstütztes, internationales Projekt aus dem Programm zur Förderung der grenzübergreifenden Zusammenarbeit zwischen dem Freistaat Sachsen und der Tschechischen Republik 2014–2020, registriert unter der Nummer 100348899.



Beteiligte Projektpartner

Am Projekt GeoMAP sind das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), die Technische Universität Ostrava sowie die TU Bergakademie Freiberg beteiligt. Die TU Bergakademie Freiberg ist zur Bearbeitung mit dem Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und dem Lehrstuhl für Gebirgs- und Felsmechanik/Felsbau vertreten.

Leadpartner: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie



Projektpartner 1: Technische Universität Bergakademie Freiberg



Projektpartner 1a: Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Lehrstuhl Felsmechanik/ Felsbau



Projektpartner 1b: Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik, Professur für technische Thermodynamik



Projektpartner 2: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava



Inhaltsverzeichnis

1. Aktualisierung des 3D-Untergrundmodells von Lugau/Oelsnitz	5
2. Numerische Simulation von Hebungen über gefluteten Steinkohlebergwerken des Altbergbaus am Beispiel des ehem. Steinkohlereviers Lugau-Oelsnitz	21
3. Grubenwassergeothermie als innovative Energiequelle – Bergbaufolgegebiete positiv nutzen –	38
4. Die Ausnutzung ausgewählter Methoden des geotechnischen Monitorings unter Feldbedingungen	51
5. Erfahrungen aus dem Wasseranstieg nach Stilllegung des Steinkohlebergbaus der RAG AG	63
6. Grenzüberschreitende Überwachung des Grubenwasseranstiegs im ehemaligen saarländisch-lothringischen Steinkohlerevier	70
7. Erfahrungen bei der modelltechnischen Begleitung der Flutung der ehemaligen Urangrube Königstein	78



Aktualisierung des 3D-Untergrundmodells von Lugau/Oelsnitz

S. Hädecke, R.A. Oeser, A. Rommel, M. Ussath, M. Hübschmann

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Zusammenfassung

Für die Visualisierung des geologisch-strukturellen Untergrundes sowie für die Prognose von Bergbaufolgen ist es unerlässlich, auf Daten aus der Zeit des aktiven Bergbaus und der Verwitterung zurückzugreifen. Dies gilt insbesondere für das ehemalige Steinkohlenrevier Lugau/Oelsnitz südwestlich von Chemnitz in Sachsen. In diesem Gebiet wurde von 1844 bis 1971 Steinkohle gefördert, wobei komplizierte geologische und tektonische Verhältnisse den bergmännischen Betrieb maßgeblich beeinflussten (Felix & Berger 2010). Diese natürlichen Verhältnisse, rezente Hebungs- und Senkungsbewegungen aus der Zeit der Post-Bergbau-Ära und eingeschränkte Monitoringmöglichkeiten des Flutungsprozesses im Grubengebäude erschweren die Aufarbeitung der Daten für ein montanhydrogeologisches 3D-Modell. Dieses Modell soll zum einen der Visualisierung der strukturellen Untergrundkomponenten dienen und zum anderen zukünftig als geometrische Basis für eine geohydraulische Simulation von belastbaren Prognosen des stetigen Anstiegs des Grubenwassers im Lugau/Oelsnitzer Revier eingesetzt werden. Die Datengrundlage für die Modellierung besteht aus etwa 300 Bohrungen und Schächten, dem bergmännischen Risswerk und der bergschadenkundlichen Analyse. Neuere Untersuchungen, wie z.B. geophysikalischen Messungen und hydrogeochemische Analysen stehen als Grundlage für die Erstellung einer geohydraulischen Simulation ebenfalls zur Verfügung. Letztgenannte Untersuchungen wurden bereits in der Veröffentlichung von Hädecke et al. (2019) thematisiert. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich vertieft mit der Aufarbeitung der Bohrungsdaten, Schachtdokumentationen und des bergmännischen Risswerkes sowie mit Ansätzen der Modelloptimierung auf Grundlage dieser Quellen. Abschließend wird ein Ausblick auf die notwendigen weiteren Arbeiten des LfULG zu Gefährdungsanalyse des Wiederanstiegsprozesses im Steinkohlenrevier Lugau/Oelsnitz über das Projekt GeoMAP hinaus gegeben.

5

1. Der geologisch-strukturelle Untergrund von Lugau/Oelsnitz und seine Beeinflussung durch den Steinkohlenbergbau

Das ehemalige Steinkohlenrevier Lugau/Oelsnitz befindet sich im Chemnitz-Becken, einem während der variskischen Gebirgsbildung angelegten intramontanen Becken (siehe Abbildung 1). Während der Sedimentation wurde der Bereich von mehreren Grabenstrukturen geprägt, die die Sedimentationsräume und damit auch die Bereiche der Flözbildung tektonisch gliederten.

Die kohleführenden Karboneinheiten liegen in diesem Revier unter einer bis zu 1200 m mächtigen Deckgebirgsschicht aus Rotliegendensedimenten (Felix et al. 2007). Insgesamt ist das Revier Lugau/Oelsnitz durch große Abbauteufen, komplexe tektonische Störungen und eine Vielzahl hydraulisch wirksamer geologischer und hydrogeologischer Einheiten und Strukturen gekennzeichnet.



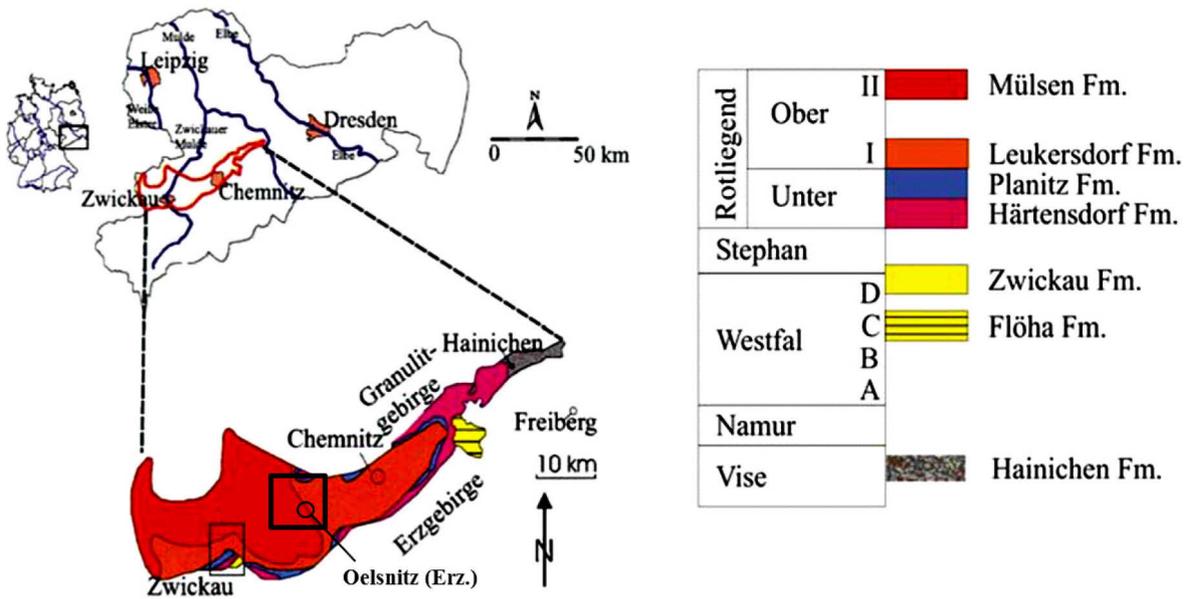


Abbildung 1: Lage des Untersuchungsgebietes, verändert nach (Lange 1998).

Im Zuge der Steinkohleförderung in Lugau/Oelsnitz hatten diese komplizierten Bedingungen großen Einfluss auf das Fortschreiten des Abbaus und damit die Absenkung des Deckgebirges sowie der Tagesoberfläche. Die Region hat im Laufe des aktiven Bergbaus und der Zeit danach eine Reihe unerwünschter Prozesse, wie Geländedeformationen mit negativem und positivem Betrag durchlaufen, deren Ursache auf das Abbaugeschehen zurückzuführen sind. Auch der Prozess des Grubenwasserwiederanstieges nach Einstellung der Wasserhaltung im Zuge der Beendigung des Bergbaus spielt dabei eine entscheidende Rolle. Aus dem Zusammenspiel dieser Ursachen ergibt sich ein dringender Handlungsbedarf für die betroffenen Kommunen, Behörden und Experten aus Wissenschaft und Wirtschaft, um mögliche Folgen, wie die Bildung von Vernässungszonen rechtzeitig abschätzen zu können.

Eine Zusammenfassung der wichtigsten Untersuchungen und Projekte seit Einstellung des Steinkohlenbergbaus in Lugau/Oelsnitz findet sich im Projektband GeoMAP (Rommel et al. 2021). In diese Untersuchungen gliedert sich das EU-Projekt GeoMAP ein (Hädecke et al. 2019). Im Rahmen dieses Erfahrungsaustauschprojektes erarbeiten das Institut für Geotechnik (TU Bergakademie Freiberg) und das LfULG gemeinsam geologische, hydrogeologische und geomechanische Modellierungs-, Visualisierungs- und Prognoseansätze für das Untersuchungsgebiet Lugau/Oelsnitz.

2. Datengrundlage

Folgende Quellen bilden die Datengrundlage für das geologisch-strukturelle 3D-Modell (Steinborn 2005) und wurden von Seiten des LfULG im Rahmen von GeoMAP näher untersucht:

- Die Bergschadenkundliche Analyse für Lugau/Oelsnitz (Beyer 1974)
- Das bergmännische Risswerk
- Schichtenverzeichnisse und Dokumentationen zu Bohrungen und Schächten Archivunterlagen und geologische Vorarbeiten (Steinborn (2005) und Felix et al. (2007))

3. Datenrecherche und -dokumentation

Folgende Archivstandorte wurden in die umfassenden Recherchen zum Lugau/ Oelsnitzer Revier im Rahmen der Projektarbeit von GeoMAP einbezogen:

- Sächsisches Staatsarchiv, Abteilung 5 Bergarchiv Freiberg
- Bergbaumuseum Oelsnitz/Erzgebirge
- Sächsisches Oberbergamt
- Archiv des LfULG

Dabei wurden die Metadaten der vorgefundenen Archivalien systematisch erfasst und ein Teil, welcher für die weitere Arbeit in GeoMAP als unmittelbar relevant eingestuft wurde, wurde digitalisiert und wenn nötig georeferenziert.

Auf die Datengrundlage in GeoMAP und das Vorgehen sowie die Ergebnisse der Datenrecherche an den genannten Standorten wird im abschließenden Projektband für GeoMAP (erscheint im Juni 2021) vertieft eingegangen.

4. Das geologisch-strukturelle 3D-Modell von Lugau/Oelsnitz

Das bestehende geologisch-strukturelle 3D-Modell von Lugau/Oelsnitz wurde mittels der Software GOCAD® (Paradigm Geophysical Corp.) im Rahmen eines Eigenforschungsprojektes des LfULG zum Thema „Tektonik und Strukturbaue des Permokarbons“ von 2003 bis 2005 erstellt (Steinborn 2005). Es enthält die geologischen Formationen Quartär, Rotliegend und Karbon sowie die Obergrenze des phyllitischen Grundgebirges. Die geologischen Grenzen existieren als sogenannte *Surfaces* im Modell. Elf relevante Störungszonen, welche die Steinkohlenlagerstätte in tektonische Blöcke unterteilen, sind als Flächen im Modell abgebildet. Weiterhin sind die für die Modellierung herangezogenen Bohrungen und Schächte sowie ein Teil der bergmännischen Auffahrungen Bestandteil des Modells (Abbildung 2).

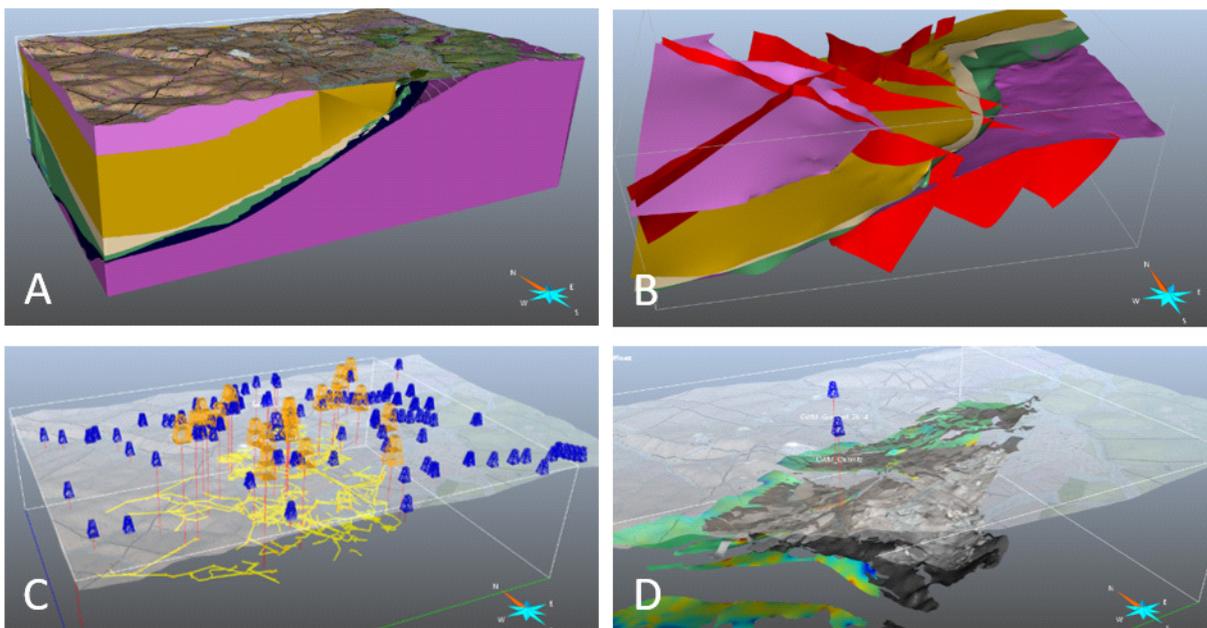


Abbildung 2: Eindrücke des GOCAD-3D-Modells nach Steinborn (2005). A: Die geologischen Einheiten als Blockbild, B: die oberen Schichtgrenzen (ohne Geländeoberkante) der geologischen Einheiten und vier signifikante Störungszonen (rot), C: die im Modell erfassten Bohrungen (blau) und Schächte (orange) sowie bergmännische Auffahrungen (gelb), D: die Flächen, welche die Steinkohleflöze abbilden sowie die beiden Grubenwassermessstellen Oelsnitz (SW) und Gersdorf (NE).

Das bestehende 3D-Modell erlaubt somit einen Überblick über den komplizierten strukturgeologischen Aufbau des Untersuchungsgebietes und die bergmännisch überprägten Bereiche. Im Zuge der Untersuchungen, welche im Sachstandsbericht (Felix et al. 2007) zusammengefasst sind, wurde das Modell seinerzeit verwendet, um ein Grubenwasseranstiegmodell auf dessen struktureller Grundlage zu entwickeln (Felix et al. 2007). Die hierbei entstandenen Grubenwasseranstiegsszenarien basieren auf einem Boxmodell (Eckart & Unland 2005) und sollen für Prognosen und Planungen von Maßnahmen zur Abwehr von Bergschäden durch das ansteigende Grubenwasser herangezogen werden. Auch wurden Informationen aus dem Modell für die numerische Senkungsmodellierung durch den GeoMAP-Projektpartner TUBAF, Institut für Felsmechanik genutzt. Es hat sich jedoch gezeigt, dass das derzeitige 3D-Modell die Anforderungen für die Flutungsprognose und die numerische Modellierung nur bedingt erfüllt. So ist es beispielsweise nicht möglich, Resthohlräume in den ehemaligen Abbaufeldern zu lokalisieren, da das Modell die lokalen Volumina des bergmännischen Versatzes nicht erfasst. Stattdessen wurde die Differenzierung der Lagerstätte in Form eines Boxmodells vorgenommen, in welche die flutbaren Resthohlräume integriert wurden (Eckart & Unland 2005).

Im Bereich der Rotliegend-Formationen wird eine Unterteilung in Mülsen- Leukersdorf, Planitz- und Härtensdorf-Formation abgebildet. Diese spiegeln jedoch nicht die unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften dieser Gesteinsfolgen wieder, welche das Rotliegende allgemein aufweisen kann (vgl. Kollitsch 2008). Für eine Transportmodellierung für den Grubenwasseranstieg wäre eine differenzierte Unterteilung zweckmäßig.

5. Bearbeitungsschwerpunkte in GeoMAP

Im Rahmen der fachlichen Arbeiten des LfULG in GeoMAP stand zunächst die Recherche und Dokumentation der Ausgangsdaten für das Untersuchungsgebiet Lugau/Oelsnitz im Fokus. In den Vorgängeruntersuchungen (Steinborn 2005; Felix et al. 2007) wurden die verwendeten Daten zwar erläutert, jedoch waren viele Zwischenprodukte und Metainformationen zur Digitalisierung und Modellierung nicht mehr verfügbar. Für eine Validierung des 3D-Modells war es deshalb notwendig, die Herkunft der Ausgangsdaten festzustellen und ihre Übertragung in die 3D- noch einmal zu prüfen. Aufgrund der fehlenden Dokumentation der Metadaten, speziell für die verwendeten Archivunterlagen, war dies indessen mit hohem Rechercheaufwand verbunden. Die an die Datenakquise anknüpfende Überprüfung erfolgte in folgenden Schritten:

Schritt 1: Zusammenfassung und Ergänzung aller Bohrungen und Schächte aus der Aufschlussdatenbank im Untersuchungsgebiet

Im folgenden Abschnitt soll die Vorgehensweise des initialen Datenabgleichs beziehungsweise der Datenbeschaffung aus der Aufschlussdatenbank des LfULG kurz beschrieben werden.

Zunächst wurden die in Felix et al. (2007), Anlage 16 aufgeführten Bohrungen und Schächte als Punktdaten in ArcGIS visualisiert und es erfolgte ein prinzipieller Abgleich der Angaben im Sachstandsbericht (Felix et al. 2007) mit den Daten mittels GeODin¹ hinsichtlich Hoch- und Rechtswert, Geländeoberkannte und Endteufe der Bohrungen. Sofern vorhanden, wurden anschließend weitere Schichtdaten aus der zentralen Aufschlussdatenbank des LfULG in den Datensatz aufgenommen. Weitere, zum Teil nach 2007 geteufte Bohrungen und Schächte, welche eine Teufe von 50 m erreichen, Schichtinformationen enthalten und aufgrund dieser Bedingungen zur Ertüchtigung des 3D-Modells dienen können, wurden im Datensatz ergänzt (Abbildung 3). Die in GeODin ausgewiesenen Horizonte „Steinkohleflöz“ sollten im nächsten Schritt genauer spezifiziert werden. Dazu wurden die

¹ GeODin (kommerzielle Software der Fa. FUGRO, Berlin) zur graphischen Darstellung von Bohrprofilen und Schnitten sowie für komplexe Auswertungen

Teufeninformationen der Flöze (hinterlegt in ArcGIS als *Shapefiles* und/oder als georeferenzierte Rasterdaten) verglichen, um den Steinkohlenflözen die entsprechende Markerbezeichnung zuordnen zu können (z.B. Floez_Haupt für Hauptflöz). Dies war ein wichtiger Schritt, um die Angaben zu den Abbaubereichen in den Übersichtsrisen, welche für die GOCAD-Modellierung herangezogen wurden, zu verifizieren und gegebenenfalls anzupassen.

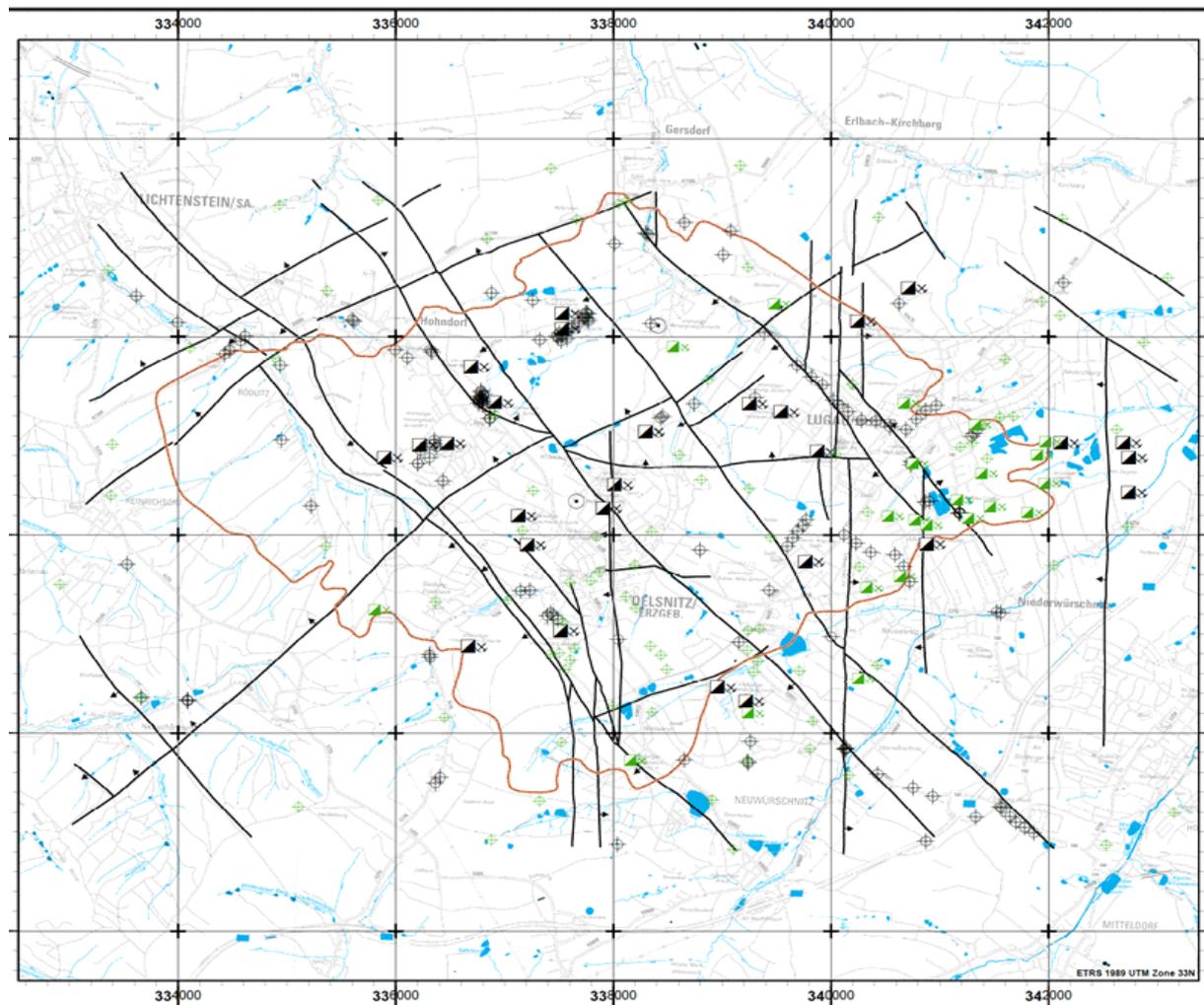
Hierfür wurde zusätzlich die Grundlagenkarte Steinkohleninventur (Markscheiderei Oelsnitz i.E. 1948) für den Abgleich und die Benennung der Horizonte herangezogen. Zudem wurden 9 Schachtprofile aus dem Archivbestand des Bergbaumuseums genutzt, um die Angaben in der Aufschlusdatenbank zu ergänzen. Diese Profile (siehe Tabelle 1) thematisierten in der Regel den Abschnitt Basis Rotliegend bis zur Schachtsohle, die teilweise bis zum Top des Grundgebirges reichte.

Tabelle 1: Übersicht über die verwendeten Schachtprofile aus dem Archivbestand des Bergbaumuseums.

Bezeichnung Schachtprofil	Jahr der Erstellung	Urheber
Hedwig-Schacht	1932	Markscheiderei Gewerkschaft Deutschland
Helene-Schacht	1932	Markscheiderei Gewerkschaft Deutschland
Ida-Schacht	1932	Markscheiderei Gewerkschaft Deutschland
Friedenschacht	1930	Markscheiderei Gewerkschaft Deutschland
Deutschland-Schacht I	1932	Markscheiderei Gewerkschaft Deutschland
Deutschland-Schacht II	1932	Markscheiderei Gewerkschaft Deutschland
Vertrauen-Schacht	1938	Markscheider Arnold
K.-Liebknecht-Werk Oelsnitz	1946	Markscheiderei Karl-Liebknecht-Werk
Vereinglück-Schacht I	1882/1929	Markscheider Sagert, Markscheiderei Oelsnitz
R.-Breitscheid-Schacht – nicht implementiert	k.A.	Markscheiderei Gewerkschaft Deutschland
Glück-Auf-Schacht – nicht implementiert	1897	Steinkohlenverein Gottes Segen

Die Steinkohleflöze wurden in diesen Profilen spezifisch bezeichnet und sehr detailliert dargestellt (mit einzelnen Kohlelagen und Zwischenmitteln). Damit boten die Schachtprofile eine Ergänzung zu den Aufschlüssen in der Datenbank des LfULG, in der diese Informationen bis dato fehlten

Während dieses Arbeitsprozesses wurde deutlich, dass die Auflösung der Flöze hinsichtlich ihrer Teufe und der Mächtigkeit von Kohlelagen und Zwischenmitteln in den Schachtprofilen meist um ein Vielfaches höher ist als in GeODin. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die in den Archivunterlagen dargestellten Verhältnisse, bedingt durch die bergbaulichen und nachbergbaulichen Veränderungen im Untergrund (Geländesenkungen und -hebungen, Nachsacken in Auflockerungszonen, o.a.), nicht mehr den aktuellen Gegebenheiten entsprechen. Aus diesem Grund sind vor allem Teufen nicht uneingeschränkt aus den Quellen extrahierbar.



10

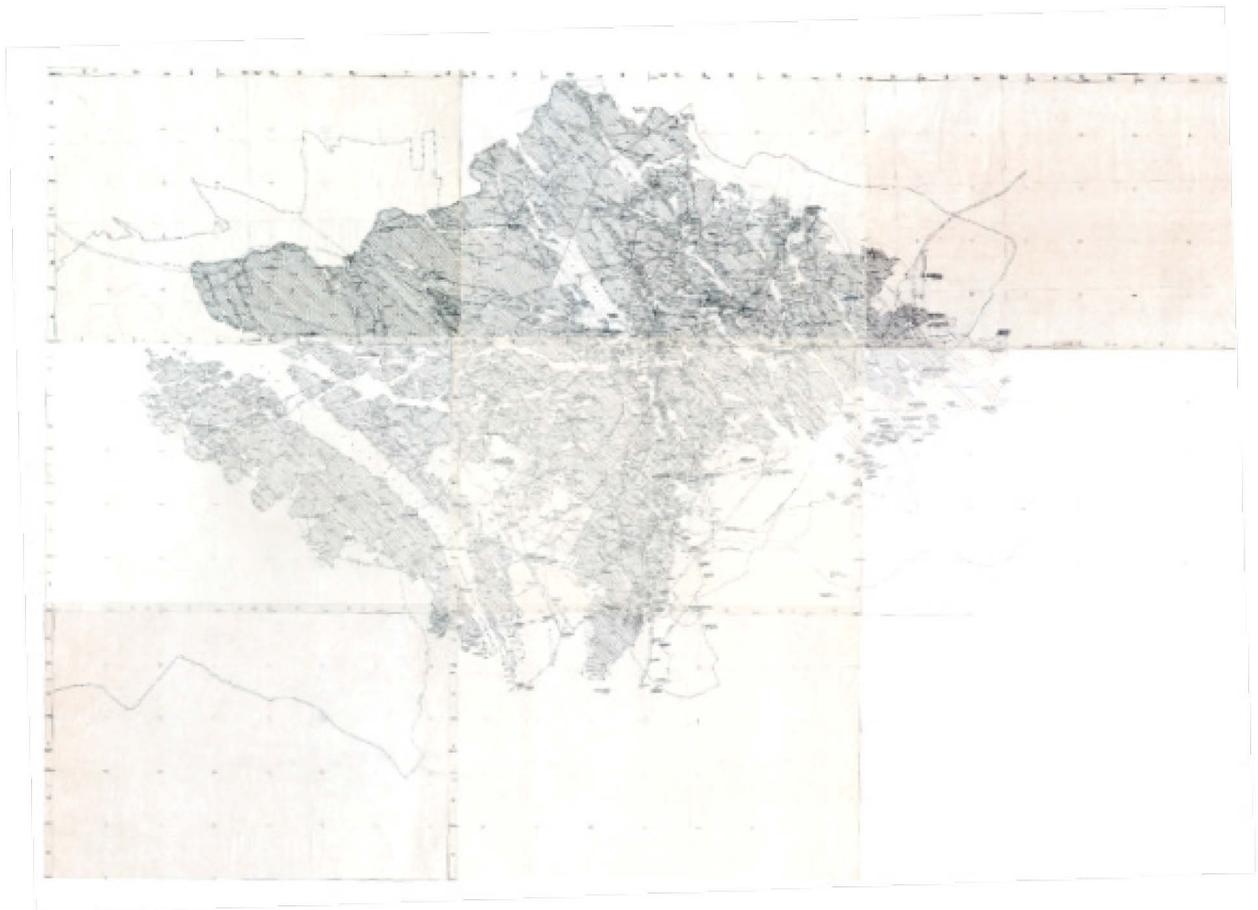
Abbildung 3: Das Abbaugebiet von Luga/Oelsnitz (orange) mit im 3D-Modell bereits erfassten Bohrungen und Schächte (schwarz) und für die Implementierung geeigneten Bohrungen und Schächten (grün). Schwarze Linien symbolisieren den Verlauf der Hauptstörungen im Revier.

Schritt 2: Abgleich der bereits in GIS aufgearbeiteten Flözverbreitungskarten mit den gescannten, georeferenzierten Übersichtsrissen

Aus früheren Untersuchungen (Felix et al. 2007) existieren GIS-Dateien für das Luga/Oelsnitzer Revier, welche die georeferenzierten Informationen des Übersichtsrisswerkes zu Verbreitung, Teufe und Mächtigkeit der abgebauten Flöze enthalten. Die Angaben wurden, abgesehen von Einfallwinkel und Versatzart, bereits im Rahmen der ursprünglichen Modellerstellung digitalisiert und in Form von georeferenzierten *Shapefiles*, die von GIS-Programmen ausgelesen werden können, gespeichert (Abbildung 4). Auch der Verlauf von Störungszonen wurde in den Rissen digitalisiert und als Punktwolken in das GOCAD-3D-Modell eingespeist (Steinborn 2005). Diese wurden vor der Weiterverwendung für die Aktualisierung des 3D-Modells auf ihre Richtigkeit geprüft. Bei der Sichtung des ursprünglichen 3D-Modells wurde deutlich, dass sich die auf den Übersichtsrissen basierenden „Surfaces“, welche die Basis der Flöze abbilden, überschneiden. Eine räumliche Überlappung von nacheinander abgelagerten Steinkohlenflözen ergibt stratigraphisch keinen Sinn, tritt im GOCAD-Modell von Steinborn (2005) jedoch flächenhaft auf. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine detaillierte Darstellung der Flöze nie Ziel der ursprünglichen Modellierung war. Zudem erfolgt durch die Interpolation während der Modellierung stets eine Vereinfachung der Bezugsdaten, wodurch derartige Überschneidungseffekte auftreten können.

Eine weitere Ursache hierfür wurde in den Primärdaten des Übersichtsrisserwerkes oder in den GIS-Dateien vermutet, weswegen beide Formate miteinander verglichen wurden. Dazu wurden die gescannten Originale zugeschnitten und georeferenziert.

Im anschließenden Abgleich wurde in den Attributen für das Vertrauensflöz ein systematischer Vorzeichenfehler der Höhenangaben festgestellt, welcher jedoch behoben werden konnte. Davon abgesehen konnte die korrekte Übertragung der Informationen aus dem Übersichtsrisserwerk in GIS bestätigt werden. Die Ursache für die Überlappung der Flöze ist demnach stattdessen in der Übertragung der bergmännischen (2D-) Primärdaten in den dreidimensionalen Raum zu suchen. Die Punktwolke, welche die Verbreitung und Teufe eines Flözes repräsentiert, liefert keine hinreichenden Informationen über die zahlreichen Abbrüche, Versätze und Erosionsflächen, welche für die Lagerstätte des Lugau/Oelsnitzer Reviers charakteristisch sind. Aus diesem Grund reichen die Übersichtsrisse (oder allgemein bergmännische Risse) als einzige Grundlage für eine Visualisierung der Flöze im Raum nicht aus.



11

Abbildung 4: 8 Rissplatten für das Grundflöz aus dem Übersichtsrisserwerk Lugau/Oelsnitz (SächsStA-F Bestand 40120), zugeschnitten und georeferenziert.

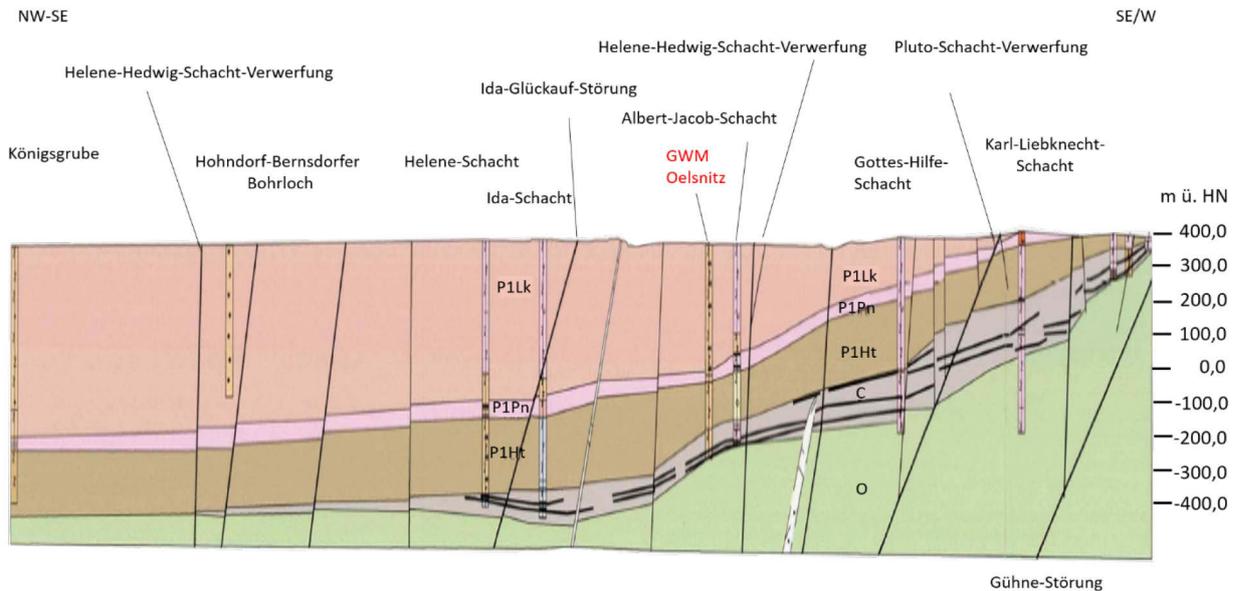


Abbildung 6: Geologischer Schnitt A, nach Anlage 5 (Quelle: Felix et al. 2007, modifiziert). P1Lk – Leukersdorf-Formation, P1Pn – Planitz-Formation, P1Ht – Härtensdorf-Formation, C – Oberkarbon, O – Ordovizium, hier: phyllitisches Grundgebirge.

Schritt 4: Abgleich der Profilschnitte mit den bestehenden 3D-Modell

13

In diesem Arbeitsschritt wurde geprüft, in wieweit das 3D-Modell auch in den Bereichen mit geringer Stützpunktdichte plausibel ist. Hierfür wurden erneut die drei oben genannten geologischen Schnitte aus dem Sachstandsbericht (Felix et al. 2007) herangezogen und analoge Profilschnitte (sog. "Crossplots") durch das 3D-Modell mit Hilfe der Software GOCAD produziert. Die Lage der geologischen Schnitte im 3D-Modell ist der Abbildung 7 zu entnehmen.

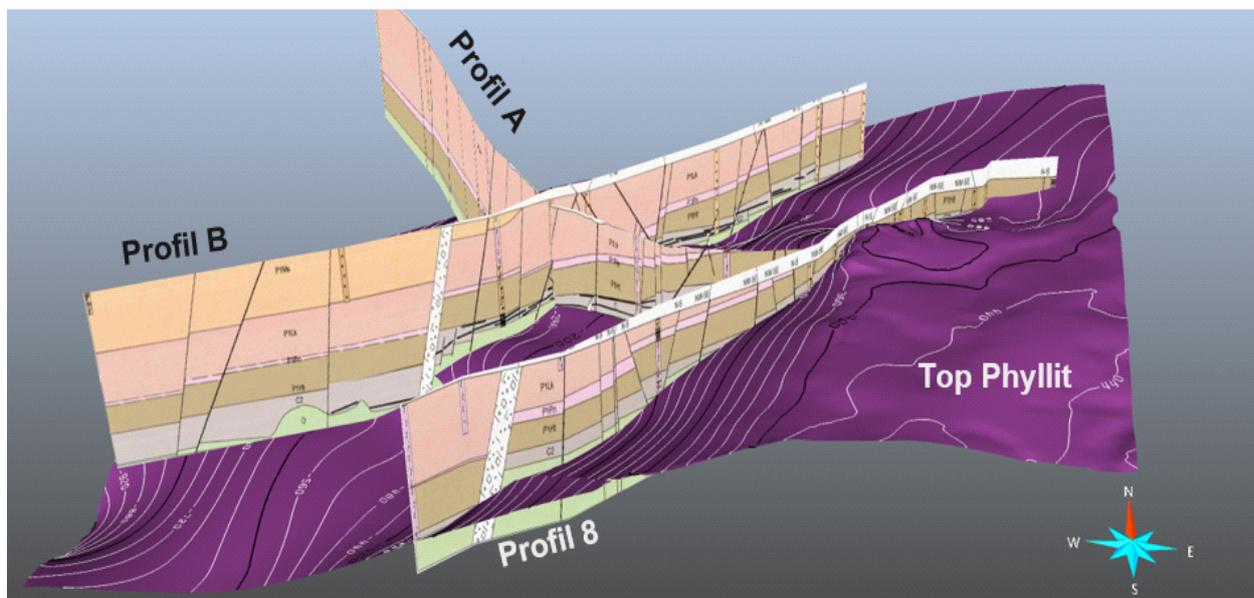


Abbildung 7: Lage der geologischen Schnitte A (Felix et al. 2007, Anl. 5), B (Anl. 6) und Profil 8 (Anl. 25) maßstabsgetreu im 3D-Modell. Violett: Surface der Oberkante des phyllitisches Grundgebirges zum Vergleich.

Die „Crossplots“ (Abbildung 8A) wurden anschließend für eine bessere Veranschaulichung an die Farbgebung der geologischen Schnitte aus dem Sachstandsbericht (Felix et al. 2007) angepasst (siehe Abbildung 8B). Durch diesen Bearbeitungsschritt war es schließlich möglich, die geologischen Schnitte direkt mit dem 3D-Modell zu vergleichen, Unterschiede festzustellen und Möglichkeiten der Korrektur zu formulieren. Dabei wurde angenommen, dass die geologischen Schnitte die Untergrundverhältnisse entlang der Profillinien passend darstellen und als Referenz für die 3D-Modellierung geeignet sind.

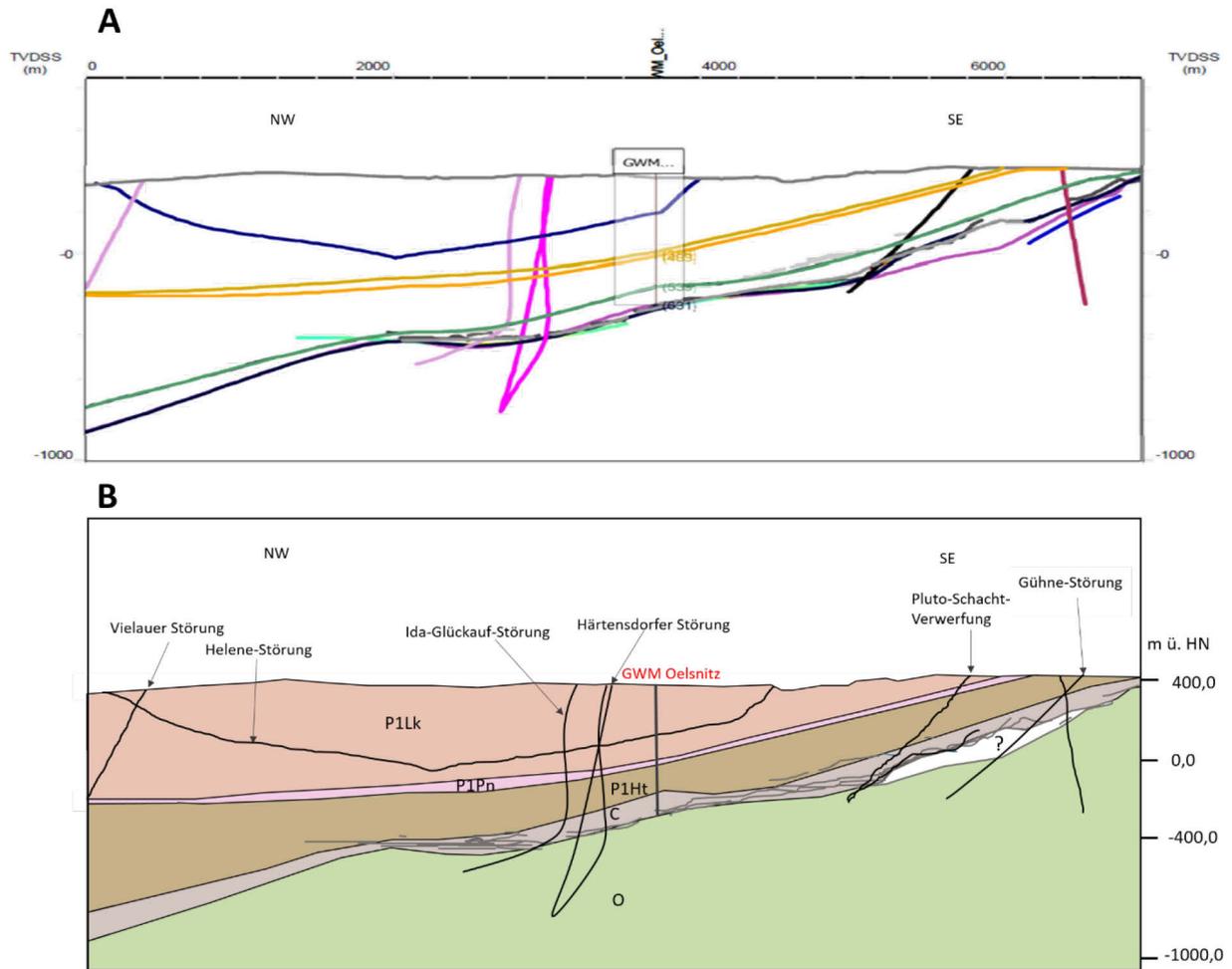


Abbildung 8: A: Crossplot Export aus GOCAD analog dem geologischen Schnitt A [Felix et al. 2007, Anlage 5]. B: farblich angepasster Crossplot durch das GOCAD-Modell analog dem geologischen Schnitt A. Legende: P1Lk – Leukersdorf-Formation, P1Pn – Planitz-Formation, P1Ht – Härtensdorf-Formation, C – Oberkarbon, O – Ordovizium, hier: phyllitisches Grundgebirge.

Geologischer Schnitt A (Felix et al. 2007, Anlage 5): Im 3D-Modell taucht die Oberkante des phyllitischen Grundgebirges nordwestlich der Ida-Glückauf-Störung steiler ab, was laut dem geologischen Schnittes nicht der Fall ist (vgl. Abbildung 6 und 8B). Das modellierte Einfallen der angeschnittenen Störungen entspricht nicht dem in den Schnitten. Östlich der Pluto-Schacht-Verwerfung besteht im 3D-Modell eine Lücke zwischen den stratigraphisch redundanten *Surfaces* Basis Karbon (Marker C und Top Phyllit (Marker O)). Aus dem *Crossplot* lässt sich ableiten, dass der *Surface* Top Phyllit der tatsächlichen stratigrafischen Grenze entspricht. Diese Diskrepanz findet sich auch in den Aufschlussdaten wieder, wo sie mithilfe der Schachtprofile aus dem Archiv des Bergbaumuseums eliminiert werden konnte. In diesem Bereich ist eine entsprechende Überarbeitung der Grenze zwischen Karbon und Grundgebirge (Phyllit) im 3D-Modell erforderlich.

Geologischer Schnitt B (Felix et al. 2007, Anlage 6): Im Vergleich zwischen dem geologischen Schnitt und dem GOCAD-Crossplot fällt auf, dass die zahlreichen Versätze, welche besonders nordöstlich des Rödlitzer Sprunges durch die geologischen Einheiten verlaufen, im 3D-Modell nicht realisiert sind (Abbildung 9). Im ursprünglichen 3D Modell von Steinborn wurden nicht alle in den geologischen Schnitten dargestellten Störungen in die Modellierung einbezogen. Dies ist vermutlich auf die verallgemeinernde Zielstellung der damaligen Modellierung zurück zu führen. Die Software GOCAD® (Paradigm Geophysical Corp.) ist darauf ausgelegt, Surfaces besonders glatt zu modellieren und starke Höhenversätze auf kurze Distanz einzuebnen, sofern zuvor keine explizite manuelle Definition tektonischer Versätze erfolgt ist. Hierdurch entsteht ein deutlicher Unterschied zwischen geologischen Schnitten und GOCAD-Crossplots.

15

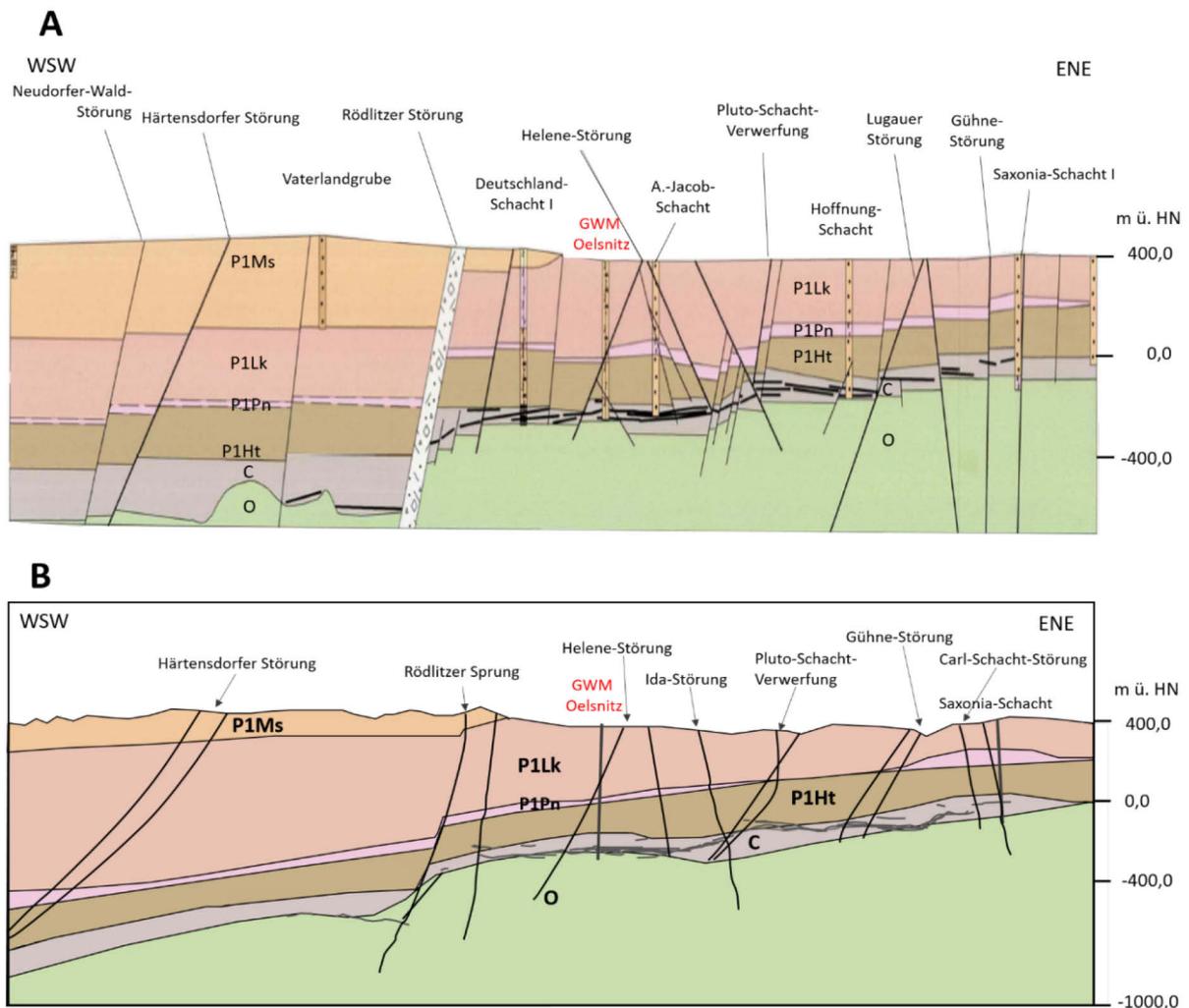
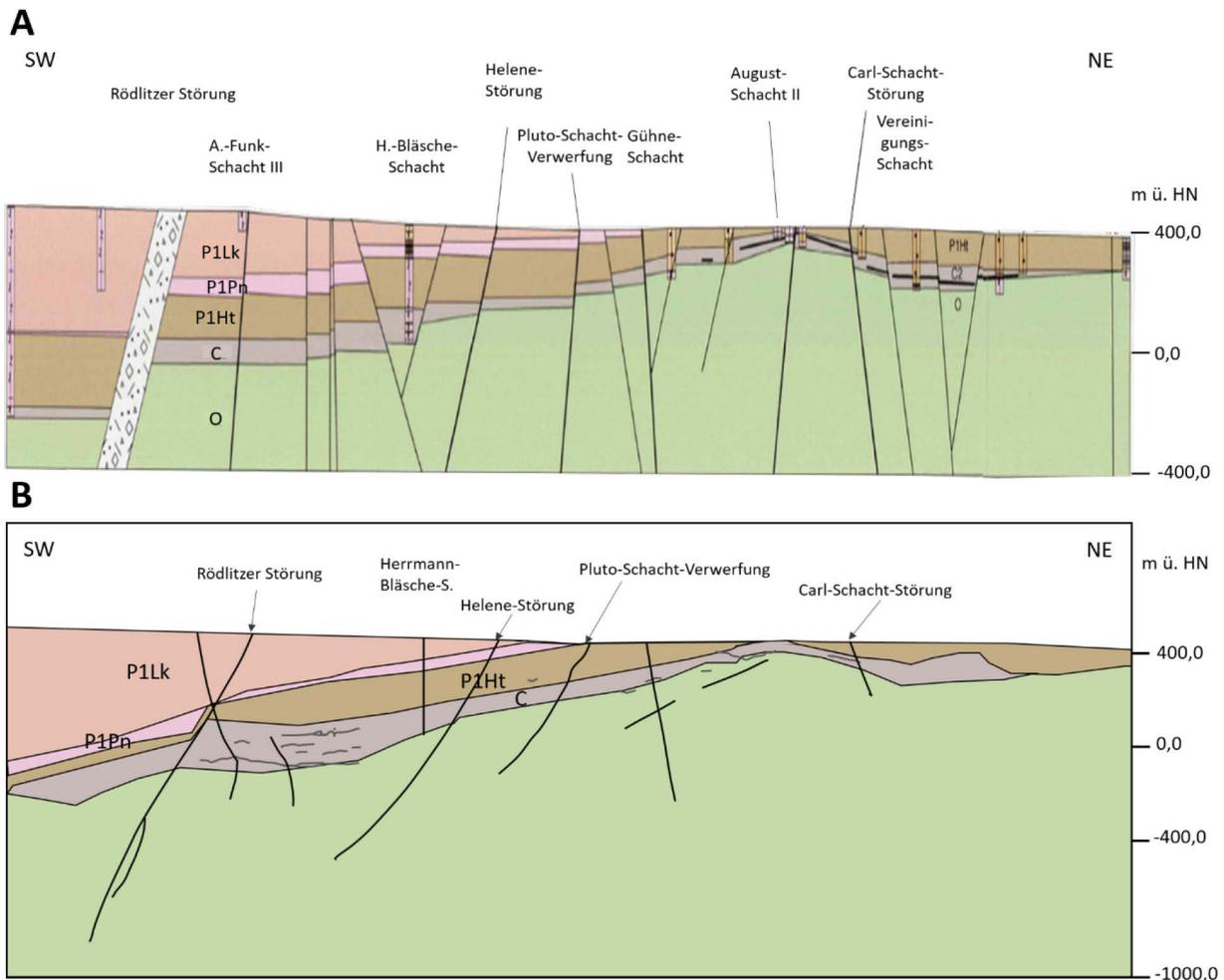


Abbildung 9: A: Geologischer Schnitt B, nach Anlage 6 (Quelle: Felix et al. 2007, modifiziert). B: Crossplot durch das GOCAD-Modell analog dem geologischen Schnitt B, farblich angepasst. Legende: P1Ms – Mülsen-Formation, P1Lk – Leukersdorf-Formation, P1Pn – Planitz-Formation, P1Ht – Härtensdorf-Formation, C – Oberkarbon, O – Ordovizium, hier: phyllitisches Grundgebirge.

Geologischer Schnitt 8 (Felix et al. 2007, Anlage 25): Auch hier fällt auf, dass der Versatz entlang des Rödritzer Sprunges, welcher laut Sachstandsbericht (Felix et al. 2007) bis zu 350 m beträgt, im GOCAD-Crossplot links- und rechtsseitig der Störung geglättet wurde (Abbildung 10). Die Planitz-Formation (P1Pn) nimmt südwestlich des Rödritzer Sprunges im 3D-Modell scheinbar stark an Mächtigkeit zu, was im geologischen Schnitt 8 nicht nachzuvollziehen ist.



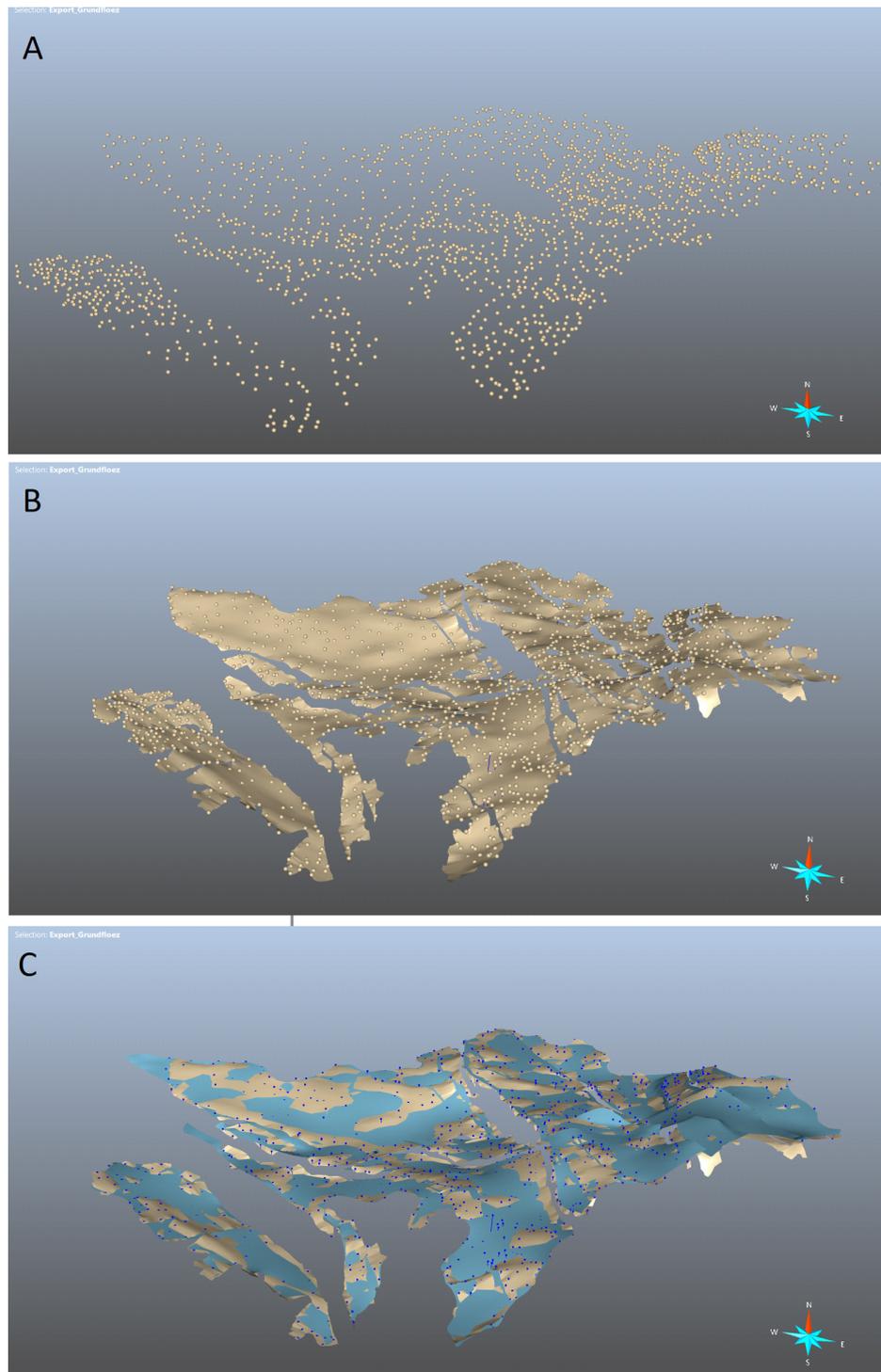
16

Abbildung 10: A: Geologischer Schnitt 8, nach Anlage 25 (Quelle: Felix et al. 2007, modifiziert). B: Crossplot durch das GOCAD-Modell analog dem geologischen Schnitt 8, farblich angepasst. Legende: P1Lk – Leukersdorf-Formation, P1Pn – Planitz-Formation, P1Ht – Härtensdorf-Formation, C – Oberkarbon, O – Ordovizium, hier: phyllitisches Grundgebirge.

In allen drei Schnittebenen im 3D-Modell ist zu erkennen, dass verschiedene Flöz-Surfaces ober- und unterhalb von der Karbonoberfläche bzw. Karbon-Basis verlaufen, was geologisch nicht korrekt ist. Möglicherweise wird dieses Problem durch die oben beschriebene Korrektur der Karbon-Basis behoben.

Schritt 5: Rekonstruktion des Modellierungsprozesses nach Steinborn (2005) an ausgewählten geologischen Elementen

An den übereinander lagernden Flözen Kneiselflöz, Grundflöz und Hauptflöz wurde der initiale Modellierungsprozess beispielhaft nachvollzogen. Hierfür wurden, wie in Steinborn (2005) beschrieben, die Punktwolken der Flözverbreitungskarten in GOCAD importiert und jedem Punkt die jeweilige Teufe als z-Wert zugeordnet. Anschließend wurden, abweichend von der Anleitung nach Steinborn, „Surfaces“ über den Befehl „Surface/ New/ Point Set Medium Plane“ des gesamten Arbeitsgebietes generiert. Mit dem Befehl „Surface/ Fit/ to Point Set“ wurde die Fläche anschließend an die Punktwolke angeglichen und als letzter Schritt wurden die Flächen mit den aus ArcMAP importierten Polygonumrissen verschnitten. Im Ergebnis entstehen 3D-Flächen, welche mit den ursprünglich modellierten 3D-Flächen im Modell gut übereinstimmen. Ebenso wie die ursprünglichen modellierten Flöze weisen auch die neu modellierten Einheiten eine starke Überschneidung zwischen Kneisel- und Grundflöz und eine weniger stark ausgeprägte Überschneidung zwischen Grund- und Hauptflöz auf (Abbildung 11). Dies ist mit den lokal vorkommenden Flözvereinigungen bzw. dem geringen vertikalen Abstand von teils wenigen Zentimetern bis Dezimetern zwischen den übereinander lagernden Flözen im Revier zu erklären (vgl. (Felix et al. 2007)). Die Modellauflösung, bzw. –größe ist für die Darstellung solcher Details nicht geeignet. Hinzu kommen die bereits erwähnten und auch in den Schachtprofilen (Tabelle 1) dokumentieren Störungen, welche die Steinkohleflöze gegeneinander versetzen und im 3D-Modell nicht detailliert visualisiert sind.



18

Abbildung 11: Workflow in GOCAD. A: Importiertes Point Set aus dem Übersichtsrisserwerk. Die Höhenangaben wurden den Punkten als z-Werte zugewiesen. B: Aus dem Flöz-Polygon und dem Point Set wird ein Surface generiert. C: Der ursprüngliche Surface (blau) und der neu modellierte Surface (beige) für das Grundflöz wurden übereinandergelegt.

Eine Modellierung der Flözvolumina anhand der bereits existierenden Informationen aus dem Übersichtsrisserwerk schien an diesem Punkt der Bearbeitung nicht sinnvoll. Bevor eine Modellierung der Abbaubereiche, auf welche im ursprünglichen Modell verzichtet wurde, durchgeführt werden kann, müsste die stratigrafische Abfolge im Karbon modellgerecht vereinfacht werden. Hierfür sollten die Marker der Bohrungen und Schächte hinzugezogen werden, welche neben den Punktwolken aus dem Übersichtsrisserwerk als Primärdaten in die Modellierung der Steinkohleflöze einfließen sollten.

6. Empfehlung für die Aktualisierung des GOCAD-3D-Modells

Im Zuge der oben beschriebenen Untersuchungen wurden teils große Diskrepanzen zwischen den einzelnen Quellen (z. B. Aufschlussdaten und Übersichtsrisserwerk) aber auch zwischen den Ausgangsdaten und dem 3D-Modell festgestellt. Daraus ergeben sich folgende Schwerpunkte für die Ertüchtigung des 3D-Modells:

- Ergänzung der überarbeiteten Schichtinformationen für alle modellrelevanten Bohrungen und Schächte als Marker im Modell
- Implementierung der ca. 100 zusätzlich ausgewählten Bohrungen und Schächte
- Behebung von lokalen Unstimmigkeiten an den Formationsgrenzen im Modell, an denen sich teilweise Schichten überschneiden bzw. Hohlräume bilden
- Konzept für 3D-Visualisierung der Abbaubereiche der einzelnen Flöze
- Volumenbasierte Modellierung für Lugau/Oelsnitz mittels Workflow „Structure and Stratigraphy“ unter Einbezug der geologischen Einheiten, Störungszonen und Abbaufelder

7. Zusammenfassung und Ausblick auf weitere Arbeiten

Die im Rahmen von GeoMAP erfolgten Arbeiten an dem 3D-Modell von Lugau/Oelsnitz bilden den Grundstein für eine Ertüchtigung des Modells, insbesondere im Bereich der Karbon-Schichten. Die in der Projektlaufzeit erfolgten Recherchen und die Datenakquise waren vor allen auf Quellen mit Bezug zum ehemaligen Bergbau im Revier ausgerichtet. In den beschriebenen Archivstandorten waren diese Informationen in Fülle vorhanden und eine Aufarbeitung erschien im Kontext der laufenden Untersuchungen zu den Folgen des Bergbaus im Revier zwingend notwendig. So können die Daten beispielsweise dazu dienen, weitere geeignete Standorte für Grubenwassermessstellen auszuwählen.

Eine ähnlich umfangreiche Recherche zu den Rotliegend-Schichten steht noch aus. Während die Abbaufelder als weitgehend geflutet, versetzt bzw. verbrochen gelten, findet der Grubenwasseranstieg im Rotliegenden weiterhin statt. Eine petrografische Differenzierung und Parametrisierung des Rotliegenden wäre jedoch für die Prognostizierung des weiteren Flutungsverlaufes in oberflächennahen Bereichen von großem Interesse. Im Sachstandsbericht (Felix et al. 2007) wurde diesbezüglich von der Annahme ausgegangen, dass die Gesteinsformationen des Rotliegenden in ihrer Gesamtheit „hydraulisch dicht“ sind (vgl. Felix et al. 2007, S. 98), allerdings muss auch die lokal abweichende hydraulische Wirksamkeit des Störungsinventars berücksichtigt werden. Dies zu prüfen sollte Gegenstand künftiger Untersuchungen sein.

Literaturverzeichnis

Bergbaumuseum Oelsnitz/Erzgeb., Grundlagenkarte Steinkohleninventur. Markscheiderei Oelsnitz i.E.1948. Oelsnitz/Erzgeb.

Beyer, C., Schneider, H. & Unger, R. (1974): Bergschadenskundliche Analyse „Lugau-Oelsnitz“- Unveröff., VEB Baugrund Berlin, Produktionsbereich Zwickau & VEB Steinkohlenwerk Oelsnitz, Zwickau, Archiv Oberbergamt, Freiberg.

Eckart, M. & Unland, W. (2005): Aufbau eines Grubenwasserwiederanstiegsmodells für das Steinkohlenrevier Lugau/Oelsnitz, Teil 11. - unveröff. Bericht, DMT GmbH, Essen.

Felix, M. H. J. Berger, S. Görne, L. Assmann, H. Steinborn, W. Alexowsky, H. Schubert (2007): Abschlussbericht Bergbaufolgen im ehemaligen Steinkohlenrevier Lugau/Oelsnitz unter besonderer Berücksichtigung des Grubenwasseranstiegs. unveröff. Bericht. Hg. v. Sächs. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Freiberg.

Felix, M., Berger, H.-J. (2010): Steinkohlebergbau und Bergbaufolgen im Steinkohlerevier Lugau/Oelsnitz. Beitrag in Geoprofil Bd. 13, Sächs. Landesamt für Umwelt und Geologie; Freiberg.

Fischer, F. (1991): Das Rotliegende des ostthüringisch-westsächsischen Raumes (Vorerzgebirgs-Senke, Nordwestsächsischer Vulkanitkomplex, Geraer Becken). - Dissertation TU Bergakademie Freiberg. Freiberg.

Hädecke, S., Ussath, M., Jahns, C. und Hübschmann M. (2019): Visualisierung und Prognostizierung von Bergbaufolgen am Beispiel des Grubenwasseranstiegs im ehemaligen Steinkohlenrevier Lugau/ Oelsnitz (Sachsen). In: THGA Forschungszentrum Nachbergbau (Hg.): Tagungsband Bergbau, Energie, Rohstoffe 2019. Übergang zu neuen Zeiten. Unter Mitarbeit von Deutscher Markscheider-Verein e.V. Bergbau, Energie, Rohstoffe. Bochum.

Kolitsch, S. (2008): Hydrogeologische Analyse und großräumige Modellierung des weiteren Vorerzgebirgssenkensraumes. Dissertation. Technische Universität Bergakademie Freiberg. Freiberg.

Lange, T. (1998): Ein GOCAD-3-D-Modell des tektonostratigraphischen Baues im Steinkohlenrevier Zwickau als Grundlage für Ermittlung von Bergbaufolgeschäden – Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg (unveröffentlicht). Freiberg.

Rommel, A., Hädecke, S., Ussath, M. & Hübschmann, M. (2021): GeoMAP - Geologische, hydrogeologische und geomechanische Modellierungs-, Visualisierungs- und Prognosewerkzeuge zur Darstellung von Bergbaufolgen und Nachnutzungspotenzialen. Hg. v. Sächs. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie; Technische Universität Bergakademie Freiberg; VŠB - Technická univerzita Ostrava. Freiberg

Sächsisches Staatsarchiv, Bergarchiv Freiberg, 40120 „VEB Steinkohlenwerk Oelsnitz (Erzgebirge) und Vorgängerbetriebe“, Archivalien K66 bis K73.

Steinborn, H. (2005): Angewandte Modellierung im Schwerpunktprojekt Steinkohlenbergbaureviere Zwickau und Lugau/Oelsnitz mittels Gocad. Tektonik und Strukturbau Permokarbon Zwickau/Oelsnitz. unveröff. Bericht Sächs. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Freiberg.

Numerische Simulation von Hebungen über gefluteten Steinkohlebergwerken des Altbergbaus am Beispiel des ehem. Steinkohlereviers Lugau-Oelsnitz

G. Lüttschwager, F. Weber, H. Konietzky

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik
Gustav-Zeuner-Str. 1, 09599 Freiberg

Zusammenfassung

Während der vergangenen Jahrzehnte wurden zahlreiche Steinkohlebergwerke stillgelegt. Nach Einstellung der Wasserhaltung werden diese geflutet und der Grubenwasserstand steigt. Diese Flutung hat viele Auswirkungen auf die Umwelt. Ein Aspekt sind beispielsweise Hebungen an der Geländeoberkante, in Folge der Flutung des Alten Mannes und des Deckgebirges. Bisher wurden diese Prozesse fast ausschließlich analytisch beschrieben. Jedoch sind entsprechende Ansätze für komplizierte Grubengeometrien oder komplexe geologische Bedingungen meist nicht ausreichend. Ein 3-dimensionales numerisches Modell wird beispielhaft für das ehemalige Steinkohlerevier Lugau-Oelsnitz in Sachsen erarbeitet. Dabei besteht die Herausforderung in der begrenzten Datenlage eines Altbergbau-Objektes und der vereinfachenden Erstellung der Abbaugeometrien. Zudem müssen hebungsrelevante Mechanismen erkannt und geeignet implementiert werden. Die Prognose der Hebungsraten an der Geländeoberfläche verwendet digitale Flözgeometrien und aktuelle Messungen der Grubenwasserstände. Der dargestellte kontinuumsmechanische Ansatz zur Abbildung der Hebungsprozesse, ist für Bergwerke mit beschränkten geomechanischen und hydraulischen Informationen geeignet. Die Simulationsergebnisse sind in guter qualitativer Übereinstimmung mit Beobachtungsdaten aus Nivellement-Messungen und satellitengestützten Auswertungen des Untersuchungsgebiets Lugau-Oelsnitz. Die hier vorgestellte Arbeit bestätigt die Notwendigkeit genauer Kenntnisse über stillgelegte Kohleminen zur besseren Risikoabschätzung.

21

1. Einleitung

Nach der Stilllegung von Steinkohlebergwerken wird die Wasserhaltung meist eingestellt und die Gruben geflutet, wodurch der Grubenwasserstand steigt. Diese Flutung hat zahlreiche Auswirkungen auf die Umwelt, wie z.B. zunehmende Instabilität des Grubengebäudes im Allgemeinen und der Schächte im Speziellen, sowie Vermischung der oberflächennahen Grundwässer mit dem aufsteigenden Grubenwasser und damit einhergehende Verunreinigung des Grundwassers. Des Weiteren wird durch den ansteigenden Grubenwasserstand und die damit einhergehenden Spannungumlagerungen im Untergrund, eine Hebung an der Geländeoberfläche verursacht. Diese Hebungen wurden von zahlreichen Wissenschaftlern beobachtet und beschrieben (Gee et al. 2016; Gee et al. 2017; Bekendam und Pöttgens 1995; Bekendam 2017; Heitfeld et al. 2014; Heitfeld et al. 2016a; Dudek et al. 2020). Berechnungen und Vorhersagen von Hebungsraten beschränken sich bisher überwiegend auf analytische Lösungen. Numerische Simulationsansätze sind in der Literatur dagegen eher selten vertreten.



Als Teil des durch die Europäische Union geförderten Projektes GeoMAP wird daher ein numerischer Simulationsansatz zur Berechnung und Vorhersage von Hebungseffekten infolge des Grubenwasseranstiegs entwickelt. Als beispielhaftes Untersuchungsobjekt dient das stillgelegte Steinkohlerevier Lugau-Oelsnitz in Sachsen. Lage und Ausdehnung des Untersuchungsgebietes sind in Abbildung 1 dargestellt. Der Bergbau wurde 1971 eingestellt und das Bergwerk daraufhin unkontrolliert geflutet. Eine abschließende bergschadenkundliche Analyse wurde von Beyer (1974) verfasst. Die Schachtanlagen wurden vollständig verfüllt. Es wurden bei Stilllegung keine Monitoring-Einrichtungen installiert und das Grubengebäude ist seitdem nicht mehr zugänglich. Dies hat zur Folge, dass aus der direkten Nachbergauphase keine Daten über Bodenbewegungen oder Flutungsverlauf existieren. Neuere Untersuchungen zum Gebiet wurden seit Mitte der 90er-Jahre wieder durchgeführt. Hebungsprozesse wurden z.B. von Löbel et al. (2015) und John (2019) untersucht. Eine erste numerische 2D-Simulation wurde von Löbel et al. (2015) präsentiert. Die nun durchgeführte Studie beinhaltet eine 3D-Hebungsmodellierung.

Besonderer Schwerpunkt der Untersuchungen liegt dabei auf der Erstellung einer Modellierungsstrategie für eine begrenzte Datenlage. Die Hauptherausforderungen sind dabei die Datenaufbereitung sowie die vereinfachende Erstellung der Abbaugemetrien und hebungsrelevanten Mechanismen. Die hier vorgestellten Arbeiten umfassen eine Bestandsaufnahme vergleichbarer Studien, eine analytische Betrachtung der Hebungsvorgänge sowie die Aufbereitung der Monitoring-Daten. Abschließend wird die numerische Simulationsstrategie vorgestellt und die Ergebnisse werden diskutiert.

22

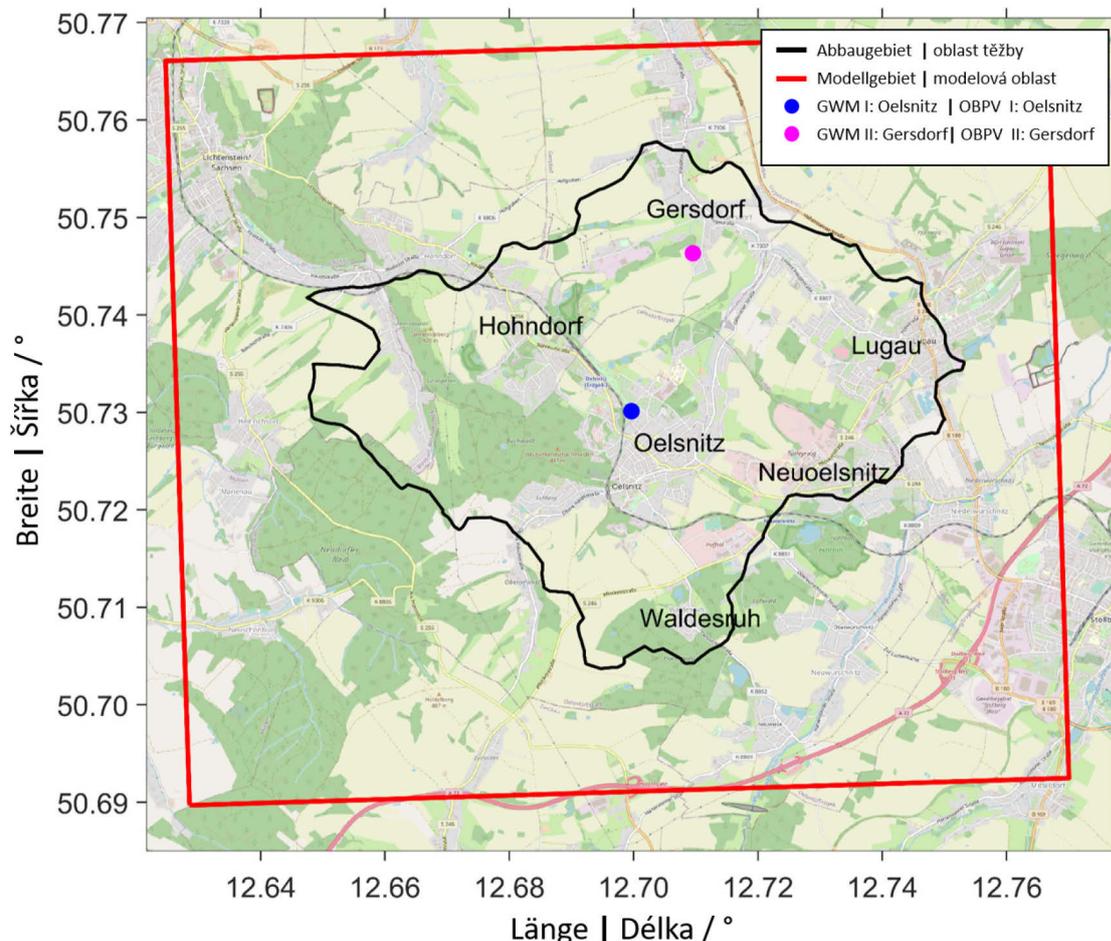


Abbildung 1: Übersichtskarte vom Untersuchungsgebiet mit der Ausdehnung des Modellgebietes, der Lage der wichtigsten Ortschaften, der Ausdehnung des Abbaus sowie der Lage der Grubenwassermessstellen.

2. Berechnung von Hebungen über stillgelegten Kohlebergwerken während der Flutung

Ein ansteigender Grubenwasserpegel und dadurch erhöhter Porendruck im Alten Mann verursacht eine Ausdehnung des Alten Mannes und folglich eine Hebung der Geländeoberfläche. Eine erste analytische Beschreibung dieser Prozesse findet sich bei Pöttgens (1985). Dieser Arbeit zufolge wird die Hebung über gefluteten Kohlebergwerken durch die Dekompression und Ausdehnung des Alten Mannes infolge der poren-druckbedingten Spannungsänderungen verursacht. Die genaue Ausdehnung des durch Dekompression beeinflussten Bereiches ist dabei stark von der Art des Gesteins, dem Auflockerungsgrad und den hydraulischen Eigenschaften des anstehenden Deckgebirges beeinflusst. Das Grubenwasser kann den Bereich des Alten Mannes und überliegende gestörte Bereiche oder auch zusätzlich das gesamte oder Teile des Deckgebirges beeinflussen. Ein Beispiel für ein Steinkohlerevier, welches Hebungseffekte auch für das geflutete Deckgebirge aufweist ist das südliche Limburger Revier (Bekendam, 2017).

Die Spannungsumlagerungen im gefluteten Alten Mann wirken in Form von Auftrieb. Gleichung 1 beschreibt diesen Zusammenhang, wobei σ die Spannung, p den Wasserdruck und σ' die effektive Spannung darstellt. Die resultierende Hebungswirkung (vertikale Ausdehnung) des gefluteten Alten Mannes kann durch Gleichung 2 beschrieben werden.

$$\sigma' = \sigma - p \quad (1)$$

$$\Delta h = D_m h \Delta p \quad (2)$$

Der ansteigende Grubenwasserdruck Δp im Alten Mann erzeugt eine überwiegend vertikal gerichtete Ausdehnung Δh des verbrochenen Gebirges (Mächtigkeit h). Zur Berechnung dieser vertikalen Dehnung muss der Extensionskoeffizient D_m mittels gemessener Hebungsdaten kalibriert werden. Die Hebungen an der Oberfläche setzen sich (bei den analytischen Lösungsansätzen) aus der Superposition der Hebungswirkung aller gefluteten Bereiche zusammen. Die horizontale Ausdehnung und Wirkung eines einzelnen Elementes des Alten Mannes auf die Hebung der Geländeoberkante wird durch die Einflussfunktion k_z beschrieben. Mit ihrer Hilfe kann die Gesamthebung an der Oberfläche für einen spezifischen Grubenwasserstand durch Integration über alle Abbauelemente (Integration über die gesamte Fläche A) entsprechend Gleichung 3 bestimmt werden:

$$u_z = \Delta h \int k_z dA. \quad (3)$$

Üblicherweise wird, wie bei Verbruchanalysen auch, eine zusätzliche horizontale Grenze definiert, oft in Form eines Grenzwinkels. Ein solcher horizontal begrenzter Hebungsansatz ist die Einflussfunktion von Knothe (1984), welche auf einem horizontal exponentiellen Abklingen der Hebungen bis zu einer definierten Entfernung vom Abbaubereich basiert. Diese Wirkentfernung ist von der Tiefe des gefluteten Bereiches und einem deckgebirgsspezifischen Grenzwinkel abhängig. Sroka und Preusse (2017) haben diesen Ansatz erstmalig für Hebungsberechnungen infolge des Grubenwasseranstieges verwendet. Abbildung 2 zeigt die Hebungslösung nach Sroka und Preusse (2017) für ein einfaches synthetisches Untergrundmodell.

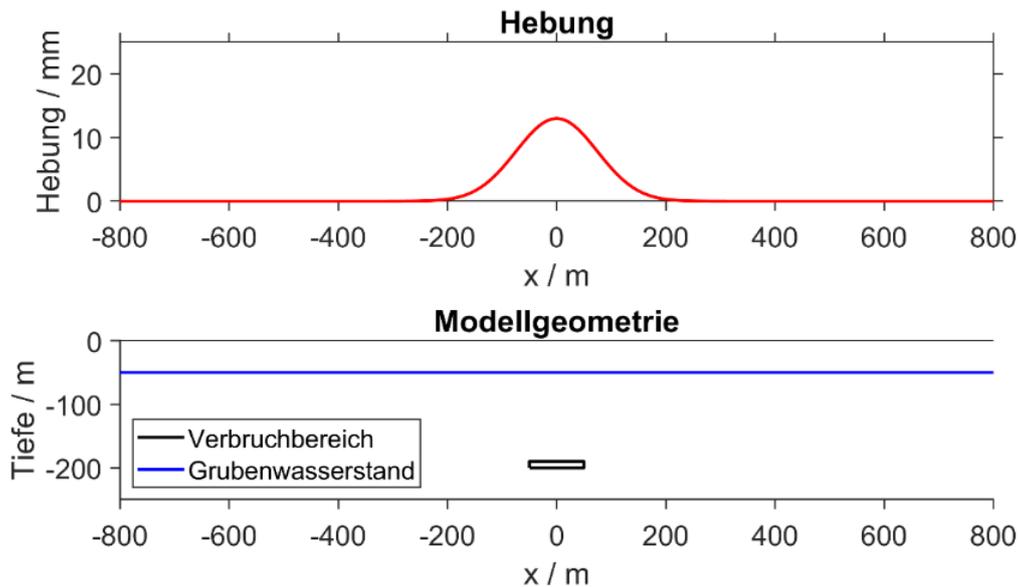


Abbildung 2: Analytische Lösung der Hebung an der Geländeoberkante für die Flutung einer einfachen Verbrauchsgeometrie nach Sroka und Preusse (2017).

Aufgrund der Einfachheit der Lösungsansätze und insbesondere der Geometrien sind, diese analytischen Betrachtungen nur begrenzt geeignet, um komplexe Abbaugeometrien und komplizierte geologische Bedingungen zu betrachten. Der fortschreitende Sättigungsprozess im Alten Mann wird ebenfalls nicht berücksichtigt und für steiler einfallende Abbaue ist der Ansatz einer reinen Superposition nicht ausreichend. Um diese Schwächen der analytischen Ansätze zu vermeiden wird in dieser Arbeit ein numerisches 3D-Modell vorgestellt, mit welchem auch komplexere, in Flutung befindliche Bergwerke betrachtet werden können.

3. Geologie, Bergbau und Monitoring

3.1. Geologie im Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet mit dem ehemaligen Steinkohlerevier Lugau-Oelsnitz befindet sich in der Nordwest - Südost orientierten Vorerzgebirgssenke. Die geologische Situation wurde überwiegend durch die variskische Orogenese und die damit einhergehende Entstehung des südöstlich liegenden kristallinen Erzgebirgskomplexes geprägt. Die regionale Geologie wurde ausführlich von z.B. Berger et al. (2010) und Felix et al. (2007) beschrieben. Das Präkarbone Grundgebirge besteht überwiegend aus ordovizischen Phylliten, das Deckgebirge aus mehreren Rotliegendformationen. Das geologische Modell des Rotliegend liegt für diese Arbeit in Form von geologischen Horizonten vor. Sedimente des Tertiärs und jünger treten nur vereinzelt entlang der heutigen Täler auf (Mächtigkeit < 10 m). Diese Ablagerungen sind überwiegend Lockersedimente und wurden für die numerische Simulation in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt. Infolge der Orogenese des Erzgebirges war das Untersuchungsgebiet bis zum Tertiär durch starke tektonische Aktivität geprägt. Die Aktivität der Störungen endete aber spätestens mit dem Tertiär.

Für die numerische Simulation von grubenwasserbedingten Hebungen sind die hydraulischen Eigenschaften des Abbau- bzw. Verbrauchsbereiches sowie des überliegenden Deckgebirges von entscheidender Bedeutung. Das oberflächennahe Rotliegend und Post-Rotliegend weist in den obersten 50 – 70 m eine hohe bis sehr hohe Permeabilität auf. Die Wegsamkeiten sind durch Störungswegsamkeiten sowie allgemeine Verwitterung des Rotliegend geprägt. Unterhalb dieser Erosionsschicht ist das Rotliegend durch schichtungsparelle Aquifugen gekennzeichnet. Großräumige Grundwasserleiter existieren nicht. Die Störungen unterhalb einer Tiefe von 70-100 m sind

weitestgehend verletzt und mylonitisiert und daher hydraulisch dicht. Eine Reaktivierung der Störungszonen wurde während des Abbaus und danach nicht beobachtet. Großräumig betrachtet ist als Grundlage für die numerische Simulation von einer vertikal grundsätzlich grubenwasserstauenden Funktion des Rotliegend auszugehen.

3.2. Bergbau

Während der industriellen Abbauperiode (1859-1971) wurden 142 Mio. t Kohle gefördert. Insgesamt wurden im Revier 16 zumindest teilweise abbauwürdige Kohleflöze aufgefunden. Für die durchgeführte numerische Simulation wurden das Grundflöz, das Vertrauensflöz, das Glück-Auf-Flöz sowie das Oberflöz berücksichtigt (Abbildung 3), da zum Zeitpunkt der Modellerstellung nur für diese Flöze digitale Flözverteilungsdaten vorlagen.

Detaillierte Informationen zur Mächtigkeit der Flöze oder den einzelnen Abbaufeldern lagen nicht in digital verwertbarer Form vor. Eckart und Unland (2005) haben das noch offene Hohlraumvolumen mittels einer Volumenbilanz abgeschätzt. Der noch offene Hohlraum der Abbaue beträgt demzufolge 45 Mio. m³. Bezogen auf die zur Verfügung stehenden Flözverteilungskarten (Abbaufäche: ca. 44,4 Mio. m²) wurde eine mittlere Abbaumächtigkeit von 1 m abgeleitet. Dieser Wert ist als sehr niedrig anzusehen, da die ungleichmäßige Abbaugeometrie, größere stehengelassene Gebirgsbereiche, aber auch andere abgebaute Flöze keine Berücksichtigung finden. Folglich wurde die mittlere Abbauhöhe für die gegebene Geometrie vereinfacht auf 2 m festgelegt. Dies ist vertretbar, da auch die Höhe der Verbruchbereiche sowie die Ausmaße der gestörten und somit potentiell gefluteten Bereiche im Deckgebirge nicht bekannt sind. Die räumliche Verteilung der Abbauverfahren ist digital nicht verfügbar, sodass eine allgemeine Annahme getroffen werden musste. Da das gängige Verfahren für die letzten Abbaujahrzehnte der Strebruchbau war, wird dieses Verfahren vereinfacht für das gesamte Revier angenommen. Es wird für alle Abbaubereiche von Selbstbruchversatz ausgegangen.

25

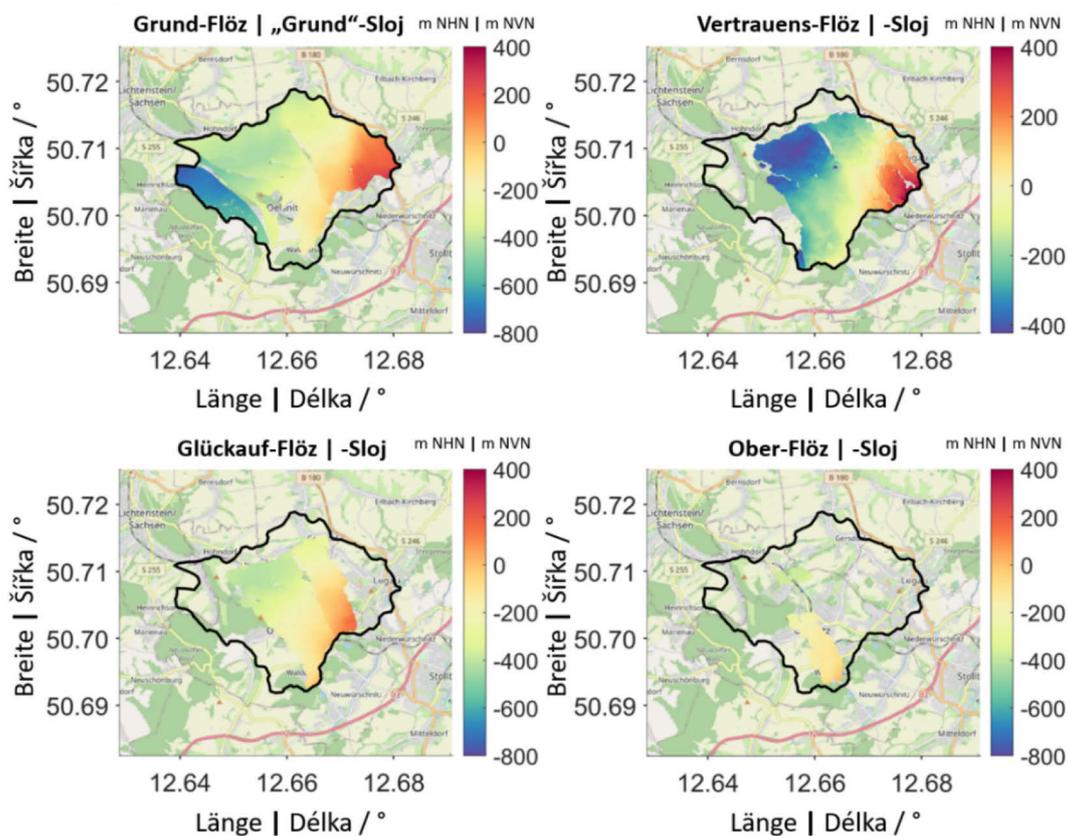


Abbildung 3: Tiefenlage und Verteilung der implementierten Kohleflöze im Revier Lugau-Oelsnitz.

3.3. Grubenwasserstand und Hebungsmessungen

Im Untersuchungsgebiet existieren zwei Grubenwassermessstellen zur Überwachung des Grubenwasserstandes, sowie zur Probennahme für chemische Analysen. Die erste Messstelle (GWM I) wurde im Stadtgebiet Oelsnitz mit einer Teufe der Filterstrecke von ca. 610 m eingerichtet. Aufgrund der komplexen geologischen Verhältnisse und unklaren Grubenwasserfließwege im Grubengebäude wurde in Gersdorf eine zweite Messstelle eingerichtet (GWM II). Die Messreihen sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Daten zeigen einen weitestgehend gleichmäßigen und annähernd linearen Grubenwasseranstieg über den gesamten Beobachtungszeitraum. Die mittlere Anstiegsgeschwindigkeit des Grubenwassers beträgt 10,5 m/a (GWM I) bzw. 11,4 m/a (GWM II). Auf dieser Datengrundlage wurde für die numerische Simulation ein mittlerer Grubenwasseranstieg von 11 m/a für das gesamte Revier angenommen. Unter Extrapolation des bisherigen Grubenwasseranstiegs ist zu erwarten, dass das Grubenwasser in den 2030er Jahren die Geländeoberkante im Bereich der tiefsten Lagen im Hegebachtal erreicht. Diese Annahme beruht ausschließlich auf den bisherigen Beobachtungen. Da die oberflächennahen hydraulischen Bedingungen deutlich vom tieferen Untergrund abweichen, ist eine Änderung des Flutungsverhaltens in Zukunft sehr wahrscheinlich, aber aus jetziger Sicht nicht prognostizierbar.

Ab 1996 wurden Nivellements im Steinkohlerevier Lugau-Oelsnitz für ca. 50 Messpunkte wieder aufgenommen. Nivellement Kampagnen finden seitdem in zeitlich unregelmäßigen und größeren Abständen statt (1996/1997, 2002, 2006, 2014). Die Ergebnisse der Messungen werden in Abbildung 5 als Hebungsraten (Hebung/Jahr) dargestellt. Die Hebungsraten wurden für jeweils ganze Jahre bestimmt, da die genauen Messtermine der einzelnen Messpunkte nicht vorliegen. Deshalb sind Fehler in der Bestimmung der Hebungsraten für einzelne Punkte von bis zu 25 % möglich.

26

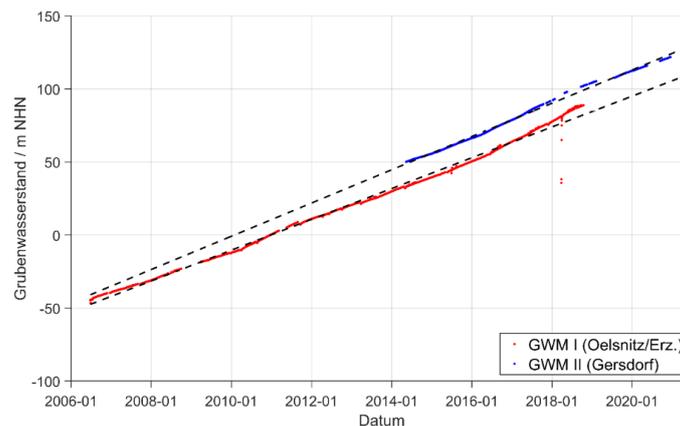
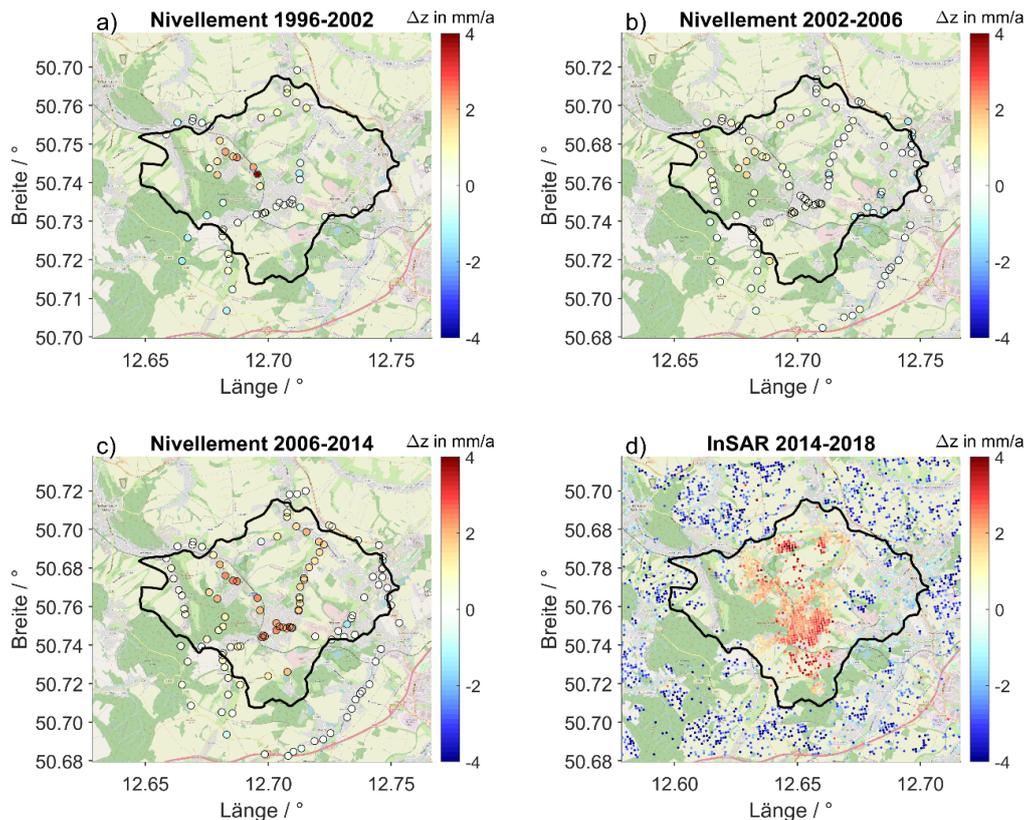


Abbildung 4: Grubenwasserstanddaten für die GWM I und GWM 2, mit dem jeweiligen linear extrapolierten Trend (schwarz gestrichelt). Zur Lage der Messstellen siehe Abbildung 1 (Stand 15.12.2020).

Um die Messabdeckung und die zeitliche Auflösung der Messungen zu verbessern wurden zusätzlich InSAR-Satellitendaten verwendet (ISBAS DInSAR-Prozessierung). Die InSAR-Ergebnisse zeigen im Untersuchungsgebiet vergleichbare Hebungswerte. Außerhalb der Abbaubereiche weisen die Satellitendaten Setzungen aus, welche durch die Nivellements nicht bestätigt werden. Dabei handelt es sich vermutlich um Artefakte aus der Prozessierung. Die maximalen Hebungsraten betragen 2 mm/a - 4 mm/a. Die zeitliche Entwicklung der Hebungsraten (Abbildung 5) zeigen eine Ausdehnung des Hebungsbereiches Richtung Osten. Diese ist durch die einsetzende Flutung der östlichen Grubenbereiche zu erklären, welche durch die Pluto-Schacht-Verwerfung mit einer Sprunghöhe von 100-150 m vom westlichen Grubenteil getrennt sind. Im gleichen Zeitraum wurden auch die flacher liegenden, südlichen Grubenfelder geflutet. Aufgrund der geringen Teufe und den hohen Abbaumächtigkeiten sind die Hebungsraten in diesem Bereich besonders hoch.



27

Abbildung 5: Jahreshebungsdaten für verschiedenen Zeiträume a-c) Nivellements; d) Satellitenbasierte InSAR Daten (Sentinel 1).

4. Numerische Simulation

4.1. Modellierungsstrategie und Modellaufbau

Für die numerische Simulation der Hebungsprozesse wurde ein kontinuumsmechanischer Ansatz verwendet und die Berechnungen in FLAC3D™ durchgeführt. Aufgrund der begrenzten Datenlage wurde das Modell entsprechend vereinfacht. Im Modell wurden keine Störungen (Verwerfungen) eingebaut, denn diese haben auf die hydraulischen und mechanischen Vorgänge keine praktischen Auswirkungen. Da die hydraulischen Vorgänge im Alten Mann nicht hinreichend gut bekannt sind und die hydraulische Permeabilität im Deckgebirge gering ist, wurde in der Simulation auf hydraulisches Fließen verzichtet. Bei besserer Datenlage wäre die Implementierung von hydraulischen Fließprozessen im Alten Mann aber grundsätzlich möglich. Der steigende Grubenwasserpegel wurde alternativ als Spannungsänderung im Alten Mann bzw. den darüber liegenden aufgelockerten Bereichen eingeschrieben. Diese Spannungsänderung reduziert die effektiven Spannungszustände im jeweiligen Bereich und erzeugt dadurch einen Auftrieb und somit eine Ausdehnung des „gefluteten“ Modellbereiches.

Das zur Verfügung stehende geologische Modell ist im Vergleich zur Mächtigkeit und Struktur der einzelnen Rotliegend-Formationen eher ungenau. Andere geologische Schichten im Deckgebirge sind sehr gering mächtig und haben für die Hebungsmodellierung keine große Relevanz. Des Weiteren ist eine signifikante Unterscheidung der mechanischen Parameter zwischen den einzelnen Formationen auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Daten nicht möglich. Aus diesen Gründen wurde ein Zwei-Schicht-Modell erzeugt (Deckgebirge und Grundgebirge), worin die Flöze und die darüber befindlichen Verbruchbereiche als Auflockerungszone zusammengefasst werden (Abbildung 6). Das Modell basiert auf einem gleichmäßig strukturierten hexaedrischen Gitter, welches um die Abbaue zusätzlich verfeinert wird.



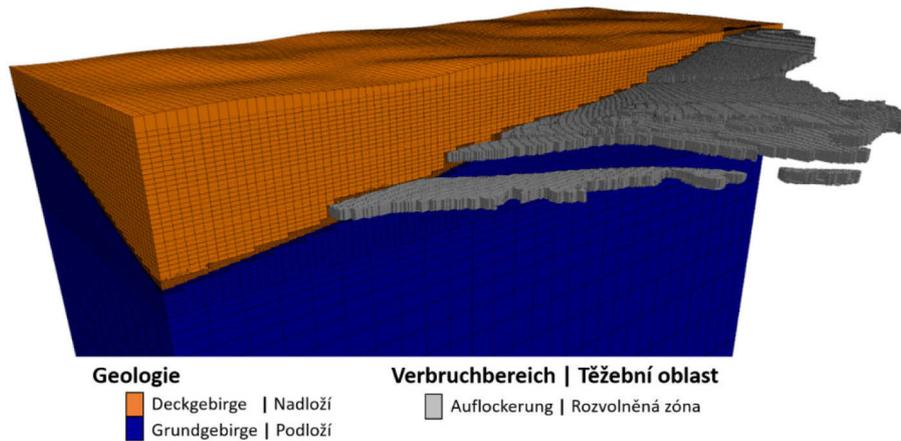


Abbildung 6: Schnitt durch die Modellgeometrie, gleichmäßig Gitterstruktur mit höher aufgelösten Flözen (Alter Mann) und vereinfachter Geologie.

Die Abbau- und Verbruch-Geometrien haben die größten Einflüsse auf die Simulationsergebnisse. Für die Mächtigkeiten der Flöze bzw. des Alten Mannes wurden Mittelwerte verwendet: Die Flözmächtigkeit wird mit 2 m angenommen. Die Mächtigkeit der gestörten und aufgelockerten bzw. verbrochenen Bereiche wird mit zwei verschiedenen Ansätzen definiert. Die Mächtigkeit des direkt verbrochenen Alten Mannes wird mit dem 3- bis 4-fachen der Flözmächtigkeit abgeschätzt (Bekendam, 2017). Das Grubenwasser dringt aber aufgrund entstehender Risse im Deckgebirge deutlich tiefer in das Gestein ein und sättigt sehr schnell auch eigentlich wasserstauende Schichten auf (Ahmed et al. 2018). Peng und Chiang (1984) schätzen die vertikale Ausdehnung, des durch Grubenwasser beeinflussten Bereiches, auf das 28-fache bis 42-fache der Abbaumächtigkeit. Da für das Revier Lugau-Oelsnitz keine Messdaten zur Mächtigkeit der Auflockerungszone vorliegen, wurde diese durch Modellkalibrierung (s. Abschnitt 4.2. und Tabelle 3) anhand der Hebungsmessdaten auf 100 m festgesetzt.

28

Für den gesamten Modellraum wird ein elastisches Stoffgesetz verwendet. Als Randbedingungen wurden an den seitlichen sowie der unteren Modellgrenze Rollrandbedingungen ohne weitere externe Kräfte verwendet. Die Modelloberkante ist entsprechend der Funktion als Geländeoberkante ohne Randbedingungen frei. Die numerischen Berechnungen werden in zwei Schritten durchgeführt: Der erste Schritt umfasst die Berechnung des Gleichgewichts im trockenen Zustand und entspricht somit der Situation nach Einstellung des Bergbaus und vor Beginn der Flutung. Der zweite Schritt der numerischen Simulation umfasst die stufenweise Flutung der Grube. Dazu wurde die Hebungssituation zu den Zeitpunkten, an denen Hebungsmessungen vorliegen numerisch simuliert. Zudem wurde der Grubenwasserstand und somit der Hebungsverlauf in 4-Jahres-Intervallen vor 1996 bzw. nach 2018 simuliert.

4.2. Modellparameter und -kalibrierung

Neben der Geometrie des Modells ist die Wahl der Parameter des gewählten Stoffgesetzes besonders wichtig. Idealerweise basieren sie auf den Messwerten aus dem Untersuchungsgebiet bzw. aus gesteinsmechanischen Versuchen an Proben vom Untersuchungsobjekt. Die finalen Modellparameter sind in Tabelle 1 dargestellt. Da das Grubengebäude im Lugau-Oelsnitzer Revier nicht zugänglich ist, musste hier auf vergleichbare Werte aus anderen Revieren, sowie Schätzungen und die Modellkalibrierung zurückgegriffen werden. Zur Kalibrierung wurden daher Testreihen erstellt. In der Testreihe E1 – E3 wurde drei Simulationen mit unterschiedlichen E-Modul des Deckgebirges durchgeführt (s. Tabelle 2), wobei die Mächtigkeit der Auflockerungszone 50 m beträgt. In der Testreihe V1 – V4 wurde die Mächtigkeit der Auflockerungszone von 20 – 150 m variiert (s. Tabelle 3).

Diese Testfälle sollen den Einfluss der Eingangsgrößen zeigen und dienen zur Kalibrierung der Simulation an den Hebungsmessungen. Dadurch konnten die finalen Parameter für E-Modul (s. Tabelle 1) und Verbruchhöhe (100 m) gewonnen werden.

Tabelle 1: Übersicht über die wichtigsten Modellparameter für die Hebungsprognose.

Parameter	Deckgebirge		Mann		Grundgebirge
		Alter (trocken)	Alter (geflutet)		
E-Modul / GPa	4.0 - 12.0	0.18 - 12.0	0.18 - 12.0	55.0	
Poissonverhältnis	0.30	0.30	0.30	0.17	
Dichte / kg/m ³	2660	2660	2968 - 3070	2750	
Porosität	--	--	0.30 - 0.40	--	
Zonengröße / m (horizontal/vertikal)	80/40	20/10	20/10	80/40	

Tabelle 2: Werte für den E-Modul im Deckgebirge in den Testfällen E1 - E3 für eine 50 m mächtige Auflockerungszone.

	E1	E2	E3
E-Modul Deckgebirge/ GPa	6.7 - 20.0	5.0 - 15.0	4.0 - 12.0
E-Modul Alter Mann (trocken) / GPa	0.225 - 20.0	0.225 - 15.0	0.18 - 12.0
E-Modul Alter Mann (geflutet) / GPa	0.225 - 20.0	0.225 - 15.0	0.18 - 12.0
Mächtigkeit Auflockerungszone / m	50.0	50.0	50.0

29

Tabelle 3: Werte für die Mächtigkeit der Auflockerungszone in den Testfällen V1 - V4 mit E-Modul für das Deckgebirge.

	V1	V2	V3	V4
Mächtigkeit Auflockerungszone / m	20.0	50.0	100.0	150.0
E-Modul Deckgebirge/ GPa	5.0 - 15.0	5.0 - 15.0	5.0 - 15.0	5.0 - 15.0
E-Modul Alter Mann (trocken) / GPa	0.225 - 15.0	0.225 - 15.0	0.225 - 15.0	0.225 - 15.0
E-Modul Alter Mann (geflutet) / GPa	0.225 - 15.0	0.225 - 15.0	0.225 - 15.0	0.225 - 15.0

Nahe der Geländeoberfläche wird ein linearer Gradient des E-Moduls verwendet um seine Verringerung zur Oberfläche hin (bspw. von 12 GPa auf 4 GPa bei Modell E3) zu modellieren. Diese ist üblicherweise durch die Verwitterung der oberflächennahen Festgesteinschichten verursacht. Innerhalb der Verbruchbereiche (Abbildung 6) wird der E-Modul zusätzlich angepasst. Dazu wird ausgehend von der Flözsohle ein linear ansteigender Gradient des E-Moduls bis zur Oberkante der Auflockerungszone verwendet. Der E-Modul des Deckgebirges und seine entsprechenden Gradienten wurde anhand von Sensitivitätstest und der Modellkalibrierung für die finale Prognose abgeschätzt.

Das Poisson-Verhältnis ist für jede geologische Struktur als konstant angenommen. Die Werte wurden aus allgemeinen Literaturwerten, sowie anhand der Auswertung der Bohrkernuntersuchungen an den zwei tiefen Grubenwasserbohrungen abgeleitet. Die Dichte für die jeweiligen geologischen / bergbaulichen Einheiten wurde gemäß Literaturwerten gewählt. Für den gefluteten Zustand wurde die Dichte entsprechend des anteiligen gefluteten Porenraumes erhöht. Dabei wurde von einer mittleren Porosität von 40 % im Verbruch und 30 % im überliegenden gestörten Sandstein des Deckgebirges ausgegangen. Hierbei ist zu beachten, dass Dichte und Porosität des Verbruchbereiches, sowie des teilweisen eingebrachten Versatzes, nur sehr ungenau abschätzbar sind und räumlich stark variieren.

Eine bessere Charakterisierung ist aber aufgrund der Unzugänglichkeit des Grubengebäudes nicht möglich.

Das Ansteigen des Grubenwasserspiegels wurde nicht als hydro-mechanisch gekoppelte Simulation durchgeführt, sondern in der mechanischen Simulation als zusätzlicher hydrostatischer Spannungsterm eingebracht. Der additive Spannungsterm Δp berechnet sich für jede Zone i im gefluteten Grubengebäude mittels folgender Gleichung:

$$\Delta p_i = \rho_w * g * h_{w,i} \quad (4)$$

wobei ρ_w die Dichte des Wassers, g die Schwerebeschleunigung und $h_{w,i}$ die Höhe der Wassersäule über der Zone i ist. Die Hebungen an der Geländeoberfläche werden auf dieser Grundlage für jeweils diskrete Grubenwasserstände berechnet (Abbildung 7).

Die gewählten Flutungsschritte für die numerische Simulation wurden entsprechend den zur Verfügung stehenden Hebungsdaten festgelegt. Zusätzlich wurden die Hebungsdaten in 4-Jahres-Intervallen vor 1996 bzw. nach 2018 simuliert. Dabei wurde ein gleichbleibend linearer Grubenwasseranstieg angenommen. Zum jetzigen Zeitpunkt ist eine detaillierte Prognose für den Flutungsverlauf in der Endphase (oberen 70 - 100 m) allerdings nicht zuverlässig möglich. Abbildung 7 zeigt den gemessenen und in der numerischen Simulation angenommenen Flutungsverlauf, Tabelle 4 gibt einen Überblick über die gewählten Simulationsschritte. Neben der numerischen Lösung wurde zusätzlich der in Abschnitt 2 beschriebene analytische Ansatz auf das Revier Lugau-Oelsnitz angewendet, um einen Vergleich mit der numerischen Lösung durchführen zu können.

30

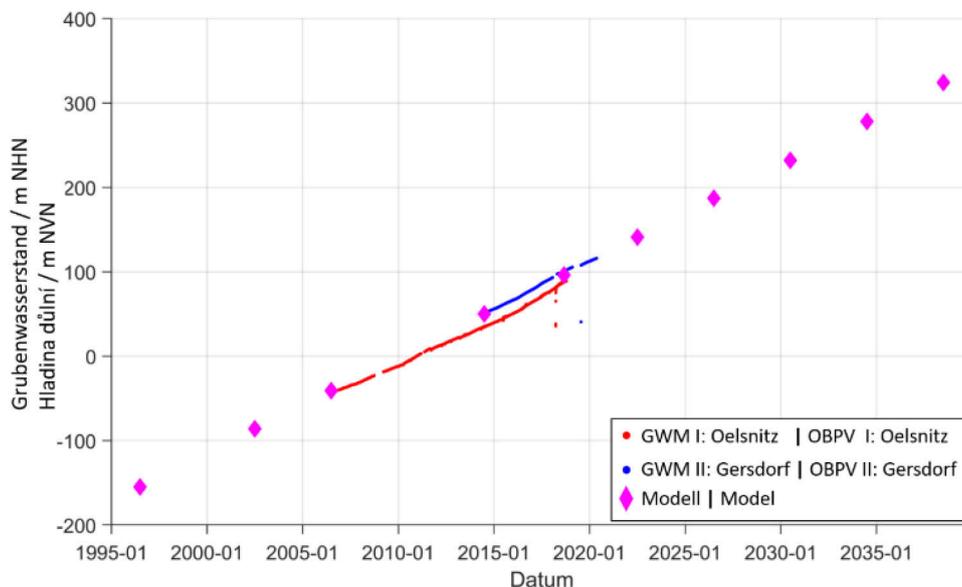


Abbildung 7: Messdaten der Grubenwasserstände mit den extrapolierten Grubenwasserständen für die numerische Simulation.

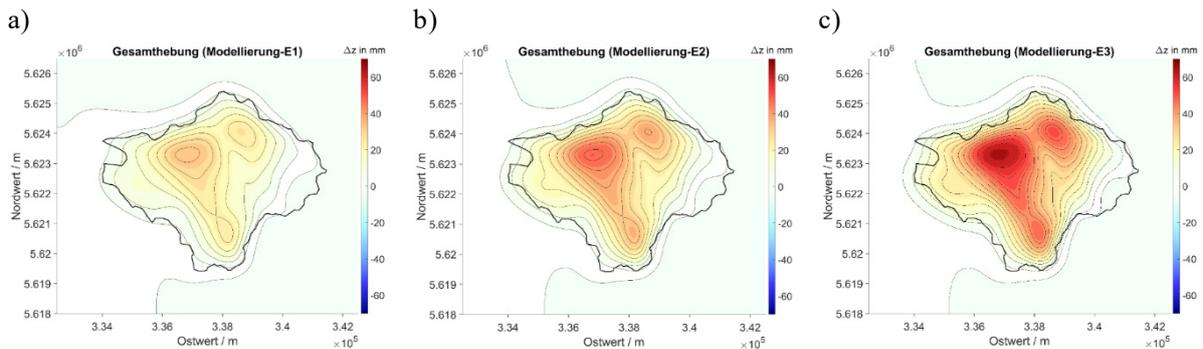
Tabelle 4: Schritte der numerischen Simulationsrechnungen.

Jahr	Grubenwasser- stand / m	Hebungsdaten
1996	-155	
2002	-86	Nivellement
2006	-41	Nivellement
2014	50	Nivellement
2018	96	InSAR
2022	141	
2026	187	
2030	232	
2034	278	
2038	324	

5. Ergebnisse und Diskussion

5.1. Ergebnisse der Testreihen zur Kalibrierung

Die Ergebnisse der simulierten flutungsinduzierten Gesamthebungen der Testreihe E1 – E3, mit einer 50 m mächtigen Auflockerungszone, sind in Abbildung 8 als Konturplots dargestellt. Bei einer maximalen Deckgebirgssteifigkeit von 20 GPa treten lediglich maximale Hebungen von circa 36 mm (E1) auf. Verringert sich die Steifigkeit des Deckgebirges vergrößern sich die maximalen Hebungen auf circa 51 mm (E2) und 67 mm (E3). Die Ergebnisse zur Testreihe der Verbruchhöhe sind in Abbildung 9 zu sehen. Hier steigern sich die maximalen Hebungen von circa 15 mm bei Modell V1, über 51 mm (V2) und 112 mm (V3) bis hin zu 170 mm im Modell V4. Somit wird deutlich, dass ein weniger steifes Deckgebirge (und Alter Mann) und eine mächtigere Auflockerungszone zu größeren Hebungen an der Geländeoberkante führen.



32

Abbildung 8: Gesamthebungen der Testreihe E1 - E3.

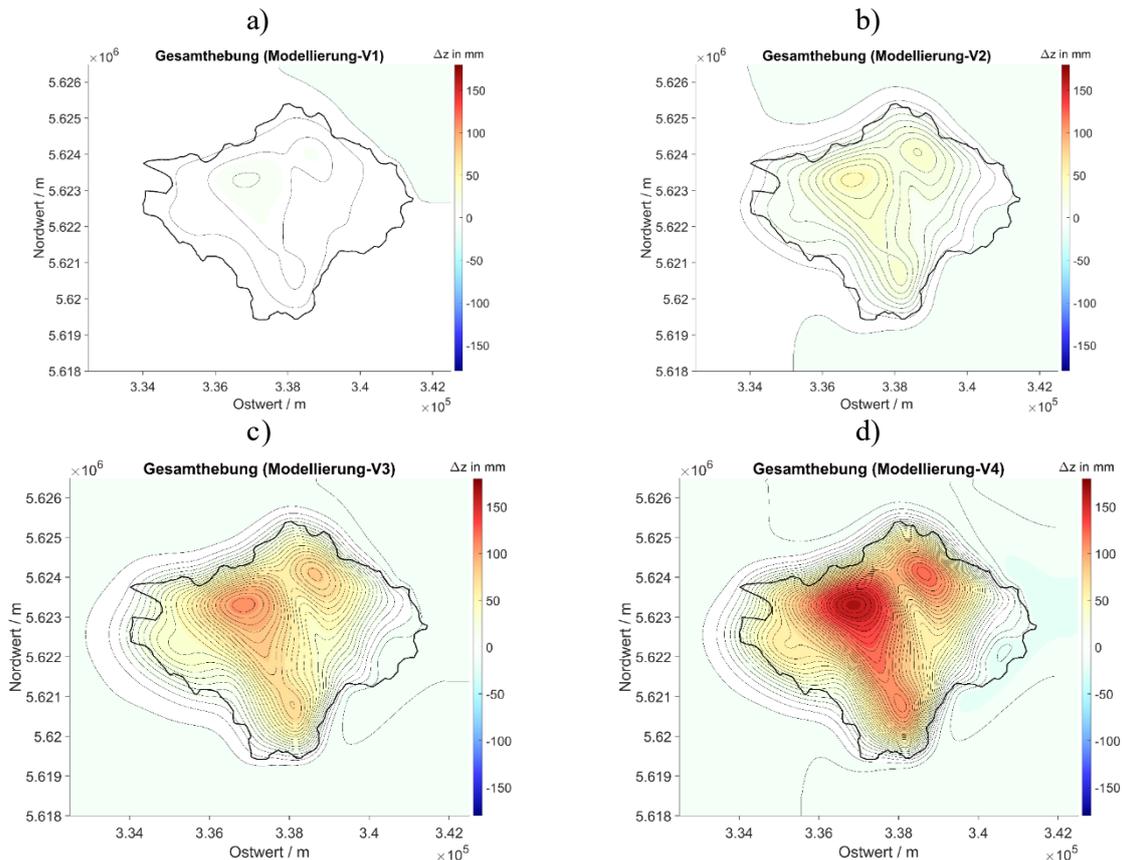
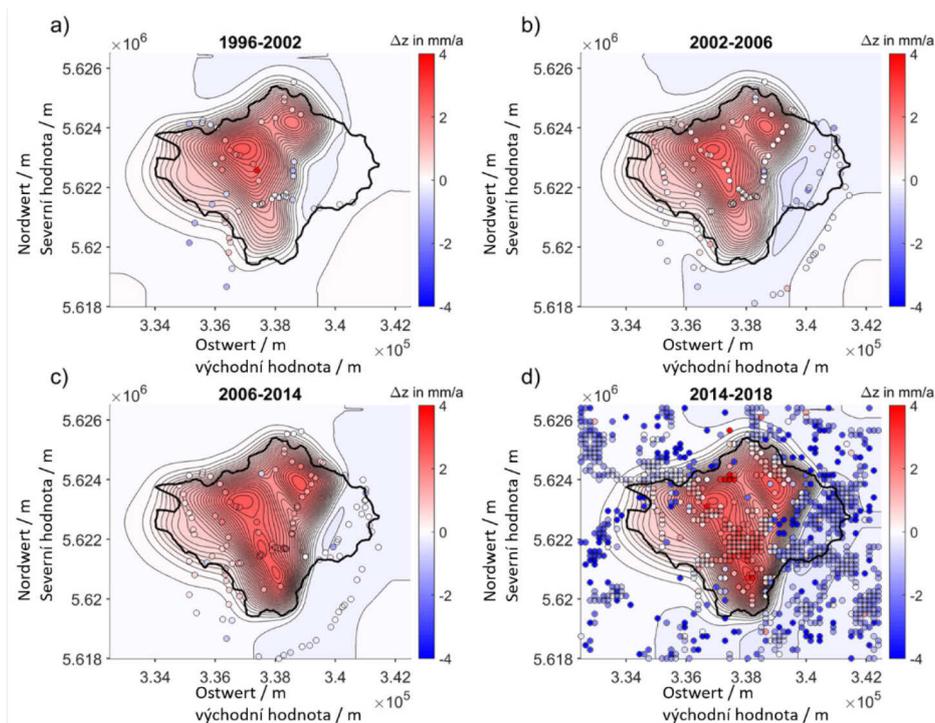


Abbildung 9: Gesamthebungen der Testreihe V1 – V4.

5.2. Ergebnisse der Hebungsprognose

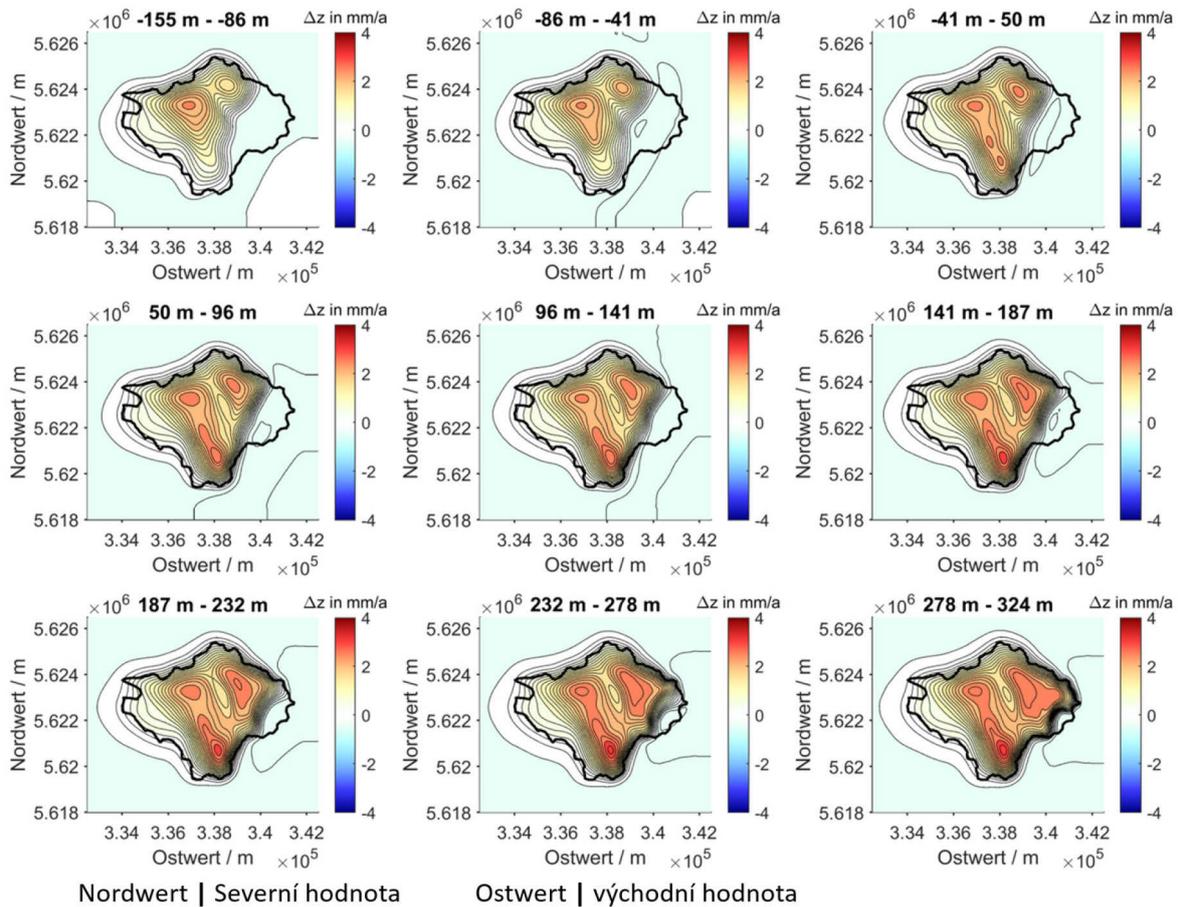
Abbildung 10 zeigt die, aus der finalen numerischen Simulation (Parameter aus Tabelle 1) resultierenden Hebungsraten (Kontur-Darstellung), im Vergleich zu den gemessenen Hebungswerten (Punkte). Die Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung in Bezug auf die zeitliche Entwicklung der Hebungsbereiche sowie der einzelnen Hebungsmaxima. Insbesondere die Ausweitung der höheren Hebungsraten Richtung Süden und Südosten kann mit der numerischen Simulation gut reproduziert werden. Diese Verschiebung der Hebungsmaxima ist durch die flachere Lage der südlichen und östlichen Abbaubereiche zu erklären und im Modell gut verifizierbar. Nach der Flutung der meisten Abbaue im südlichen Bereich hat sich die Ausdehnung des Hebungsgebietes wieder verlangsamt (s. Abbildung 10d). Die maximalen Hebungsraten liegen in der numerischen Simulation und den Messungen zwischen 2 und 4 mm/a.



33

Abbildung 10: Hebungsraten der numerischen Simulation (Kontur) und Monitoringdaten (Punkte) für den Untersuchungszeitraum 1996- 2018.

Auf Grundlage der bereits beschriebenen Flutungsschritte wurden die Hebungsraten in 4-Jahres Intervallen bis zum ungefähren, final möglichen Grubenwasserstand (324 m NN) berechnet (Abbildung 11). Das Erreichen des finalen Flutungspegels ist aber sehr spekulativ. Kowarik et al. (2018) gehen hierbei aus Sicherheitsgründen z.B. von einem maximal anzustrebenden Grubenwasserstand von 300 m NN aus. Eine Diskussion der potenziellen Auswirkungen des Grubenwasseranstiegs auf die oberflächennahen (70 m bis 100 m unter GOK) Bereiche und mögliche Risiken, bzw. anzustrebende Sicherheitsmaßnahmen, werden ebenfalls von Kowarik et al. (2018) aufgeführt. Unter der Annahme des weitergehend linearen Flutungsvorgangs, sind zukünftig nur sehr geringfügige Erhöhungen der Hebungsraten zu erwarten (Abbildung 11). Zudem wird sich das Hebungsgebiet weiterhin langsam Richtung Osten ausdehnen. Der genaue Hebungsverlauf im östlichen Randgebiet des Reviers ist aber aufgrund der sehr unvollständigen Abbaudaten aus diesen Bereichen und den bereits genannten schwer vorhersehbaren Vorgängen in den obersten 70-100 m hoch spekulativ.



34

Abbildung 11: Modellerte jährliche Hebungsdaten für verschiedene Flutungsintervalle (s. Tabelle 4).

Die auftretenden Gesamthebungen der numerischen Simulation sind in Abbildung 12a dargestellt. Die maximalen Hebungen treten demzufolge im nordwestlichen Grubengebiet auf, welches einen Großteil der tiefsten Abbaue beinhaltet. Die dortigen höheren Hebungswerte sind auf die große Tiefenlage und den damit verbundenen höheren Porenwasserdruck gegenüber den flacheren südlichen Abbaubereichen, zurückzuführen. Dabei werden maximale Hebungen von circa 15 cm erreicht. Dieser Wert stehen in guter Übereinstimmung mit den Hebungsmessungen in anderen Revieren (Bekendam, 2017), (Heitfeld, et al., 2016), (Heitfeld, et al., 2015)

Die analytische Lösung (Abbildung 12b) ergibt eine ähnliche Verteilung der Hebungen, mit den drei ausgebildeten Hebungsmaxima. Jedoch überschätzt die analytische Lösung die Hebungswerte. Im Vergleich zu den Hebungsdaten im numerischen Modell und den Messungen, treten bei der Sroka-Preuße-Lösung höhere Raten zwischen 2 und 5 mm/a auf, was die höheren Gesamthebungen erklärt.

Das numerische Modell bildet somit in guter Näherung die durch Monitoringdaten belegbaren Hebungsdaten ab und liefert plausible Gesamthebungen. Die Ergebnisse liefern Aussagen über großräumige Hebungsverteilungen. Aussagen über lokale Ereignisse bspw. an Tagesschächten oder Störungen sind nicht möglich. Die Hebungsprognose ist daher aufgrund der getroffenen Annahmen für den E-Modul, die Höhe der Verbruchzone etc. mit erhöhten Unsicherheiten behaftet. Dies ist auf die äußerst begrenzte Datengrundlage zurückzuführen.

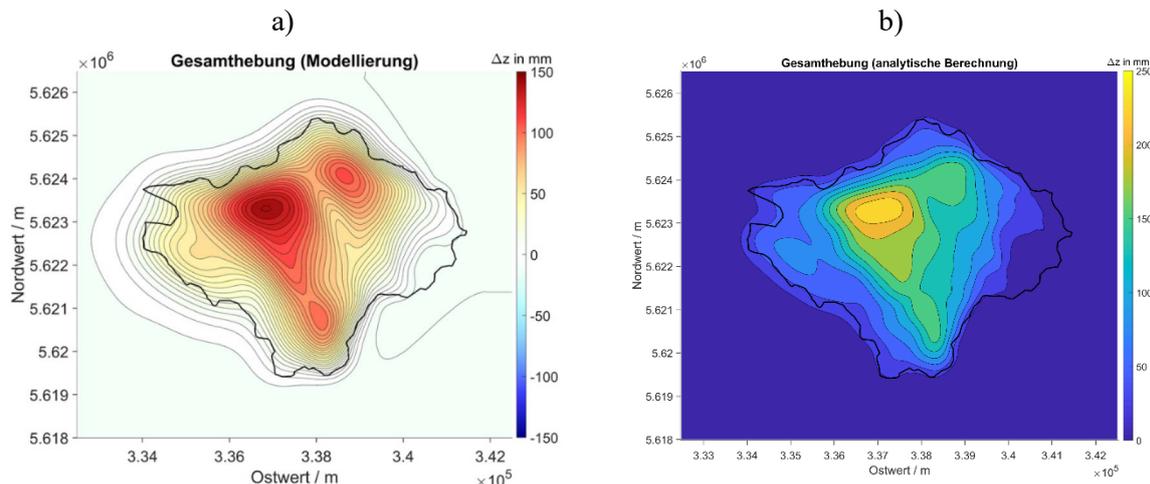


Abbildung 12: Gesamthebungen der numerischen Lösung (a) und analytischen Lösung (b).

6. Schlussfolgerungen

Die numerische Simulation der durch den Grubenwasseranstieg verursachten Hebungen hat folgendes gezeigt:

- Auch bei sehr begrenzter Datenlage können die grubenwasserbedingten Hebungsvorgänge über einem stillgelegten Steinkohlebergwerk gut modelliert werden. Dazu wurde ein vergleichsweise einfacher Simulationsansatz verwendet, welcher auch ohne größere Kenntnisse der hydraulischen Eigenschaften und Bedingungen im Abbau plausible Ergebnisse erzeugt.
- Der gewählte Ansatz ist für komplexe Geometrien der Geologie und Abbaue, vor allem bei starken Neigungen der Flöze gut geeignet. Die erzielten Ergebnisse sind vor allem gegenüber den vorgestellten analytischen auf Superposition beruhenden Verfahren plausibler.

Aufgrund der getroffenen Annahmen (E-Modul Deckgebirge, Verbruchhöhe, etc.) sind die Ergebnisse mit erhöhten, schwer quantifizierbaren Unsicherheiten behaftet. Zudem geben die hier durchgeführten Untersuchungen nur Aufschluss über die großräumigen Hebungswirkung tieferer Abbaubereiche im nicht verwitterten Gebirge. Die Auswirkungen des Grubenwasseranstiegs auf die obersten 70 – 100 m unterhalb der Geländeoberkante können in diesem groß-skaligen Modell nicht berücksichtigt werden. Bei einer Änderung der Geschwindigkeit des Grubenwasseranstiegs muss dieses Modell ebenfalls neu bewertet werden. Für eine detailliertere numerische Simulation sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Für eine genauere Hebungssimulation ist eine flächendeckende Langzeitüberwachung der Wasserstände im Grubengebäude, aber auch der zeitlichen Grundwasserstandsänderungen im Deckgebirge empfehlenswert. Dies ist besonders zur besseren Einschätzung der Hebungswirkung des Deckgebirges notwendig.
- Ein konsistentes geometrisches Modell des Untergrundes bzgl. der geologischen Strukturen aber auch des Grubengebäudes (inkl. Abbaumächtigkeiten und Versatzsituation) ist notwendig um die Hebungen vollständig abbilden und nachvollziehen zu können.

Danksagung

Die Untersuchungen wurden durch den Europäischen Fond für regionale Entwicklung (EFRE) und den Freistaat Sachsen im Rahmen von "Interreg V A – SN-CZ 2014-2020" (Projektname: "GeoMAP"; Projektnummer 100348899) finanziert. Ein Dank geht an alle beitragenden Projektpartner. Ein spezieller Dank geht an David Gee (University of Nottingham) für das Prozessieren und zur Verfügung stellen der InSAR-Daten.

Literaturverzeichnis

Ahmed, Samar S.; AlHeib, Marwan; Gunzburger, Yann; Renaud, Vincent (2018): 3D Numerical Simulation of the Goaf Due to Large-Scale Longwall Mining. In: Hany Shehata und Youssef Rashed (Hg.): Numerical Analysis of Nonlinear Coupled Problems. Cham: Springer International Publishing (Sustainable Civil Infrastructures), S. 121–131.

Beak Consultants GmbH (2020): Auswertung von Bodenbewegungsdaten aus der Georadarfernerkundung zur Untersuchung von bergbau- und flutungsbedingten Senkungen und Hebungen der Erdoberfläche im Steinkohlenrevier zur Festlegung von Bohrlochansatzpunkten. Teilprojekt 2.3.1.5, Teil 2. Vita-Min-Projekt - Abschlussbericht. Beak Consultants GmbH. Freiberg.

Bekendam, Roland (2017): Abschätzung der Bodenhebungen in Folge des Grubenwasseranstiegs über stillgelegten Kohlegruben im Südlimburger Revier. In: Günter Meier (Hg.): 17. Altbergbau-Kolloquium. 16. bis 18. November 2017, Freiberg. Nossen: Wagner Digitaldruck und Medien GmbH, S. 118–130.

36 Bekendam, R. F.; Pöttgens, J. J. (1995): Ground movements over the coal mines of southern Limburg, The Netherlands, and their relation to rising mine waters. In: Land Subsidence. FISOLS - Fifth International Symposium on Land Subsidence. The Hague, 10/1995. IAHS & Netherlands Geodetic Commission (IAHS Publ., no. 234).

Berger, H.-J.; Steinborn, H.; Görne, S.; Junghanns, C. (2010): Stratigraphie und Tektonik im Steinkohlerevier Lugau/Oelsnitz. In: Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Hg.): Geoprofil 13 (2010): Geologie und Bergbaufolgen im Steinkohlerevier Lugau/Oelsnitz. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Freiberg, S. 15–43.

Beyer, J. (1974): Bergschadenskundliche Analyse „Lugau-Oelsnitz“. VEB Baugrund Berlin, Produktionsbereich Zwickau & VEB Steinkohlenwerk Oelsnitz. Zwickau.

Dudek, Mateusz; Tajduś, Krzysztof; Misa, Rafat; Sroka, Anton (2020): Predicting of land surface uplift caused by the flooding of underground coal mines – A case study. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 132, S. 104377. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104377.

Eckart, M.; Rüterkamp, P. (2013): Konzeptentwicklung zur gesteuerten Flutung des ehemaligen Steinkohlereviere Lugau-Oelsnitz und Darstellung technischer Lösungen für die Konzeptumsetzung. EU-Projekt VODAMIN. Bericht. DMT GmbH & Co. KG.

Eckart, M.; Unland, W. (2005): Aufbau eines Grubenwasserwiederanstiegsmodells für das Steinkohlerevier Lugau/Oelsnitz, Teil II. unveröff. Bericht. DMT GmbH & Co. KG. Essen.

Felix, M.; Berger, H.-J.; Köhler, U.; Döhner, S.; Kauk, S.; Löbel, K.-H. (2007): Bergbaufolgen im ehemaligen Steinkohlerevier Lugau/Oelsnitz unter besonderer Berücksichtigung des Grubenwasseranstiegs. Abschlussbericht. Landesamt für Umwelt und Geologie - Oberbergamt.

Gee, David; Bateson, Luke; Sowter, Andrew; Grebby, Stephen; Novellino, Alessandro; Cigna, Francesca et al. (2017): Ground Motion in Areas of Abandoned Mining: Application of the Intermittent SBAS (ISBAS) to the Northumberland and Durham Coalfield, UK. In: *Geosciences* 7 (3), S. 85. DOI: 10.3390/geosciences7030085.

Gee, David; Sowter, Andrew; Novellino, Alessandro; Marsh, Stuart; Gluyas, Jon (2016): Monitoring land motion due to natural gas extraction: Validation of the Intermittent SBAS (ISBAS) DInSAR algorithm over gas fields of



North Holland, the Netherlands. In: *Marine and Petroleum Geology* 77, S. 1338–1354. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2016.08.014.

Heitfeld, Michael; Denys, Frank; Klünker, Johannes; Rosner, Peter; Spaans, Jaap (2016a): Systematische Erfassung und Bewertung von Spätfolgen des Steinkohlenbergbaus in Südlimburg/Niederlande. In: *Berg Huettenmaenn Monatsh* 161 (4), S. 156–163. DOI: 10.1007/s00501-016-0465-7.

Heitfeld, N.; Rosner, P.; Mühlkamp, M. (2016b): Gutachten zu den Bodenbewegungen im Rahmen des stufenweisen Grubenwasseranstiegs in den Wasserprovinzen Reden und Duhamel. Bewertung des Einwirkungspotentials und Monitoringkonzept. - Anstieg bis -320 mNHN -. Ingenieurbüro Heitfeld - Schetelig GmbH. Aachen.

Heitfeld, Michael; Denys, Frank; vent, Ilse de; Klünker, Johannes; Rosner, Peter (2015): Bewertung der Risiken durch Spätfolgen des Steinkohlenbergbaus in Südlimburg/Niederlande. In: Günter Meier (Hg.): 15. Altbergbau-Kolloquium. Vom 5. bis 7. November 2015 in Leoben, (Montanuniversität Leoben. Nossen: Wagner, S. 130–146.

Heitfeld, Michael; Rosner, Peter; Mühlkamp, M. (2014): Auswirkungen von Geländehebungen im Zuge des Grubenwasseranstiegs im Ruhrrevier - ein Ansatz zur Bewertung der Risiken. In: Günter Meier (Hg.): 14. Altbergbau-Kolloquium. Vom 6. bis 8. November 2014 in Gelsenkirchen. Nossen: Wagner.

John, André (2019): Untersuchungen zum Monitoring von Bodenbewegungen in Folge des Grubenwasseranstiegs im ehemaligen Steinkohlerevier Oelsnitz/Erzgebirge mittels Radarinterferometrie. In: G. Mayer, C. Butscher, J. Benndorf, K.-H. Löbel, D. Tondera und Wolfgang Busch (Hg.): 19. Altbergbau-Kolloquium. Leoben, 07. bis 09. November 2019. Nossen, Deutschland: Wagner Digitaldruck und Medien GmbH, S. 127–142.

Knothe, S. (1984): Prognozowanie wpływów eksploatacji górnictwa. Katowice: Wydawnictwo Śląsk.

37 Kowarik, J.; Eckart, M.; Rüterkamp, P.; Dabrowski, A.; Schubert, J.; Beige, H. (2018): Erarbeitung inhaltlicher Aspekte für ein Rahmenkonzept zu "Bergbaunachfolgen des ehemaligen Steinkohlereviers Lugau-Oelsnitz / Erzgeb.". DMT-Leipzig.

Löbel, K.-H.; Tamaskovics, N.; Eckart, M.; Busch, W. (2015): Vertikale Bodenbewegungen im Zusammenhang mit dem Grubenwasseranstieg im ehemaligen Steinkohlenrevier Oelsnitz/Erzgebirge. In: Günter Meier (Hg.): 15. Altbergbau-Kolloquium. Vom 5. bis 7. November 2015 in Leoben, (Montanuniversität Leoben. Nossen: Wagner, S. 114–129.

Peng, Syd S.; Chi ang, Han Shing (1984): Longwall Mining. New York: Wiley.

Pöttgens, J. J. E. (1985): Bodenhebung durch ansteigendes Grubenwasser. In: 6. Internationaler Kongress für Markscheidewesen. Harrogate, S. 928–938.

Sächsisches Oberbergamt (Hg.) (2014): Erfahrungen im Umgang mit aufsteigenden Grubenwässern. Studie im Rahmen des Ziel 3-Projektes VODAMIN. Unter Mitarbeit von Stephan Uhlig. Sächsisches Oberbergamt.

Sroka, A.; Preusse, A. (2017): Technische Abschätzung von Folgelasten des Steinkohlebergbaus. In: 9. Aachener Altlasten- und Bergschadenskundliche Kolloquium: "Ende des subventionierten Steinkohlenbergbaus - aktueller Stand und langfristige Entwicklungen". Aachen, 11.-12.06.2017. GDMB (Schriftenreihe der GDMB, 112), S. 49–58.



Grubenwassergeothermie als innovative Energiequelle – Bergbaufolgegebiete positiv nutzen –

L. Oppelt, S. Pose, T. Grab, T. Fieback

TU Bergakademie Freiberg, Lehrstuhl für technische Thermodynamik

Keywords: Grubenwasser, erneuerbare Energie, Geothermie, Heizen, Kühlen, Wärmepumpe

Zusammenfassung

Stillgelegte Bergwerke bieten eine Möglichkeit zur regenerativen Energiebereitstellung. Aufgrund ganzjährig nahezu konstanter Temperaturen und der großen Gesteinsflächen als wärmeübertragende Flächen ist Grubenwasser ideal zum Heizen und Kühlen einsetzbar.

Es wird ein Überblick über die grundlegende Technologie und den aktuellen Status quo bestehender, geplanter und stillgelegter Anlagen gegeben. In Sachsen und Tschechien konnten 12 aktive Anlagen recherchiert werden. Sowohl in Sachsen als auch in Tschechien bestehen weitere Potenziale Grubenwasser energetisch zu nutzen, z.B. in Mariánské Radčice wo jährlich etwa 11 GWh Heizwärme an einer Pumpstation genutzt werden könnten.

Eine Herausforderung bei der energetischen Nutzung von Grubenwasser besteht darin, dass aufgrund der Mineralisation des Grubenwassers Ablagerungen im Wärmeübertrager zwischen Grubenwasser- und Zwischenkreislauf entstehen. Die Effizienz der Anlage wird dabei wesentlich reduziert. Im Projekt GeoMAP wurde deshalb ein Wärmepumpenversuchsstand entwickelt womit mögliche Gegenmaßnahmen in unterschiedlichen Bergwerksregionen untersucht werden können. Dabei wurden verschiedene Materialien und Oberflächen in In-situ-Versuchen erprobt, die besten Ergebnisse lieferte dabei u.a. eine Silber-Nano-Beschichtung die dafür sorgt, dass sich weniger Ablagerungen auf der Wärmeübertragerplatte bilden.

38

1. Einleitung

Seit September 2016 arbeiten deutsche und tschechische Firmen und Forschungseinrichtungen in den im Rahmen des Kooperationsprogramms des Freistaates Sachsen und der Tschechischen Republik durch die Europäische Union geförderten Projekte VODAMIN II (SAB-Antragsnummer: 100304269) und GeoMAP (SAB-Antragsnummer: 100348899) gemeinsam an Themen zum grenzübergreifenden Gewässerschutz sowie dem Gefährdungs- und Nutzungspotenzial von Grubenwässern. Diese haben meist ein ganzjährig nahezu konstantes Temperaturniveau und sind damit perfekt zum Heizen und Kühlen geeignet. In Abhängigkeit vom Standort bestehen dabei verschiedene Möglichkeiten das Grubenwasser zu entnehmen, so kann z.B. im Ruhrgebiet das zum Grundwasserschutz nach oben gepumpte Grubenwasser direkt geothermisch genutzt werden. An anderen Standorten z.B. in Freiberg besteht die Möglichkeit Grubenwasser aus Entwässerungstollen zu nutzen. Ein Überblick möglicher Entnahmestellen ist ebenso wie mögliche Einleitungsstellen und potenzielle Nutzer in Abbildung 1 dargestellt. Außerdem ist in dieser Abbildung das Grundprinzip einer Grubenwassergeothermieanlage gezeigt. Das warme Grubenwasser wird dabei zunächst zu einem Wärmeübertrager gepumpt, um den Pumpaufwand zu reduzieren befindet sich dieser häufig unter Tage. In diesem Wärmeübertrager wird das Grubenwasser dann abgekühlt und die so entzogene Wärme an ein Fluid im Zwischenkreislauf übertragen. Das so abgekühlte Grubenwasser wird dann z.B. in einen Entwässerungstollen zurückgeführt. Das Fluid im Zwischenkreislauf das die Wärme aufgenommen hat, wird als geschlossenes System umgewälzt, wodurch der elektrische Aufwand geringgehalten wird. Die Wärme



wird über den Zwischenkreislauf zum Heizkreislauf geführt und kann bei ausreichend hoher Grubenwassertemperatur direkt zum Heizen eingesetzt werden. In den meisten Fällen muss das Temperaturniveau jedoch noch durch eine Wärmepumpe erhöht werden. Die Nutzung von Grubenwasser zum Kühlen erfolgt nach dem gleichen Prinzip, nur, dass die Wärme dem zu kühlenden Gebäude entzogen wird und dann über den Wärmeübertrager an das Grubenwasser abgegeben wird, das sich demzufolge im Kühlbetrieb erwärmt. Das beschriebene Prinzip mit Zwischenkreislauf ist der weltweit am häufigsten umgesetzte Aufbau (Grab et al. 2018). Weitere mögliche Systeme, z.B. ein geschlossener Kreislauf werden bei (Grab et al. 2018) näher beschrieben.

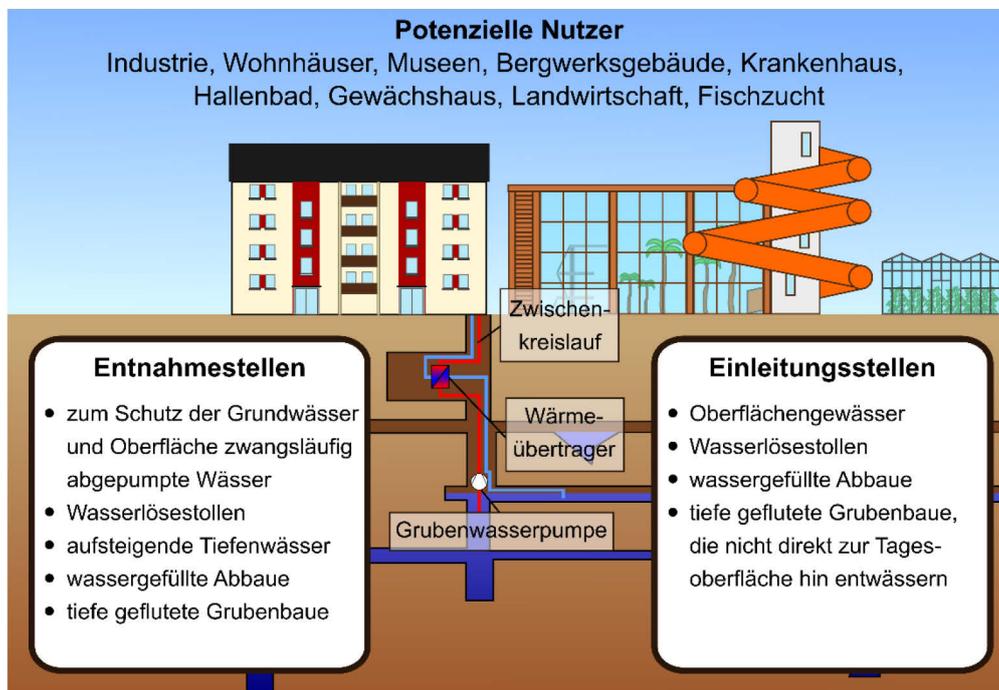


Abbildung 1: Grundprinzip Grubenwassergeothermie sowie mögliche Entnahme-, Einleitungsstellen und potenzielle Nutzer (nach Oppelt et al. 2020a).

2. Status quo Grubenwassergeothermie

Seit den 80er Jahren werden stillgelegte Bergwerke energetisch genutzt, eine der ersten Anlagen entstand z.B. 1981 in Kingston (Pennsylvania) und dient zur Beheizung eines Freizeitentrums (Korb 2012). Ein Überblick über aktuell aktive, stillgelegte, im Bau befindliche Anlagen und Studien für Europa und Nordamerika gibt Abbildung 2. Außerhalb dieser Gebiete konnte weltweit nur eine Anlage in China recherchiert werden (Guo et al. 2017). Es wird also deutlich, dass sich die energetische Nutzung von Grubenwasser bisher im Wesentlichen auf Deutschland, Großbritannien und die USA, bzw. Kanada beschränkt. Details zu den einzelnen Anlagen weltweit wurden von Grab et al. (Grab et al. 2018) und Oppelt et al. (Oppelt et al. 2021a) veröffentlicht.

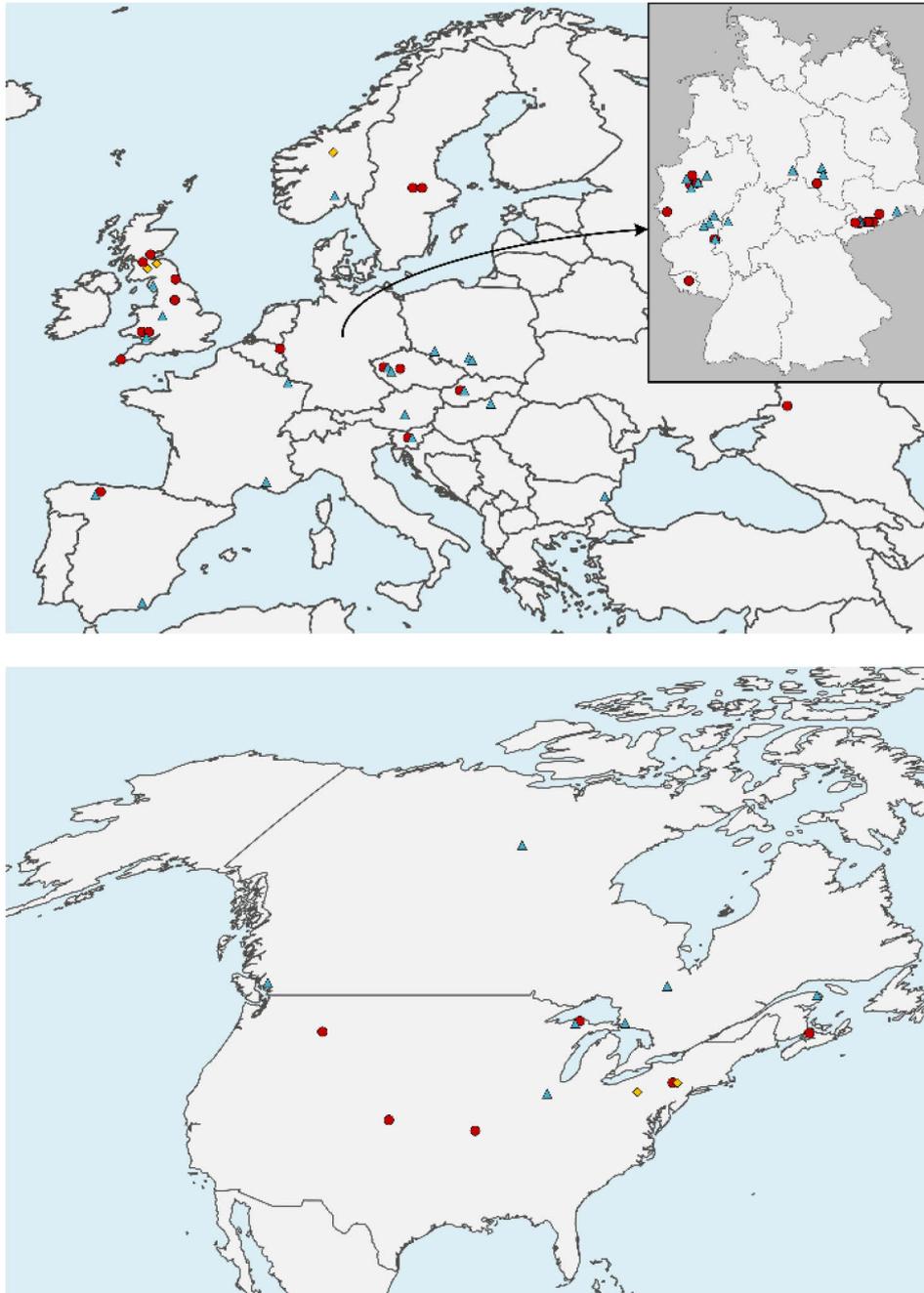


Abbildung 2: Übersicht Grubenwassergeothermieanlagen in Europa (oben) und Nordamerika (unten) (Anlagen in Betrieb ●, Anlagen nach Betrieb stillgelegt ◆, Anlagen in Bau/ Planung/ Studie ▲) (nach (Grab et al. 2018).

Innerhalb Deutschlands konzentrieren sich die realisierten Anlagen und Studien auf die beiden großen Bergbauregionen: das Erzgebirge und das Ruhrgebiet. Dabei stehen zehn der insgesamt 18 aktiven Anlagen in Deutschland im Erzgebirge. Der Strukturwandel ist dort bereits stärker fortgeschritten, einige Anlagen wie die in Ehrenfriedersdorf laufen bereits seit den 90er Jahren (Oppelt et al. 2020b). Zudem befindet sich derzeit auch die einzige deutsche Anlage im Bau in Sachsen: im ehemaligen Uranrevier Königstein in der sächsischen Schweiz wird aktuell eine Anlage zur Beheizung eines Betriebsgebäudes errichtet (Jenk 2020). Im Rahmen des Projektes GeoMAP liegt ein besonderes Augenmerk auf der Nachsorge und Nachnutzung von Bergwerken in Sachsen und Tschechien, einen Überblick über die dort aktuell bestehenden Anlagen liefert Tabelle 1:

Tabelle 1: Standorte und Kennwerte der realisierten Grubenwassergeothermieanlagen in Sachsen und Tschechien (SN=Sachsen, CZ=Tschechien).

Ort	Name	Abnehmer	Ressource	Heizleistung in kW	Quelle
Bad Schlema (SN)	Grube Schlema-Albenroda	Schule	Uran	200	(Debes 2012; Ramos et al. 2015; Vater 2012; Wismut GmbH 2012)
Bad Schlema (SN)	Projekt „Leon“	Wohngebäude	Uran	-	(Debes 2012; Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie 2012; Vater 2007; Vater 2012)
Ehrenfriedersdorf (SN)	Nord-West-Feld	Schule	Zinn	95	(Debes 2012; Lagerpusch K. 04.02.10; Wieber and Ofner 2008)
Ehrenfriedersdorf (SN)	Revier Sauberg	Museum, Bürogebäude	Zinn	120	(Kissing 2009; Lagerpusch K. 04.02.10; Raube 2012; Wieber and Ofner 2008)
Freiberg (SN)	Alter Fürstentollen	Schloss Freudenstein	Silber	130	(Batchelor et al. 2015; Hall et al. 2011; Lagerpusch K. 04.02.10)
Freiberg (SN)	Reiche Zeche	Universität	Silber	200	(Baukonzept Dresden GmbH; Grab et al. 2010; Staatsbetrieb Sächsisches Immobilien- und Baumanagement 2013)
Freiberg (SN)	Rothschönberger Stolln	Krankenhaus	Silber	860	(Johnson Controls; Ulbricht 2013)
Marienbad (CZ)	Hachov-Plana	Bergwerksgebäude	Uran	550	(Röder 2012, 2015; Sunbeam GmbH 2013)
Marienberg (SN)	Wismut-Schacht 302	Freizeitbad	Uran	800-1700	(Lagerpusch K. 04.02.10; Wieber and Ofner 2008)
Pobershau (SN)	Walfisch-Stollen, Weiße Villa	Wohngebäude	Zinn	-	(Lagerpusch K. 04.02.10; Mineralienatlas - Fossilienatlas 2015)
Pribram (CZ)	Prokop-schacht	Schule, Bürogebäude	Uran	500	(Myslík and Frydrych 2005; Wolf et al. 2007)
Zwickau (SN)	-	Universität	Steinkohle	600	(Wolf et al. 2007)

Wie die Tabelle zeigt, ist die energetische Nachnutzung von Bergwerken in Sachsen und Tschechien aufgrund der vorhandenen Lagerstätten auf ehemalige Uran-Bergwerke fokussiert. Weltweit weisen dagegen Grubenwassergeothermieanlagen in ehemaligen Kohlebergwerken den größten Anteil auf (Grab et al. 2018). Durch die Schließung der tschechischen Kohlereviere in den nächsten Jahren werden sich dort zukünftig umfassende Möglichkeiten der energetischen Nutzung von Grubenwasser ergeben.

Auch die Ergebnisse des Projektes VODAMIN II zeigen: an vielen Standorten in Sachsen und im nordböhmischen Becken bestehen weitere erhebliche Potenziale zur energetischen Nutzung von Grubenwasser. Ein möglicher Standort ist dabei die Pumpstation MR1 in Mariánské Radčice im Moster Becken. Hier muss stündlich ein Volumenstrom von etwa 100 m³ gepumpt werden. Das Grubenwasser hat dabei stets eine Temperatur von über 25 °C und wird bisher ohne weitere Nutzung in ein Oberflächengewässer abgeführt. Bei einer angenommenen Abkühlung des Grubenwassers von 27,9 °C (Durchschnittstemperatur im Rahmen der Messung in VODAMIN II) auf 17 °C gäbe es ein theoretisches thermisches Potenzial von 11,1 GWh. Dies würde in Abhängigkeit des angenommenen Bedarfs ausreichen, um fast die gesamte Gemeinde Mariánské Radčice ganzjährig mit Wärme zu versorgen (Oppelt et al. 2020c). Die theoretisch verfügbare Spitzenlast liegt bei 1,3 MW (Oppelt et al. 2020c).

Da sich die Pumpstation etwas außerhalb der Ortslage befindet, wäre ein Transport der Wärme erforderlich, was zu geringen Verlusten führen würde. Aus diesem Grund wurde auch die Möglichkeit betrachtet, die Wärme unmittelbar in der Umgebung der Pumpstation zu nutzen, z.B. durch Gewächshäuser. Ein neu gebautes Gewächshaus benötigt, unter aktuellen Standards, eine Spitzenlast an Heizenergie von rund 150 W/m² (BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. 2018; Seidl 2020), das bedeutet mit der verfügbaren Spitzenlast könnten Gewächshäuser mit einer Gesamtfläche von 0,87 ha vollständig regenerativ beheizt werden. Mit der theoretischen Energiemenge von 11,1 GWh wäre es möglich Tomatengewächshäuser mit einer Fläche von 31 ha zu versorgen. Bei Kalthäusern für z.B. Kopfsalat oder Spinat, die weniger Wärme benötigen, wäre eine theoretische Fläche von 258 ha möglich. Spitzenlasten müssten dann über andere Energieträger, z.B. Erdgas oder Solarthermie bereitgestellt werden.

3. Ineffizienter Anlagenbetrieb durch Fouling

Eine zentrale Herausforderung bei Grubenwassergeothermieanlagen besteht in der Bildung von Ablagerungen und Verschmutzungen durch im Grubenwasser mitgeführte Frachten und Bakterien (Fouling). Durch die Installation eines Zwischenkreislaufs werden zwar Verschmutzungen in der Wärmepumpe verhindert, bilden sich aber stattdessen im Wärmeübertrager, wodurch der Druckverlust steigt und die übertragene Wärmemenge reduziert wird. Im Regelfall sind die Wärmeübertrager deshalb als Plattenwärmeübertrager ausgeführt, und können so geöffnet und gereinigt werden, was aber stets mit entsprechendem Wartungsaufwand und –kosten verbunden ist. Erschwerend kommt hinzu, dass die Wärmeübertrager oft untertage installiert sind, was Aufwand und Kosten noch weiter erhöht. In Abbildung 3 ist der Verlauf des Druckverlustes über den Wärmeübertrager für einen Zeitraum von 4 Monaten dargestellt. Innerhalb dieses Zeitraums musste dieser zweimal chemisch und mechanisch gereinigt werden. Bei einer einzelnen mittelgroßen Anlage, z. B. dem Kreiskrankenhaus Freiberg können dabei durch Fouling jährlich Verluste von bis zu 250.000 € entstehen (Oppelt et al. 2021b).

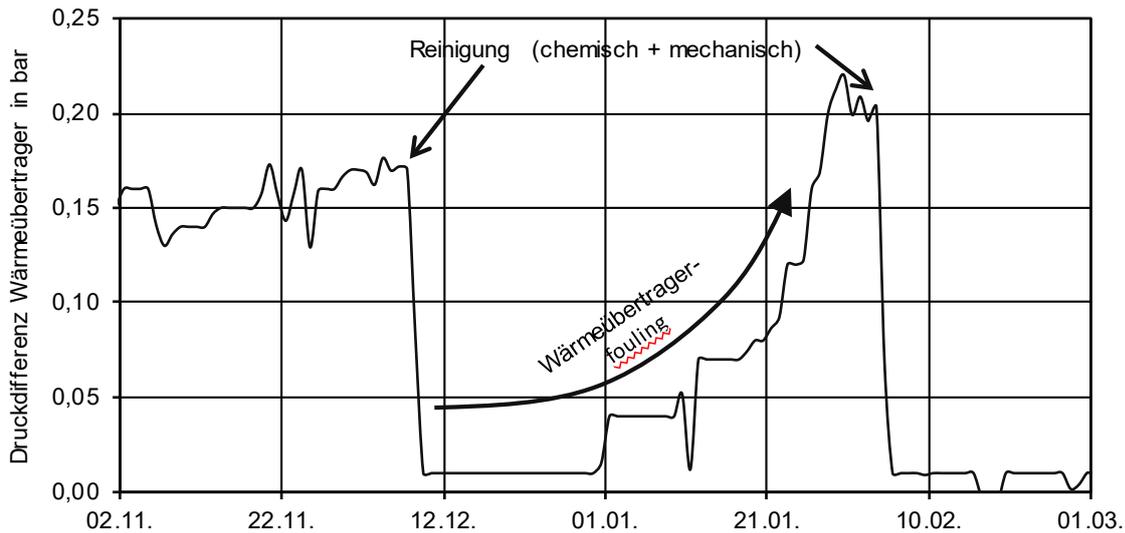


Abbildung 3: Druckverlust über den Wärmeübertrager an der Grubenwassergeothermieanlage Reiche Zeche (Betrachtungszeitraum 02.11.2015-01.03.2016).

Die Wärmeübertragerplatten können zwar nach einer Demontage gereinigt werden, was temporär zu einer Verbesserung führt, der Ursprungszustand wird jedoch nicht wieder erreicht. Dies zeigt der Vergleich einer unbenutzten, verschmutzten und nach einer Verschmutzung gereinigten Wärmeübertragerplatte in Abbildung 4.

43



Abbildung 4: Gegenüberstellung einer unbenutzten, verschmutzten und gereinigten Wärmeübertragerplatte.

Durch die Problematik des Foulings wird die Anlageneffektivität wesentlich beeinflusst. Es kann nicht ganzjährig die geplante Energiemenge aus dem Grubenwasser entnommen werden, zudem entstehen durch Reinigungs- und Wartungsarbeiten Stillstandszeiten. Hier müssen Maßnahmen entwickelt und erprobt werden um das Fouling zu reduzieren oder zumindest eine leichtere und vollständige Reinigung zu ermöglichen. Die Ergebnisse des Projektes VODAMIN II zeigten, dass sich die Ablagerungen auf den Platten standortabhängig stark unterscheiden. Das heißt mögliche Maßnahmen müssen standortspezifisch getestet werden. Um eine Unabhängigkeit von Anlagenbetreibern und Standorten mit realen Anlagen zu ermöglichen, wurde ein mobiler Wärmepumpenversuchsstand entwickelt (siehe Abbildung 5).

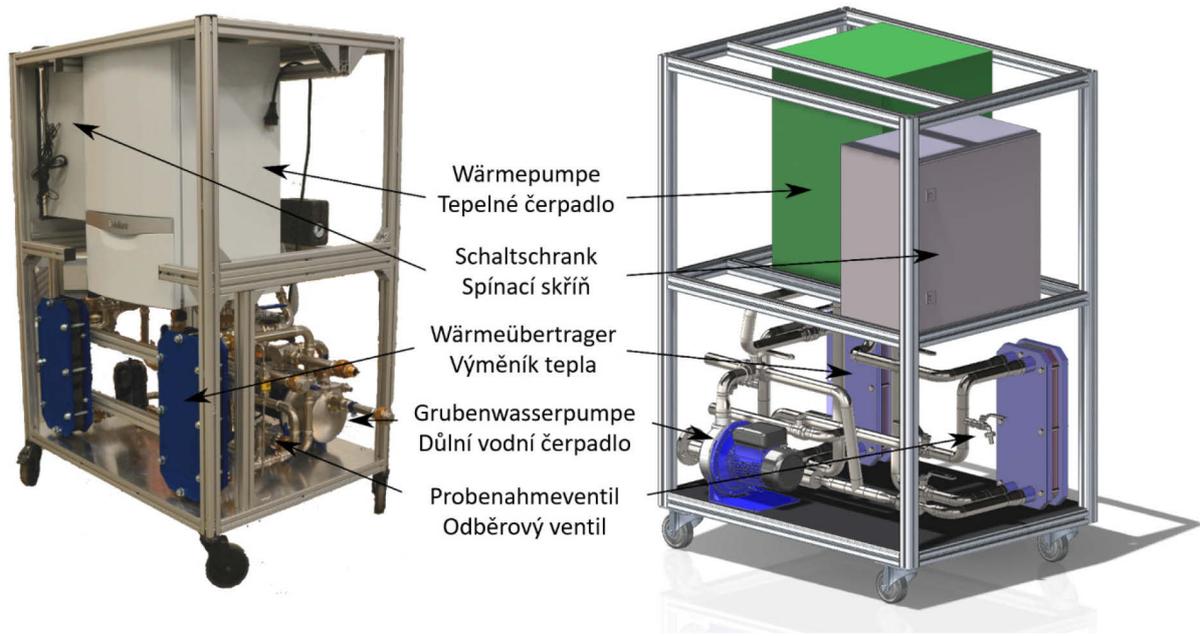


Abbildung 5: Wärmepumpenversuchsstand zur Durchführung von Forschungen zur Reduktion von Fouling in Wärmeübertragern bei der energetischen Grubenwassernutzung (links: Foto, rechts: 3D-Modell).

44

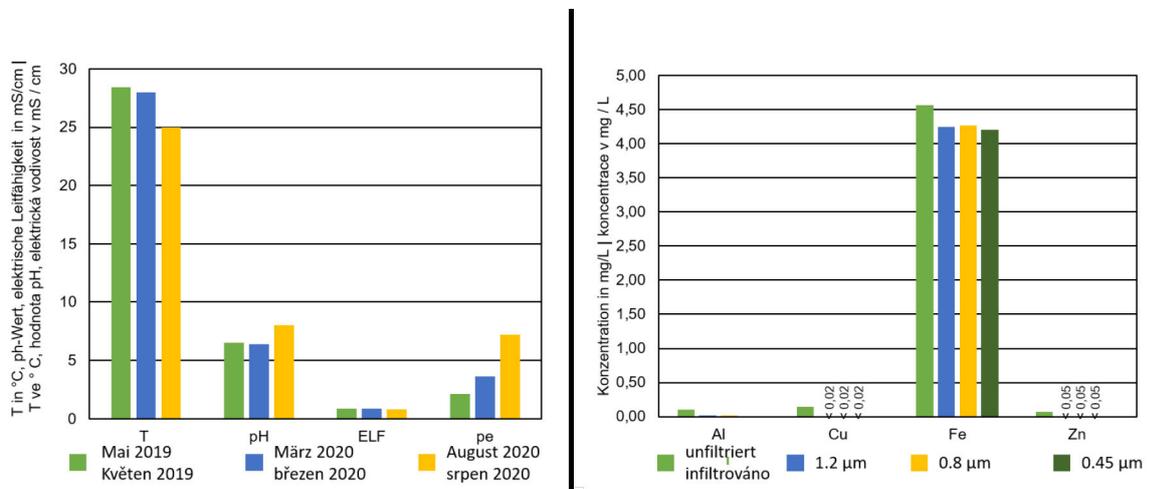
Dieser Versuchsstand stellt eine Grubenwassergeothermieanlage im Labormaßstab dar. Die Wärmeübertragerplatten können flexibel getauscht und auf Ablagerungen untersucht werden. Außerdem wurde der Versuchsstand so konzipiert, dass sowohl der Heiz- als auch der Kühlbetrieb untersucht werden kann. Dafür wird der Grubenwasservolumenstrom geteilt und dann in einem Wärmeübertrager abgekühlt (Heizbetrieb) und in dem anderen Wärmeübertrager erwärmt (Kühlbetrieb). Anschließend werden die Volumenströme wieder vereint, wodurch sich die Grubenwassertemperatur im Vergleich zum Eintritt in den Versuchsstand nur geringfügig erwärmt (bedingt durch elektrischer Aufwand Wärmepumpe). Diese Randbedingung muss aus Umweltschutzgründen an einzelnen Standorten sichergestellt werden.

Eine erste Versuchsreihe wurde im Sommer 2020 an der Pumpstation MR1 in Mariánské Radčice durchgeführt. Wie oben beschrieben, wurde an diesem Standort ein hohes energetisches Potenzial identifiziert, weshalb (Vor-)Untersuchungen für einen effizienten Anlagenbetrieb von großem Interesse sind. Zur Charakterisierung des Standortes wurden in den Projekten VODAMIN II und GeoMAP insgesamt dreimal Wasserproben entnommen. Die Zusammensetzungen sind dabei vergleichbar, nur die Milieuwerte weisen geringe Unterschiede auf. Die Wassertemperatur schwankt zwischen 25 und 28 °C. Die pH-Werte liegen mit 6,5 bis 8,0 im neutralen Bereich. Das Grubenwasser weist mit 0,8 mS/cm eine mäßige Mineralisation auf, was durch die Bestimmung der Element- und Anionenkonzentrationen (Tabelle 2) bestätigt wird. Neben den zu erwartenden (Erd-)Alkali-Ionen sowie Cl- und TIC und Fe und Si, sind die anderen Bestandteile nur im µg/L-Bereich zu finden bzw. unterhalb der Nachweisgrenze.

Tabelle 2: Konzentrationen von ausgewählten Kat- und Anionen im Grubenwasser an MR1.

	Sulfat mg/L	Chlorid mg/L	TIC mg/L	Ca mg/L	Fe mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	Si mg/L
MR1 unfiltriert	< 5	26,3	171	32,4	4,57	12,1	12,9	92,7	14,9

Von der Probenahmestelle wurden verschieden filtrierte Proben abgefüllt, um ableiten zu können, ob im Wasser eventuell kolloidalgebundene Elemente/ Schwermetalle vorliegen, die eine Gefährdung hinsichtlich von Ablagerungen in einer Grubenwasseranlage darstellen könnten. Aluminium, Kupfer, geringe Mengen von Eisen sowie Zink könnten so ein Potential liefern (siehe auch Abbildung 6 (rechts)). Auch wenn es sich nur um geringe Differenzen handelt, kann bei großen Wassermengen daraus eine größere und relevante Masse an Ablagerungen resultieren. Auch der, im Vergleich zu den anderen Projektstandorten in VODAMIN II, hohe TIC könnte eine Rolle beim Foulingprozess spielen, da bspw. Carbonate ausfallen.



45

Abbildung 6: Milieuparameter (links) sowie Elementgehalte verschiedener Filterstufen (rechts) der Pumpstation MR1 (ELF=elektrische Leitfähigkeit) (Oppelt et al. 2020c).

Erste Recherchen zu möglichen Materialien und Oberflächen die Fouling reduzieren könnten, wurden ebenfalls im Projekt VODAMIN II durchgeführt, aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden acht verschiedene Materialien, bzw. Beschichtungen für die erste Versuchsreihe an der Pumpstation MR1 ausgewählt. Diese sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Übersicht der während der ersten Versuchsreihe im Versuchsstand eingesetzten Oberflächen und Materialien.

Materialnummer	Kennzeichnung
1.4401	X5CrNiMo17-12-2
2.4819	NiMo16Cr15W
2.4675	NiCr23Mo16Cu
1.4301	X5CrNi18-10
3.7025	JIS H4600 TR270C(Titan)
1.4539	X1NiCrMoCu25-20-5
1.4547	X1CrNiMoCuN20-18-7
1.4401	X5CrNiMo17-12-2 (Nano-Ag-Beschichtung)

Um einen möglichen Effekt der Materialien und Oberflächen auf das Fouling zu quantifizieren wurde eine Methode der optischen Bildauswertung erarbeitet. Die Methodik ist vereinfacht in Abbildung 7 dargestellt. Zunächst wird das Foto der einzelnen Platten in Graustufen eingefärbt und anschließend alle Bereiche die unterhalb eines Graustufen-Grenzwertes liegen rot eingefärbt, dies umfasst damit alle Bereiche der Platte die nicht verschmutzt sind. Als weiterer Kennwert wird die Stärke der Verschmutzung betrachtet, dabei wird die Platte in Abhängigkeit der Dicke der Ablagerungen (dunklere Graustufe=dickere Ablagerung) eingefärbt. Die Farbskala reicht von gelb (dünne Ablagerungen) über rot bis zu schwarz (dicke Ablagerungen).

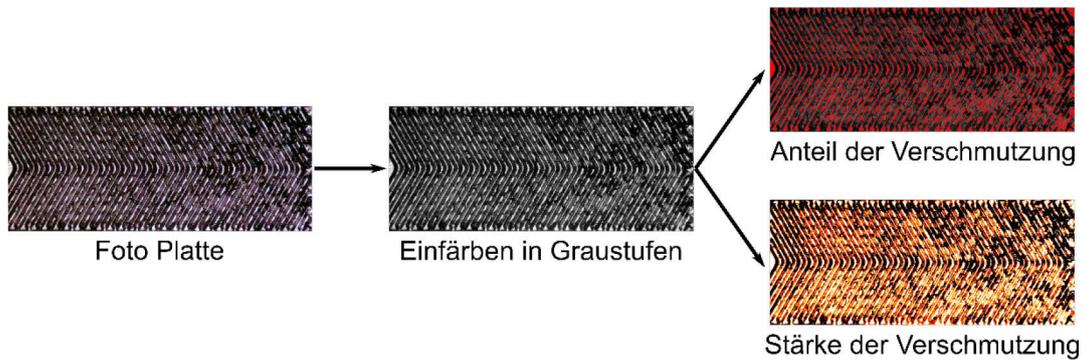


Abbildung 7: Methodik zur Auswertung der Fotos der Versuche mit dem Wärmepumpenversuchsstand.

Der Grenzwert für den Verschmutzungsgrad wurde auf Basis einer neuen unverschmutzten Platte ausgelegt. Das Verhältnis zwischen verschmutzter (grau/schwarz) und unverschmutzter (rot) Fläche stellt den Verschmutzungsgrad dar, der dann einen Vergleich der Materialien und Oberflächen ermöglicht. Je niedriger dieser Wert umso besser ist die Anti-Fouling-Wirkung der Oberfläche.

Die Ergebnisse des Verschmutzungsgrades für den Heizbetrieb sind in Abbildung 8 dargestellt. Die besten Ergebnisse liefern dabei die folgenden Oberflächen und Materialien:

- NiMo16Cr15W
- NiCr23Mo16Cu
- JISH4600TR270C(Titan)
- Silber-Nano-Beschichtung

46

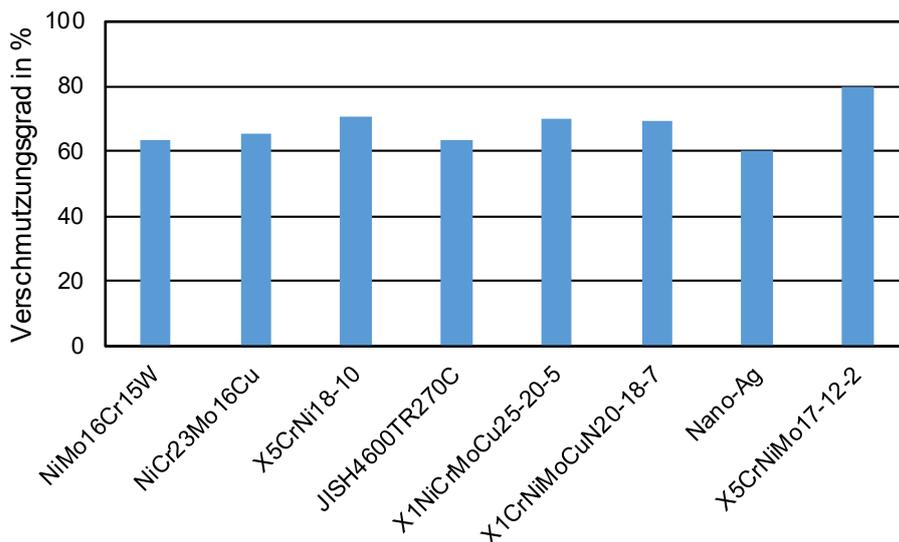


Abbildung 8: Vergleich des Verschmutzungsgrades für die im Rahmen der ersten Testreihe an MR1 eingesetzten Materialien und Oberflächen (Heizbetrieb).

Der Vergleich zu den Ergebnissen zur Untersuchung des Kühlbetriebes (Abbildung 9) zeigt, dass dort bei fast allen Oberflächen eine stärkere Verschmutzung auftritt als beim Heizen. Dies zeigt auch der mittlere Verschmutzungsgrad über alle eingesetzte Materialien und Oberflächen: beim Kühlen liegt er bei knapp 75 %, beim Heizen bei etwa 68 %. Jedoch erreichen die gleichen vier Oberflächen und Materialien wie beim Heizbetrieb die niedrigsten Verschmutzungsgrade.

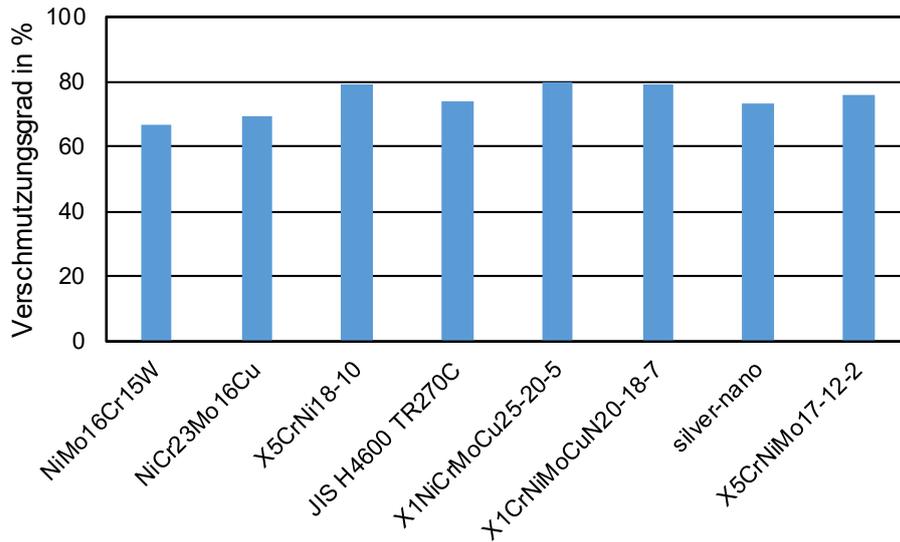


Abbildung 9: Vergleich des Verschmutzungsgrades für die im Rahmen der ersten Testreihe an MR1 eingesetzten Materialien und Oberflächen (Kühlbetrieb).

Ein Vergleich der Stärke der Verschmutzung zwischen NiMo16Cr15W und der Silber-Nano-Beschichtung zeigt, dass bei NiMo16Cr15W die Verschmutzung nicht gleichmäßig auf der Platte verteilt ist. Der niedrige Verschmutzungsgrad resultiert hier im Wesentlichen aus der nahezu unverschmutzten Fläche unten rechts (Abbildung 10a). Bei der Silber-Nano-Beschichtung ist die Verschmutzung gleichmäßiger verteilt und insgesamt weniger stark ausgeprägt, was einen positiven Einfluss auf die übertragbare Wärmemenge haben könnte. Diese Unterschiede müssen in weiteren Versuchen detaillierter untersucht werden.

47

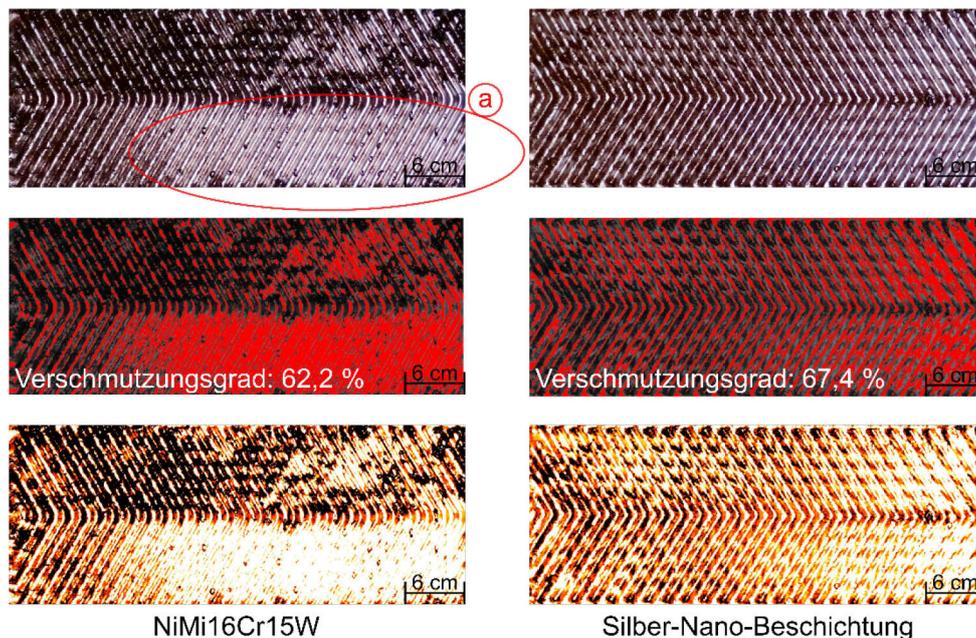


Abbildung 10: Gegenüberstellung der Verschmutzungen auf den Wärmeübertragerplatten (Verschmutzungsgrad der konkreten Platte) aus NiMo16Cr15W und mit Silber-Nano-Beschichtung (Kühlbetrieb).

4. Zusammenfassung und Ausblick

Grubenwassergeothermie stellt eine innovative und regenerative Alternative für die Bereitstellung von Heiz- und Kühlenergie dar. Weltweit existieren aktuell 42 Anlagen und an weiteren Standorten wurden konkrete Potenzialstudien erstellt und teilweise mit dem Bau begonnen. Dennoch bestehen weiter erhebliche ungenutzte Potenziale, z.B. im Erzgebirge auf sächsischer und tschechischer Seite. So werden an der Pumpstation MR1 in der Nähe von Mariánské Radčice (CZ) stündlich 100 m³ warmes Grubenwasser gepumpt, die ausreichen würden um die naheliegende Gemeinde ganzjährig zu einem großen Anteil mit Wärme zu versorgen. Alternativ könnten theoretisch auch Gewächshäuser (z.B. für Kopfsalat und Spinat) mit einer Fläche von bis zu 258 ha mit Wärme versorgt werden. Doch bei der energetischen Nutzung von Grubenwasser besteht u.a. auch ein Problem durch die Bildung von Fouling im Wärmeübertrager. Durch Ablagerungen, die sich aufgrund von im Grubenwasser mitgeführten Frachten auf den Wärmeübertragerplatten bilden, wird die übertragene Wärmemenge erheblich reduziert und der Druckverlust steigt. Dadurch leidet die Effizienz der Anlage und es sind regelmäßige Reinigungen notwendig, was Stillstandszeiten verursacht. Um Möglichkeiten zur Reduktion dieses Foulings zu untersuchen, wurden In-situ-Versuche mit verschiedenen Materialien und Oberflächen in einem Versuchsstand (Grubenwassergeothermieanlage im Labormaßstab) durchgeführt. Der Versuchsstand wurde dabei an der Pumpstation MR1 installiert. Es zeigte sich, dass eine Erwärmung des Grubenwassers (Kühlbetrieb, Verschmutzungsgrad=75 %) an diesem Standort zu etwas stärkeren Verschmutzungen führt als beim Abkühlen (Heizbetrieb, Verschmutzungsgrad=68 %). Unabhängig vom Betriebsmodus wurden die besten Ergebnisse an zwei Edelstählen, Titan und einer Silber-Nano-Beschichtung erzielt. Zukünftige Untersuchungen an weiteren Standorten und mit weiteren Materialien und Beschichtungen werden zeigen in wie weit sich diese Ergebnisse bestätigen.



Literaturverzeichnis

Batchelor T, Curtis R, Ledingham P, Law R (2015) Country Update for the United Kingdom: Paper-ID: 01076. In: International Geothermal Association IGA (ed) Proc. of World Geothermal Congress 2015

Baukonzept Dresden GmbH Projekt: Geothermische Grubenwassernutzung in Freiberg

BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2018), Erdgas in Gärtnereien - Optimaler Energieeinsatz im Gewächshaus, Berlin, online: https://www.gewerbegas.info/fileadmin/Public/PDF_Sonstiges/Erdgas_Gewerbe/Erdgas_Gaertnereien.pdf, abgerufen am 27.04.2021

Debes C (2012) Minewater geothermal energy in Europe - Pilots in ReSource and Remining LOWEX. In: Debes C (ed) 2. Workshop Minewater - Renewable Energy: ReSource - Turning Problems into Potentials, Eisleben

Grab T, Storch T, Gross U, Kleutges J, Grötzsch S (2010) Geothermieanlage zur Grubenwassernutzung für Heizung (200 - max. 670 kW) und Kühlung (155 - max. 500 kW). In: GtV - Bundesverband Geothermie e.V. (ed) Der Geothermiekongress 2010

Grab T, Storch T, Groß U (2018) Energetische Nutzung von Grubenwasser aus gefluteten Bergwerken. In: Bauer M, Freedon W, Jacobi H, Neu T (eds) Handbuch Oberflächennahe Geothermie. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 523–586

Guo P, He M, Zheng L, Zhang N (2017) A geothermal recycling system for cooling and heating in deep mines. Applied Thermal Engineering 116:833–839. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.116>

Hall A, Scott JA, Shang H (2011) Geothermal energy recovery from underground mines. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15:916–924. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.007>

Jenk U (2020) Standortvortrag Königstein. Grubenwasser als regenerative Energiequelle in der gesamten Bergbauregion Erzgebirge/Krušnohoří 4. Workshop GeoMAP, Freiberg

Johnson Controls Fallstudie - Hohe Heizkosten sind heilbar: Grubenwasser dient als Energiequelle für zweistufige Ammoniak-Wärmepumpe im Kreiskrankenhaus Freiberg. http://www.johnsoncontrols.com/de_de-/media/jci/be/germany/solutions-by-industry/files/bts_case_study_hospital_freiberg_de.pdf. Accessed 10 September 2018

Kissing H (2009) Thermische Nutzung des Grubenwassers der Schiefergruben der MAGOG GmbH & Co KG in Schmallenberg/ Ortsteil Bad Fredeburg, Bochum

Korb MC (2012) Minepool Geothermal in Pennsylvania. In: Department of Environmental Protection Pennsylvania (ed) 14th Conference on Abandoned Mine Reclamation: New Frontiers in Reclamation.

Lagerpusch, K. (04.02.2010) Stellenwert Bergbau – Geothermie in Sachsen, Bad Schlema

Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2012) Abschlussbericht: Förderprogramm „Immissions- und Klimaschutz einschließlich der Nutzung erneuerbarer Energien“: Ergebnisse im Zeitraum 2000-2008

Mineralienatlas - Fossilienatlas. (2015) <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Deutschland/Sachsen/Erzgebirgskreis/Marienberg%2C%20Revier/Marienberg/Pobershau>

Myslík V, Frydrych MSV (2005) Geothermal Energy Potential of Czech Republic. In: Proceedings World Geothermal Congress

Oppelt L, Pose S, Grab T, Fieback T (2020a) Geothermische Nutzung von Grubenwasser zur regenerativen Energieversorgung. Geothermische Energie:25–27

Oppelt L, Pose S, Grab T, Fieback T (2020b) Regenerative Energiegewinnung aus Grubenwasser. Acamonta 27:47–51

Oppelt L, Kaplin K, Grimmer M, Grab T, Hoth N, Fieback T (2020c) Grubenwassergeothermie als regenerative Energiequelle - Status quo, Risiken und Potenziale. Abschlussworkshop VODAMIN II, Freiberg

Oppelt L, Grab T, Pose S, Storch T, Fieback T (2021a) Mine water geothermal energy as a regenerative energy source - status quo and results from five years of monitoring. Oil Gas EUROPEAN MAGAZINE 47:15–19. <https://doi.org/10.19225/2103054>

Oppelt L, Grab T, Storch T, Fieback T (2021b) Versuche zur Reduzierung des Fouling im Wärmeübertrager bei der energetischen Nutzung von Grubenwasser. Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppen Fluidverfahrenstechnik und Wärme- und Stoffübertragung

Ramos EP, Breede K, Falcone G (2015) Geothermal heat recovery from abandoned mines: a systematic review of projects implemented worldwide and a methodology for screening new projects. Environmental Earth Sciences 73:6783–6795. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4285-y>

Raube, J. (2012) Wärmenutzung aus Grubenwasser in Bochum-Werne

Röder U (2012) Geothermie im Fokus der Nachnutzung von Bergbaufolgelandschaften am Beispiel des Zwickauer Steinkohlenreviers: Geothermische Nutzung von Flutungswässern

Röder U (2015) Geothermische Nutzung von Flutungswässern aus den Abbauhohlräumen des Zwickauer Steinkohlenreviers: Stand und Zwischenergebnisse des Projektes

Seidl M (2020) Zukunft und Entwicklung des Bergbaubereiches Brüx - Budoucnost a rozvoj hornické oblasti Most. Freiburger Forschungshefte:49–61

Staatsbetrieb Sächsisches Immobilien- und Baumanagement (2013) Medieninformation: Technische Universität Bergakademie Freiberg Geothermische Anlage zur Nutzung des Energiepotenzials des Rothschönberger Stolln geht in Betrieb. 63/2013

Sunbeam GmbH (2013) Forschung für Energieeffizienz: Projekt: Geothermische Nutzung von Grubenwässern zur Nahwärmeversorgung. <http://www.eneff-stadt.info/de/pdf/waerme-und-kaeltenetze/projekt/details/geothermische-nutzung-von-grubenwaessern-zur-nahwaermeversorgung/>. Accessed 21 January 2013

Ulbricht S (2013) Wieder Pionierrolle für Freiberg: Projekt "Energetische Optimierung im Kreiskrankenhaus Freiberg" nutzt Warmwasser des Supertunnels. Wochenspiegel - regional:3

Vater A (2007) Geothermie - Nutzung von Wärme aus der Erde, Bad Schlema

Vater A (2012) Geothermische Nutzung von Grubenwasser aus der Grube Schlema - Alberoda

Wieber G, Ofner C (2008) Geothermische Potenziale gefluteter Bergwerke. bbr Jahresmagazin

Wismut GmbH (2012) Geothermie in Bad Schlema: Projekt „Schillerschule“

Wolf P, Lagerpusch KH, Hofmann K (2007) Zur geothermischen Nutzung von Grubenwässern in Sachsen. Sächsischer Geothermietag Spezial: Geothermie und Bergbau, Marienberg

Die Ausnutzung ausgewählter Methoden des geotechnischen Monitorings unter Feldbedingungen

J. Mališ, M. Klempa, J. Šancer, V. Zubíček

VŠB – Technische Universität Ostrava, Tschechische Republik

Zusammenfassung

Ein Phänomen der letzten Jahre ist in der Tschechischen Republik das schrittweise Einschränken des Untertage- und auch des Übertageabbaus von Kohle. Bestandteil der Sanierung der Abbaufolgen ist eine Umwandlung der Postbergbaulandschaft in eine Form, in der sie wieder für das Leben, die Landwirtschaft, das Wohnen und die Industrie nutzbar gemacht wird. Diese Transformation ist ein durch viele Faktoren beeinflusster langfristiger Prozess. Wichtig ist dabei die Festlegung vieler Umweltschutzparameter, welche bei der Bestimmung des Ausmaßes der Landschaftsstörung helfen. Zu diesen Parametern gehören die geologischen Bedingungen des Gebiets - die Beeinträchtigung des Oberbodens und der obersten Gesteinsschichten, die hydrogeologischen Bedingungen - die Grundwasserströmungen, die Geochemie der Böden und Gesteine - oft verbunden mit deren Kontaminierung, Änderungen des Landschaftsreliefs - Hangbewegungen anthropogener Aufschüttungen oder das Absenken der Landschaft nach dem Bergbau und viele andere Erscheinungen.

51

1. Einleitung

Im Rahmen der Sanierungs- und Rekultivierungsarbeiten sind unter anderem Kenntnisse aus den Bereichen Erkundungs- und Bohrarbeiten erforderlich, welche eingesetzt werden, um die Gesteinsumgebung zu charakterisieren und helfen, außerordentlichen Ereignissen wie z.B. Bodenrutschungen, Absenkungen, Grundwasseraustritte, Grundwasserableitungen, Entwässerungen u.a. zu verhindern.

Ziel dieses Berichtes ist es, die Basismethoden geotechnischer Forschungsarbeiten vorzustellen, welche beim Monitoring der Postbergbaulandschaft in Nordböhmen angewendet werden.

2. Geotechnische Arbeiten zur Überwachung der Hangstabilität

Gegenwärtig dienen Bohrungen auch als sehr wichtiges Mittel zur Platzierung von Messgeräten zur Überwachung und Auswertung von Deformationen in der Gesteinsumgebung. Selbstverständlich werden an diese Bohrungen spezielle Anforderungen gestellt. Nachfolgend wird ein Methodenkomplex vorgestellt, der die Bohrlochumgebung zur Messung von Hangdeformationen und -bewegungen nutzt.

- Präzisionsinklinometrie,
- Porendruckmessungen,
- Extensometer (für horizontale und auch vertikale Bohrungen),
- spröde Bandleiter,
- geoakustische Messungen in den Bohrungen,
- Messung der Längsverschiebung an Hängen.

Die zur Überwachung der Stabilität von Felswänden und Hängen verwendeten Bohrlöcher werden mit üblicher Spindel- und Lafetten-Rotationskernbohrtechnik, einschließlich der Seilkernbohrtechnik, gebohrt.



An die Bohrung werden hinsichtlich der inklinometrischen Messung keine außerordentlichen Ansprüche gestellt. Es handelt sich um Bohrungen mit 112 mm bzw. 93 mm Durchmesser. Bei diesen Bohrungen muss vor allem eine gute Durchgängigkeit, d.h. Geradlinigkeit für das nachfolgende Einführen der Polyethylenrohre (PE) gewährleistet werden.

Bei inklinometrischen Bohrungen wird das Hauptaugenmerk auf das korrekte Einbringen der Auskleidung der Bohrung gelegt. Insbesondere müssen folgende Dinge sichergestellt werden:

- perfektes Einpassen der Nuten der einzelnen PE-Rohre (dabei muss beachtet werden, dass die gedachte Ebene zwischen zwei gegenüberliegenden Nuten identisch mit der vorausgesetzten Hangbewegung ist);
- bei vertikalen Bohrungen muss eine maximale Vertikalität der Verrohrung sichergestellt werden (die Interpretation der Ergebnisse in perfekt vertikalen Bohrungen ist im Gegensatz zu geneigten Bohrungen nicht fehlerbehaftet);
- innere Verschmutzung der PE-Rohre verhindern;
- auf Wasserdichtheit der Verbindungen der PE-Rohre achten.

Die letzte Stufe der inklinometrischen Bohrung ist ein ausgerüstetes Bohrloch mit modifiziertem Bohrlochkopf, bereit für die eigentliche Messung.

- Bei den übrigen, in den Bohrungen durchgeführten Überwachungsmethoden (Messen des Porendrucks, Extensometrie u.a.) sind die grundlegenden Anforderungen an die Bohrung: gute Durchgängigkeit und Geradlinigkeit,
- passender Bohrdurchmesser, sodass eine gute Handhabung der Werkzeuge (Bohrgestänge oder Injektionsgestänge) beim Einsetzen der Geräte in die Bohrung, bei der Zementierung oder Umschüttung möglich ist.

52

Die Messungen erfolgen in Bohrungen, die von der Oberfläche oder in Bergwerken, z.B. in Erkundungsstollen gebohrt werden. Die Methoden für die Überwachung von Hangdeformationen und -bewegungen sind auf Abbildung 1 dargestellt

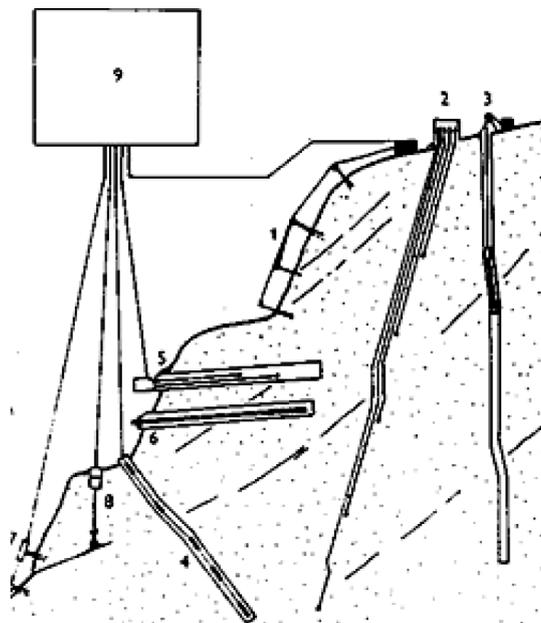


Abbildung 1: Methoden zur Überwachung von Hangdeformationen und -bewegungen 1 - Oberflächenextensometer, 2 - Drahtextensometer zur Lokalisierung von Gleitzonen, 3 - Präzisionsinklinometrie, 4 - Kettendeflektometer zur Messung der Quersetzung, 5 - Mehrfachstangenextensometer mit mechanischer Aufzeichnung, 6 - Deformeter (Bewegungsmessung auf Gleitflächen), 7 - Dynamometer (Messen der Ankervorspannung), 8 - Schlauchwasserwaage zur Messung horizontaler Bewegungen, 9 – Auswertungseinheit.

2.1. Inklinometrie

Hierbei handelt es sich um die Basismethode für Kontrollüberwachungen und Messungen horizontaler Bewegungen und Deformationen unter der Oberfläche. Typischerweise kommt sie bei der Bestimmung von Gleitflächen, der Überwachung der Bewegungsrichtung im Staudammfuß, der Überwachung von Stützmauern usw. zur Anwendung. Das Prinzip der Methode ist auf Abbildung 2 dargestellt.

Die Bohrung wird mit Kunststoff-Futterrohren mit genauen Führungsnuten ausgekleidet. Anschließend wird diese Verrohrung zementiert. Das Futterrohr muss bis in eine Tiefe reichen, in dem sich keine Umformprozesse mehr zeigen, dies bedeutet, dass die Bohrungsbasis bis in die stabile Umgebung eingreifen muss. Diese Bedingung garantiert, dass die Messergebnisse aus dem unteren Abschnitt der Bohrung während der periodischen Messungen stabil sind. Nach Einlassen der inklinometrischen Sonde wird die Nullmessung, also die Referenzmessung, durchgeführt. Es wird in der Regel in Schritten (Abständen), die im Allgemeinen der Länge der Sonde entsprechen, gemessen. In festgelegten Zeitintervallen, gegeben durch die Geschwindigkeit der Hangbewegung oder deren wahrscheinlichen Entwicklung, werden die Messungen in den gleichen Tiefenniveaus periodisch wiederholt. Mithilfe zweier Neigungssensoren wird die Abweichung von der Senkrechten in zwei zueinander senkrechten Ebenen A und B gemessen. Es wird in zwei Positionen gemessen (Position 0° und Sondenposition um 180° gedreht). Dadurch wird ein eventueller Ablesefehler ausgeschlossen. Die Neigungsdifferenzen der Sonde zur Senkrechten in den entsprechenden Tiefen repräsentieren die Neigungsänderung des Winkels θ , die direkt in eine lineare Verschiebung $\Delta = L \cdot \sin \theta$ überführt wird. Eine progressive Entwicklung dieser Änderungen indiziert die Gleitfläche der Bewegungszone. Wenn die Neigungsänderungen (resp. Verschiebungen) in den einzelnen Tiefenniveaus zur Nullmessung eingetragen werden, erhalten wir die sog. „Deltakurve“ Δ . Diese Kurve drückt die relative Verschiebung der Bohrungsschneise im Tiefenniveau aus. Wenn in den einzelnen Tiefenniveaus die Summe der Neigungsänderungen vom tiefsten Niveau bis zur Oberfläche eingetragen werden, erhalten wir die Kurve „Summe Delta“ $\Sigma \Delta$, welche die horizontale Deformation angibt. Inklinometer für das Messen der Hangbewegungen sind um ein Mehrfaches genauer als normale Inklinometer für Tiefenmessungen (messen in Größenordnungen von Winkelsekunden). Die meisten Geräte arbeiten auf Gravitationsprinzip, d.h. der Massenbewegung bei Änderung der Ruheposition. Azimutmessungen werden nicht vorgenommen, da die konstante Sondenposition durch eine Nut im Futterrohr gesichert ist.

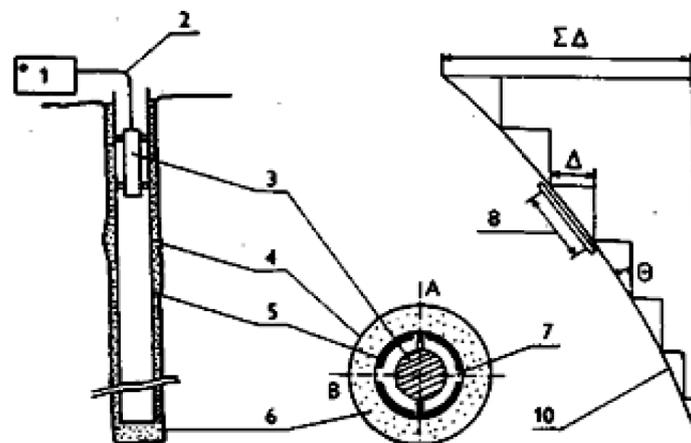


Abbildung 2: Prinzip der genauen Inklinometrie 1 - Auswertungsgerät, 2 - Kabel, 3 - Sonde, 4 - Bohrung, 5 - Futterrohr, 6 - Injektionsmischung, 7 - Führungsnut, 8 - Messintervall, 9 - Referenzprofil, 10 - gemessenes Profil.

2.2. Extensometrie

Drahtextensometer werden zur Bestimmung der Größe von Deformationszonen und Störungszonen im Hangkörper, in unterirdischen Bauten, in Aufschüttungen usw. benutzt.

Der Korpus eines Mehrfachextensometers (Abbildung 3) besteht aus: Leitanker (Fixierung des Ankersystems vor der Zementierung);

- Basisanker, befestigt am Rohr, das den Druck der Einführungsstange übernimmt;
- Normalankern (Anzahl nach Messbedarf). Sie befinden sich zwischen dem Basisanker und dem Messkopf. Sie sind für niedrigere Ankerstufen durchgängig. Jedes Anker-niveau ist mit dem Kopf des Extensometers verbunden.

Der eigentliche Messkopf besteht aus der zugehörigen Anzahl an inneren Umlenkrollen, welche mit den Ankerebenen verbundenen sind, den äußeren Umlenkrollen, über welche die einzelnen Drähte mit Gewicht gespannt werden und aus Messmitteln und Aufnehmern der Verschiebungsgröße.

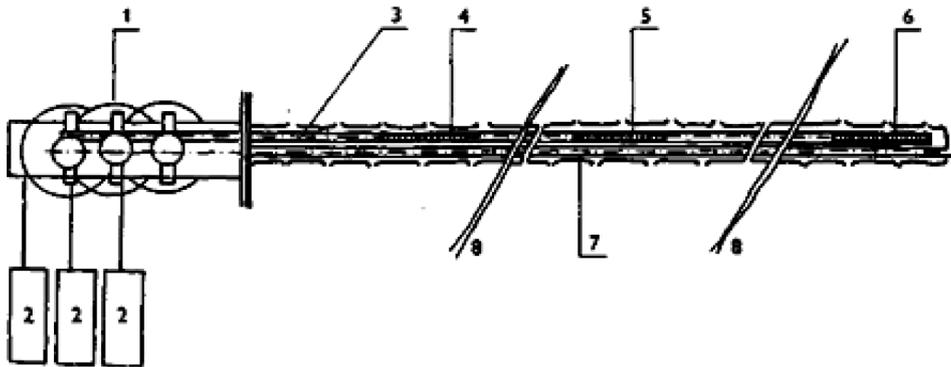


Abbildung 3: Schema eines Mehrfachextensometers. 1 - Kopf mit Rollen, 2 - Gewichte, 3 - Verbindungsdraht, 4 - Normalanker, 5 - Basisanker, 6 - Leitanker, 7 - Injektionsrohr, 8 - Störungszone.

Bei einem Stangenextensometer sind die Drähte durch einen Glasfaserstab ersetzt. Diese Technik schließt die Probleme der Korrosion bei einem Drahtextensometer aus. Ebenfalls muss auch der Anker nicht vorgespannt werden, da die Verschiebung der Stange des Extensometers direkt mit mechanischem Messmittel gemessen wird. Die gesamte Mechanik des Stangenextensometers ist eine Einheit und erlaubt eine sehr einfache Handhabung, insbesondere ist beim Einsetzen in die Bohrung kein Bohrwerkzeug erforderlich. Der Stangenextensometer ist in Abbildung 4 dargestellt.

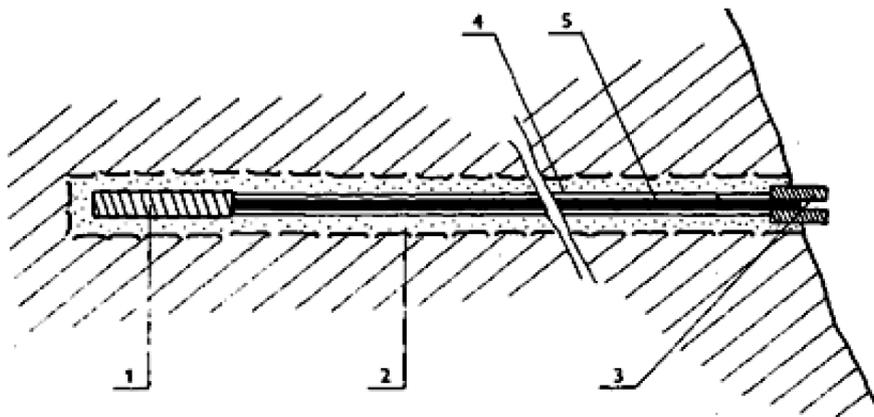


Abbildung 4: Stangenextensometer: 1 - Anker, 2 - Zementierung, 3 - Kopf (mechanisches Ablesen der Stangenbewegung), 4 - Kunststoffdeckkabel, 5 - Gestänge.

2.3. Dilatometrische Prüfungen

Zweck der Prüfung mit elastischem Dilatometer ist die Messung der Ausdehnung (Umformbarkeit) von Felsgesteinen (dilatometrische Prüfung von Felsgesteinen, RDT) und Böden (dilatometrische Bodenprüfung, SDT) auf Grundlage der radialen Ausdehnung eines Bohrungsabschnitts unter gleichmäßiger radialer Belastung durch eine zylindrische dilatometrische Sonde.

Die Prüfung besteht aus dem Einbringen der Sonde in die Bohrung und dem Messen der radialen Ausdehnung des Bohrlochs in gewählten Zeitintervallen oder auf semikontinuierliche Weise bei Applikation eines bekannten Radialdrucks in der Sonde. Die Dilatometersonde ist mit einer nachgiebigen Membrane ausgestattet. Mit dieser wird durch Öl oder Gas eine Druckbelastung von der Sonde auf die Bohrungswand übertragen. Die Deformationen der Bohrungswand werden mit drei elektrischen Sensoren aufgenommen, die in verschiedenen Höhenniveaus, 75 mm voneinander entfernt und um jeweils 120° zueinander verdreht angeordnet sind. Die Bahnänderungen jedes Sensors, der vom Mantel der Belastungssonde mitgenommen wird, werden separat abgelesen. Die Ablesegenauigkeit beträgt 0,025 mm. Mit einem Dilatometer des Typs Socossor kann z.B. ein Druck bis 30 MPa ausgeübt werden, der Tiefenbereich der Sonde beträgt 50 m.

Aus den ermittelten Werten der Deformation und der Belastung wird ein Arbeitsdiagramm erstellt. Aus dessen Belastungs-, resp. Entlastungszweigen werden die Umformungsmodule und die Elastizitätsmodule in den einzelnen Richtungen bestimmt.

In spröden oder in lehmigen Felsgesteinen und in zerkleinerten und stark zerklüfteten Formationen, wo der Kernaustag für das Erhalten repräsentativer Proben für Laborprüfungen niedrig oder unannehmbar ist, kann ein zylinderförmiges Dilatometer für die schnelle Erkundung und für den Vergleich der relativen Umformbarkeit der einzelnen Gesteinsschichten benutzt werden.

Beispiel einer Messeinrichtung für dilatometrische Prüfungen ist das Dilatometer Typ Socossor. Für diese Prüfung ist eine Kernbohrung mit Durchmesser 101 mm optimal. Die Sonde mit Durchmesser 95 mm hat Deformationsaufnehmer im Bereich bis 25 mm, dies bedeutet eine maximale Dehnung bis Durchmesser 120 mm. Dennoch ist die Anwendung des Dilatometers in Bezug auf den Bohrdurchmesser sehr eingeschränkt, da Bohrwerkzeuge mit Durchmesser von 101 mm in Tschechien nicht gängig sind und der nächste, geläufige Durchmesser von 112 mm in weniger qualitativer Gesteinsumgebung schon nicht mehr geeignet ist (angesichts der hohen Belastungsdrücke bis 30 MPa).

Die Vorteile der Methode können im Erreichen hochwertiger Angaben über die Deformationsparameter der Gesteine und Böden und der Schnelligkeit der Prüfung (gegenüber Laborbedingungen) gesehen werden. Als Nachteile können der teilweise hohe zeitliche Aufwand, die Technik und die Organisation der Erkundung (wenn sie beim Bohren durchgeführt wird) und die relativ hohen Kosten genannt werden.

Die Methode kann sehr gut für die Ermittlung der Umformungsparameter von Gesteinen und Böden in situ auch in größeren Tiefen angewendet werden.



Abbildung 5: Beispiel der Zusammenstellung eines elastischen Dilatometers.

3. Geophysikalische Methoden zur Überprüfung der hydrogeologischen Bedingungen und der Stabilität von Hängen - Elektrische Widerstandstomographie (ERT)

Bei der Überprüfung der hydrogeologischen Bedingungen und der Hangstabilität von Gesteinsmassen können prinzipiell geophysikalische Methoden angewendet werden, deren Messgröße auf einen messbaren Unterschied bzw. auf Abweichungen von physikalischen Parametern der Gesteinsumgebung beruhen.

Diese voneinander abweichenden Eigenschaften basieren auf Unterschiede im Gestein. Im gemessenen Profil können die einzelnen quasihomogenen Einheiten von ihrer Umgebung auf Grundlage des interpretierten elektrischen Widerstands unterscheiden werden, da diese in dem Bereich Hauptquelle geophysikalischer Anomalien sind. Die Komplexität des Gesteinsmassivs (die geologischen Verhältnisse, verschiedene physikalische Eigenschaften der Gesteinsmassen, manchmal auch ein flächenmäßig eingegrenztes Erkundungsgebiet oder auch ein intensives Störfeld) verursacht, dass geophysikalische Methoden und ihre Interpretation oft sehr kompliziert und schwierig sind.

Die bisherigen Erfahrungen bei der Lösung dieser Problematik zeigen, dass die geeignetsten Methoden für die Lokalisierung abweichender quasihomogener Einheiten im Gesteinsmassiv in geringen Tiefen unter der Oberfläche geoelektrische, geophysikalische Methoden sind, insbesondere die als ERT (Electrical Resistivity Tomography) und GPR (Ground Penetrating Radar) bezeichneten Methoden.

Die ERT-Methode (auch Widerstandstomographie oder „Multikabel“ genannt) ist die gegenwärtig meistgenutzte Widerstandsmethode beim Aufsuchen unterirdischer Hohlräume. Hinsichtlich der Messmethodik ist sie eine Kombination zweier klassischer Gleichstromwiderstandsmethoden - der Widerstandsprofilierung und dem Widerstandssondieren. Die Methode wird mit der Apparatur ARES angewendet. Es handelt sich um ein automatisches geoelektrisches System ARES-200E. Für die Messung wird ein spezielles Multielektrodenkabel (ein Kabel - 8 Elektroden) benutzt. Die Anzahl der Kabel, Sektionen genannt, ist beliebig. In der Praxis ist sie aber durch die Konstruktion des eigentlichen Geräts eingegrenzt, und zwar auf eine maximale Elektrodenzahl von 250. Beim Messen mit dieser Apparatur werden Zylinderelektroden benutzt - siehe Abbildung 6, auf welchem die Apparatur, die Zylinderelektrode und die Kabelsektion abgebildet sind.

56

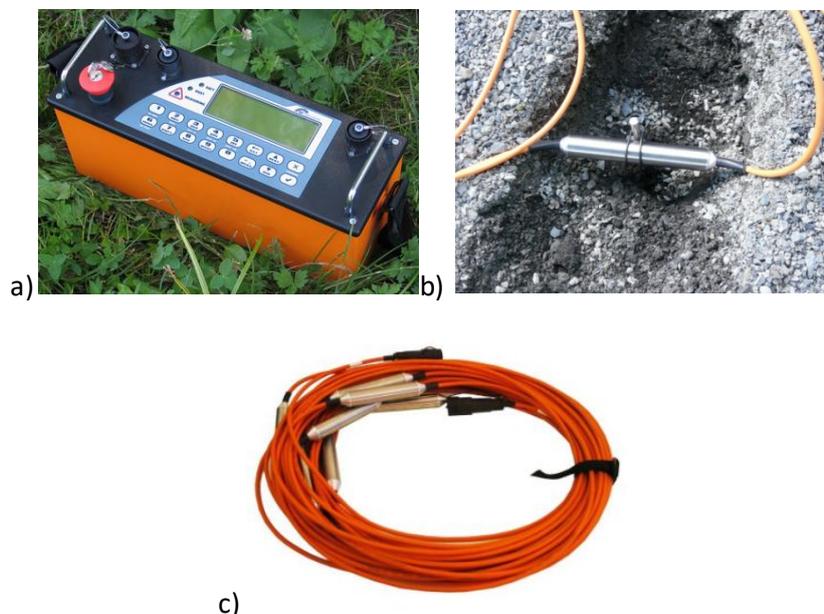


Abbildung 6: Gleichstromwiderstandsapparatur ARES 200E für Multielktroden-Widerstandsmessen (www.gfiinstruments.cz). a) Apparatur ARES-200E, b) Zylinderelektrode als Teil des Multielektrodenkabels beim Messen mit der Apparatur ARES, c) Kabelsektion.

Die Elektroden werden in konstantem Abstand voneinander in die Erdoberfläche gesteckt, entweder in Form: 2D – eines Profils oder 3D - in der Fläche. Die Elektroden, die ununterbrochen im Kontakt mit der Gesteinsumgebung sind, werden mithilfe eines Rechners abwechselnd als Strom- (C1, C2) oder als Messelektroden (P1, P2) angeschlossen. Der Aufbau der Messeinrichtung am südlichen Seeufer mit konstantem Abstand von 3 m zwischen den Elektroden ist auf Abbildung 7 zu sehen.



Abbildung 7: Anordnung der Elektroden ERT auf Profil P2 am Südufer des Sees (im Hintergrund Burg Hněvín).

Die Verarbeitung der erzielten Daten erfolgt mit einem Computerprogramm der Firma Geotomo Software RES2DINV. Es ist für die Inversion großer Dateien (200 - 6500 Punkte) und Speichersysteme mit großer Elektrodenanzahl (25 - 1800) konzipiert. Dieses Programm erstellt aus den Terrainmessungen ein Widerstandsprofil.

Ergebnis der Messdatenverarbeitung ist ein vertikaler Iso-Ohm-Schnitt, dessen Interpretation von einem Fachmann - gewöhnlich einem Geophysiker vorgenommen werden muss.

Die Profillänge im Arbeitsgebiet war einerseits durch die gewählte Messmethodik bedingt, andererseits auch durch die Forderung, einen optimalen Tiefenbereich bezüglich der vorausgesetzten Tiefe des festen Untergrunds zu erreichen. Die Lage der gemessenen Profile ist auf Abbildung 8 und 9 dargestellt.

Es wurden insgesamt 3 Profile gemessen, in der ersten Phase die Profile P1 am Nordufer und P2 am Südufer entlang der Falllinie. Nachfolgend wurde dann das Profil P3 senkrecht auf P1 entlang einer Höhenlinie am Nordufer gemessen.

Die gemessenen und interpretierten Datensätze sind Daten mit Log-Normalverteilung und diese Tatsache wurde bei der Wahl des logarithmischen Maßstabs – bedeutet bei der Wahl des Intervallschritts der Isolinien auf den interpretierten vertikalen Iso-Ohm-Schnitten - berücksichtigt.

Die reale Tiefenreichweite der Messungen lag mit der gewählten Elektrodenanzahl, der benutzten Messmethode und einem Elektrodenabstand von 3 m bei den Profilen P1 bis P3 bei ca. 25 m. Dies entspricht der vermuteten Tiefe für das Auftreten von Gleitflächen und potentieller Feuchtigkeitsänderungen durch episodische Infiltrationsniederschläge. So sind auch die Interpretationsergebnisse in die einzelnen Profile eingetragen.

Mit der Interpretationssoftware RES2Dinv wurden 2D-Widerstandsmodelle der untersuchten Umgebung in Form vertikaler Schnitte erstellt.

3.1. ERT Profil P1

Die Profillänge betrug 333 m, gemessen wurde annähernd in Richtung Nord-Süd, siehe Abbildung 8. Auf Grundlage des erhaltenen Widerstandsbildes können zwei Bereiche eingegrenzt werden, die ihrem Charakter nach einem Bereich erhöhter Sättigung des Porensystems mit Wasser entsprechen können (blaue Farbe). Der erste Bereich ist der Bereich zwischen der Metrierung 103 m bis 168 m in der oberflächennahen Zone (Tiefe bis ca. 2 m), der zweite Bereich liegt im Bereich zwischen 180 m bis 243 m. Weiterhin wurden Bereiche mit erhöhter Wassersättigung bei 57 m im tieferen Teil des Profils und im Intervall ab 123 m bis 162 m ermittelt. Zwischen 186 bis 213 m kann im unteren Bereich die Existenz konsolidierten Gesteins des ursprünglichen Hangs des Großsteinbruchs Ležáky angenommen werden. Die Ergebnisse in Form von vertikalen Widerstandsschnitten sind in Abbildung 10 dargestellt.

58



Abbildung 8: Lage der ERT Profile im Arbeitsgebiet (blau = Profile P1 und P3; rot = Profil P2).



Abbildung 9: Lage der ERT Profile am Nordufer des Sees Most.

59

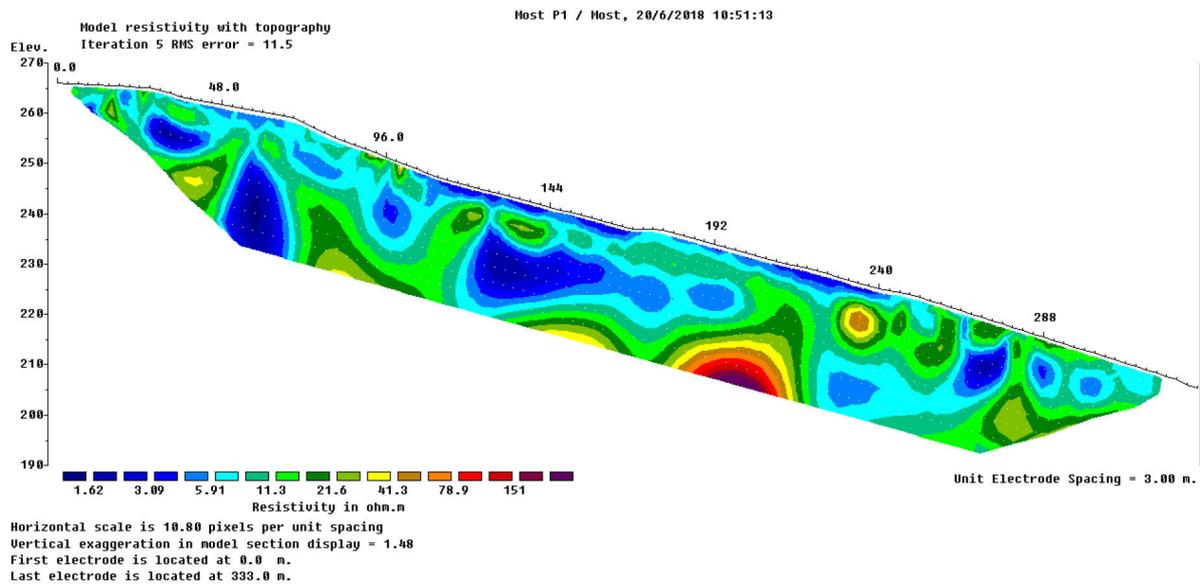
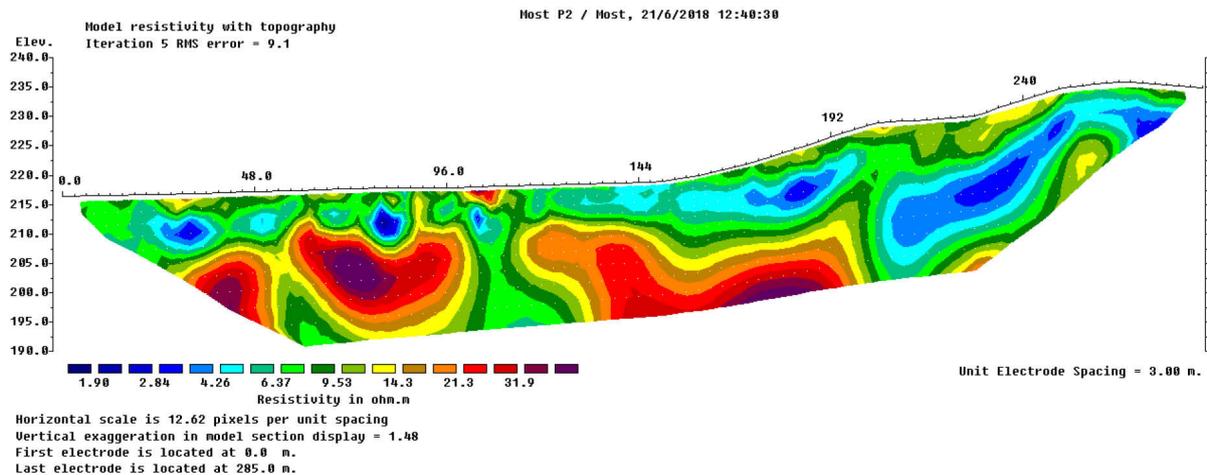


Abbildung 10: Ergebnisse der Widerstandstomographie (vertikale Widerstandsschnitte) am Profil P1. Blaue Bereiche deuten wahrscheinlich auf die Existenz erhöhter Sättigung des Porensystems im Gesteinsmassiv hin. In rot ist der wahrscheinlich konsolidierte Untergrund des ursprünglichen Untergrunds vor der Rekultivierung gekennzeichnet.

3.2. ERT Profil P 2

Die Profillänge wird mit 285 m angegeben, gemessen wurde in Richtung Nordost-Südwest, siehe Abbildung 8. Auf Grundlage des Widerstandsbildes kann ein Bereich eingegrenzt werden, der einem Bereich erhöhter Sättigung des Porensystems mit Wasser entsprechen kann (blaue Farbe). Es handelt sich um den Bereich zwischen 138 m bis 198 m in der oberflächennahen Zone in einer flachen Tiefe zwischen 2-8 m. Weiter kann eine erhöhte Sättigung zwischen 204 bis 250 m im tieferen Bereich der Gesteinsumgebung, in ca. 15 m Tiefe, vermutet werden. Quasihomogene Einheiten, die hier eine rote Farbe aufweisen, sind wahrscheinlich konsolidierte und wenig gesättigte Partien des ursprünglichen Untergrunds. Die Ergebnisse in Form der vertikalen Widerstandsschnitte sind in Abbildung 11 dargestellt.



60

Abbildung 11: Ergebnisse der Widerstandstomographie (vertikale Widerstandsschnitte) des Profils P2. Blaue Farben deuten auf das Vorhandensein von wassergesättigten Porensystemen des Gesteinsmassivs hin. Rot eingefärbte Bereiche kennzeichnen wahrscheinlich den konsolidierten Untergrund des ursprünglichen Terrains.

3.3. ERT Profil P3

Die Profillänge beträgt 141 m, gemessen wurde in Richtung West-Ost, siehe Abbildung 8 und 9. Auf Grundlage des erhaltenen Widerstandsbildes kann ein Bereich eingegrenzt werden, der seinem Charakter nach einem Bereich erhöhter Wassersättigung des Porensystems im Untergrund entsprechen kann (blaue Farbe). Es handelt sich hierbei um eine flache Zone, die sich über das gesamte Profil erstreckt. Im mittleren Abschnitt reicht sie etwa 6 m von der Oberfläche, am Anfang und Ende des Profils von ca. 3 m bis ca. 9 m, der Höchstwert wurde im Bereich zwischen 35 m und 120 m erkundet. Weiterhin wurde an der Profilbasis ein Bereich mit höheren Widerstandswerten zwischen 24 m und 55 m in Tiefe von ca. von 12 m bis 24 m und in etwa gleicher Tiefe mit symmetrischem Muster zwischen 84 m bis 114 m ermittelt. Diese Anomalie entspricht wahrscheinlich den konsolidierten Gesteinen des ursprünglichen Untergrunds. Die Ergebnisse in Form der vertikalen Widerstandsschnitte sind auf Abbildung 12 dargestellt.

4. Fazit

In diesem Beitrag wurden verschiedene geologische und geotechnische Erkundungs- und Monitoringmethoden vorgestellt. Diese Methoden erlauben in-situ Untersuchungen und Messungen verschiedener Parameter und ihrer Änderungen unter Feldbedingungen. Zu den wichtigsten Parametern gehören eindeutig die geologischen Bedingungen im Gebiet - die Beeinträchtigung des Oberbodens und der obersten Gesteinsschichten, die hydrogeologischen Bedingungen - die Grundwasserströmungen, die Geochemie der Böden und Gesteine - oft verbunden mit deren Kontamination und der Änderungen des Landschaftsreliefs - Hangbewegungen anthropogener Aufschüttungen oder das Absenken der Landschaft nach dem Bergbau und viele andere Erscheinungen.

Jede der genannten Methoden wird von einem Beispiel der praktischen Anwendung in der Postbergbaulandschaft begleitet. Die einzelnen Methoden und die ihnen entsprechende technische Ausstattung ist Bestandteil des Feldlabors der VŠB-TU Ostrava, welches unter intensiver Beihilfe des EU-Projekts GeoMAP aufgebaut wurde.

Bestandteil des Feldlabors sind Einrichtungen für die geologische Erkundung, z.B. für die Erstellung eines geologischen Profils auf Grundlage der Auswertung von Bohrungen, geophysikalischer Methoden oder Untersuchungen mit leichter Rammsonden. Weiter gehört zur Laborausstattung Equipment für das geotechnische Monitoring, z.B. für inklinometrische Messungen, extensometrische Messungen, Grundwasserstands- und Porendruckmessungen, sog. Höhenstandsmesser und Piezometer.

Erfahrungen aus dem Wasseranstieg nach Stilllegung des Steinkohlebergbaus der RAG AG

I. Balzer, M. Drobniowski

RAG Aktiengesellschaft

Zusammenfassung

Die RAG AG bewältigt auch heute noch verlässlich die Folgen des Bergbaus in den ehemaligen Steinkohlenrevieren Ruhr, Ibbenbüren, Saar. Mit der Bearbeitung der sogenannten Ewigkeitsaufgaben (Grubenwasserhaltung, Poldermaßnahmen, Grundwasserreinigung) trägt die RAG dazu bei, den Wasserhaushalt in diesen Regionen unter und über Tage zu regulieren. Oberste Priorität haben hierbei der Trinkwasser- und Umweltschutz. Insbesondere die Grubenwasserhaltung soll durch die Entwicklung von Grubenwasserkonzepten auch für nachfolgende Generationen ökologisch und ökonomisch sinnvoll gestaltet werden. Die Umsetzung dieser Konzepte wird durch zahlreiche Monitoringmaßnahmen begleitet. Hierbei kann auch auf die Erfahrung von bereits abgeschlossenen Grubenwasseranstiegen zurückgegriffen werden.

Die RAG AG (ehemals Ruhrkohle AG) wurde 1968 als Konsolidierungsunternehmen der deutschen Steinkohlenbergwerke gegründet. Zu dieser Zeit bündelte das Unternehmen etwa 94 % der Steinkohlenförderung im Ruhrrevier. Aktuell ist die RAG AG (im folgenden RAG) für die ehemaligen Steinkohlenreviere an der Ruhr und Ibbenbüren in Nordrhein-Westfalen (Fördereinstellung 2018) und das Saarrevier im Saarland (Fördereinstellung 2012) verantwortlich. Denn auch nach Einstellung der Steinkohlenförderung übernimmt die RAG langfristig die Verantwortung in den Bergbauregionen. Bei den Ewigkeitsaufgaben handelt es sich um Bergbaufolgen, die unbefristet Maßnahmen erfordern. Hierzu zählen die Grubenwasserhaltung, Poldermaßnahmen über Tage sowie die Grundwasserreinigung an einigen ehemaligen Kokereistandorten und das Grundwassermonitoring an kontaminierten Standorten.

Eine wesentliche Aufgabe der RAG ist dabei das Wassermanagement unter Tage und in Teilen des Ruhrgebietes auch über Tage. Oberste Priorität haben hierbei der Trinkwasser- und Umweltschutz.

Die finanziell und technisch herausforderndste Ewigkeitsaufgabe ist die Grubenwasserhaltung. Dies betrifft insbesondere das Ruhrgebiet. Aufgrund der Lage der Grundwasservorkommen, die zur Trinkwassergewinnung genutzt werden, sowie der Geländebeschaffenheit bietet sich in Ibbenbüren und im Saarrevier die Chance, das Grubenwassermanagement, ohne den Einsatz von Pumpen zu bewerkstelligen. Hier kann ein natürlicher Austritt des Grubenwassers direkt in die Saar bzw. die Ibbenbürener Aa geschaffen werden. Bevor dies realisiert werden kann, sind jedoch noch umfangreiche Untersuchungen und Genehmigungsverfahren nötig.

Grundsätzlich war in der Vergangenheit der Schutz der benachbarten Bergwerke und deren Kohleförderung vorrangiges Ziel der Grubenwasserhaltung. Mit Stilllegung der letzten Zeche besteht keine Notwendigkeit mehr, das untertägige Grubengebäude trocken zu halten. So bietet sich heute die Chance, die Grubenwasserhaltung zu optimieren.

Aufgrund des 2007 zwischen den Ländern Nordrhein-Westfalen und Saarland mit der RAG-Stiftung geschlossenen Erblastenvertrags ist die RAG verpflichtet, ein Konzept zur langfristigen Optimierung der Grubenwasserhaltung zu entwickeln und fortlaufend zu aktualisieren. Zur langfristigen Optimierung der Grubenwasserhaltung sieht das heutige Grubenwasserhaltungskonzept ein weiteres

Zentralisieren der Wasserhaltungen vor. Durch einen kontrollierten Anstieg auf ein festgelegtes Zielniveau sollen ehemals getrennte Wasserhebungsbereiche miteinander verbunden werden und das Einzugsgebiet der zentralen Wasserhaltungen sukzessive vergrößert werden. Die Verbindung der vormals getrennten Wasserhebungsbereiche erfolgt über untertägige Fließwege im ehemaligen Grubengebäude. Diese Fließwege sind durch die Verbindung einzelner Steinkohlenbergwerke, oftmals durch Zechenzusammenschlüsse in der Vergangenheit, entstanden. So sollen im Ruhrrevier langfristig nur noch sechs Wasserhaltungen betrieben werden. Dies bietet die Chance, insbesondere kleinere Gewässer von der Grubenwassereinleitung zu befreien. Die Emscher soll zukünftig komplett von der Grubenwassereinleitung befreit werden. Durch den höheren Wasserstand bietet sich hier ebenfalls die Möglichkeit, das zur Wasserhaltung noch betriebene untertägige Restgrubengebäude aufzugeben und den Betrieb der Wasserhaltung in eine moderne, von über Tage aus betriebene Brunnenwasserhaltung umzubauen (siehe Abbildung 1).

64

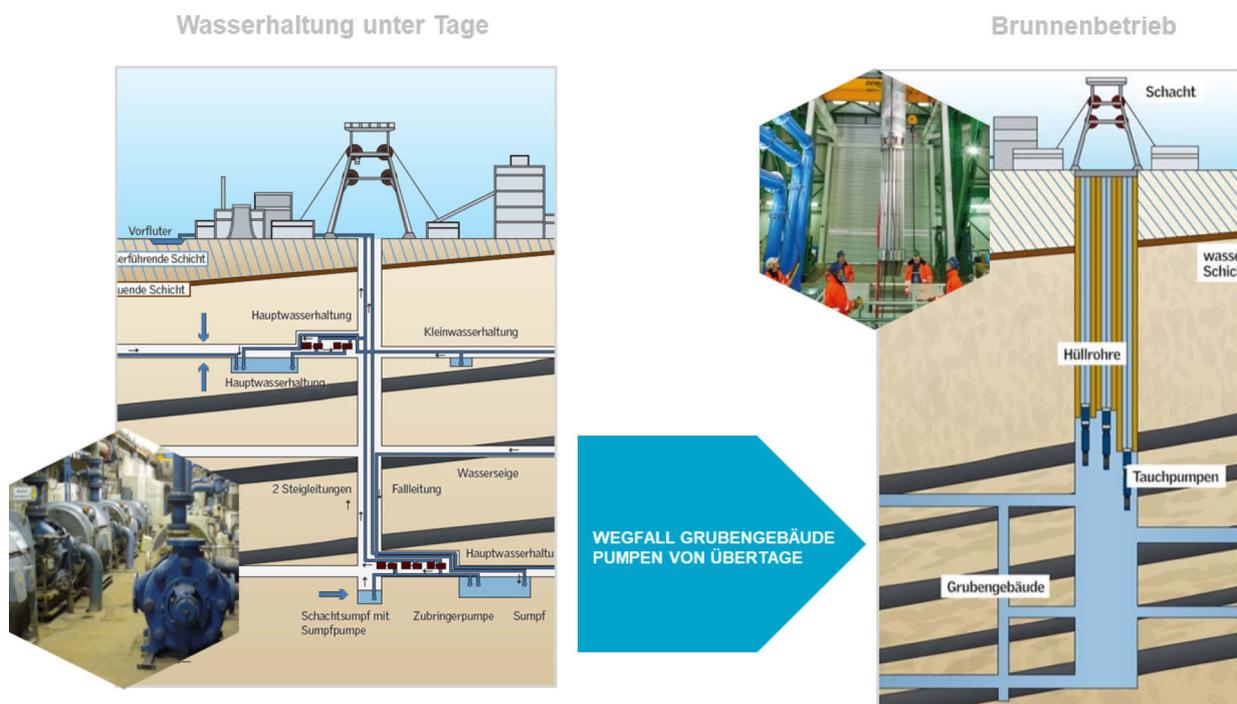


Abbildung 1: Umbau der Wasserhaltungsstandorte.

Bei allen Umbaumaßnahmen hat der Umwelt- und Trinkwasserschutz oberste Priorität. Das Ruhrgebiet ist mit ca. 5,1 Mio. Einwohnern der größte Ballungsraum Deutschlands und wird zum Großteil mit Trinkwasser aus den im nördlichen Ruhrgebiet vorkommenden bedeutenden Grundwasserleitern der Haltern-Formation versorgt. Hier sieht das Grubenwasserkonzept einen ausreichenden Sicherheitsabstand zwischen Gruben- und Trinkwasser vor.

Im Jahr 2020 wurden im Ruhrgebiet 51,6 Mio. m³ Grubenwasser an noch neun Standorten zutage gefördert (siehe Abbildung 2). Eingeleitet wurde das Grubenwasser in die Vorfluter Lippe, Ruhr, Rhein und Emscher. Der Großteil des geförderten Grubenwassers fällt hierbei im südlichen Ruhrgebiet an. Dies ist auf die geologischen Verhältnisse im Ruhrgebiet zurückzuführen: im südlichen Ruhrgebiet streicht die Steinkohlenlagerstätte an der Tagesoberfläche aus. Die Schichten fallen generell nach Norden hin ein und werden dabei von einem immer mächtiger werdenden, abdichtenden Kreide-Deckgebirge überlagert. So kann an den südlich gelegenen Wasserhaltungen Heinrich, Friedlicher Nachbar und Robert Müser das Grubenwasser bereits aus einer geringen Teufe und mit geringer Mineralisierung gefördert werden. An den nördlicher gelegenen Wasserhaltungen nimmt die Mineralisierung zu, die anfallende Wassermenge wird jedoch vergleichsweise geringer.

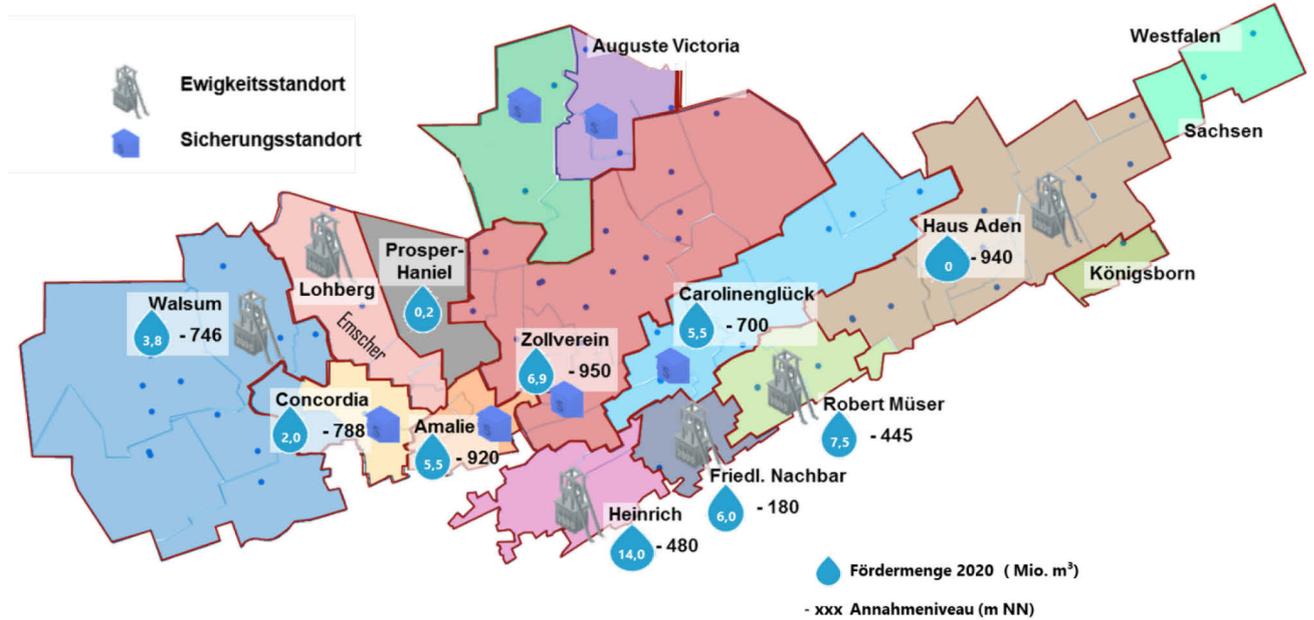


Abbildung 2: Grubenwasserhaltung im Ruhrrevier – Übersicht der Fördermengen und Annahmehöhen in den Wasserprovinzen.

Aktuell findet im Ruhrgebiet in einigen Bereichen bereits ein Anstieg des Grubenwasserniveaus statt (siehe Abbildung 3). Dies betrifft insbesondere den östlichen Teil des Ruhrreviers (Wasserprovinz Haus Aden und Westfalen) und die Wasserprovinz Lohberg. Im mittleren Ruhrrevier ist der Grubenwasseranstieg zeitnah vorgesehen.

Jeder Grubenwasseranstieg wird durch ein umfassendes Monitoring begleitet. So werden die Wasserstände in der Lagerstätte über Leitungen in verfüllten Schächten regelmäßig erfasst. An einigen Standorten kann mit einem Schöpfgefäß auch eine Wasserprobe gewonnen werden, um die Grubenwasserqualität während des Anstiegs zu überwachen. Ein Abgleich mit dem prognostizierten Chemismus des Grubenwassers während der Anstiegsphase ist hier begrenzt möglich. Mit Hinblick auf die zu erwartende Qualität des Grubenwassers nach einem Anstieg und bei Wiederaufnahme des Pumpbetriebs können hier wichtige Informationen gewonnen werden.

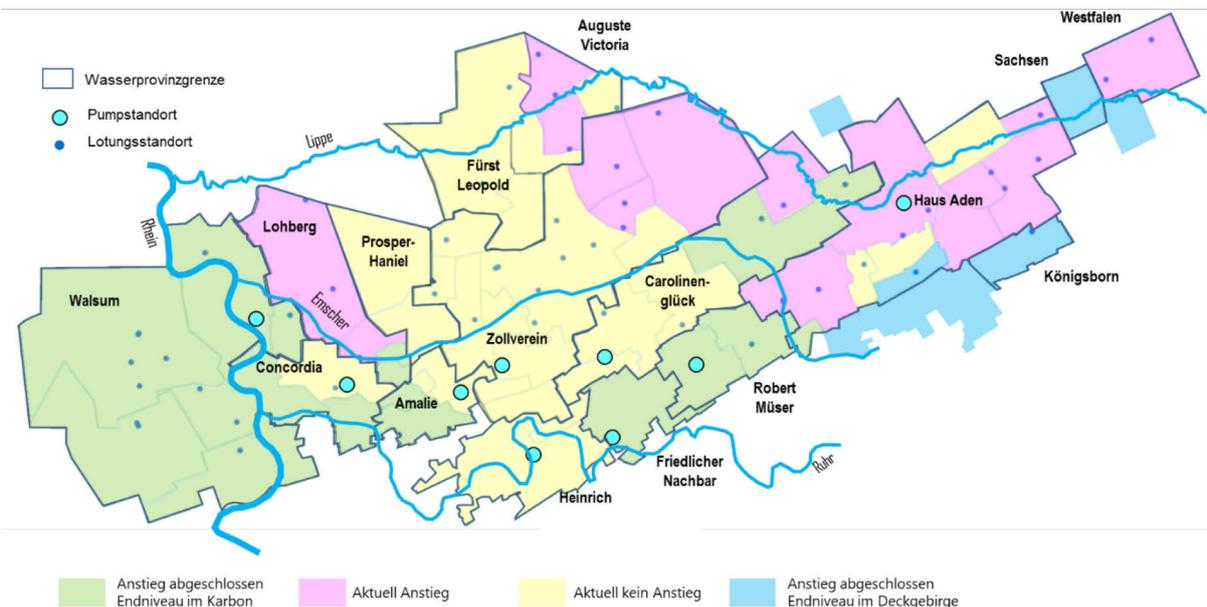


Abbildung 3: Anstiegssituation in den Wasserprovinzen des Ruhrreviers.

Um potenzielle Wechselwirkungen mit den Grundwasserleitern im Deckgebirge während eines Grubenwasseranstiegs rechtzeitig zu erfassen, führt die RAG im östlichen und mittleren Ruhrrevier auch ein Grundwasserstockwerke übergreifendes Monitoring mit tiefen Pegeln. Hierbei werden an einem Standort über Mehrfach-messstellen die verschiedenen Grundwasserhorizonte aufgeschlossen. Neben dem Wasserstand wird hier auch regelmäßig eine chemische Analyse des Grundwassers durchgeführt. Zusammen mit den Wasserstandsmessungen aus der Lagerstätte im Karbon kann hier über lange Zeiträume die Entwicklung der einzelnen Grundwasserhorizonte im Zusammenhang mit dem Grubenwasseranstieg beobachtet und bewertet werden.

Mit dem Verschluss des Restgrubengebäudes des ehemaligen Bergwerks Auguste Victoria kamen auch erstmals untertägige Messsonden zum Einsatz. Diese In-Situ-Messsonden wurden in einem F&E-Projekt in einer Zusammenarbeit aus RAG und dem Forschungszentrum Nachbergbau entwickelt. Sie sind beim endgültigen Abschluss des Grubengebäudes untertage verblieben. Über Kabel, die durch die Füllsäulen der Schächte geführt wurden, liefern diese Messsonden Echtzeitdaten zum Grubenwasseranstieg in dem verschlossenen Bergwerk. Die Sonden liefern Informationen zu elektrischer Leitfähigkeit, Temperatur, Strömungsrichtung und zum Wasserstand (Druck). Bisher liefern die Messsonden sehr zuverlässig Ergebnisse, die sich mit den Ergebnissen aus anderen Messverfahren (z.B. Wasserstandsnotung) decken. Der Einsatz der Messsonden wurde daraufhin auch an weiteren Standorten umgesetzt bzw. ist geplant.

66

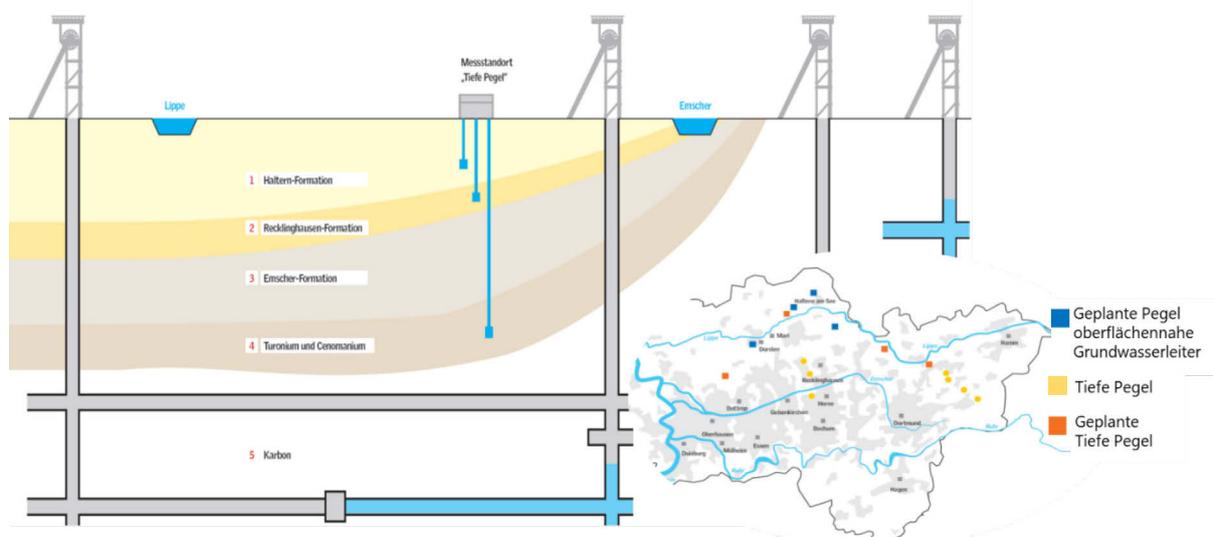


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Messprogramms „Tiefe Pegel“.

Neben dem Themenfeld Grundwasser/Grubenwasser werden auch weitere potenzielle Risiken eines Grubenwasseranstiegs betrachtet und in ein Monitoring mit einbezogen. Dies betrifft insbesondere Ausgasungen an der Tagesoberfläche und Bodenbewegungen.

Grundsätzlich ist bei steigendem Wasserstand mit einem Rückgang des Grubengasangebots der Lagerstätte zu rechnen. Aufgrund des entgegenwirkenden hydrostatischen Drucks wird das Entweichen des Gases aus den noch anstehenden Flözen unterbunden. Dennoch wird das potenzielle Ausgasungsverhalten des Grubengebäudes vor einem Wasseranstieg genau analysiert und bewertet. Auch die Beschaffenheit des Deckgebirges und mögliche Strömungswege im Grubengebäude werden in diese Analyse mit einbezogen. Auf dieser Grundlage wird ein Monitoring erarbeitet und das Ausgasungsverhalten messtechnisch überwacht. Auch können so Warnwerte definiert werden, bei dessen Überschreitung weitere Maßnahmen zur Vermeidung von Risiken eingeleitet werden.

In fast allen Steinkohlenrevieren konnte nach Einstellung der Wasserhaltung eine Hebung der Geländeoberfläche beobachtet werden. Im Rahmen umfangreicher Untersuchungen konnten inzwischen zahlreiche Erkenntnisse über die charakteristische Größenordnung der Bodenhebungen sowie über deren räumliche und zeitliche Entwicklung gewonnen und ausgewertet werden. Auf dieser Grundlage erfolgt für Bereiche, in denen ein Grubenwasseranstieg geplant ist, eine gutachterliche Bewertung zur Identifizierung von potenziellen Bodenbewegungsbereichen. Generell ist festzuhalten, dass als Hebungspotenzial von Bodenbewegungen im Zuge des Grubenwasseranstiegs nur ein Bruchteil der abbaubedingten Bodenbewegungen zu erwarten ist. Die sich im Laufe des Grubenwasseranstiegs entwickelnden Bodenhebungen erfolgen in der Regel sehr langsam, großflächig und vergleichsweise gleichmäßig. Im Vorfeld eines geplanten Grubenwasseranstiegs lässt RAG auch das Themenfeld Bodenbewegungen gutachterlich analysieren und bewerten. Der Wasseranstieg wird auf Grundlage dieser Auswertung durch Höhenmessungen an der Tagesoberfläche begleitet. Bisherige Messungen der RAG bestätigen auch die Erfahrungen aus anderen Revieren. Bodenhebungen sind bisher in einer Größenordnung von einigen Zentimetern aufgetreten. Großräumige schadensrelevante Auswirkungen an der Geländeoberfläche sind durch diese stetig verlaufenden Bodenbewegungen in den Revieren der RAG bisher nicht aufgetreten und auch nicht zu erwarten.

Um die bisher in Nordrhein-Westfalen durchgeführten Monitoringmaßnahmen in einem revierweiten Monitoring zusammenzuführen, wird der Grubenwasseranstieg seit 2020 durch den Prozess des „Integralen Monitorings“ unter der Leitung des MWIDE, des MULNV und der Bezirksregierung Arnsberg unter Beteiligung der RAG begleitet.

67

Das Integrale Monitoring hat zum Ziel, eine zusammenfassende Dokumentation der Grubenwasseranstiege und ihrer Umweltauswirkungen zu erstellen. Der Monitoringprozess ist hierzu gegliedert in eine übergeordnete landesweite Entscheidungsgruppe, temporäre thematische Konzeptgruppen zu den Themen Ausgasung, Wasser und Bodenbewegung, sowie in regionale Arbeitsgruppen. In den regionalen Arbeitsgruppen erfolgt die operative Umsetzung der Konzepte unter der Leitung der Bezirksregierung Arnsberg, die durch einen externen Dienstleister unterstützt wird.

Neben den Bereichen der Zentralwasserhaltungen gibt es im Ruhrgebiet auch Bereiche, die heute nicht mehr von Wasserhaltungsmaßnahmen beeinflusst werden. Diese Bereiche liegen überwiegend im südlichen und östlichen Teil des Ruhrreviers. Ein Beispiel hierfür ist das ehemalige Bergwerk Königsborn im Kreis Unna.

Das Bergwerk Königsborn wurde 1981 stillgelegt. Zum Schutz des benachbarten Bergwerks Ost wurde die Wasserhaltung dort zunächst weitergeführt. Durch den Bau eines Hochdruckdamms zwischen den beiden Bergwerken konnte die Wasserhaltung Königsborn 1996 aufgegeben werden. Seitdem entwickelt sich der Wasserstand in dem Bereich eigenständig. Von 1996 bis 2020 ist der Wasserstand um über 900 m angestiegen. Seit 2012 war eine deutliche Verlangsamung des Grubenwasseranstiegs erkennbar. Die Höhe des Druckwasserspiegels liegt aktuell wie prognostiziert im Niveau von rund +40 m NHN. Ein weiterer Anstieg ist kaum noch zu verzeichnen.



Dieser Grubenwasseranstieg wurde im Rahmen einer Sensibilitätsanalyse durch ein umfassendes Monitoring begleitet. Dieses umfasste folgende Elemente:

- Erfassen von Wasserständen:
 - Grubenwasserstand an Schacht Königsborn 4
 - Grundwasserstände in den „Tiefen Pegeln“
 - Grundwasserstände im oberen Grundwasserstockwerk
- Erfassung von Abflussverhältnissen an ausgewählten Oberflächengewässern
- Messungen zur elektrischen Leitfähigkeit des Grundwassers an Quellen und Grundwassermessstellen
- Messungen zur Erfassung von vertikalen Bodenbewegungen.

Insbesondere beim oberen, tagesnahen Grundwasserleiter lag der Fokus auf Bereichen, bei denen Auswirkungen des Grubenwasseranstiegs bei gleichzeitigen sensiblen Nutzungsverhältnissen zu erwarten waren. Hier wurden neue Grundwassermessstellen eingerichtet. Bis heute zeigt sich im oberen Grundwasserstockwerk lediglich eine rein klimatisch bedingte Grundwasserstandsentwicklung. Auswirkungen des Grubenwasseranstiegs sind bis heute nicht erkennbar. Auch bei den Abflussverhältnissen an Oberflächengewässern zeigt sich keine erkennbare Zunahme infolge des Grubenwasseranstiegs. Bei den Messungen der elektrischen Leitfähigkeit ist bisher kein Trend erkennbar. Die elektrische Leitfähigkeit unterliegt je nach Jahreszeit und Quellschüttung großen Schwankungen. Lediglich zwei nördlich des Bereiches Königsborn gelegene Tiefe Pegel zeigen von 2004-2015 einen leichten Anstieg. Dieser fand jedoch nicht kontinuierlich statt. Seit Mai 2015 haben sich die Grundwasserstände stabilisiert und zeigen bis heute lediglich klimabedingte Schwankungen.

68

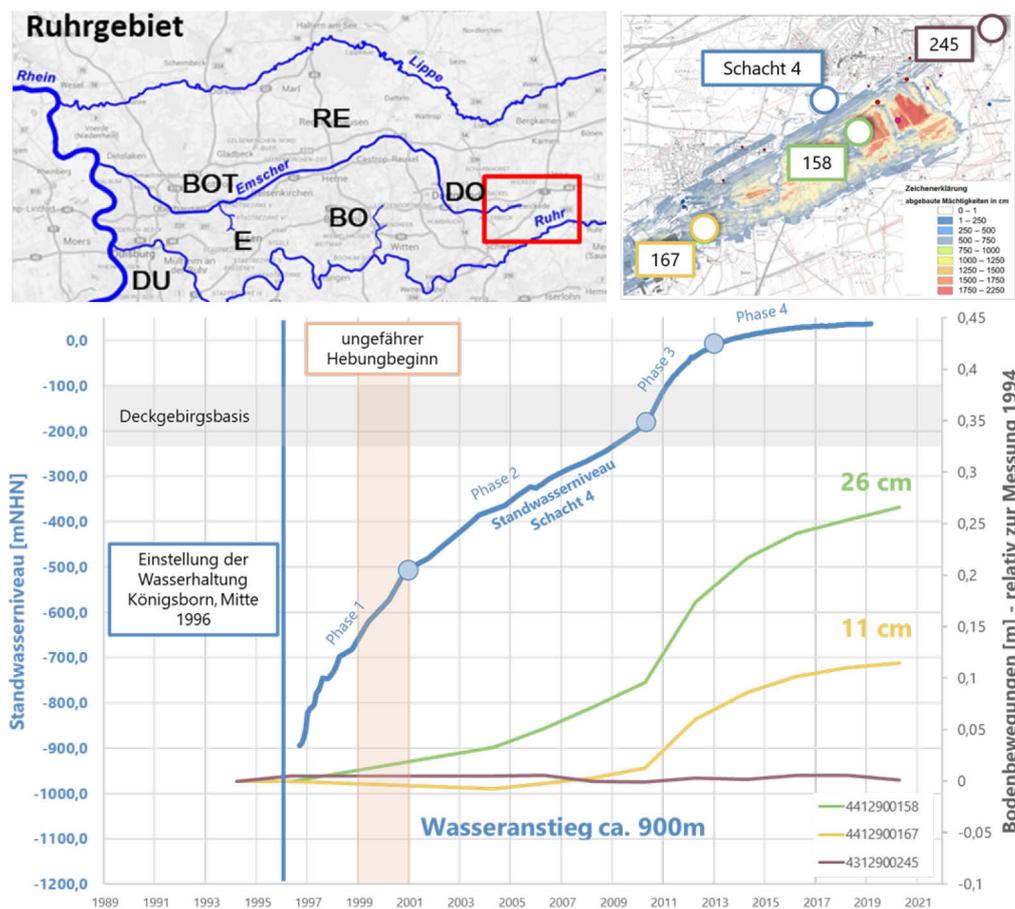


Abbildung 5: Entwicklung des Grubenwasserstandes und von Bodenbewegungen im Bereich des ehemaligen Bergwerks Königsborn.

Bei den vertikalen Bodenbewegungen konnte bisher ein Anstieg von rund 26 cm beobachtet werden. Wie auch in anderen Steinkohlenrevieren beobachtet, zeigen sich die größten Hebungsbeiträge in den Bereichen, in denen die Abbaumächtigkeit am größten war. Auch zeigt sich eine Zunahme der Hebungen mit Einstau der Deckgebirgsbasis (siehe Abbildung 5). Schäden aufgrund der Hebungen sind bisher nicht bekannt geworden.

Die RAG übernimmt auch langfristig die Verantwortung in ihren ehemaligen Steinkohlenrevieren. Hierbei kann RAG auf die Erfahrungen aus ihrer über 50-jährigen Geschichte zurückgreifen. Denn schon zu aktiven Bergwerkszeiten war die Beherrschung von Grubenwasser in Stillstandsbereichen von Bedeutung. Hierbei wurden durch Monitoringmaßnahmen zahlreiche Erkenntnisse zu Wasseranstiegen nach Stilllegung des Steinkohlenbergbaus gewonnen. Diese werden laufend erweitert und auch durch neue Technologien ergänzt. Für die Zukunft hat RAG langfristige Grubenwasserkonzepte erarbeitet, mit denen der Wasserhaushalt in den ehemaligen Steinkohlenrevieren ökologisch und ökonomisch auf Dauer reguliert werden kann.

Literaturverzeichnis

Melchers, Westermann, Reker: Evaluierung von Grubenwasseranstiegsprozessen, Berichte zum Nachbergbau Heft 1, 2019

RAG AG: Konzept zur langfristigen Optimierung der Grubenwasserhaltung der RAG Aktiengesellschaft für Nordrhein-Westfalen gemäß §4 Erblastenvertrag zur Bewältigung der Ewigkeitslasten des Steinkohlenbergbaus der RAG AG im Rahmen der sozialverträglichen Beendigung des subventionierten Steinkohlenbergbaus in Deutschland vom 14.08.2007, 2014

Ten Thoren: Bericht zum Monitoring tiefer Grundwassermessstellen im Jahr 2020, unveröffentlichtes Gutachten im Auftrag der RAG, 2021

„Aufgaben für die Ewigkeit“. Homepage der RAG AG. <https://www.rag.de/>, letzter Zugriff 19.03.2021

„Grubenwasserhaltung“. Homepage der RAG Stiftung. <https://www.rag-stiftung.de/ewigkeitsaufgaben/grubenwasserhaltung>, letzter Zugriff 19.03.2021

„Integrales Monitoring Grubenwasseranstieg Steinkohle“. Homepage des Ministeriums für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen. <https://www.wirtschaft.nrw/integrales-monitoring-grubenwasseranstieg-steinkohle>, letzter Zugriff 25.03.2021

Grenzüberschreitende Überwachung des Grubenwasseranstiegs im ehemaligen saarländisch-lothringischen Steinkohlerevier

Thomas Walter

Ministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, Saarbrücken

E-Mail: t.walter@umwelt.saarland.de

Das Lothringer Kohlerevier, das bedeutendste Frankreichs, umfasst den südwestlichen Teil der von NO nach SW verlaufenden saarländisch-lothringischen Lagerstätte mit einer Fläche von etwa 30 mal 25 km. Das lothringische Kohlebecken befindet sich im Norden des Départements Moselle an der Staatsgrenze zu Deutschland und findet im saarländischen Steinkohlerevier seine direkte Fortsetzung auf deutschem Staatsgebiet.

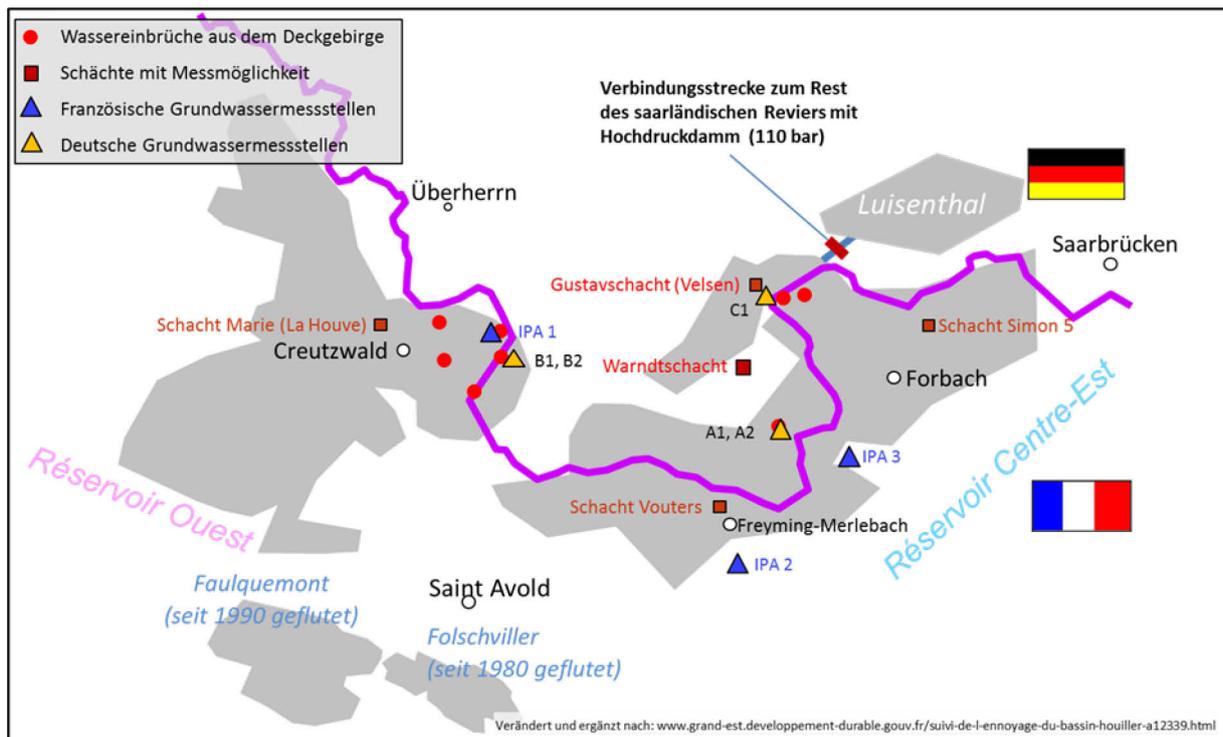


Abbildung 1: Abbaugebiete in der saarländisch-lothringischen Lagerstätte (grau) mit der Lage der Überwachungsstellen auf beiden Seiten der Grenze. Im Umfeld der saarländischen Messstellen sind die bekannten Wassereintruchstellen aus dem Deckgebirge als rote Punkte markiert. Die frühere Verbindung des gemeinsamen Abbaugebietes zum Abbaubereich der ehemaligen Grube Luisenthal ist durch einen Hochdruckdamm abgeperrt.

Es umfasst auf französischer Seite auf einer Fläche von 490 km² 58 Schächte (CDF 2003). Im Gegensatz zur saarländischen Seite mit einer Fläche von 740 km² (ELS, 2016), wo der systematische Steinkohlenbergbau mit der Verstaatlichung sämtlicher Bergwerke durch Fürst Wilhelm-Heinrich von Saarbrücken bereits 1750 begann, verhinderte auf lothringischer Seite die Überdeckung der Lagerstätte mit den Schichten des Mittleren Buntsandsteins über längere Zeit den Bergbau. So wurden die lothringischen Flöze erst in den fünfziger Jahren des 19. Jahrhunderts entdeckt, wobei der Bergbau weiterhin langfristig durch die ständigen Wassereintrüche aus dem Deckgebirge behindert wurde.

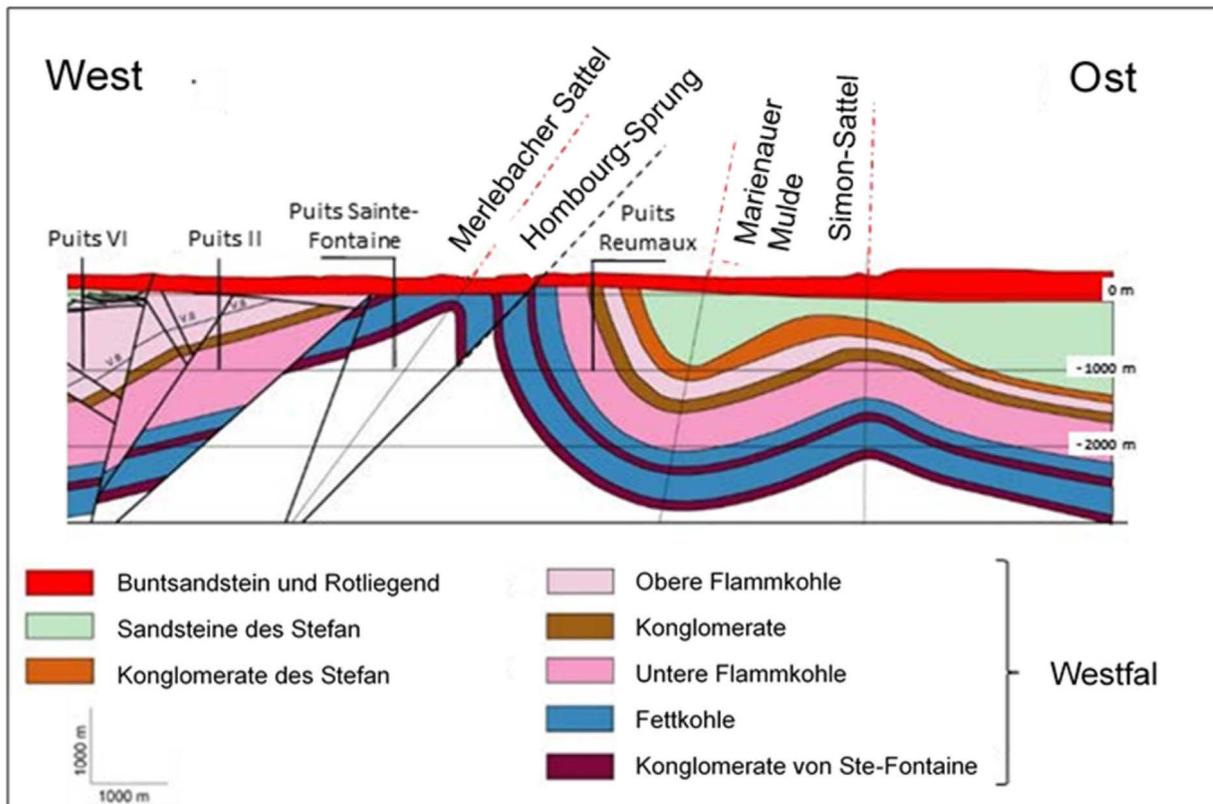
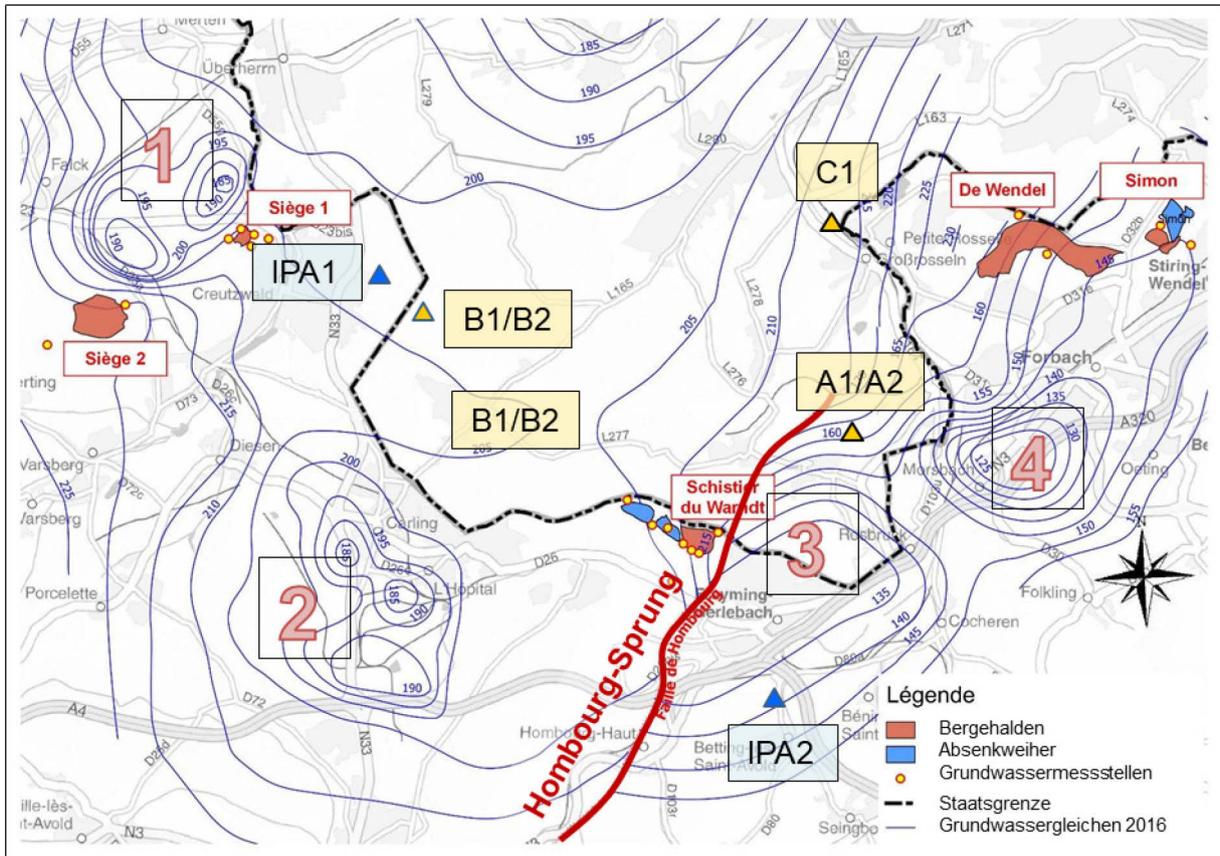


Abbildung 2: Tektonischer Bau der saarländisch-lothringischen Lagerstätte (nach Metz & Babot, 2003). Der Abbau hat auf beiden Seiten des Merlebacher Sattels stattgefunden, wobei der Abbau im Bereich Mitte-Ost westlich und östlich des Hombourg-Sprungs von den steilstehenden Schichten des Südostschenkels bestimmt wurde.

71

Daher waren auch die gehobenen Wassermengen im Vergleich zu der Wasserhebung der nordöstlich anschließenden und nicht überdeckten Lagerstätte deutlich höher: während in den saarländischen Bergwerken eine mittlere Menge von ca. 17 Mio. m³ pro Jahr gehoben wurden, waren es im grenzüberschreitenden Revier 45,1 Mio. m³ (Zahlen für 2001, aus Metz & Babot 2003), von denen nur 2,2 Mio. m³ in der Grube Wandt anfielen, die ausschließlich auf saarländischer Seite abgebaut hat. Mit 31,8 Mio. m³ hatten der Bereich Mitte-Ost und mit 12,1 Mio. m³ auch der hydraulisch getrennte Bereich West deutlich größere Mengen zu heben. Ein großer Teil dieses buntsandsteinbürtigen Wassers konnte wegen seiner niedrigen Mineralisierung für die öffentliche Wasserversorgung verwendet werden.

Wegen der tektonischen Verhältnisse wurden im Bereich Mitte-Ost die steil stehenden Flöze der Südostflanke des Merlebacher Sattels abgebaut (Abbildung 2), in denen trotz des Versatzes mit eingespültem Sand die gegenüber einer flacheren Lagerung deutlich höheren Setzungserscheinungen zwar stark abgemildert, aber nicht verhindert werden konnten. Die bruchhafte Verformung insbesondere der postkarbonen Verwitterungsschicht („Grenzletten“, s. Abbildung 5) und den darüber folgenden unterschiedlich mächtigen Schichten des Rotliegenden führte neben den z. T. erheblichen Senkungserscheinungen an der Oberfläche (z. B. in Nassweiler von mehr als 12 m, CDF 2007) dazu, dass diese natürliche hydraulische Barriere durchbrochen wurde und vermehrt Wasser aus dem Deckgebirge einströmte.



72

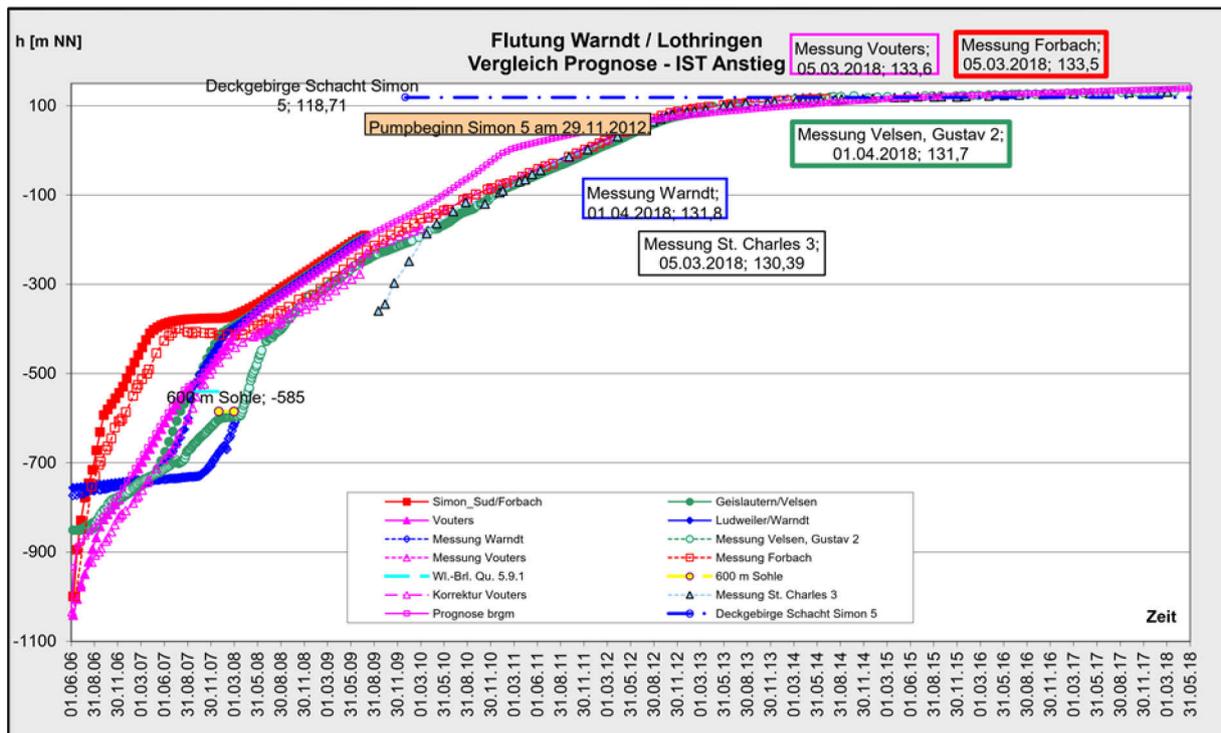
Abbildung 3: Auswirkung des Bergbaus auf den Grundwasserspiegel im hangenden Grundwasserleiter, Situation im Jahr 2016 (GIAM 2017). Von den hydraulische Absenktrichtern auf französischer Seite sind 3 auf Bergbautätigkeit (1, 3, und 4), während der Absenktrichter in Carling (Nr. 3) durch Grundwasserentnahmen im Buntsandstein verursacht ist. Auffällig ist die hydraulische Wirkung des Homburg-Sprungs, der den östlichen Teil des Grundwasserleiters mit Spiegeldifferenzen von mehr als 80 m deutlich vom westlichen abtrennt.

In der Folge bildeten sich weiträumige Absenktrichter, in denen der Grundwasserstand im Mittleren Buntsandstein z. T. bis auf dessen Basis abgesenkt wurde. Diese Absenktrichter haben einen erheblichen und langfristigen Einfluss auf das Verhalten des gesamten hydraulischen Systems während des gemeinsamen Anstiegs des Grubenwassers und des Wassers im hangenden Grundwasserleiter; sie sind daher auch lange nach dem Abschalten der Pumpen noch deutlich erkennbar (Abbildung 3). Zur Zeit des aktiven Abbaus lagen die Absenktiefen im Absenktrichter bei Forbach (Nummer 4 in Abbildung 3) noch auf einer Höhe von 80 m NHN, in Freyming-Merlebach bei 100 m NHN (Nummer 3 in Abbildung 3), während sich der Absenktrichter der Grube La Houve in Creutzwald kaum verändert hat (Metz & Babot, 2003).

Eine weitere Besonderheit des Bergbaus in diesem Gebiet liegt in der komplexen Geschichte der Region, die aufgrund ihrer Kohlelagerstätten lange Zeit zwischen Deutschland und Frankreich umkämpft war. Daher wurden im Saarvertrag von 1956, der die Rückkehr des Saarlandes in das Staatsgebiet der Bundesrepublik Deutschland regelte, Frankreich umfangreiche Konzessionsrechte zum Abbau auf deutschem Staatsgebiet zugestanden. Daher wurden die Baufelder auf der deutschen Seite von Frankreich aus angefahren und waren somit mit den französischen Bergwerken verbunden. Der Vertrag beinhaltete jedoch auch eine sukzessive Rückgabe der Pachtgebiete, so dass auf saarländischer Seite 1964 die Grube Warndt der Saarbergwerke mit den Baufeldern Ludweiler und Geislautern ihren Betrieb aufnehmen konnte.

Der französische Abbau erreichte 1964 mit einer Jahrestonnage von ca. 15.600.000 t (CDF, 2003) sein Maximum, bis Ende der achtziger Jahre wurden noch ca. 10.000.000 t im Jahr gefördert, die dann schrittweise heruntergefahren wurden bis zur Beendigung des Steinkohlebergbaus in Lothringen im Jahre 2004. Durch die Förderung etwa 800 Mio. t Steinkohle (CDF, 2003) entstand ein geschätztes Resthohlraumvolumen von etwa 155 Mio. m³, wobei hier auch der entsprechende Resthohlraum der saarländischen Gruben berücksichtigt wurde (GIAM 2011).

Nach der Stilllegung der französischen Bergwerke in Jahre 2004 und der Grube Warndt 2005 musste für das grenzüberschreitende Revier eine gemeinsame Strategie für die Umsetzung und Überwachung des Grubenwasseranstiegs gefunden werden. Da der Abbau in den weiter östlich auf deutscher Seite angrenzenden Gebieten zwar schon abgeschlossen war, die dort vertraglich abgesicherte Grubengasnutzung aber fortgeführt werden sollte, wurde der Rest der saarländischen Bergwerke durch einen auf 110 bar bemessenen Hochdruckdamm hydraulisch abgetrennt.



73

Abbildung 4: Anstiegsüberwachung und Prognose für den Bereich Mitte-Ost (Quelle: RAG). Der zunächst unterschiedliche Verlauf für die getrennte Auffüllung der einzelnen Bergwerke verläuft erst ab Ende 2009 einigermaßen angeglichen. Ab Mitte 2009 bis in die zweite Jahreshälfte 2012 ist der Wasseranstieg deutlich langsamer als prognostiziert, liegt dann aber bis etwa September 2015 über dem prognostizierten Anstieg. Seit diesem Zeitpunkt verläuft der Anstieg langsamer als prognostiziert, was wohl im Wesentlichen auf die Zuschaltung der zusätzlichen Pumpkapazität in Schacht Simon im August 2015 zurückzuführen ist (siehe auch Abbildung 6).

2006 wurde mit der Abschaltung der Pumpen der Grubenwasseranstieg eingeleitet. Die Überwachung des Anstiegs findet seitdem in beiden Ländern über mehrere Schächte statt (Abbildung 4), während der parallel erfolgende Anstieg im hydraulisch angebundenen Deckgebirge bislang nur auf französischer Seite über entsprechende Messstellen (IPA 1 – 3 in Abbildung 1) gemessen wurde.

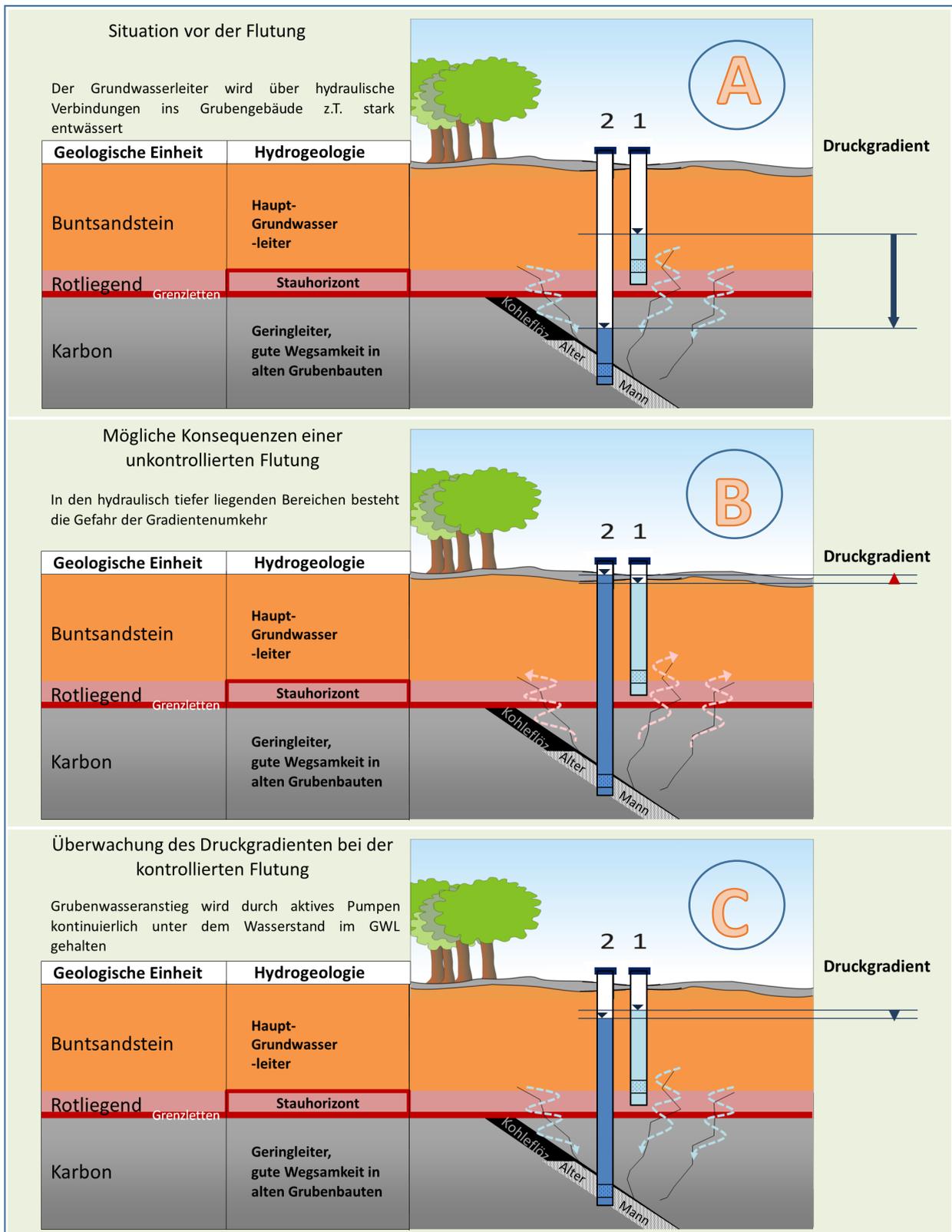
Mit der fast vollständigen Füllung der bergbaulichen Hohlräume beim Erreichen einer Höhe von 118 m NHN in Vouters um die Jahresende 2014/15 trat die Flutung in ihre finale Phase ein. Der weitere Anstieg wird seit diesem Zeitpunkt durch die Auffüllung des deutlich größeren Porenraumes im Buntsandstein bestimmt und die Anstiegsgeschwindigkeit im Buntsandstein gegenüber der im Grubengebäude verlangsamt. Bei einem erhöhten Druckpotenzial im Grubengebäude könnte stärker mineralisiertes Grubenwasser über die bestehenden hydraulischen Verbindungen in den beiden Seiten der Grenze zur Trinkwassergewinnung genutzten Grundwasserleiter aufsteigen.

Daher wurden ab dem 26.11.2009 wegen der ins Deckgebirge zunächst in La Houve (Bereich West, Wasserstand bei 185 m NHN, GIAM 2014) und ab dem 29.11.2012 am Schacht Simon (Bereich Mitte-Ost, Wasserstand etwa 84 m NHN, GIAM 2014, siehe auch Abbildung 5) sukzessive Pumpen in Betrieb genommen. Damit soll das Druckpotenzial in den Grubengebäuden während des Anstiegsprozesses etwa 8 m unter dem tiefsten Wasserspiegel des hangenden Buntsandsteins gehalten und das Aufsteigen von Grubenwasser in den Grundwasserleiter verhindert werden.

Bei der momentanen Anstiegsgeschwindigkeit von etwa 3,5 m pro Jahr und dem Flurabstand von knapp 60 m wird es rechnerisch allerdings noch etwa 15 Jahre bis zum freien Auslauf des Grubenwassers dauern. Da das in den alten Absenktrichtern zu füllende Porenvolumen sich aber mit jedem Meter Anstieg vergrößert und der Anstieg im Buntsandsteinaquifer sich entsprechend verlangsamt, wird die Förderrate sukzessive angepasst werden müssen, um den Druckspiegel im Grubengebäude dauerhaft unter dem des hangenden Grundwasserleiters zu halten.

Das Ministerium für Umwelt und Verbraucherschutz des Saarlandes hat im Jahr 2018 5 Messstellen zur Überwachung von Wasserstand und -qualität im Warndt ausbauen lassen. Die Messstellen A1/A2 in St. Nikolaus wurden bis auf 120 bzw. 275 m Tiefe, B1/B2 in Lauterbach auf 149 bzw. 313 m und C1 in Großrosseln-Velsen auf 43 m Tiefe niedergebracht, wobei die tiefere Messstelle im Bereich des obersten abgebauten Flözes, die flachere dagegen an der Aquiferbasis verfiltert wurde (Abbildung 5), so dass am selben Standort ein direkter Vergleich von Druckverhältnissen und Grundwasserchemie in beiden Stockwerken möglich ist. Der Messstellenausbau erfolgte jeweils in einer eigenen Bohrung, um Probleme mit eventuellen Umläufigkeiten zu vermeiden.

Die Messstelle C1 liegt im Schachtpfeiler der Grube Velsen, eine parallele Bohrung in ein abgeworfenes Streb war daher nicht möglich. Wegen der Lage an der Staatsgrenze, die gleichzeitig Konzessionsgrenze war, und da der der Abbau auf französischer Seite in mehreren Flözen bis exakt an diese Grenze geführt wurde, ist wegen der damit verbundenen Senkungskonzentration und der daraus resultierenden stärkeren mechanischen Beanspruchung des Gebirges mit einer erhöhten Durchlässigkeit des Karbongebirges und so auch mit der Möglichkeit des Aufstiegs von Grubenwasser zu rechnen. Mit ihrer Lage in unmittelbarer Nähe zum geplanten Auslauf im Gustavschacht, wo bei Abschluss des Anstiegsprozesses das niedrigste Druckpotenzial im hangenden Grundwasserleiter herrschen wird, soll die Messstelle frühzeitig Beeinflussungen durch eventuell in den Grundwasserleiter aufsteigendes Grubenwasser anzeigen.



75

Abbildung 5: Prinzip der Überwachung der Druckgradienten in den Doppelmessstellen A1/A2 und B1/B2. Durch die Einwirkung des Bergbaus ist die abdichtende Wirkung der Grenzletten und des Rotliegenden gestört und durch das entstandene System von Rissen strömt Grundwasser aus dem hangenden Grundwasserleiter in Grubengebäude ein (Bilder A und C), aber nur bei aufwärts gerichtetem Druckgradienten (Bild B) kann Wasser aus dem Grubensystem in den Buntsandstein aufdringen.

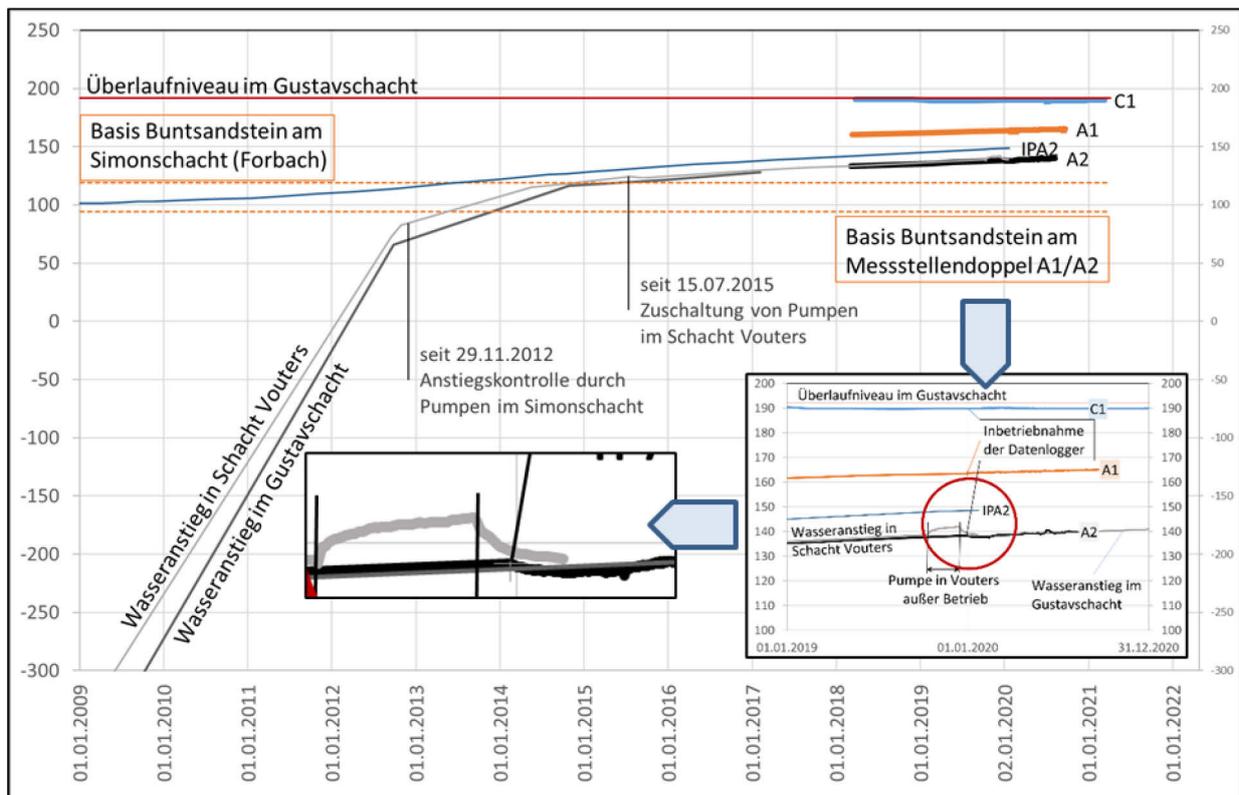


Abbildung 6: Ergebnisse der Überwachung am Beispiel der neuen saarländischen Messstellen für den Bereich Mitte-West (der frühe Anstiegsverlauf für die Schächte ist nur grob skizziert) mit Ausschnittsvergrößerungen.

76

Ende 2019 wurden die Messstellen mit Datenloggern ausgerüstet. Die bisherigen Ergebnisse bestätigen die Druckdifferenz zwischen beiden Stockwerken (Abbildung 6). So beträgt die Druckdifferenz zwischen den Messstellen A1 und A2 im Mittel 25,32 m, bei den Messstellen B1 und B2 6,71 m. Gleichzeitig zeigen die Ganglinien eine sehr gute Anbindung der jeweiligen Messstellen an das jeweilige System an. So fällt z. B. die Inbetriebnahme des Datenloggers in der Messstelle A2 in die Phase der Absenkung nach einer Wiederinbetriebnahme der Pumpen in Schacht Vouters und zeichnet die Absenkkurve in Schacht Vouters mit einem leichten Versatz im Wasserstand von etwa 1 m zeitgleich nach und liegt damit exakt auf dem Niveau der Anstiegskurve im Gustavschacht (siehe Insets der Abbildung 6), in dem der Wasserstand allerdings nur einmal jährlich gemessen wird.

Der in Abbildung 6 zu erkennende Unterschied von etwa 15 m zwischen den Niveaus in den Messstellen A1 auf der saarländischen und IPA2 auf der französischen Seite bei annähernd parallelem Verlauf erklärt sich durch die unterschiedliche Lage im Absenktrichter. Die Messstelle IPA2 befindet sich deutlich näher zum Zentrum des Absenktrichters 3 der Abbildung 3 und zeigt damit ein vergleichsweise niedrigeres Druckpotenzial an. Dementsprechend liegt die Anstiegsgeschwindigkeit mit 1,2 cm/Tag in der Messstelle IPA2 auch leicht über der in der Messstelle A1 mit 0,99 cm/Tag. Diese Differenzen werden sich allerdings wie auch die Anstiegsgeschwindigkeiten bei fortschreitendem Anstiegsprozess weiter angleichen.

Inwieweit auch bei Erreichen der Höhe des freien Auslaufs die zur Verhinderung des Aufstiegs von Grubenwasser in den Grundwasserleiter erforderlichen Druckdifferenzen erhalten bleiben, lässt sich nicht mit ausreichender Sicherheit vorhersagen. Zudem kann durch die in einem gebrächen und stark durchbauten Gebirge langfristig durchaus zu erwartende Verschlechterung der Durchlässigkeit von wesentlichen hydraulischen Verbindungen zu Erhöhungen des Druckspiegels im Grubengebäude führen. Daher wird die Grundwasserbeobachtung wohl auch nach der Beendigung des eigentlichen Anstiegsprozesses langfristig erforderlich bleiben.

Literaturverzeichnis

BRGM (2011): Le Bassin Houiller Lorrain, GIAM 2014, http://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/IMG/zip/PdF_cle0f2f52.zip

BRGM (2014): Le Bassin Houiller Lorrain, GIAM 2014, Surveillance, http://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/IMG/zip/GIAM_2014_1120_cle538d75.zip

BRGM (2017): Bassin Houiller Lorrain, GIAM 2017 – Surveillance, http://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/IMG/zip/giam_02_10_2017_forbach.zip

CDF (2003): Histoire du charbon lorrain, <https://web.archive.org/web/20081118163401/>

http://www.charbonnagesdefrance.fr/dArticle.php?id_rubrique=166&id_article=648

CDF (2007): Charbonnage de France, GIATM 22.1.2007, État d'avancement des travaux, http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/zip/giatm22-01-2007_cle2a831b.zip

ELS (Erdbaulaboratorium Saar, 2016): Ansteigenlassen des Grubenwasserspiegels auf -320 mNN in den Wasserprovinzen Reden und Duhamel – Hydrogeologische Bewertung einer möglichen Beeinflussung des oberflächennahen Grundwassers, Gutachten im Auftrag der RAG Aktiengesellschaft, http://www.bid.rag.de/bid/PdFs/SA/GWA_Reden_Duhamel/2_ELS_Hydrogeologische%20Bewertung/3222_GA_1_2017-07-28_Grubenwasseranstieg-320mNN.pdf, abgerufen am 10.4.2021

METZ, M. & BABOT, Y. (2003): Après-mines 2003, 5-7 Février 2003, Nancy, Colloque International Après-mine 2003, Feb 2003, Nancy, France.

Erfahrungen bei der modelltechnischen Begleitung der Flutung der ehemaligen Urangrube Königstein

Thomas Metschies

Wismut GmbH Chemnitz

Zusammenfassung

Die Flutung eines untertägigen Laugungsbergwerkes in einem regionalen Grundwasserleitersystem stellt hinsichtlich der gewählten Sanierungslösung besondere Anforderungen in Hinblick auf die Minimierung der Umweltauswirkungen. Damit sind für die technische Planung sowie die Genehmigung der notwendigen Maßnahmen detaillierte Prognosen der regionalen hydraulischen Entwicklung, der Schadstofffreisetzung sowie des Schadstofftransportes notwendig.

Am Beispiel des ehemaligen Uranbergwerkes in Königstein (Sachsen) werden das grundsätzliche Modellkonzept, bestehend aus 3 miteinander gekoppelten Bausteinen, sowie die Erfahrungen bei Aufbau, Parametrisierung, Kalibrierung und Verifizierung dieser Modelle dargestellt.

1. Historische Entwicklung

Anfang der 1960er Jahre wurden im Bereich der mit kreidezeitlichen Sandsteinen gefüllten Paläobecken zwischen Pirna und Bad Schandau im Gebiet der Sächsischen Schweiz Uranvererzungen im Rahmen eines umfangreichen Erkundungsprogrammes nachgewiesen. Dies führte zur Entwicklung eines Bergbauprojektes, das mit der Errichtung der ersten Schachtanlagen sowie untertägigen Ausrichtungsstrecken ab 1963 seinen Anfang nahm. Damit waren die Voraussetzungen für eine Urangewinnung ab 1967 in der Urangrube Königstein gegeben. Die in den Sandsteinschichten nachgewiesenen Erzgehalte betragen im Mittel ca. 600 ppm. Zu Beginn erfolgte der Abbau der vererzten Bereiche fast ausschließlich im Kammerpfeilerbau. Gegen Ende der 1970er Jahre verschlechterten sich die Abbaubedingungen zunehmend, während auch die Erzgehalte deutlich zurückgingen. Das führte zur Überlegung, den Abbau ausschließlich durch eine untertägige chemische Laugung vorzunehmen, die hier bereits durch Feldexperimente erprobt war. Die vollständige Umstellung auf die chemische Gewinnung erfolgte 1984, wobei Abfallschwefelsäure aus der Sprengstoffproduktion zum Einsatz kam. Technologisch waren dabei die unterschiedlichen Filtrationseigenschaften der vererzten Bereiche zu berücksichtigen. In Gesteinen mit hohen Durchlässigkeiten wie dem Quadersandstein erfolgte eine Infiltrationslaugung, wobei die Laugungslösung vom Hangenden zum Liegenden die vererzten Bereiche durchsickerte. Weniger durchlässige Gesteinsbereiche mussten vor der Laugung magaziniert werden, wozu ein Kompensationshohlraum aufgefahren wurde und mit der anschließenden Sprengung die Blockabschnitte so aufgelockert wurden, dass auch hier eine Laugung möglich wurde. Die untertägige Laugung wurde als Abbauverfahren bis zur Einstellung der Produktion Anfang 1990 aufrechterhalten [1].

2. Standortbedingungen

Die Grube Königstein befindet sich in unmittelbarer Nähe zum Nationalpark Sächsische Schweiz. Die zentralen Betriebsbereiche, einschließlich einer Halde auf der Bergematerial, Aufbereitungs- sowie Wasserbehandlungsrückstände aufgehaldet wurden bzw. im Rahmen der Sanierung auch weiterhin werden, liegen in der Sichtweite der Festung Königstein, womit sich u. a. ein entsprechendes verstärktes öffentliches Interesse an den Sanierungsarbeiten in der Grube sowie auf den Betriebsflächen begründet.

Die Entfernung zur Elbe als dem zentralen hydraulischen Entlastungsbereich im Elbtal beträgt gerade einmal 600 m von der nordöstlichsten Ausdehnung der Grubenkontur, wobei die Grubenbaue hier ca. 100 m unter dem Niveau der Elbe liegen.

Aus hydrogeologischer Sicht erfolgte die Auffahrung der Grube im untersten von in diesem Bereich ausgehaltenen 4 Grundwasserhorizonten, die jeweils durch Grundwasserstauer getrennt sind. Das Schichteinfallen ist grundsätzlich von Südwesten nach Nordosten gerichtet, was auch die Grundwasserströmung in den südlich der Elbe gelegenen Bereichen des so genannten Pirnaer Beckens bestimmt. Die Speisung der GWL (Grundwasserleiter/Aquifere) vollzieht sich vorwiegend in den jeweiligen Ausstrichbereichen südlich der Grube, während die Entlastung im Bereich des Elbtales nördlich der Grube Königstein erfolgt. Natürliche hydraulische Verbindungen zwischen den einzelnen Grundwasserleitern bestehen im Wesentlichen in den Ausstrichbereichen im Süden sowie an tektonischen Störungszonen. Daneben sind durch die umfangreichen Erkundungsarbeiten in diesem Bereich zumindest in den Anfangsjahren teilweise unzureichend verwahrte Bohrungen zusätzliche Wasserwegsamkeiten zwischen den einzelnen Grundwasserleitern gegeben. Während des Rückzuges aus der Grube wurden sämtliche vertikalen Verbindungen der Grube zur Tagesoberfläche wie Schächte und Wetterbohrlöcher sowie im Stauer zwischen den liegenden Grundwasserhorizonten verwahrt. Dennoch konnte an einem der ehemaligen Wetterbohrlöcher trotz wiederholter Abdichtungsversuche eine Wasserwegsamkeit nicht vollständig unterbunden werden.

3. Sanierungsherausforderung

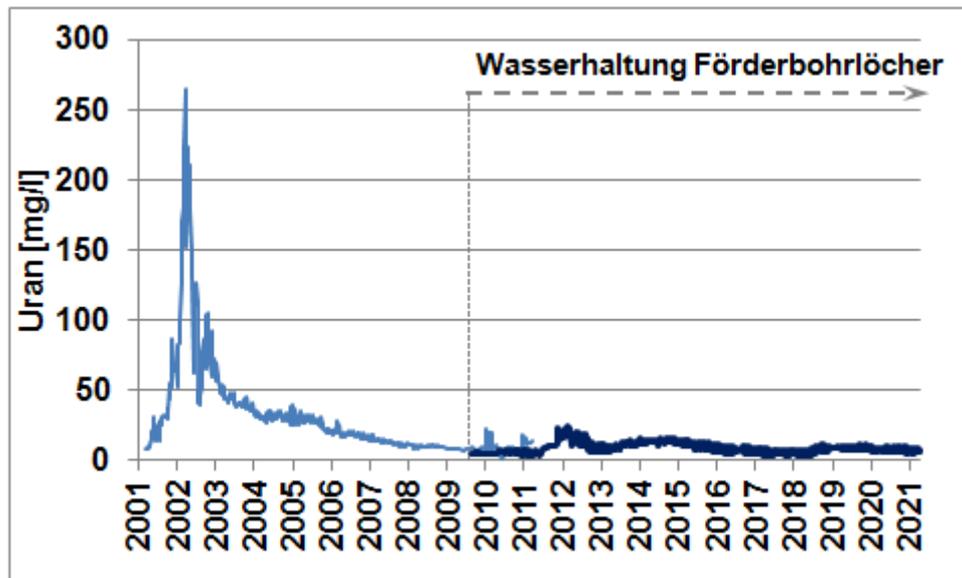
Durch die in der Grube praktizierte untertägige Laugung ergeben sich besondere Herausforderungen an die Sanierung. Untersuchungen der Porenwässer in den gebauten Sandsteinbereichen ergaben geringe pH-Werte sowie hohe Salz- und Metallkonzentrationen. Hierbei sind insbesondere die Konzentrationen von SO_4 , U und Zn kritisch (Tabelle 1).

Tabelle 1: Ausgewählte Stoffgehalte der Porenwässer.

Parameter	Einheit	Wertespanne	Max.
pH		0.9 – 2.5	
Redoxpotential	mV	600 – 800	
Gesamtmineralisation	g/l	3 – 25	335
Elektrische Leitfähigkeit	mS/cm	8 – 34	98
SO_4^{2-}	g/l	ca. 10	170
U	mg/l	50 – 500	7
Zn	mg/l	50 – 400	3
Nitroaromaten	$\mu\text{g/l}$	2 – 230	-



Neben den Porenwässern ist zusätzliches Stoffpotential in Sekundärmineralen sowohl in der Sandsteinmatrix als auch in offenen Strecken gebunden, das bei der Flutung in Kontakt mit Wasser durch Lösung mobilisiert und ausgewaschen wird. Dies führt in erster Linie zu dem aus anderen Flutungsprojekten ebenfalls bekannten hohen initialen Stoffaustrag („first flush“), wie er bei der Flutung einzelner Grubenbereiche der Grube Königstein beobachtet werden konnte. Die Abbildung 2 zeigt beispielhaft für Uran den beobachteten Konzentrationsverlauf im gefassten Flutungswasser.



80 **Abbildung 1:** Konzentrationsverlauf von Uran im Flutungswasser. Uran;

Mit der Stofffreisetzung im Flutungsraum durch das Wiederaufgehen des Wasserspiegels in der Grube besteht die Gefahr einer Migration der belasteten Grubenwässer in die umliegenden GWL. Durch die Wasserhaltung während der Bergbautätigkeit wurde der Abstrom belasteter Wässer hydraulisch verhindert.

Im Rahmen des Sanierungskonzeptes wurde vor Beginn der Flutung in den Abstrombereichen in das westliche und nördliche Umfeld der Grube ein insgesamt 6 km langes, den Flutungsraum umgreifendes Streckensystem errichtet, das von den Grubenauffahrungen durch einen sogenannten Sandsteinpfeiler aus unverritztem Sandstein getrennt ist. Ein eingerichtetes Drainagesystem stellt sicher, dass der 4. GWL, in dem auch die Grube aufgefahren war, in diesem Bereich vollständig entwässert werden kann. Verbindende Grubenbau wurden durch entsprechende Dammbauwerke hydraulisch dicht gestaltet. Diese sogenannten Kontrollstrecken waren an einen ehemaligen Förderschacht angebunden, über den das zufließende Grubenwasser ausgefördert werden konnte. Derart wurde 2001 parallel zum schrittweisen Rückzug aus den höher gelegenen südlichen Grubenbereichen mit der schrittweisen Flutung begonnen (Abbildung 2). Mit Abschluss der untertägigen Rückzugsarbeiten wurde auch der Schachtbereich verwahrt, so dass nach Errichtung von 2 Förderbohrlöchern auf das Kontrollstreckensystem und deren Ausrüstung mit Unterwassermotorpumpen eine Umstellung der Wasserhaltung ab 2009 erfolgte. Dazu wurde das Kontrollstreckensystem geflutet, wobei das Potential unter dem Flutungsstand der Grube gehalten wird. Hydraulisch konnte somit bisher sichergestellt werden, dass auch weiterhin kein Abstrom in den umliegenden 4. GWL erfolgte.

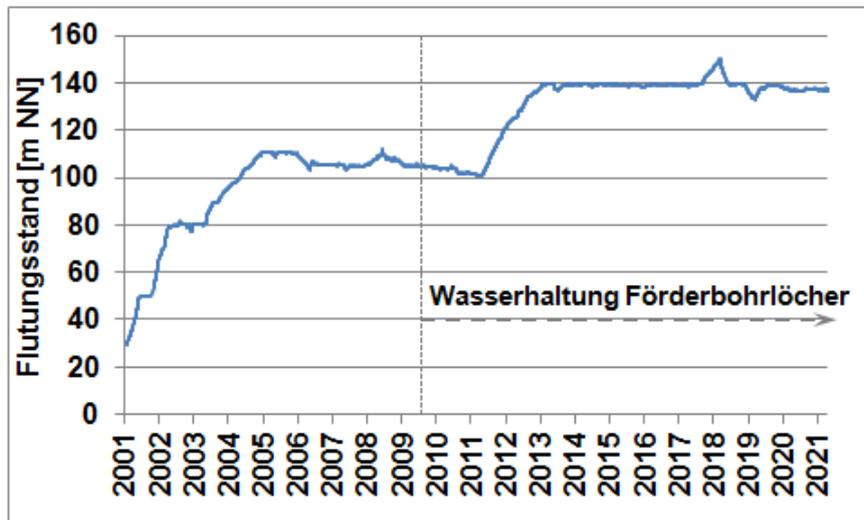


Abbildung 2: Einstau Grube Königstein während der Flutung seit 2001.

Um Übertritte in den hangenden 3. GWL zu verhindern, wurde die Flutung des sogenannten Teilbereiches I 2013 mit dem Erreichen eines Flutungsniveaus von 140 m NN abgeschlossen. Somit ist aufgrund der sich einstellenden Potentialdifferenz zwischen Grube und dem hangenden 3. GWL ein Übertritt von Flutungswässern über entsprechende hydraulische Verbindungen noch zu vermeiden.

Die angestrebte finale Flutung mit der Herstellung technisch unbeeinflusster hydraulischer Strömungsbedingungen in den Grundwasserhorizonten erfordert jedoch einen weiteren Anstieg des Flutungsniveaus um ca. 50 m. Damit verbunden ist eine Umkehr des Potentialgradienten in den nördlichen Bereichen der Grube, womit ein Abstrom in das Hangende zu erwarten ist. Eine signifikante stoffliche Beeinflussung des Grundwassers im Hangenden ist jedoch aus wasserrechtlicher Sicht soweit möglich zu vermeiden. Daraus ergeben sich wesentliche Rahmenbedingungen für die Flutung. Einerseits sind die übertretenden Stofflasten deutlich zu begrenzen sowie andererseits können auch vorhandene Rückhaltemechanismen im direkten Abstrombereich für die Begrenzung des Einflusses genutzt werden. Für eine Optimierung des Flutungsprozesses ergeben sich daraus Anforderungen an die Prognosen der hydraulischen und stofflichen Auswirkung der Flutungsschritte, die idealerweise durch die Anwendung entsprechender numerischer Modelle erfüllt werden können.

81

4. Modellkonzept

4.1. Übersicht

Der gesamte Prozess der Ausarbeitung der Sanierungskonzeption sowie der bereits erfolgten Flutungsschritte wurde daher genutzt, um ein Modellkonzept zu erstellen und kontinuierlich weiter zu entwickeln, das auf drei wesentlichen Elementen beruht:

1. Regionales Strömungsmodell unter Nutzung der kommerziell verfügbaren Modellsoftware SPRING,
2. Boxmodell der Grubenflutung FLOODING unter Nutzung von PhreeqC,
3. 1-D-Abstrommodelle in den direkt beeinflussten GWL im Abstrombereich der Grube zur Beschreibung des reaktiven Transportes auf der Grundlage von PhreeqC.

Grundlage für die hydraulischen Modellbetrachtungen ist ein umfassendes hydrogeologisches Systemmodell, das auf der Grundlage der Erkundungs- und Monitoringdaten aus der Phase des aktiven Bergbaus sowie der nachfolgenden Sanierung aufgestellt wurde und auflaufend fortgeschrieben wird. Wesentliche Aspekte zur Vertiefung des Prozessverständnisses sowie einer belastbareren Parametrisierung wurden durch Labor- und Felduntersuchungen unteretzt.

4.2. Regionales Strömungsmodell

Seit über 20 Jahren wird das regionale Strömungsmodell, das die hydraulischen Bedingungen im ca. 350 km² umfassenden Umfeld der Grube beschreibt, betrieben. Hierbei sind die 4 Grundwasserhorizonte einschließlich der stauenden Schichten mit insgesamt 19 Modellschichten in einem ca. 460 000 Modellknoten sowie ca. 530 000 Elemente umfassenden FEM-Modell abgebildet. Dabei sind jeweils der 3. und 4. GWL sowie der beide trennende Stauer in jeweils 5 Schichten detaillierter aufgelöst. Während der Modellerstellung wurde der gesamte Zeitraum des Grubenbetriebes seit der Auffahrung im Modell mit abgebildet. Im Rahmen des behördlichen Genehmigungsverfahrens der Flutung der Grube ist eine jährliche Fortschreibung und Validierung des Modelles gefordert. Damit ist neben dem Zeitraum des Grubenbetriebes nunmehr auch die Flutungsphase auflaufend im Modell mit einem einheitlichen Parametersatz beschrieben.

Ein wichtiges Element für eine konsistente Beschreibung des Flutungsverlaufes in der Grube und dessen Wechselwirkung mit den GWL im Grubenumfeld ist die für dieses Strömungsmodell speziell in das Programmsystem SPRING eingeführte Grubenrandbedingung. Dabei werden die die Grube in den verschiedenen Modellschichten repräsentierenden Modellknoten zu einem Bilanzbereich zusammengefasst in dem ein konstantes Druckpotential auftritt. Für solche Bilanzbereiche erfolgt für jeden modellierten Zeitschritt die Berechnung der Wasserbilanz. Aus markscheiderischen Angaben zu Grubenhohlräumen und Gesteinsvolumen mit einer entsprechenden einstaubaren Porosität wurde eine höhenbezogene Einstauvolumenverteilung ermittelt. Entsprechend der innerhalb des Zeitschrittes bestimmten Differenz zwischen den Zu- und Abflüssen wird auf der Grundlage der so ermittelten Speicheränderungen und der o.g. Einstauvolumen-Einstauhöhen-Beziehung eine Zu- bzw. Abnahme des Flutungsstandes im Flutungsraum bestimmt. Entsprechend wird im Modell für den nächsten Zeitschritt das Potential in den Grubenknoten einheitlich neu vorgegeben. Dadurch kann für einzelne Grubenbereiche innerhalb des instationären Modellaufes die Einstauentwicklung beschrieben werden. Im regionalen Strömungsmodell werden aufgrund der jeweils ausgeglichenen Wasserstände sowohl der Flutungsraum in der Grube als auch die Kontrollstrecke als entsprechende Bilanzbereiche betrachtet. Die Berücksichtigung von technischen Wasseraufgaben sowie -entnahmen aus diesen Bilanzräumen wird dabei als Randbedingung 2. Art entsprechend der gemessenen Durchflüsse vorgegeben und damit die Einstauentwicklung in diesen 2 Teilsystemen im Rahmen der Modellanpassung betrachtet. Die Modellparametrisierung kann damit auf der Grundlage des Vergleiches der gemessenen und modellierten Einstauentwicklung in diesen Bilanzbereichen erfolgen. Daneben stellen der Vergleich der Wasserstandsentwicklung in den im regionalen Strömungsfeld befindlichen Grundwasserbeschaffenheitsmessstellen sowie der Grubenwasserbilanz wichtige Kriterien für die Modellanpassung dar. Dabei sind für den Vergleich des Einstauverlaufes sowohl die jeweiligen Abweichungen der Wasserstände zwischen Messung und Modell als auch der sich während der Absenkungsphase (Auffahrung der Grube) sowie des Wiederanstieges (Flutung der Grube) ergebende Anstieg der Kurvenverläufe jeweils wichtige Kriterien.

Dieses Modellkonzept erlaubt damit Prognosen für definierte Fahrweisen der finalen Flutung der Grube wobei die Steuerung des Flutungsverlaufes durch eine entsprechende Variation der Einspeisung sowie der Entnahme von Wässern im Flutungsraum bzw. Kontrollstreckensystem beschrieben werden können.

Das regionale Strömungsmodell liefert derart sowohl für die Zeiträume der Epignose wie auch der Prognose szenarienspezifische Mengenentwicklungen der Wasserströme an der Grubenkontur, die als Randbedingung in das Grubenmodell FLOODING eingehen. Das abgeleitete Strömungsfeld im Abstrom der Grube sowie die entsprechenden Mengenbilanzen fließen darüber hinaus in die hydraulische Beschreibung der reaktiven 1D-Abstrommodelle ein.

4.3. Grubenmodell FLOODING

Die Beschreibung des Stoffaustrages aus der gefluteten Grube erfolgt mit einem Boxmodell, das die grundsätzliche Geometrie der Grube berücksichtigt. Neben den im Grundgebirge aufgefahrenen Grundsohlen werden auch die im 4. GWL sowie in den angrenzenden Stauerbereichen befindlichen Abbauhohlräume einschließlich der Magazine und Versatzbereiche einbezogen. Als weitere Elemente werden der Sandsteinpfeiler zwischen der gefluteten Grube und Kontrollstrecke sowie die Kontrollstrecke selbst als Mischreaktor betrachtet. Während die Grundsohlen nur die aufgefahrenen Grubenhohlräume umfassen, werden die die Abbauhohlräume beschreibenden Boxen durch einen Grubenhohlraumanteil sowie Porenraumanteil repräsentiert. Beide Anteile sind jeweils über einen Austauschterm hydraulisch verbunden, während die Durchströmung durch die Grube durch die entsprechende Verknüpfung der jeweiligen offenen Grubenhohlanteile erfolgt. Der Übertritt aus der Grube in die Kontrollstrecke erfolgt höhendifferenziert über Pfeilerboxen, die nur über ein Porenvolumen verfügen.

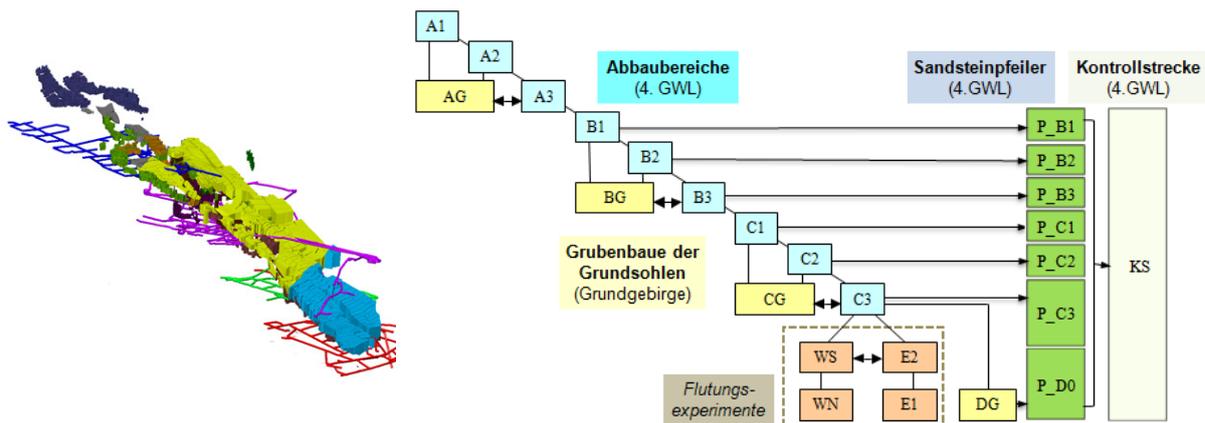


Abbildung 3: Grubenvisualisierung mit Grundsohlenbereichen im Festgestein und den hangenden Abbauhohlräumen (links) im Vergleich zur abgeleiteten Modellstruktur.

Grundlage für die stoffliche Beschreibung des Modells bilden die Ergebnisse der zwischen 1995 und 1999 durchgeführten Flutungsexperimente, bei denen isolierte Grubenbereiche geflutet und die Wasserbilanzen sowie die Austragsentwicklung auf der Grundlage eines umfassenden Monitoring- und erweiterten Untersuchungsprogrammes betrachtet wurden. Damit ist ein Grundparametersatz abgeleitet worden der auf alle die Grube repräsentierenden Boxen entsprechend übertragen wurde. Eine Anpassung des Datensatzes wurde während der weiteren Nachrechnung des Flutungsverlaufes nur auf der Grundlage spezifischer Bedingungen in den einzelnen Grubenbereichen vorgenommen. So wurden z. B. die Stoffgehalte in Modellboxen, die überwiegend konventionell abgebaute Grubenbereiche repräsentieren, entsprechend angepasst, da die Versatzbereiche hinsichtlich einer Reihe von Parametern (z. B. Ca) eine abweichende Charakteristik aufweisen. Für Bereiche, in denen vor Beginn der Flutung Immobilisierungsmaßnahmen unter Aufgabe einer BaCl_2 -Lösung realisiert wurden, wurde das mobilisierbare Stoffpotential dagegen verringert.

Zentrales Kriterium für die Modellanpassung ist die Konzentrationsentwicklung in dem aus der Kontrollstrecke ausgeförderten Flutungswasser (Abbildung 4). Nur hier liegen entsprechend interpretierbare Monitoringmessungen vor, die eine integrale Modellanpassung zulassen. Die darüber hinaus im Grubenraum in unterschiedlichen Bereichen, wie Magazinen, offenen Grubenhohlräumen oder Versatzbereichen, verfilterten Messstellen dokumentieren lokale Konzentrationsverläufe, die für das durch die Modellboxen jeweils repräsentierte deutlich größere Grubenvolumen nur bedingt als repräsentativ anzusehen sind. Damit kann mit diesem Modellansatz für einzelne Punkte in der Grube keine belastbare Prognose der Konzentrationsentwicklung erfolgen. Vielmehr werden mittlere Stoffgehalte im Flutungswasser beschrieben, die im Gesamtsystem betrachtet eher repräsentativ für die gut durchströmten und damit den generellen Stoffaustrag dominierenden Grubenanteile sind. Für die im Rahmen der stofflichen Beeinflussung der umliegenden GWL relevanten Frachtausträge sind die Modellergebnisse damit als hinreichend belastbar zu betrachten, wie sich an der modelltechnischen Abbildung der Konzentration in den aus der Kontrollstrecke gehobenen Wässern im Vergleich zu den Messwerten zeigt. Dennoch sind bei der Bewertung der Modellergebnisse die damit modellbedingt gegebenen Unsicherheiten mit zu betrachten.

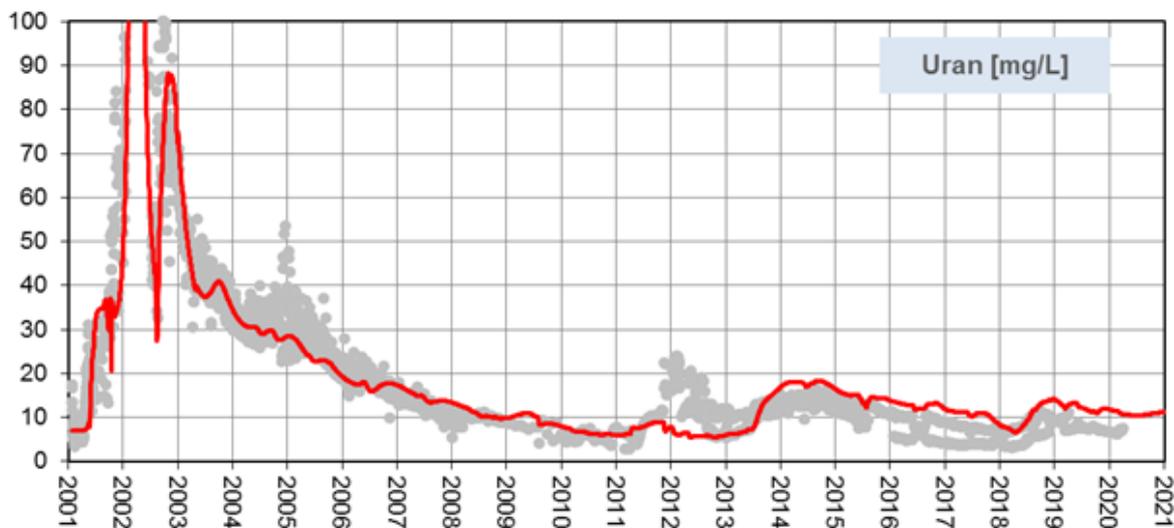


Abbildung 4: Vergleich der gemessenen und modellierten Konzentrationsentwicklung im aus der Kontrollstrecke geförderten Flutungswasser beispielhaft für Uran.

4.4. Reaktives 1D-Abstrommodell

Sowohl das im Strömungsmodell beschriebene regionale Strömungsfeld mit Fließrichtungen, Abstandsgeschwindigkeiten und Wassermengen als auch die mit dem Grubenmodell ermittelten Stofffrachten an den Übertrittsstellen in die umliegenden GWL sind wesentliche Modellrandbedingungen für die reaktiven Abstrommodelle, die jeweils den Abstrompfad im 3. und im 4. GWL zwischen der Grube (Quelle) und der Elbe (Senke) beschreiben. Der Modellansatz beruht auf der in PhreeqC umgesetzten Transportoption, mit deren Hilfe ein 1D-reaktives Transportmodell aufgebaut wurde. Für den 3. GWL umfasst dieses Modell 74 Modellzellen, die den ca. 1 200 m langen Fließweg zwischen den potentiellen Übertrittsstellen aus der Grube zur Elbe beschreiben.

Eine besondere Herausforderung ergibt sich bei der stofflichen Parametrisierung, da es im Abstrombereich mit 2 umfassend untersuchten Bohrkernen nur eine begrenzte Anzahl von Aufschlüssen zur Ableitung der geochemischen und mineralogischen Stoffgehalten gibt. Zusammen mit weiteren Ergebnissen punktueller Untersuchungen aus den gleichen Grundwasserhorizonten ergeben sich aus der Datenanalyse Spannweiten der reaktiven Mineralgehalte über mehrere Größenordnungen (Tabelle 2).

Tabelle 2: Spannweiten reaktiver Mineralgehalte aus Gesteinsuntersuchungen für den Abstrombereich im 3. GWL.

Mineral	Einheit	min.	max.	Mittelwert
Karbonat-C (Kalzit)	M%	< 0,005	0,03	0,01
Disulphid-S (Pyrit)	M%	< 0,01	2,6	0,4
nicht sulfidische Eisenverbindungen	M%	0,028	0,65	0,19
Pot. Kationen- Austauschkapazität	meq/100g	< 0,02	3,4	1,5

Neben diesen Parameterspannen stellt sich zudem die Frage nach dem reaktiven Anteil der in den Laboranalysen durch die Probenaufschlüsse zumeist vollständig bestimmten Stoffgehalte. Aus großräumigen Feldversuchen sowie den vielfältigen Zeitreihen von Wasserstandsmessungen kann abgeleitet werden, dass der zwischen 80 und 100 m mächtige Grundwasserhorizont zwar in hydraulischer Sicht als homogener Körper angesehen werden kann, sich aber dennoch lokale Fließwege ausbilden, die damit auch für den reaktiven Transport prägend sind. Das zeigt sich auch an den Bohrkernen, die sich hinsichtlich Färbung - oxidierte bzw. reduzierte Bereiche -, der Korngröße, Maserung oder auch Klüftigkeit über die Teufe vielfach ändern können. Somit ist nur ein Teil der für den Stoffrückhalt relevanten reaktiven Mineralgehalte tatsächlich für die entsprechenden geochemischen Reaktionen verfügbar. Trotz vertiefender Untersuchungen in Batch- und Säulenversuchen stellen die im Modell betrachteten Stoffgehalte nur Schätzungen dar, die die erzielten Modellergebnisse durchaus nachhaltig prägen. Erst ein Vergleich mit im Feld beobachteten Bedingungen erlaubt eine belastbare Abschätzung der letzten Endes tatsächlich wirksamen reaktiven Stoffanteile. Diese ergeben sich allerdings erst induziert durch weitere Flutungsschritte zu deren Genehmigung jedoch nachvollziehbaren Prognose vorausgesetzt werden. Es bleibt daher konzeptionell nur die Möglichkeit, die sich einstellenden Bedingungen in Form von Szenarien zu betrachten. Dabei besteht aus den Laborversuchen zum Kontakt der Flutungswässer mit dem Sandsteinmaterial, den entsprechenden theoretischen Überlegungen sowie nicht zuletzt den Modellbetrachtungen ein vertieftes Verständnis für die zu erwartenden Prozesse und damit die relevanten Mineral- und Stoffgehalte. Entsprechend erfolgt die konservative Annahme mittlerer Stoffgehalte, die dann in den zu betrachtenden Szenarien jeweils anteilig als reaktiv betrachtet werden. So lassen sich z. B. Szenarien mit zwischen 0,1 % und 10 % reaktiven Stoffanteil betrachten und als Grundlage für die weiteren Flutungsschritte verwenden.

5. Ergebnisse

Mit dem vorgestellten Modellkonzept wurde die seit 2001 erfolgte Flutung der Grube Königstein modelltechnisch begleitet. In den jeweiligen Flutungsschritten waren dabei einzelne Prozesse im besonderen Fokus der Anpassung der einzelnen Modelle. So konnte der Sandsteinpfeiler zwischen der Grube und Kontrollstrecke abschnittsweise angepasst werden, solange die Wasserhaltung untertägig in der offenen Kontrollstrecke erfolgte. Mit dem Betrieb der Förderbohrlöcher bleibt nunmehr dieser Parametersatz unverändert, während sich der Fokus mehr auf die Wechselwirkungen mit dem Umfeld verschiebt. Dabei ist die Potentialentwicklung im unmittelbar an die Grube angrenzenden hangenden 3. GWL von besonderer Bedeutung, da der Potentialgradient bezogen auf die Grube wesentlich für die Übertrittsmengen an Grubenwasser und damit eine Stoffausbreitung über die Grubenkontur hinaus ist. Nach der großräumigen und langzeitigen Absenkung des Wasserspiegels in den an die Grube angrenzenden GWL durch den Grubenbetrieb erfolgt der Wiederanstieg im ungespannten 3. GWL vergleichsweise langsam, so dass sich hinsichtlich des mengenmäßigen Zustands stationäre Bedingungen erst über Jahrzehnte wieder einstellen werden. Das lässt sich mit dem regionalen Strömungsmodell analog zu den Beobachtungsdaten gut nachvollziehen. Die entsprechenden Konsequenzen für den Sanierungsverlauf mit einer sich daraus ergebenden zeitlichen Streckung der Flutung sind somit auch in den Prognosen gut abbildbar.

Eine wesentliche Erkenntnis bei der Nachrechnung des Flutungsverlaufes stellt die zeitliche Veränderung der Speicherkapazität des Flutungsraumes dar. Die mit dem Sandstein bestehende Matrixporosität zeichnet sich durch einen schnell und einen langsam einstaubaren Porenanteil aus. Diese zeitliche Dynamik kann in den Modellen nicht ohne weiteres beschrieben werden. Insbesondere bei Wiederabsenkungen des Flutungsspiegels ist dies bedeutsam und erfordert eine entsprechende Anpassung der Speicherparameter. Dabei ist die jeweilige Größenordnung auch von der Geschwindigkeit der Änderung des Einstauniveaus abhängig.

Für die Beschreibung des integralen Stoffaustretes hat sich ein vereinfachtes Boxmodell unter Verwendung von PhreeqC als geeignet erwiesen. Damit kann die Zusammensetzung des gefassten Flutungswassers in seiner zeitlichen Veränderung gut beschrieben werden. Dabei ist die Wahl eines einheitlichen Parametersatzes basierend auf den Flutungsexperimenten auf einer vergleichbaren Skala geeignet, um eine Beschreibung noch nicht gefluteter Bereiche vorzunehmen. Anpassungen wurden dabei erst erforderlich, wenn sich die bestehenden Abbaubedingungen in den jeweils neu zu flutenden Bereichen grundlegend veränderten. Dies konnte damit begründet und nachvollziehbar erfolgen und erlaubte auch die noch nicht gefluteten Bereiche entsprechend anzupassen.

Für die Beschreibung des reaktiven Transportes von Flutungswasser entlang von Strompfaden im Abstrom der Grube eignet sich konzeptionell ein 1D-Ansatz unter den gegebenen Bedingungen. Dabei lassen sich in Effektszenarien das geochemische Systemverständnis nachvollziehbar erarbeiten. Die Überlagerung der geochemischen Effekte durch komplexe Strömungsprozesse ist in diesem Modellstadium noch überschaubar. 1D-Stofftransportmodelle schließen damit die Lücke zwischen hydrochemischen batch-Modellen aus der Prozessevaluierung kleinmaßstäblicher Laborversuche und der großmaßstäblichen Reaktions- und Stoffverlagerungsdynamik im Maßstab eines Grundwasserleiters.

Unschärfen in diesem vereinfachten Ansatz werden im Wesentlichen durch die Unsicherheiten bei der geochemischen und mineralogischen Parametrisierung geprägt.

Für eine Validierung eines solchen konzeptionellen Modelles und die Berechnung belastbarer Prognosen sind Messwerte auf der entsprechend mit dem Modell beschriebenen räumlichen Skala erforderlich. Erst mit einem derart angemessenen hydrochemischen Daten validierten Modellkonzept erscheint eine Erhöhung der Komplexität des Modellansatzes von 1D auf bis zu 3D sinnvoll.



6. Ausblick

Perspektivisch ist die vollständige Flutung der Grube Königstein vorgesehen. Ohne technische Maßnahmen soll sich die Grube damit in das natürliche regionale Strömungsregime einpassen und der mengenmäßig gute Zustand entsprechend EU-WRRRL wiederhergestellt werden. Die Vermeidung signifikanter stofflicher Veränderungen in dem Wasserkörper, der die Grube sowie die Lagerstätte mit enthält, ist dabei eine besondere Herausforderung. Sofern ein Übertritt von belasteten Flutungswässern in die umliegenden GWL nicht vollständig verhindert werden kann, ist sicherzustellen, dass durch natürliche bzw. während der Flutung technisch induzierte Rückhalteprozesse eine Stoffausbreitung in den GWL verhindert wird.

Für eine entsprechend dieser Anforderungen ausgerichtete Steuerung der weiteren Flutung sind hydraulische und hydrochemische Prognosen von besonderer Bedeutung. Das vorgestellte Modellkonzept stellt dabei eine wesentliche Grundlage dar, wobei die einzelnen Modelle anhand der im weiteren Verlauf erfassten Monitoringdaten hinsichtlich der jeweils berücksichtigten Prozesse weiter zu validieren und entsprechend fortzuschreiben sind, um die Belastbarkeit der getroffenen Prognosen weiter sukzessive zu verbessern.

Die aus den entsprechenden Szenarienrechnungen abgeleiteten Modellierungsergebnisse sind eine wesentliche Grundlage für die Fortschreibung des Flutungskonzeptes, technische Planungen sowie den notwendigen Genehmigungsprozess. Das Ziel sind dabei transparente und nachvollziehbare Prognosen, in denen auch die bestehenden Unsicherheiten angemessen berücksichtigt werden.

87

Danksagung

Das dargestellte Konzept und die beschriebenen Erfahrungen sind das Ergebnis vielfältiger Untersuchungen, Recherchen und Diskussionen einer Vielzahl von Kollegen in Wismut aber auch externer Gutachter. So haben einen entscheidenden Anteil an der Entwicklung der jeweiligen Modelle auch die Kollegen der delta h Ingenieurgesellschaft mbH, Witten (SPRING) und Umwelt- und Ingenieurtechnik GmbH, Dresden (FLOODING). An der Erarbeitung des Abstrommodelles war zudem Prof. Wolfgang van Berk (TU Clausthal) maßgeblich beteiligt. Allen daher hier ein herzlicher Dank für die Zusammenarbeit.

Literaturverzeichnis

[1] Chronik der Wismut, Wismut GmbH, Chemnitz, 1999.

