



ABSCHLUSSBERICHT

7. Oktober 2022

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis.....	2
Vorwort	3
Das Forum Bergbau und Wasser (FBW)	5
Eigene operative Forschungsaktivitäten	9
Rechtliche Grundlagen bergrechtlicher Genehmigungsverfahren.....	10
Belastbarkeit Numerischer Modelle für komplizierte Grubenwasseranstiege	14
Bestimmung von Grubenwassereinzugsgebieten: Dynamik der Grundwasserneubildung	18
Monitoringmaßnahmen für nachhaltige Grubenwasseranstiegsprozesse	23
Evaluation der Durchlässigkeit der Emscher-Formation	28
Reaktiver Stofftransport bei initialer Flutung von stillgelegten Kohlebergwerken	36
Beurteilungsgrundlagen und -kriterien für Grubenwasser	39
Nachhaltige Grubenwasseranstiegsniveaus in ehemaligen Steinkohlenrevieren	45
Bevölkerungsumfrage zum Thema Grubenwasser	50
Förderung externer Forschungsvorhaben	53
Thermische und hydrodynamische Vorgänge bei der Nutzung des Erdwärmepotenzials	54
Nutzungspotential von Grubenwasser zur Stromgewinnung und Energiespeicherung	57
Grubenwasseranstieg und Einstellung der Poldermaßnahmen an Emscher und Lippe.....	62
Daten aus der Vergangenheit für die Steuerung eines nachhaltigen Grubenwasseranstiegs.....	65
Ökologisch-wasserwirtschaftliche Auswirkung des Grubenwasserkonzepts der RAG AG	68
Publikationen aus dem Forum Bergbau und Wasser	71
Das FBW im Dialog	98
Bildungs- und Informationsinitiativen.....	101
Lernsoftware Grubenwasser	102
Internetportal Grubenflutungen	105
Zusammenfassung und Ausblick	109



VORWORT

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

die gemeinnützige Stiftung *Forum Bergbau und Wasser* wurde 2017 errichtet, um Forschungen zu den „Chancen und Risiken des Grubenwasseranstiegs“ in den deutschen Steinkohlerevieren – Ruhrgebiet, Saarland und Ibbenbüren - durch geeignete wissenschaftliche Projekte zu fördern, das internationale Wissen zu Grubenflutungen auszuwerten und die Erkenntnisse für Politik, Behörden, Wirtschaft, Wissenschaft und die interessierte Öffentlichkeit aufzubereiten und zu verbreiten. Dazu sollten Fachpublikationen veröffentlicht sowie wissenschaftliche und öffentliche Dialogveranstaltungen durchgeführt werden.

Mit diesem Dokument legt die Stiftung nun Rechenschaft über die fünf Jahre ihrer Tätigkeit ab. Es soll insbesondere die gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse zusammenfassen und die von der Stiftung initiierten Informationsinitiativen vorstellen. Zudem geben wir – im Sinne höchstmöglicher Transparenz – auch einen Überblick über unsere organisatorische und personelle Struktur sowie unsere sonstigen Aktivitäten. Der Bericht richtet sich nicht nur an die Stifterin, sondern alle diejenigen, die an fundierten wissenschaftlichen Erkenntnissen interessiert sind, welche (positiven und negativen) Folgen ein Anstieg des Grubenwassers in den betroffenen Regionen hat und wie dieser nachhaltig gestaltet werden kann.

Ursprünglich war geplant, die Stiftung über fünf Jahre laufen zu lassen und sie Ende 2021 zu beenden. Wie bei so vielen Projekten, kam die Covid-19-Pandemie dieser Planung in die Quere. Forschungsprojekte dauerten länger, weil Labore nicht betreten oder Reisen nicht angetreten werden konnten. Veranstaltungen, in denen das Forum mit der wissenschaftlichen und allgemeinen Öffentlichkeit diskutieren wollte, mussten abgesagt oder verschoben werden. Daher ist dieser Abschlussbericht nicht auf den 31. Dezember 2021, sondern auf den 30. Juni 2022 terminiert.

Wir laden Sie, liebe Leserinnen und Leser dazu ein, sich ein Bild über die folgenden Themen zu machen, die das *Forum Bergbau und Wasser* in den letzten fünf Jahren bearbeitet hat:

- » Rechtliche Grundlagen für den Anstieg von Grubenwasser,
- » Mögliche Inwertsetzungen von Grubenwässern (seltene Erden, Energiegewinnung),
- » Hydro- und isotopenchemische Aspekte von Grubenwasseranstiegen,
- » Dichteschichtungen in gefluteten Untertagebergwerken,
- » weltweite Erfahrungen aus Grubenflutungen,
- » Petrophysikalische Untersuchungen der Emscher-Formation,
- » Numerische Modellrechnungen zu langfristigen Grubenwasseranstiegen,
- » Ökologische Auswirkungen des Grubenwasserkonzepts der RAG AG,
- » Worst-case-Szenarios eines ungehinderten Grubenwasseranstiegs
- » und vieles mehr.

Weitergehende Informationen, z.B. auch die vollständigen Abschlussberichte der Projekte, die vom Forum extern vergeben wurden, finden Sie auf unserer Webseite: www.forum-bergbau-wasser.de.

Glückauf!

Dr. Wilhelm Struckmeier
Vorsitzender des Kuratoriums



DAS FORUM BERGBAU UND WASSER (FBW)

Organisationsform

Das *Forum Bergbau und Wasser* (FBW) wurde im Juli 2017 als treuhänderische Stiftung im *Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e.V.* gegründet. Dieser ist damit rechtlich in der Pflicht, das Stiftungsvermögen zu verwalten und für die satzungskonforme Verwirklichung der Stiftungszwecke zu sorgen. Dazu hat der *Stifterverband* die Verwaltung seiner Tochter, der *DSZ – Deutsches Stiftungszentrum GmbH*, übertragen.

Stifter des *Forums Bergbau und Wasser* ist die RAG AG, die die Stiftung mit einer Geldzusage von 5 Mio. Euro ausgestattet hat. Das Forum ist als Stiftung organisiert, um die finanzielle, organisatorische und inhaltliche Unabhängigkeit von der Stifterin zu gewährleisten.

Gemäß Satzung ist die Stiftung selbstlos und unabhängig tätig und verfolgt ausschließlich gemeinnützige Ziele. Ihre Arbeit war zunächst auf eine Dauer von fünf Jahren ausgerichtet.

Auftrag

Gemäß Satzung fördert das *Forum Bergbau und Wasser* Wissenschaft und Forschung auf dem Gebiet der Hydrogeologie mit dem Schwerpunkt Grubenwasser.

Besonders berücksichtigt werden dabei die Chancen und Risiken eines Grubenwasseranstiegs (Grubenflutung) nach Einstellung des Steinkohlenbergbaus sowie deren ökologische und ökonomische Konsequenzen. Insbesondere will die Stiftung aktuellen Forschungsbedarf in diesem Bereich klären und bestehende Grubenwasserkonzepte kritisch überprüfen.

Die Stiftung ist sowohl operativ (führt Forschungsprojekte selbst aus) als auch fördernd tätig (vergibt Fördergelder für zuvor definierte Projekte an Dritte). Sie verwirklicht ihre Ziele durch

- » eigene Grundlagen- und anwendungsbezogene Forschung zum Grubenwasser,
- » die Vergabe von Forschungsaufträgen an Dritte,
- » die Unterstützung, Organisation und Durchführung von wissenschaftlichen Veranstaltungen,
- » die Vermittlung und Publikation gewonnener Erkenntnisse.

Personen

Für die Steuerung der Stiftung sowie die operativen Forschungstätigkeiten ist ein Kuratorium zuständig, das grundsätzlich ehrenamtlich tätig ist. Mitglieder des Kuratoriums sind (Stand 30.6.2022)

- » Dir. und Prof. a.D. Dr. Wilhelm Struckmeier, Burgdorf (Vorsitzender),
- » Prof. Dr. Christian Melchers, TH Georg Agricola Bochum (stellv. Vorsitzender),
- » Prof. Dr. Maria-Theresia Schafmeister, Universität Greifswald,
- » Prof. Dr. Sylke Hilberg, Paris Lodron Universität Salzburg,
- » Prof. Dr. Christian Wolkersdorfer, Tshwane University of Technology, Pretoria,
- » Prof. Dr. Georg H. E. Wieber, Universität Mainz,
- » Dipl.-Stat. Rainer Lüdtke, Stifterverband, Essen.

Für die operative Tätigkeit der Stiftung haben die Kurator(inn)en die folgenden wissenschaftlichen Mitarbeiter(innen) eingestellt.

- » Dipl.-Geol. Henning Jasnowski-Peters (Prof. Melchers),
- » Dr. rer. nat. Timo Kessler (Prof. Schafmeister),
- » Dr. rer. nat. Thomas Rinder (Prof. Hilberg),
- » MSc Diego Alexander Bedoya Gonzalez (Prof. Hilberg, Prof. Schafmeister),
- » MSc Elke Mugova (Prof. Wolkersdorfer),
- » Dr. rer. nat. Marion Stemke (Prof. Wieber),
- » Dipl.-Geol. Peter Quensel (Prof. Wieber).

Für die Informationsinitiativen und die Dialogprozesse mit der allgemeinen und wissenschaftlichen Öffentlichkeit waren weitere Personen als Auftragnehmer für die Stiftung tätig.

Meilensteine

17.3.2017	Dotation der Stiftung durch die Stifterin (RAG AG)
22.3.2017	Errichtung der Stiftung durch den Stifterverband
12.7.2017	Beginn der Stiftung
12.7.2017	Auftakt-Pressekonferenz in Essen, Freischaltung der Webseite
12.7.2017	1. Sitzung des Kuratoriums in Essen Beschluss, jedem Kuratoriumsmitglied eine:n wissenschaftliche:n Mitarbeiter:in (WiMi) zur Seite zu stellen
11.-12.9.2017	2. Sitzung des Kuratoriums in Düsseldorf Festlegung der wissenschaftlichen Aufgabenbereiche
12.12.2017	Dialogveranstaltung an der THGA Bochum ca. 110 Teilnehmer(innen)
23.3.2018	3. Sitzung des Kuratoriums in Bochum inkl. Koordinationstreffen der WiMis
10.4.2018	Prof. Dr. Josef Klostermann, Vorsitzender des Kuratoriums, tritt von seinem Amt zurück
14.-16.5.2018	4. Sitzung des Kuratoriums in Gladbeck inkl. Koordinationstreffen der WiMis Beschluss, externe Forschungsprojekte auszuschreiben
18.5.2018	Prof. Dr. Josef Klostermann verstirbt
24.-26.9.2018	5. Sitzung des Kuratoriums in Münster inkl. Koordinationstreffen der WiMis
26.9.2018	Dr. Wilhelm Struckmeier wird zum neuen Mitglied des Kuratoriums und zu seinem Vorsitzenden gewählt
10/2018	Ausschreibung externer Forschungsprojekte in den Bereichen » Inwertsetzung energetischer Nutzungspotenziale von Grubenwasser » Nachhaltige Grubenwasseranstiegsniveaus » Ökologisch-wasserwirtschaftliche Auswirkungen der Grubenwasserkonzepte der RAG AG
10.-12.12.2018	6. Sitzung des Kuratoriums in Saarbrücken mit Vorbereitungsworkshop für die Dialogveranstaltung am 7.2.2019
7.2.2019	Dialogveranstaltung in Saarbrücken 78 Teilnehmer(innen) aus Behörden, Politik, Wissenschaft, Unternehmen und Verbänden
7.-8.2.2019	7. Sitzung des Kuratoriums in Saarbrücken, inkl. Koordinationstreffen der WiMis
03/2019	Bewilligung von fünf externen Forschungsprojekten
4.-6.6.2019	8. Sitzung des Kuratoriums in Salzburg, inkl. Koordinationstreffen der WiMis
16.-17.9.2019	9. Sitzung des Kuratoriums in Bochum
9.-10.12.2019	10. Sitzung des Kuratoriums in Frankfurt/Main
24.3.2020	11. Sitzung des Kuratoriums in Bochum, kurzfristig aufgrund der Covid-19-Pandemie abgesagt
02-05/2020	repräsentative Umfrage zur Grubenwasserflutung
14.5.2020	geplante Dialogveranstaltung in Bochum, aufgrund der Covid-19-Pandemie abgesagt
14.5.2020	12. Sitzung des Kuratoriums als Videokonferenz

10.6.2020	13. Sitzung des Kuratoriums als Videokonferenz
08/2020	Beschluss, das FBW um 3 Monate bis 03/2022 zu verlängern
31.8.-2.9.2020	14. Sitzung des Kuratoriums in Greifswald, incl. wissenschaftliche Vorträge der WiMis
29.10.2020	geplanter Informationsaustausch mit der RAG AG, aufgrund der Covid-19-Pandemie abgesagt
29.10.2020	15. Sitzung des Kuratoriums als Videokonferenz
1.12.2020	Videokonferenz des Kuratoriums zur Erstellung des 1 Statusberichts
3.12.2020	1. Statusbericht zum Stand der Forschung
3.2.2021	geplanter Informationsaustausch mit den Aufsichtsbehörden, aufgrund der Covid-19-Pandemie abgesagt
17.2.2021	16. Sitzung des Kuratoriums als Videokonferenz; incl. wissenschaftlicher Vorträge der extern Geförderten
20.3.2021	Veröffentlichung der Grubenwasserbroschüre „Blickfänge – Was Sie über Grubenwasser im Blick haben sollten“
21.4.2021	17. Sitzung des Kuratoriums als Videokonferenz
8.7.2021	erster Informationsaustausch mit der RAG AG als Videokonferenz
7.10.2021	fachliche Dialogveranstaltung als Videokonferenz; 68 Teilnehmer(innen) aus Behörden, Politik, Wissenschaft, Unternehmen und Verbänden
11.11.2021	zweiter Informationsaustausch mit der RAG AG als Videokonferenz
17.12.2021	18. Sitzung des Kuratoriums als Videokonferenz; Beschluss, das FBW um weitere 3 Monate bis 06/2022 zu verlängern
6.1.2022	Videokonferenz des Kuratoriums zur Fortsetzung und wissenschaftlichen Tagung des FBW
2.2.2022	wissenschaftliche Konferenz als Online-Tagung zu den Ergebnissen der internen und externen Forschungsvorhaben des FBW; 128 Teilnehmer(innen) aus Wissenschaft und Verbänden
11.2.2022	Zustiftungszusage der RAG AG über 1. Mio. € für eine dreijährige Verlängerung der Stiftung
16.3.2022	19. Sitzung des FBW-Kuratoriums als Videokonferenz
24.3.2022	Aktualisierung der Satzung der Stiftung FBW
2.-3.6.2022	20. Sitzung des Kuratoriums in Burgdorf bei Hannover
30.6.2022	Abschlussbericht zu den Forschungsprojekten und Veranstaltungen der Stiftung in der ersten Arbeitsphase



EIGENE OPERATIVE FORSCHUNGS- AKTIVITÄTEN



RECHTLICHE GRUNDLAGEN BERGRECHTLICHER GENEHMIGUNGSVERFAHREN

Prof. Dr. G. Wieber, Mainz (Projektleiter)

Dr. M. Stemke (wiss. Mitarbeiterin)

Projektdauer: 2017 – 2021

Kurzfassung der Projektergebnisse

Die Genehmigung zum Aufsuchen, Gewinnen und Aufbereiten von Bodenschätzen erfolgt nach dem Bundesberggesetz (BBergG, 1980). Dabei dürfen dem Bergrecht unterliegende Betriebe nur auf Grund von Betriebsplänen errichtet, geführt und eingestellt werden (§ 51 Abs. 1 BBergG gekürzt). In Nordrhein-Westfalen bleiben sie auch nach Einstellung des Bergbaus gemäß § 48 Abs. 4 Ordnungsbehördengesetz Nordrhein-Westfalen (OBG NRW 1980) für die Abwehr von Gefahren aus dem Altbergbau zuständig (Elgeti, 2011). Zur Bewältigung dieser sogenannten Ewigkeitslasten wurde 2007 zwischen der RAG-Stiftung sowie den Ländern Nordrhein-Westfalen und Saarland ein „Erblastenvertrag“ auf Basis des KPMG Gutachtens von 2006 geschlossen.

Im Bergbau ist nicht nur die Errichtung und der Betrieb, sondern auch die Stilllegung nach § 53 Abs. 1 Satz 2 des Bundesberggesetzes (BBergG) betriebsplanpflichtig (Abschlussbetriebsplan). Der Betriebsplan kann nur zugelassen werden, wenn keine gemeinschädlichen Einwirkungen zu erwarten sind (§ 55 Abs. 1 Nr. 9 BBergG). Dazu gehört nach Entscheidungen von Bundesverwaltungs- und Oberverwaltungsgerichten (BVerwG, 1995 und 2014; OVG Münster 2012) auch Fragen der Gewässer Reinhaltung.

Die bergrechtliche Betriebsplanzulassung ist eine gebundene Entscheidung (§ 55 BBergG). Sie muss also beim Vorliegen der Voraussetzungen – soweit keine überwiegend öffentlichen Belange entgegenstehen (§ 48 Abs. 2 BBergG) - erteilt werden. Zu den genannten Belangen zählen u.a. auch die wasserrechtlichen Auswirkungen des Vorhabens.

Im Rahmen der bergrechtlichen Zulassungsverfahren (z.B. Abschlussbetriebspläne) muss somit geprüft werden, ob durch die Einstellung/ Änderung der Grubenwasserhaltung schädliche Einflüsse, auch in Bezug auf Gewässerverunreinigungen, ausgeschlossen werden können (Jordan et al., 2017). Zusätzlich zur Zulassung des Bergwerkes mittels Betriebsplan sind wasserrechtliche Erlaubnisse sowohl für die Nutzung als auch für die Einleitung erforderlich.

Sieht ein bergrechtlicher Betriebsplan die Benutzung von Gewässern vor, so entscheidet die Bergbehörde über die Erteilung der Genehmigung im Einvernehmen mit der Wasserbehörde (§ 19 WHG). Das bedeutet, dass ohne Einvernehmen der zuständigen Wasserbehörde keine wasserrechtliche Genehmigung erteilt werden kann.

Gewässer sind gemäß § 1 WHG (2009) zu schützen. § 27 WHG legt als Bewirtschaftungsziel das Erreichen eines guten ökologischen und chemischen Zustands der Gewässer fest. Abweichungen von diesen Zielen sind nach § 30 WHG Ziff. 1 zulässig, wenn „die Gewässer durch menschliche Tätigkeiten so beeinträchtigt oder ihre natürlichen Gegebenheiten so beschaffen sind, dass die Erreichung der Ziele unmöglich ist oder mit unverhältnismäßig hohem Aufwand verbunden wäre“ (Wieber, 2013).

§ 9 WHG definiert die Benutzungstatbestände von Gewässern. Unter § 9 Absatz 1 sind die echten Benutzungen, also eine zielgerichtete Tätigkeit mit direkter Beeinflussung des Gewässers aufgeführt, wohingegen § 9 Absatz 2 WHG die unechte Benutzung behandelt. Unechte Gewässerbenutzungen sind Maßnahmen, die keine direkte (echte) Benutzung darstellen, jedoch Auswirkungen auf das Gewässer ausüben können. Die Hebung der Grubenwässer erfüllt den Tatbestand einer Benutzung im Sinne § 9 Abs. 1 Nr. 5 WHG („Entnehmen, Zutagefördern, Zutageleiten und Ableiten von Gewässern“), die Einleitung in ein Oberflächengewässer eine Benutzung nach § 9 Abs. 1 Nr. 4 WHG („Einbringen und Einleiten von Stoffen in Gewässer“). Somit besteht eine Erlaubnispflicht. Ebenso kann § 9 Abs. 2 Nr. 1 WHG („Aufstauen, Absenken und Umleiten von Grundwasser durch geeignete Anlagen“) und Nr. 2 („Maßnahmen, die geeignet sind, dauernd oder in einem nicht unerheblichen Ausmaß nachteilige Veränderungen der Wasserbeschaffenheit herbeizuführen“) zum Tragen kommen.

Die Betriebsplanpflicht bei einer „Grubenflutung“ ergibt sich daraus, dass sie eine erhebliche Änderung der Betriebsweise darstellt. Durch den damit einhergehenden Grubenwasseranstieg werden wesentliche wasserwirtschaftlich relevante Belange betroffen (z.B. Mineralisation der Wässer). Daher ist die zuständige Wasserbehörde in dem Verfahren zu beteiligen. In dem Betriebsplan sollte auch das Zielniveau des Anstiegs sowie die bei Erreichen des Niveaus notwendigen wasserrechtlichen Erlaubnisanträge (z.B. erneute Aufnahme der Wasserhaltung, Einleitung in Vorfluter) enthalten sein. Diese können durch die Bergbehörde nur im Einvernehmen mit der Wasserbehörde genehmigt werden.

Die Zulässigkeit der Planungen wird in der Regel durch Sachverständigengutachten nachgewiesen. Dabei sind auch vorliegende amtliche Beurteilungen (z.B. Gewässergütekarten) und Festlegungen (z.B. OGewV - Oberflächengewässerverordnung) zur Bewertung mit heranzuziehen.

Zur Sicherstellung der Ewigkeitslasten nach endgültiger Einstellung des Steinkohlebergbaus der RAG wurde im Jahre 2007 ein Erblastenvertrag zwischen den Bundesländern Nordrhein-Westfalen und Saarland mit der RAG-Stiftung abgeschlossen. Als Maßnahmen zur Bewältigung der Ewigkeitslasten, die sich aus dem Bergbau der RAG ergeben, sind definiert:

- » spezifische Maßnahmen zur Grubenwasserhaltung (Kap. 5.4 KPMG Gutachten),
- » spezifische Maßnahmen der Grubenwasserreinigung an kontaminierten Standorten (Kap. 5.6 KPMG Gutachten),
- » spezifische Maßnahmen, insbesondere Poldermaßnahmen, die durch Bergbau bedingten Absenkungen der Erdoberfläche verursacht wurden/werden (Kap. 5.7 KPMG Gutachten).

Nach Aufgabe des aktiven Steinkohlebergbaus der RAG in Deutschland obliegt es der RAG-Stiftung (§ 2 Erblastenvertrag) die Finanzierung für die Maßnahmen sicherzustellen.

LITERATUR

- BBergG (1980): Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), das durch Artikel 2 Absatz 4 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist.
- BBodSchG (1998): Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 3 Absatz 3 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465) geändert worden ist.
- BVerwG – Bundesverwaltungsgericht (1995): Urteil vom 9. November 1995 – 4 C 25/94, Juris Rn. 37 - Beseitigung von Sauerwasser im Erzbergwerk Rammelsberg/Harz.
- BVerwG – Bundesverwaltungsgericht (2014): Urteil vom 18. Dezember 2014 – 7 C 22/12, Juris, Rn. 24-27, 33 = BVerwGE 151, 156-171.
- Elgeti, T. (2011): Haftungsrisiken der öffentlichen Hand bei verlassenen Grubenbauen und Tagesöffnungen. – In: Bezirksregierung Arnsberg (Hrsg., 2016): NACH Bergbauzeit in NRW. Veröffentlichungen aus dem Deutschen Bergbau-Museum Bochum, Nr. 217. S. 65-73, Bochum.
- FH-DGGV (2017): Glossar Bergmännische Wasserwirtschaft. - Arbeitskreis Grubenwasser der FH-DGGV. Sonderausgabe der FH-DGGV (ISBN 978-3-926775-72-6).
- Jordan, I., Welsing, R. (2017): Einstellung der Grubenwasserhaltung nach Beendigung der Steinkohlengewinnung – Wasserrechtliche Betrachtung, Zeitschrift für Wasserrecht (ZfW) 56/2017, Heft 3.
- KPMG (2006): Erblastenvertrag zur Bewältigung der Ewigkeitslasten des Steinkohlebergbaus der RAG AG im Rahmen der sozialverträglichen Beendigung des subventionierten Steinkohlebergbaus in Deutschland vom 14.08.2007.
- OBG des Landes Nordrhein-Westfalen: Gesetz über Aufbau und Befugnisse der Ordnungsbehörden - Ordnungsbehördengesetz (OBG) - in der Fassung der Bekanntmachung vom 13. Mai 1980

OGewV - Oberflächengewässerverordnung vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373), die zuletzt durch Artikel 2 Absatz 4 des Gesetzes vom 9. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2873) geändert worden ist

OVG Münster (2012): Urteil vom 26. Januar 2012 – 11 A 2635/09, Gewerbearchiv 2012, 72 f.

WHG (2009): Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. Juli 2017 (BGBl. I S. 2771) geändert worden ist.

Wieber, G. (2013): Stillgelegte geflutete Erzbergwerke - schädliche Bodenveränderungen gemäß Bundes-Bodenschutzgesetz? – In: altlasten spektrum 5/2013, S. 201-209, Berlin.

Wieber, G. & Stemke, M. (2021): Grundlagen des Wasseranstiegs in stillgelegten deutschen Steinkohlegruben. – bbr, 04-2021:48—52, Bonn.

Veröffentlichungen aus dem Projekt

Aus dem Projekt sind zwei Veröffentlichungen bereits publiziert oder zur Publikation eingereicht. Details finden sich im Publikationsverzeichnis ab Seite 71 unter den Referenznummern [48] und [55]



BELASTBARKEIT NUMERISCHER MODELLE FÜR KOMPLIZIERTE GRUBENWASSERANSTIEGE (NUMGRU)

Prof. Dr. M.-Th. Schafmeister, Greifswald (Projektleiterin)

Dr. T. Kessler (wiss. Mitarbeiter)

Projektdauer: 2017 – 2022

Kurzfassung der Projektergebnisse

Das Teilprojekt NumGru des *Forums Bergbau und Wasser* beschäftigte sich mit der Überprüfung, Entwicklung und Anwendung von numerischen Modellierungsansätzen zu Grubenwasseranstiegen. Vorrangig ging es um die Abbildung und die Prognose des Anstiegsverlaufs innerhalb des Grubengebäudes sowie im Nebengestein.

BEWERTUNG UND VERGLEICH VON GRUBENWASSERANSTIEGSMODELLEN

Ausgangspunkt der Untersuchungen waren die im Bergbau häufig angewendeten Boxmodelle, welche einen finite-Volumen Ansatz verfolgen und die Wasserzuströme über das gesamte Hohlraumvolumen bilanzieren. In Zusammenarbeit mit der DMT (Deutsche Montan Technologie) wurde das häufig angewendete Boxmodell 3D studiert, die Parametrisierung angepasst und für den ehemaligen Bergwerksstandort Königsborn angewendet. Parallel wurde mit der finite-Elemente Software Feflow ein Grubenwasseranstiegsmodell für denselben Standort entwickelt, um die Unterschiede und Vorzüge der beiden Ansätze zu identifizieren.

Der Berechnungsansatz des Boxmodells erwies sich zunächst als gut geeignet, um den Wasseranstieg in Strecken und Schächten abzubilden. Über die Berechnung des Resthohlraumvolumens zeichnen die Wasserzuflüsse einen zeitlichen Verlauf des Wasseranstiegs, der die gemessenen Anstiegsverläufe zu reproduzieren in der Lage ist. Modellunsicherheiten ergeben sich in erster Linie durch die Berechnung der Resthohlraumvolumina, welche in Bergwerken bis zu 30 Prozent betragen können. Mittels Überlaufpunkten und hydraulischer Verbindungen können punktuell verschiedene Wasserprovinzen miteinander verknüpft werden. Dies ist ein großer Vorteil, da große Bergwerksareale modelliert werden können bei vergleichsweise geringem Rechenaufwand.

Hydraulische Prozesse im Gebirgsbereich während des Flutungsgeschehens können allerdings in Volumenbilanzmodellen nicht abgebildet werden. Beispielsweise kommt es während des Grubenwasseranstiegs punktuell zu Zuflüssen in das Grubengebäude, welche z.B. durch Verbrauchbereiche, hydraulische Barrieren, Schachtbewandungen einen ungleichmäßigen Wasseraustausch von Grubengebäude und Gebirgsmatrix entwickeln. In der Folge sind die Grubenwasserstände kurz- und mittelfristig von den Grundwasserständen im Nebengebirge entkoppelt. Um diese Vorgänge betrachten zu können, bieten sich finite-Elemente Modelle an, welche den gesamten hydraulischen Einflussbereich des Bergwerks diskretisieren und sich an jedem beliebigen Punkt hydraulische Potentiale berechnen lassen. Ein solches Modell benötigt ein Vielfaches an Rechenkapazitäten sowie eine detaillierte Konzeptvorstellung für die tektonischen und bergbaubedingten Hohlräume und deren Parametrisierung.

Ein vereinfachtes finite-Elemente Modell für den Standort Königsborn zeigt eine Machbarkeit im Rahmen des Forschungsvorhabens, welches jedoch für die praktische Anwendung eines umfassenden Konzeptmodells bedarf und andererseits aufwändig parametrisiert werden muss. Beispielsweise ist die Kalibrierung eines finite-Elemente Modells anhand von Entnahmeraten und Wiederanstiegskurven im Schacht nicht ausreichend, um das gesamte Modellgebiet hinreichend gut zu beschreiben. Es bedarf zusätzlicher Zeitreihen tiefer Grundwassermesspunkte im Nebengestein, um die Unsicherheiten des Modells zu reduzieren. Ein finite-Elemente Modell empfiehlt sich daher in Fällen, in denen eine umfangreiche Datenbasis vorhanden ist und in denen Fragestellungen beantwortet werden wollen, die über die Grubengebäudehydraulik hinausgehen. Eine detaillierte Beschreibung von finite-Volumen- und finite-Elemente-Modellansätzen für Grubenwasseranstiege wurde auf mehreren Konferenzen (IMWA, FH-DGGV) vorgetragen und wird nun in einem wissenschaftlichen Beitrag veröffentlicht werden.

ENTWICKLUNG EINES HYDRAULISCHEN KONZEPTEES FÜR DIE FLUTUNG VON GRUBENGEBÄUDEN

Bei der Flutung von Grubengebäuden treten verschiedene Strömungstypen basierend auf den geologischen und anthropogen geschaffenen Hohlräumen auf. Zunächst gibt es eine meist störungsgebundene Tiefen-infiltration aus höherliegenden Grundwasservorkommen oder meteorischen Wassers. Dieses Wasser transferiert normalerweise als Darcy-Strömung in vertikaler Richtung in Richtung des Grubengebäudes. Das Grubengebäude selbst besteht aus intakten, verbrochenen oder verfüllten Strecken und Schächten, welche frei oder als Rohrströmung durchströmt werden. Dazu kommt es in den verbrochenen Schichten im Hangenden der abgebauten Flöze zu einer starken Klüftung des Gebirges mit kluftgebundener Strömung sowie einem verstärkten Wasseraustausch zwischen Hohlraum und Gebirgsmatrix. In Abbildung 1 ist das hydraulische Konzept einer Bergwerksflutung veranschaulicht.

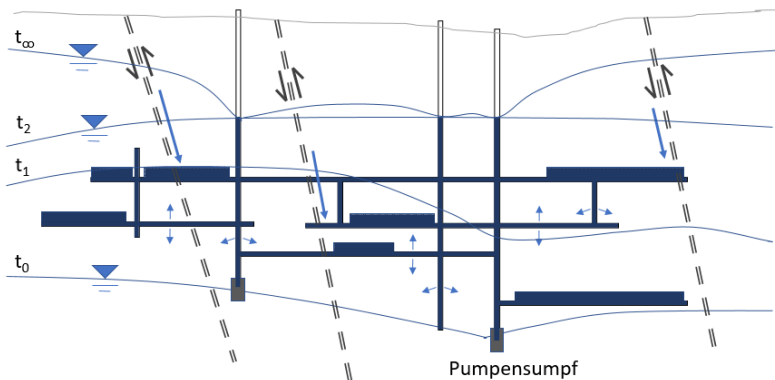


Abbildung 1: Konzeptualisierung des Grubenwasseranstiegs und der Strömungskomponenten. Neben der störungs- gebundenen Infiltration meteorischen Wassers, verbunden mit einer unmittelbaren Flutung des Grubengebäudes, strömt Wasser in die Gesteinsmatrix und lässt den Grundwasserstand im Gebirge langsam ansteigen (t_0 bis t_∞).

In diesem Arbeitspaket wurde versucht, den Modellraum eines Bergwerks derart zu konzeptualisieren, dass die Strömungen in den oben beschriebenen Hohlräumen kombiniert und integriert werden können. In einfachen numerischen Experimenten wurden die Strömungstypen für die einzelnen Hohlraumtypen parametrisiert und simuliert. Hier zeigen sich finite-Elemente Modelle als sehr flexibel, da verschiedene Strömungsfunktionen für poröse Medien, Rohrstrukturen oder auch freie Gerinne definiert werden können. Gleichzeitig verfolgt das verwendete finite-Elemente Modell einen single-Kontinuumsansatz, welcher keine separate Berechnung von hydraulischen Potentialen in benachbarten Modellbereichen mit unterschiedlicher Strömungscharakteristik erlaubt. Dies bedeutet, dass Grundwasseranstiege in Grubengebäude und Gebirgsmatrix nicht separat abgebildet werden können und der hydraulische Gradient an den Hohlraumgrenzen gemittelt wird. In einem weiteren Teilprojekt (siehe Bedoya-Gonzalez) ist ein doppelter Kontinuum Ansatz angewandt worden, in welchem die vertikale Infiltration in Klüften und Gebirgsmatrix separat berechnet werden.

GRUBENWASSERANSTIEGSMODELLIERUNG BERGWERK WESTFALEN

Für das ehemalige Bergwerk Westfalen am östlichen Rand des Ruhrgebietes wurde schließlich ein detailliertes finite-Elemente Grubenwasseranstiegsmodell konzipiert und umgesetzt. Das Bergwerk ist bereits seit vielen Jahren stillgelegt und zeigt einen unvollständigen Grubenwasseranstieg. Im Modell wurden alle hydraulisch relevanten Bergwerksbereich inklusive der verschiedenen Hohlraumtypen berücksichtigt. Das bedeutet, dass das gesamte Hauptstreckennetz sowie Schächte, Abbaubereiche und tektonische Störungen digitalisiert und in das Modell eingefügt wurden. Bergbauliche Förderwege wurden als eindimensionale diskrete Strukturen

implementiert, was eine gesonderte Parametrisierung der Hohlräume erlaubt, ohne dass diese einzeln diskretisiert werden müssen. In Abbildung 2 sind diese Strukturen für vier Bergwerkssohlen gezeigt. Die geklüfteten Verbruchbereiche im Hangenden von Abbauen wurden mit variablen äquivalenten hydraulischen Durchlässigkeiten belegt um einen guten Wasseraustausch zwischen Gebirge und Bergwerk sicherzustellen. Dabei kann einer weiteren Charakteristik von Bergwerken, nämlich die Zeitabhängigkeit von Materialeigenschaften durch Setzungsprozesse, mittels zeitabhängiger Parametrisierung Rechnung getragen werden.

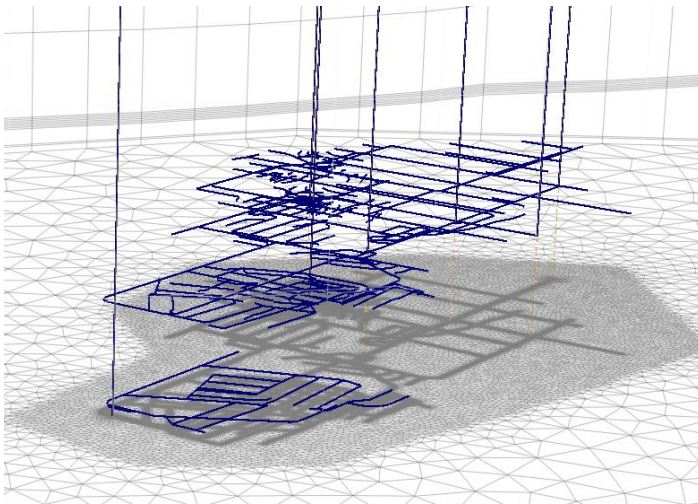


Abbildung 2: Strecken und Schächte des Bergwerks Westfalen sind auf vier Sohlen als eindimensionale diskrete Strukturen im Modellraum integriert.

Kalibriert wurde das Modell anhand von tiefen Grundwassermessstellen in der Umgebung des Bergwerks sowie eines teilweise dokumentierten Grubenwasseranstiegs in einem der Schächte. Diese Vorgehensweise führt zwangsläufig zu Modellunsicherheiten, da der Grubenwasseranstieg im Schacht wesentlich schneller vor sich geht als jener im angrenzenden Gebirge. Das Modell berechnet den Anstieg wie oben beschrieben nur für das gesamte Kontinuum, und überschätzt daher den Anstieg im Gebirge.

Die Ergebnisse der Westfalen Modellierung wurden auf verschiedenen Fachtagungen vorgestellt und diskutiert. Insgesamt können finite-Elemente Modellierungen mit einer Diskretisierung des gesamten Bergwerkbereichs in Fällen sinnvoll sein, in denen Fragestellungen in Bezug auf die umliegenden Grundwasserkörper von Bedeutung sind. Grundwasserhöhen können im gesamten Modellraum berechnet werden und es werden die hydraulischen Prozesse, welche bei der Flutung zum Tragen kommen wesentlich realitätsnäher abgebildet und überprüft werden. Voraussetzung ist eine gute Datengrundlage sowohl für die Parametrisierung der Hohlräume als auch für die Modellkalibrierung. Für die Prognose des Grubenwasseranstiegs im Grubengebäude selbst, können hingegen konventionelle Boxmodelle mit wesentlich weniger numerischem Aufwand ausreichend gute Ergebnisse liefern.

Tagungen und Veröffentlichungen

Aus dem Projekt sind zehn Veröffentlichungen bereits publiziert oder zur Publikation eingereicht. Details finden sich im Publikationsverzeichnis ab Seite 71 unter den Referenznummern [2], [4], [5], [6], [22], [23], [24], [25], [26] und [27]. Sechs Vorträge wurden auf internationalen Konferenzen gehalten.



BESTIMMUNG VON GRUBENWASSER- EINZUGSGEBIETEN: PROZESSE UND DYNAMIK DER GRUNDWASSERNEUBILDUNG

Prof. Dr. S. Hilberg, Salzburg (Projektleiterin)

Dr. T. Rinder (wiss. Mitarbeiter)

Projektdauer: 2017 – 2022

Kurzfassung der Projektergebnisse

PROJEKTGEBIET IBBENBÜREN

Im Rahmen dieses Projektes wurde federführend das vom Kuratorium definierte Oberthema „Hydrogeochemische Gesamtanalysen“ betreut. Die Idee war, eine detaillierte statistische Auswertung und Interpretation hydrochemischer und isotopehydrologischer Daten von Grund- bzw. Grubenwassersystemen durchzuführen, um so zu einem konzeptionellen Prozessverständnis zu gelangen. Als Modellgebiet wurde aufgrund seiner hervorragenden Eignung das Kohlebergwerk Ibbenbüren gewählt. Die scharfe geologische Abgrenzung des Ibbenbürener Karbonhorstes erlaubt eine relativ „einfache“ Bestimmung der relevanten Einflussparameter und kann damit auch als Validierungsgrundlage für numerische und analoge Modellierungsansätze dienen, die im Zusammenhang mit der Flutung von anderen Bergwerken relevant sind. Das Projekt wurde in eine mehrphasige Bearbeitung bestehend aus Datenakquise, Dateninterpretation und Prognose gegliedert.

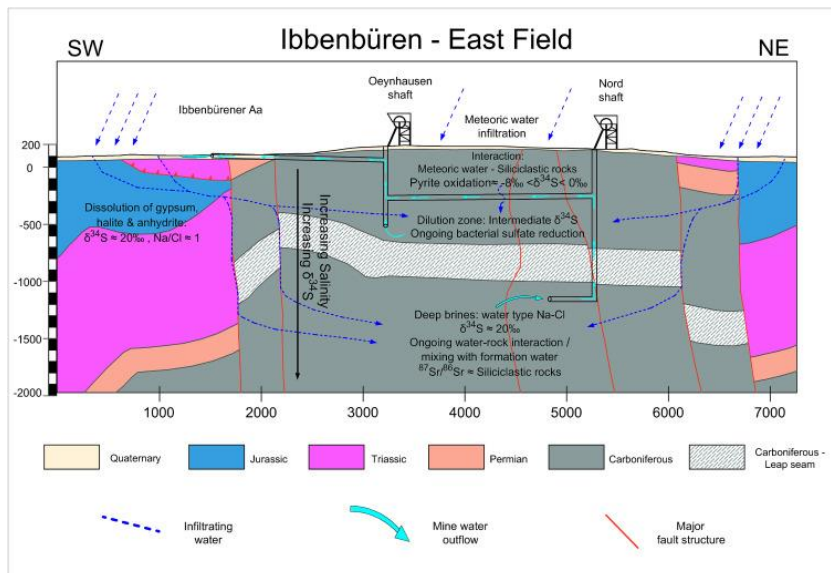


Abbildung 1 Schematischer Querschnitt durch das Ibbenbürener Ostfeld aus (Rinder et al., 2020).

Im Rahmen der Datenakquise wurden zusätzlich zur Auswertung von bestehender Literatur und Datensätzen im Juli und September 2018 Probenahmekampagnen durchgeführt. Dabei wurden Grubenwässer, sowie tiefe und oberflächennahe Grundwässer der Region beprobt und hydrogeochemisch und isotopegeochemisch untersucht (insgesamt 35). Die Auswertung der Wässer erfolgte auf Haupt- und Nebenkomponten mittels Ionenchromatographie und ICP-OES in Zusammenarbeit mit dem Institut für angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Graz. Isotopenanalytik wurde bezüglich der Isotopenverhältnisse von Strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), Schwefel und Sauerstoff im gelösten Sulfat ($\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$), Wasserstoff und Sauerstoff des Wassers ($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ und $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$) sowie Tritium (^3H) durchgeführt. Die Strategie des breit gewählten Analysepektrums zielte zuerst darauf ab, das Maximum an Information aus den Wasseranalysen zu erhalten. Eng gewählte Messprogramme sind erfahrungsgemäß mit beschränkter Interpretierbarkeit verbunden. Zusätzlich lässt sich mit dem breiten Spektrum die Eignung einzelner Parameter für zukünftige Monitoring Programme abschätzen. Die Ergebnisse der Studie zum Ibbenbürener Ostfeld wurden in der internationalen Fachzeitschrift *Applied Geochemistry* publiziert (Rinder et al., 2020) und werden hier nur kurz zusammengefasst.

Alle Wässer waren durch eine Zunahme des Salzgehalts mit der Tiefe sowie durch eine Zunahme des $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ -Isotopenverhältnisses im gelösten Sulfat gekennzeichnet. Die Bromid/Chlorid und Natrium/Chlorid Verhältnisse in tiefen Grubenwässern weisen auf Steinsalzauflösung als gemeinsame Quelle des Salzgehalts hin. Die

$\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ -Werte steigen auf bis zu +21,1‰ (VCDT), was auf die Migration von Grundwasser aus den umliegenden mesozoischen Sedimenten hindeutet (Abbildung 1). Diese Erkenntnis ist auch deshalb relevant, weil genau diese Verbindung in früheren Studien (Bässler, 1970) ausgeschlossen wurde. Der damals vermutete Einfluss eines Zechsteindeckgebirges auf die Wasserchemie konnte in unserer Studie nicht verifiziert werden.

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse zwischen 0,7108 und 0,7135 und erhöhte Alkalikonzentrationen (Lithium und Kalium) deuten auf eine anhaltende Wasser-Gesteins-Interaktion der salzhaltigen Grubenwässer mit den Gesteinen des Karbonhorstes hin. Alternativ können hohe Alkalikonzentrationen auch als Beimischung von Formationswässern des Karbons zu den salzhaltigen Grubenwässern interpretiert werden. Modernes meteorisches Wasser mit $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werten zwischen -6,9 und -8,65‰ (VSMOW) ist die primäre Wasserquelle für Solen, Grundwasser und Grubenwasser. Eine Korrelation der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse mit den $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ und $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ Werten in tiefen Grubenwässern liefert weitere Hinweise auf die Beimischung von Formationswässern. Das aus der Untersuchung hervorgegangene konzeptionelle Modell ist in Abbildung 2 dargestellt.

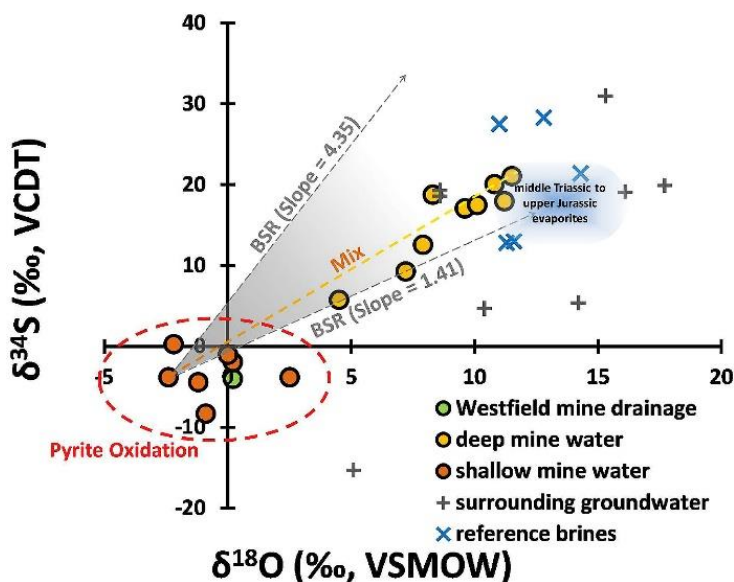


Abbildung 2: $\delta^{34}\text{S}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ (‰; VCDT) im gelösten Sulfat. Zirkumneutrale Werte, wie sie in oberflächennahen Abbau-bereichen und auch im Westfeld vorgefunden wurden, stehen mit der Oxydation von Pyrit im Zusammenhang. Die Werte des tiefen Grubenwassers weisen auf mesozoische Evaporite als Quelle des gelösten Sulfats hin. In diesem Zusammenhang liegt die Vermutung nahe, dass auch die hohen Salzgehalte der tiefen Grubenwässer auf die Steinsalzlösung der bekanntermaßen salzföhrnden mesozoischen Schichten in der Umgebung des Karbonhorstes zurückzuführen sind. Zechsteinevaporite zeichnen sich typischerweise durch $\delta^{34}\text{S}$ - Werte im Bereich von +12 ‰ aus. Die wenigen in diesem Bereich angetroffenen Wässer deuten in ihrer allgemeinen Zusammensetzung eher auf die Mischung von tiefen und oberflächennahe Grubenwässer hin.

Bezüglich Monitoringtauglichkeit hat sich der gewählte Parameterumfang als geeignet erwiesen. Vor allem durch die Kombination der stabilen Schwefel- und Strontiumisotope konnten Aussagen über relevante hydrogeochemische Prozesse getroffen werden, die mit nur einem Isotopensystem nicht möglich gewesen wären. Bezüglich gelöster Wasserinhaltsstoffe war ein Fokus auf Hauptanionen und- kationen sowie Lithium und Bromid ausreichend.

In Zusammenarbeit mit der Dissertationsstelle von Diego Bedoya Gonzales wurden im Juli 2019 verschiedene Bohrungen des geplanten Grubenwasserkanals in Ibbenbüren beprobt. Weitere Kernproben wurden im Herbst erhalten. Die Proben wurden mineralogisch untersucht und die Dünnschliffe wurden optisch ausgewertet. Zusätzliche Analytik erfolgte mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) und Rasterelektronen-

mikroskopie (REM). Die grundlegende Idee hinter dieser Studie war es, zusätzlich zu einem hydrochemischen Verständnis des Status quo auch einen Überblick über die petrologischen Eigenschaften des Karbonhorstes zu erhalten, um so die Erstellung eines reaktiven Transportmodells zu ermöglichen. Die Ergebnisse der petrologischen Studie wurden veröffentlicht (Bedoya-Gonzalez et al., 2021) und werden im Reaktiver Stofftransport näher beschrieben. Von der RAG AG wurden noch Proben von sekundären Ausfällungen der Stollenwände zur Verfügung gestellt. Diese dienten dazu, deren Einfluss auf die Wasserchemie nach Flutung zu untersuchen. Diese Proben wurden mittels RFA analysiert und das Stofffreisetzungspotential wurde mittels Schüttel eluat bestimmt. Die Ergebnisse werden gerade zusammen mit Diego Bedoya Gonzales in einem reaktiven Transportmodell evaluiert, an dessen Ende eine Prognose für die zukünftige Entwicklung der Ibbenbürener Grubenwässer stehen soll. Die Veröffentlichung dieser Arbeit ist im Sommer/Herbst 2022 geplant.

PROJEKTGEBIET – BAYERISCHE PECHKOHLE

Als weiteres Projektgebiet wurden alte Stollen im Bereich der bayrischen Pechkohle ausgewählt. Die Wasserzusammensetzung dieser Stollen ist in der Qualität typisch für Grubenwässer aus dem Kohlebergbau im Allgemeinen. Da der Bergbau im Projektgebiet aber schon in den 1950er Jahren eingestellt wurde, wurden von der Beprobung Erkenntnisse über die zeitliche Entwicklung von Grubenwasser erhofft. Die Stilllegung des Haushamer Pechkohleabbaus wurde weitestgehend ohne dokumentierte Maßnahmen zur Überwachung der Wasserqualität durchgeführt, daher konzentriert sich diese Studie ausschließlich auf selbst gewonnene Daten. Dazu wurden im Juli und August 2020 zwei Probenahmekampagnen im Gebiet der bayrischen Pechkohle durchgeführt (Umfang ca. 20 Proben). Der Analyseumfang entspricht weitgehend dem schon in Ibbenbüren gewählten. Die Daten wurden im Rahmen einer Masterarbeit analysiert (Yousefi, 2021). Ein dazugehöriges Manuskript befindet sich aktuell in der Begutachtung. Im Rahmen der Beprobung in Hausham wurde festgestellt, dass sich der Grubenwasseraustritt im Bereich einer Haldenrutschung aus dem Jahr 1953 befindet und diese Halde entlang des Fließweges durchflossen wird. Damit rückte zusätzlich zum Schadstoffinventar des Grubenwassers selbst auch noch die Rolle der Interaktion zwischen Grubenwasser und Haldenmaterial in den Fokus und es wurden Elutionsversuche von Feststoffproben der ehemaligen Halde durchgeführt. Die geogen bedingten relativ hohen Kalziumgehalte des Haldenmaterials bewirken in diesem Fall eine Übersättigung des Grubenwassers an Kalzit, sodass es im Verlauf des Fließweges zur Ausbildung von Sinterterrassen kommt. In Hausham konnte gezeigt werden, dass sich im Grubenwasser enthaltene Schadstoffe sowohl durch Sorption/Co-Fällung an Eisenhydroxidphasen als auch durch Sorption und isomorphen Einbau relevanter Stoffe in den neu gebildeten Kalzit zu einer Abnahme des Schadstoffinventars entlang des Fließweges kommt. Diese Entwicklung ist dahingehend bemerkenswert, da bei der Behandlung von Grubenwasser oft die Frage nach der Eignung passiver Reinigungsmethoden gestellt wird. Das Beispiel Hausham zeigt, dass bei geeigneter Zusammensetzung des Ausgangsgesteins selbst eine natürliche passive Reinigung erfolgreich ist und daher bei geeigneter Planung davon auszugehen ist, dass eine passive Reinigung in den allermeisten Fällen auch erfolgreich angewandt werden kann, sofern die individuellen relevanten Reaktionsmechanismen richtig interpretiert werden. Diese Interpretation benötigt wiederum geeignete Datensätze, und es wird entsprechend empfohlen, immer ein möglichst breit gefächertes Messprogramm schon während der Betriebsphase vorzuschreiben, das nicht auf wenige potentiell umweltschädliche Stoffe beschränkt ist, sondern neben Hauptanionen und -Kationen, Lithium und Bromid in geeigneten zeitlichen Abständen auch die Bestimmung stabiler Isotopenverhältnisse vorschreibt.

OCKERABLAGERUNG - DICKENBERGER STOLLEN

Im Ibbenbürener Westfeld wurden Feststoffproben der dort in großer Menge anfallenden eisenhaltigen Ablagerungen entnommen und chemisch-mineralogisch interpretiert. Hintergrund dieser Beprobung war die oft im Raum stehende Frage nach der Verwertbarkeit solcher sekundären Ablagerungen. Der Feststoff wurde in Sorptionsversuchen bezüglich seiner Adsorption von Zink untersucht und es konnte gezeigt werden, dass der Einsatz des Materials zur Sanierung von Schwermetallkontaminationen prinzipiell möglich ist, das Material aber entsprechend aufbereitet werden muss, da das Rohprodukt schon in hohem Maße „kontaminiert“ ist. In diesem Zusammenhang und mit der Frage der optimalen Aufbereitung werden aktuell noch Versuche durchgeführt.

Ganz allgemein führt aber die starke Sorption diverser Metalle und organischer Phasen an den Ockern dazu, dass es möglich ist, diese Stoffe im Feststoff nachzuweisen, auch wenn sie in der Flüssigphase unterhalb der Nachweisgrenze liegen können. Beim Monitoring des zukünftigen Grubenwasseranstieges liegt daher in solchen Feststoffanalysen enormes Potential, da RFA Analysen relativ kostengünstig durchzuführen sind und sich eine Änderung des Wasserchemismus auch dort in hoher Sensitivität niederschlägt. Eine Publikation der Ergebnisse dieser Studie ist derzeit in Bearbeitung.

LITERATUR

Bässler, R., 1970. Hydrogeologische, chemische und Isotopen-Untersuchungen der Grubenwässer des Ibbenbürener Steinkohlereviere. Zeitschrift der Dtsch. Geol. Gesellschaft 209–286.

Bedoya-Gonzalez, D., Hilberg, S., Redhammer, G., Rinder, T., 2021. A Petrographic Investigation of the Carboniferous Sequence from the Ibbenbüren Mine: Tracing the Origin of the Coal Mine Drainage. Miner. <https://doi.org/10.3390/min11050483>

Rinder, T., Dietzel, M., Stammeier, J.A., Leis, A., Bedoya-González, D., Hilberg, S., 2020. Geochemistry of coal mine drainage, groundwater, and brines from the Ibbenbüren mine, Germany: A coupled elemental-isotopic approach. Appl. Geochemistry 121, 104693. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104693>

Yousefi, N. 2021. Entwicklung von Grubenwasser in aufgelassenen Steinkohlebergwerken. Fallbeispiel Hausham – Bayrische Pechkohlenmulde. Masterarbeit, Salzburg.

Veröffentlichungen aus dem Projekt

Aus dem Projekt sind zwölf Veröffentlichungen bereits publiziert oder zur Publikation eingereicht. Details finden sich im Publikationsverzeichnis ab Seite 71 unter den Referenznummern [1], [4], [5], [7], [14], [26], [38], [39], [40], [41], [43] und [44]. Sechs Vorträge wurden auf internationalen Konferenzen gehalten.



MONITORINGMAßNAHMEN FÜR NACHHALTIGE GRUBENWASSERANSTIEGSPROZESSE

Prof. Dr. Ch. Melchers, Bochum (Projektleiter)

H. Jasnowski-Peters (wiss. Mitarbeiter)

Projektdauer: 2017 – 2022

Kurzfassung der Projektergebnisse

EINLEITUNG

Innerhalb des FBW beschäftigte sich die Arbeitsgruppe Melchers/Jasnowski-Peters mit der „Konzeption von Monitoringmaßnahmen für nachhaltige Grubenwasseranstiegsprozesse“ in allen Steinkohlerevieren der RAG. Ein besonderes Interesse gilt dabei der geologisch-hydrologisch-bergbaulichen Situation im Ruhrrevier, auf das sich in den letzten drei Jahren fokussiert wurde. Diese Monitoringmaßnahmen sind Teil eines Risikomanagements, das auf zwei Grundsätzen beruht: Conformance & Containment. „Conformance“ beschreibt eine langfristige Integrität des Vorhabens, was durch Modellierungen und ihre Anpassungen durch das Monitoring („Benchmarking“) erreicht wird, und „Containment“ den derzeitigen Zustand des Vorhabens und eine Bewertung hinsichtlich der Geschlossenheit des Systems.

Übertragen auf einen nachhaltigen Grubenwasseranstieg bedeutet das: (a) keine Infiltration von Grubenwasser in Trinkwasserreservoirs oder bewirtschaftete Aquifere sowie (b) ein genaues Augenmerk auf bereits bestehende und zukünftige Infiltrationen in den regionalen Grundwasserleiter des Cenomanium/Turonium.

Der Ansatz des Monitoringkonzeptes nach dem Schema des „BOW-TIE“ - Verfahrens orientierte sich in Anlehnung an Risikomanagement-Initiativen von internationalen Großprojekten.

Grundelemente des Monitorings sind dabei:

- (a) die Parameterauswahl und deren gesicherte Messbarkeit, die sich in Zielwerten (sog. „Baselines“) und ausgedehnten Messnetzen manifestiert,
- (b) Indikatoren zur Beurteilung und Steuerung der jeweiligen Prozesse im Untergrund, sog. präventive und korrigierende Safeguards, die die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Schadensausmaß eines Ereignisses betreffen,
- (c) ein Bewertungssystem in Form einer Ampel-Farbgebung zur Kategorisierung der Ereignisse in Alarmstufen und die sich daraus zwangsweise ergebenden
- (d) Handlungsoptionen, um den Eintritt eines Schadensfalles zu verhindern.

Eine erhebliche Erweiterung und Herausforderung für das Monitoring spielt dabei das Einbeziehen der speziellen hydrologischen, hydrochemischen und isotopengeochemischen Eigenschaften der verschiedenen Grundwasserleiter in das Monitoringkonzept. Der Fokus der hydrogeochemischen Arbeiten in dem Zeitrahmen des FBW (2017-2022) lag auf (a) der belastbaren, eindeutigen Unterscheidung der oberkarbonischen Grubenwässer von Formationswässern im Deckgebirge und regionalen Aquifern und (b) dem Verständnis der hydrologischen Vorgänge innerhalb der Grubenbaue und der Wasserbilanzierung für Grubenwasserströme in den einzelnen Wasserprovinzen des Ruhrreviers, was letztendlich zu einem hydrologischen Prozess-/Systemverständnis beiträgt.

Es gibt bei der Vorgehensweise der Auswahl hydrogeochemischer Tracer keinen singulären Ansatz, sondern vielmehr wurde eine Kombination von hydrochemischen Parametern, die aufgrund ihres unterschiedlichen geochemischen Verhaltens indikativ für Prozesse oder ihren lithologischen Ursprung sind, angestrebt.

METHODIK

Die hydrogeochemischen Analysewerte beinhalten eigene Analysen, Fallstudien sowie interne hydrochemische Referenzdatenbestände der RAG (2013-2020) und publizierte Literaturdaten aus Balneologie und Grundwassermessstellennetzen von Wasserversorgern und Behörden.

Insgesamt beinhaltet der Analyse-Pool an unterschiedlichen Standorten der Probenahme (Mehrfachbeprobungen ausgeschlossen) 135 eigene Analysen, 60 interne Analysen, 30 Analysen von Wasserversorgern

und 326 Literaturdaten. Insgesamt sind somit über 550 Probandensätze berücksichtigt.

Bei den eigenen Analysen übertage (Dichteschichtung, Fallstudien) wurden Leitfähigkeit, der pH-Wert, Redox-Spannung, Temperatur und Sauerstoffgehalt jeweils vor Ort bestimmt.

Die hydrochemische Analyse der Hauptkationen, -anionen und Spurenelemente wurde in den analytischen Laboren von Umwelt Control Lünen (UCL) mit dem Verfahren der optischen Emissionsspektroskopie mittels induktiv gekoppelten Plasmas (ICP-OES) und Ionenchromatographie durchgeführt. Es wurden Kationen und Anionen nach DIN-Normen (DIN 11885, DIN 10304-1 und DIN 38409-7) gemessen. Die Lithium-Messungen wurden in Kollaboration mit dem GD NRW in den Laboren des GD mittels axialer Plasmabetrachtung an der ICP-OES durchgeführt.

RESULTATE

Nach intensiver Recherche und einer Qualitätskontrolle der vorhandenen Literaturdaten sowie interner Datenquellen, die auf ihre Ionenbilanz untersucht wurden, wurden diese Daten mit aktuellen, eigenen hydrogeochemischen Daten verschnitten.

Folgende Elementverteilungen oder Elementkonzentrationen haben die Voraussetzung, als belastbare hydrochemische Tracer im Rahmen des Grubenwasseranstiegs zu fungieren:

- » Bromidkonzentrationen und Chlorid/Bromid-Verteilung [mg/L]
- » Lithium-Kationenkonzentration [mg/L]
- » Strontiumisotope $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

Weitere erhobene, hydrochemische Daten, die Aussagen über die Herkunft der Wasserkörper und deren Salinität erlauben, sind:

- » Wasserstoff- und Sauerstoffisotope $\delta^2\text{H}$ und $\delta^{18}\text{O}$
- » Molares Natrium vs. Chlorid-Verhältnis: Na/Cl [mol/mol]

Die erste geochemische Fragestellung, die innerhalb des geplanten Grubenwasseranstiegs im Ruhrrevier eine Besonderheit darstellte, sind die Unterscheidung zweier im Untersuchungsraum vorkommender, hoch-salinarer Formationswässer, die elektrische Leitfähigkeiten bis zu 200 mS/cm erreichen:

Cenomanium/Turonium Aquifer vs. Formationswasser Oberkarbon.

Bislang gab es keinen eindeutigen und belastbaren geochemischen Beweis der klaren Unterscheidung beider Wasserkörper. Die Herkunft der Salinität für den Cenomanium/Turonium Aquifer durch Ablaugung von Steinsalz konnte durch die Verschneidung der „Wasserisotope“ mit dem molaren Na/Cl Verhältnis und letztendlich eindeutig durch das Chlorid/Bromid Verhältnis $\text{Cl}/\text{Br} > 1450$ nachgewiesen werden (Abb.1). Für den Cenomanium/Turonium Aquifer ergaben die Daten die Herkunft durch rein meteorische Wässer, die von den nördlichen Bereichen des Münsterländer Beckens durch steinsalzführende Formationen perkolieren, hier ihre Salinität erhöhen und in einem hydrologisch gekoppelten System am Südrand des Münsterländer Beckens vor der bergbaulichen Zeit als Solen zu Tage traten. Beim Durchteufen der Deckgebirgsschichten wird dieses gespannte Salinar regelmäßig angetroffen. Die Formationswässer des Oberkarbons konnten eindeutig als konnate Wässer mit dem charakteristischen marinen molaren Na/Cl Verhältnis, resultierend aus einer starken Wasser-Gesteins-Wechselwirkung identifiziert werden. Diese Wässer besitzen ein moderates Bromid/Chlorid-Verhältnis zw. $450 < \text{Cl}/\text{Br} < 1450$ (Abb. 1).

Ein weiteres, wichtiges Unterscheidungskriterium ähnlicher Formationswässer, die es bei einem prognostizierten Grubenwasseranstieg zu beachten gibt, sind die Formationswässer mit ausgeprägter Sulfidoxidation. Hierzu zählt das Formationswasser der Emscher-Formation, in der sehr viel vorhandener framboidaler Pyrit oxidiert wird und damit ein potentiell Grubenwasser imitieren könnte.

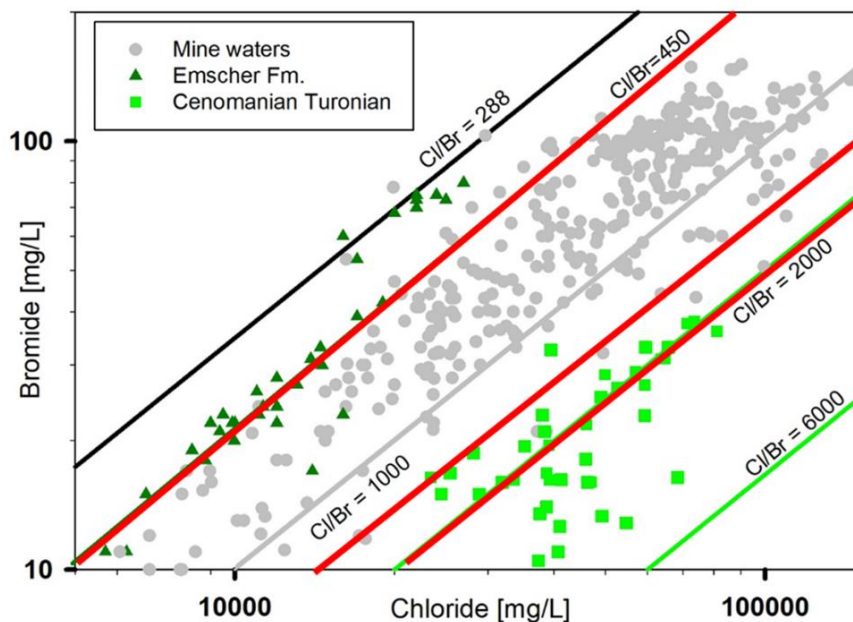


Abbildung 1: Log-Log-Diagramm der Chlorid (Cl-) zu Bromid (Br-) Verhältnisse von Literaturdaten (Puchelt, 1964, Michel, 1974 und Wedeward, 1995) im Vergleich zu Daten der Heilbäder des Hellwegs und Osnings sowie interner Datenquellen; Linien stellen definierte Cl/Br (mg/mg) Verhältnisse dar

Die Chlorid/Bromid Verteilung ist bei diesen Wässern ebenfalls ein sehr gutes Unterscheidungskriterium, da von einem erhöhten Bromeintrag durch organisch gebundenes Brom ausgegangen wird. Eine erst noch im Detail zu verifizierende Verteilung weist hier den Wert von Cl/Br > 450 auf. Meerwasser besitzt ein Verhältnis von Cl/Br = 288 (Abb. 1).

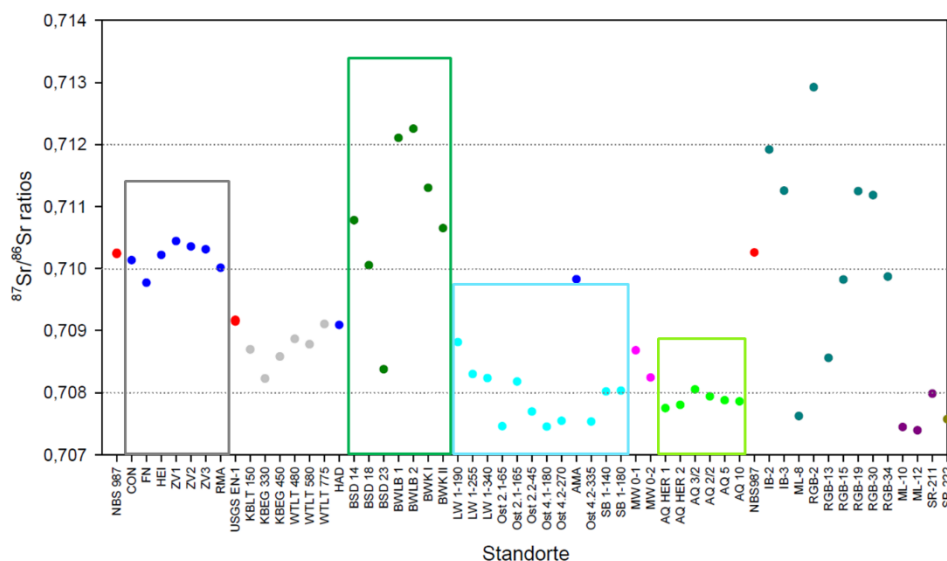


Abbildung 2: Strontiumisotope ausgewählter Probenstandorte. Besonderes Augenmerk wird auf die Zentrale Wasserhaltung (blaue Punkte) im Vergleich zu den Deckgebirgsproben aus den TiefenGWMS (hellblaue Punkte) gelegt; die Schachtprofilmessungen im Bereich Waltrop und Königsborn (graue Punkte) zeigen eine Mischungsreihe beider Wasserkörper

Als weiteres Kriterium in diesem Fall dienen die Strontiumisotope. Sie weisen für die oberkretazischen Formationswässer zudem die typischen Meerwasserkonzentrationen von 0,708-0,709 auf, die für die oberkarbonischen Wässer hier anhand der Wasserhaltungs-Mischproben deutlich über 0,709 liegen. Eine Mischungreihe beider Wasserkörper mit unterschiedlichen Strontiumisotopie-Signaturen zeigen die Schachtprofilmessungen in Königsborn und Waltrop (Abb. 2).

Lithium reagiert im Vergleich zu Bromid geochemisch unterschiedlich, obwohl sie bei bei Evaporationsvorgängen als konservativ und inkompatibel gelten. Lithium substituiert sehr gering Natrium in Kristallen – eine Parallele zum Anion Bromid vs. Chlorid.

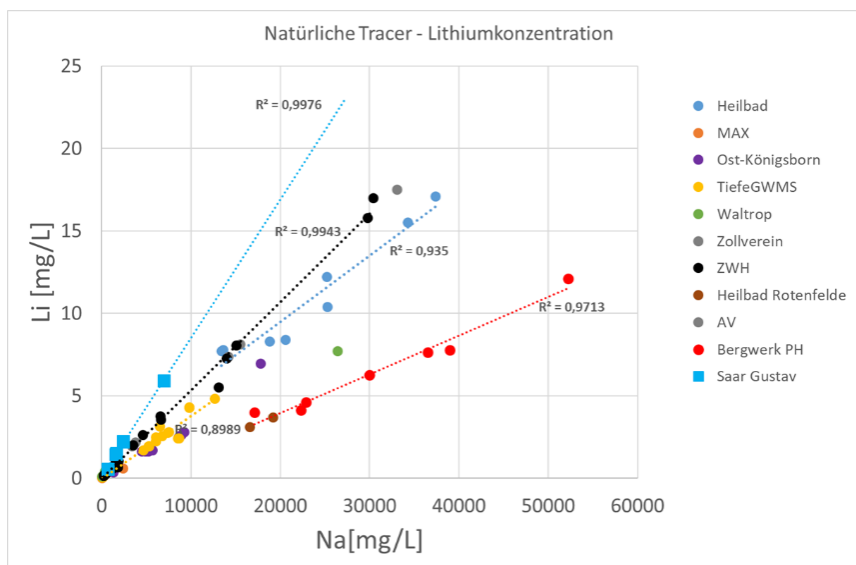


Abbildung 3: Lithiumkonzentrationen [mg/L] im Vergleich zu Natriumkonzentrationen [mg/L] ausgewählter Grundwässer; Grubenwässer (schwarze Punkte) im Vergleich zu den TiefenGWMS (gelbe Punkte) und Heilbädern (blaue Punkte).

Auffällig in der Auflistung der Lithiumkonzentrationen am Beispiel „Ruhrrevier“ sind hier die niedrigeren Li/Na-Verhältnisse für das Deckgebirge/ TiefeGWMS und die Heilbäder im Vergleich zu den Grubenwässern der Zentralen Wasserhaltung.

Die Bandbreite der natürlichen Tracer gepaart mit ihren unterschiedlichen geochemischen Eigenschaften liefern Hinweise auf vielfältige Prozesse bestehend aus Lösungsverhalten und Herkunft der Tracer.

AUSBLICK

Das Verhalten der als geochemische Tracer identifizierten Parameter wird nun im Detail für die einzelnen Wasserprovinzen untersucht. Statistisch werden hierzu die Clusteranalyse und multivariate Statistikverfahren herangezogen, um kausale Zusammenhänge zu identifizieren. Es wird im Bereich der stabilen isotope-geochemischen Tracer weitere Forschungen geben, die das Spektrum der vorhandenen Tracer noch sensitiver machen werden.

Veröffentlichungen aus dem Projekt

Aus dem Projekt sind acht Veröffentlichungen bereits publiziert oder zur Publikation eingereicht. Details finden sich im Publikationsverzeichnis ab Seite 71 unter den Referenznummern [15], [16], [17], [18], [19], [20] [21] und [26].



EVALUATION DER DURCHLÄSSIGKEIT DER EMSCHER-FORMATION

Prof. Dr. Ch. Melchers, Bochum (Projektleiter)

H. Jasnowski-Peters (wiss. Mitarbeiter)

L. Rose (stud. Mitarbeiterin)

T. Genth (stud. Mitarbeiter)

Projektdauer: 2019 – 2022

Teilprojekt „Bestimmung und Quantifizierung der Minerale, mit besonderem Fokus auf der Tonmineralogie, innerhalb der Emscher-Formation anhand der Bohrung „Waltrop 2“

Im Münsterländer Kreidebecken ist die Emscher-Formation als Teil des Deckgebirges eine wichtige Formation, wenn es um die Durchlässigkeit in Bezug auf den Grubenwasseranstiegsprozess geht. Es handelt sich dabei um die bis über 1000 m mächtigste Formation im Münsterländer Kreidebecken. Aufgrund lithofazieller Diversitäten und regionaler, tektonischer Einflüsse, ist die Formation als faziell heterogen einzustufen. Aus petrologischer Sichtweise ist die Evaluation der Mineralgehalte mit dem Schwerpunkt der Tonmineralogie und deren Verhältnisse untereinander ein wichtiger Faktor zur langzeitlichen Betrachtung der „Durchlässigkeit“. Die Tonminerale, und insbesondere die quellfähigen Tonminerale, haben aufgrund ihrer geringen Korngröße, der großen Oberfläche und der Wechselwirkungen auf molekularer Ebene einen Einfluss auf die hydraulische Durchlässigkeit. Speziell die quellfähigen Tonminerale der Smektit-Gruppe haben das Potential zur Selbstabdichtung in Störungsbereichen.

METHODIK

Der Kernverlauf wurde anhand der gekernteten Abschnitte aus den Bohrungen „Waltrop 1 und 2“ (Abbildung 1), nach makroskopischen Gesichtspunkten lithologisch-sedimentologisch analysiert. Bei den Proben handelt es sich um Bohrspülungsmaterial (Cuttings) aus der Bohrung „Waltrop 2“. Anhand dieser Proben wurde ein Workflow zur Klassifizierung und Quantifizierung der Mineralgehalte erarbeitet. Dabei wurde ein erstes Tiefenprofil (40 – 430 m) des Mineralbestands mit einer Auflösung von ca. 40 m pro Probe erstellt.

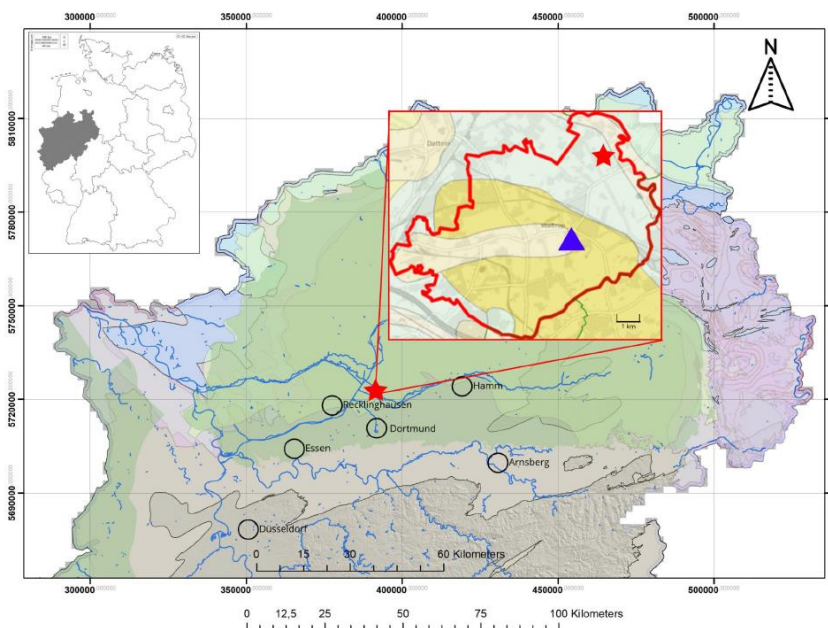


Abbildung 1: Abgedeckte geologische Karte des Münsterländer Kreidebecken; Quartäre und Tertiäre Schichten entfernt; Bohrpunkt der Bohrungen Waltrop 1 und 2 (roter Stern); Schacht „Waltrop 3“ (blaues Dreieck)

Die Untersuchungen wurden größtenteils mittels Röntgendiffraktometer (XRD) nach verschiedenen Präparationen des Probenmaterials durchgeführt. Begleitend wurden Analysen am Rasterelektronenmikroskop (REM) (Zeiss Supra 40 VP) kombiniert mit Energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDAX), durchgeführt. Der Karbonatgehalt wurde mittels thermischem Differenzierungsverfahren (Elementar soliTOC Cube) nach DIN 19539 (2016) in den Laboren des Geologischen Dienst NRW bestimmt. Die Korngrößenverteilung bis $\geq 0,063$ mm wurde per Siebverfahren ermittelt. Die Schluff- und Tonfraktion wurde anhand des

Kernmaterials der Bohrung „Waltrop 1“ analysiert. Durch Pipettanalyse nach DIN ISO 11277 (2002) mittels vollautomatisierten Sedimaten (UGT Sedimat 4-12) und unter Berücksichtigung des zuvor, mit Salzsäure entfernten Karbonates wurde die Zusammensetzung nach DIN 22015 bestimmt. Die XRD-Analysen (Panalytical X'pert Pro) erfolgten im Labor des Deutschen Bergbaumuseum Bochum. Die Differenzierung der Minerale erfolgte durch Abgleich der Reflexe mittels der Software „Profex“ (Doebelin und Kleeberg, 2015), unter Verwendung der „COD“ Datenbank (Vaitkus, Merkys und Gražulis, 2021).

Um die Hauptreflexe der Tonminerale im Röntgendiffraktogramm zu verstärken, mussten die Tonminerale senkrecht zu ihrer C-Achse eingeregelt werden (Moore und Reynolds, 1997). Dafür wurde die <2 µm Fraktion in Suspension mittels Vakuum Filtration auf einen 0,45 µm Filter eingeregelt. Die eingeregelte Probe wurde auf einen Glasobjektträger übertragen.

Die Texturpräparate wurden im luftgetrockneten Zustand gemessen. Um eine Aufweitung/Quellung der Smektit-Gruppen Tonminerale zu erzeugen, wurden die Texturpräparate mit Glykol bedampft. Durch diesen Effekt „verschieben“ sich die Smektit-Reflexe im Röntgendiffraktogramm und machen eine Bewertung der Art und des Anteils innerhalb einer Wechsellagerung möglich. Im Anschluss wurden die Texturpräparate bei 550 °C erhitzt. Durch diesen Vorgang werden die Tonminerale der Kaolinit und Smektit-Gruppe amorph. Im Vergleich der Röntgendiffraktogramme bewirkt dies ein „Wegfallen“ von möglichen Kaolinit und Smektit-Gruppen Reflexen. Durch Überlagerungseffekte können so Tonminerale der Chlorit-Gruppe identifiziert werden.

ERGEBNISSE

Die Kernaufnahme zeigt eine Wechselfolge von grauen bis schwach grünlichen, pyritischen Ton-, Schluff- und Kalkmergelsteinen mit hohen Mikrit-Anteilen. Aus der Bohrung „Waltrop 2“ (bis 71 m) wurde das Gestein als fein-, blättrig oder flaserig-geschichtet eingestuft. Die Schichtungen alternieren mit bioturbaten Abschnitten. Viele Bioklasten, größtenteils Bivalven-Schalenreste, sind zu Pyrit umkristallisiert. Einzelne Inoceramen- und Ammoniten-Steinkerne wurden im Kernverlauf identifiziert.

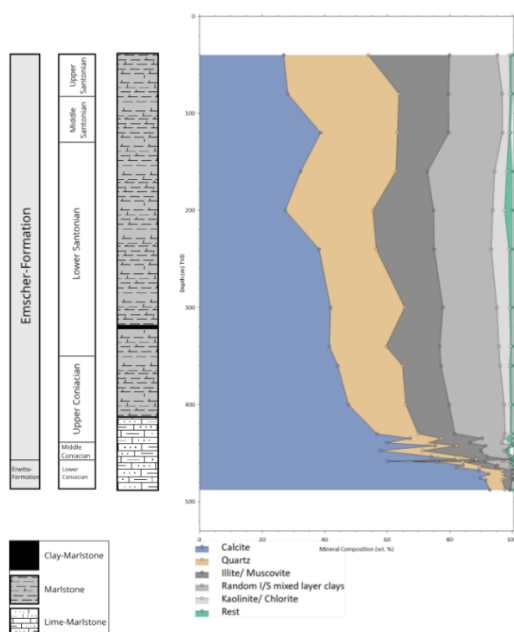


Abbildung 2: Mineralzusammensetzung der quantifizierten Pulverpräparate im Verhältnis zur Tiefe und Lithostratigraphie

Im REM wurden in jeder Probe kalkige Nanofossilien, meist Coccolithophoriden, identifiziert. Ebenfalls wurde im gesamten Teufenverlauf framboidaler Pyrit identifiziert. Aus den kombinierten Korngrößen und Karbonat-Analysen, lässt sich das Gestein im gesamten als Schluffmergelstein, stark tonig, einstufen.

Im Kernverlauf wurde ein Karbonat-Gehalt (Kalzit) von durchschnittlich 39 Gew.-% gemessen. Als Siliziklastika konnten Quarz, Illit/Smektit (I/S), Illit/Muskovit, Kaolinit/Chlorit und Feldspat identifiziert werden. Des Weiteren wurde Pyrit in den Proben identifiziert. Die Tonminerale machen ca. 1/3 der gesamten Zusammensetzung aus. Dabei weisen Illit/Smektit (I/S) und Illit/Muskovit in etwa gleiche Anteile auf. Die Illit/Smektit-Tonminerale weisen einen durchschnittlichen Anteil von 18 Gew.-% auf.

Die Tonminerale weisen keinen bis einen sehr schwach abnehmenden Trend im Kernverlauf auf. Die Analyse der Texturpräparate zeigt, dass Quarz in der Tonfraktion ($<2\ \mu\text{m}$) vorhanden ist. Mittels Glykolbehandlung konnte Illit/Smektit (I/S) in Wechsellagerung mit einem Illit-Anteil von durchschnittlich ca. 20 Gew.-% identifiziert werden. Der Wechsellagerungstyp wurde als „random“ eingestuft. Durch Erhitzen der Texturpräparate konnte Chlorit in allen Proben identifiziert werden (Abbildung 3). Der Anteil nimmt mit der Tiefe zu, konnte jedoch nicht quantifiziert werden.

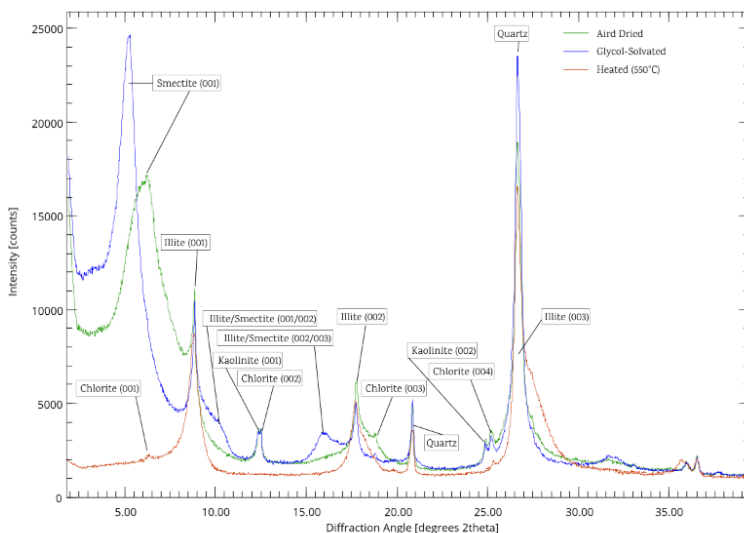


Abbildung 3: Röntgendiffraktogramme der Texturpräparate der Probe 430 m; Vergleich: luftgetrocknet (grün), Glykol behandelt (blau), erhitzt auf 550 °C (rot); Mineral-Reflexe mit zugewiesenen und den Millerschen Indizes (hkl)

INTERPRETATION

Das Quellvermögen von Smektit-Tonmineralen ist ein wichtiger Parameter bei tektonisch bedingten Durchlässigkeiten in der Formation. Die durch die Quellung ausgelöste Selbstabdichtung kann in Bereichen mit hohen Smektit-Anteilen für ein „Schließen“ der Störung sorgen. Der festgestellte Wechsellagerungstyp deutet auf ein niedriges Diagenesepotential mit Temperaturen von ca. 60 °C hin. Ein weiterer Marker für diagenetische Prozesse ist der Chlorit-Anteil, welcher im Kernverlauf zunimmt. Die Zunahme des Kalzits im Verlauf deutet auf einen stärker hemipelagisch geprägten Karbonat-dominierenden Plänerkalkstein hin. Im Kontrast dazu stehen die später sedimentierten detritischen Abschnitte. Der höhere detritische Anteil in den oberen Abschnitten, welcher durch höhere Quarz Anteile geprägt ist, ist auf inversionsbedingte Hebungen oder umgelagerte ältere Sedimente zurückzuführen. Der hohe Anteil an Quarz in der $<2\ \mu\text{m}$ Fraktion, welcher als Microquarz eingestuft werden kann, könnte für ein spröderes Verhalten der Formation sorgen.

AUSBLICK

Aufgrund der großen Faziesunterschiede im Ost-Westverlauf innerhalb der Emscher-Formation, müssen weitere Bohrungen aus dem Konzept „Tiefe Pegel“ analysiert werden. Das Ziel ist es, belastbare Daten über die gesamte Ausbreitung der Formation zu ermitteln. Der Microquarz-Anteil, welcher Auswirkungen auf die Integrität und das gebirgsmechanische Verhalten haben kann, wird zukünftig durch aufbereitete $<2\ \mu\text{m}$ Pulverpräparate quantifiziert. Für eine bessere Darstellung der elementaren Zusammensetzung, welcher bis dato aus den quantifizierten Röntgendiffraktogrammen abgeleitet wurde, sind Röntgenfluoreszenz Analysen geplant.

LITERATUR

- Doebelin, N. und Kleeberg, R. (2015) „Profex' a graphical user interface for the Rietveld refinement program „BGMN“, Journal of Applied Crystallography, 48(5), S. 1573–1580. doi: [10.1107/S1600576715014685](https://doi.org/10.1107/S1600576715014685).
- Moore, D. M. und Reynolds, R. C. (1997) „X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals“, Clay Minerals. doi: [10.1180/claymin.1999.034.1.21](https://doi.org/10.1180/claymin.1999.034.1.21).
- Vaitkus, A., Merkys, A. und Gražulis, S. (2021) „Validation of the {C}rystallography {O}pen {D}atabase using the {C}rystallographic {I}nformation {F}ramework“, Journal of Applied Crystallography, 54(2), S. 661–672. doi: [10.1107/S1600576720016532](https://doi.org/10.1107/S1600576720016532).

Teilprojekt 2: Ermittlung petrophysikalischer Kenngrößen (Permeabilität/Durchlässigkeit)

Für ein nachhaltiges Grubenwassermanagement ist die Berücksichtigung der hydraulischen Durchlässigkeit unerlässlich. Der Anstieg des Grubenwassers, und damit verbunden die Reduzierung der Grubenwasserhaltungsstandorte, sind Hauptbestandteil des Grubenwasserhaltungskonzepts im ehemaligen Steinkohlenrevier des Ruhrgebiets. Ein schrittweiser Anstieg von durchschnittlich 900 auf 600 m Pumphöhe machen die Reduzierung von 13 auf 6 Grubenwasserhaltungsstandorte und die Befreiung mehrerer Fluss- und Bachläufe von Grubenwasser möglich. Das oberste Schutzziel, der Schutz der Trinkwasservorkommen, ist durch einen Abstand zum Grubenwasser von 150 m dauerhaft zu gewährleisten. Für ein umfassendes Bild der hydraulischen Verhältnisse des Deckgebirges erfolgt eine lithostratigraphische, petrologische und petrophysikalische Analyse der von der RAG AG erstellten Bohrungen. Die petrophysikalischen Kenngrößen Porosität und Permeabilität bzw. hydraulische Durchlässigkeit stehen folgend im Fokus. Untersucht wurden Proben aus der Emscher-Formation, sowie Proben des Bentheimer Sandstein zu Vergleichszwecken.

Die Porosität gibt den Hohlraumanteil eines Gesteins an und ergibt sich als Quotient aus dem Porenvolumen und dem gesamten Gesteinsvolumen. Dabei wird, abhängig von der Berücksichtigung der Poren und Risse, von verschiedenen Porositäten gesprochen. Werden die gesamten Poren und Risse erfasst, handelt es sich um totale Porosität. Dagegen werden bei der offenen Porosität nur die miteinander verbundenen Poren und Risse einbezogen. Die geschlossene Porosität beinhaltet nur die Poren, die keine Verbindungen haben. Die Zusammensetzung der Emscher-Formation aus Karbonaten und Siliziklastika bedingt ein großes Spektrum an Poren. Karbonate bilden aufgrund vieler verschiedener Arten von Poren ein Netzwerk von Porengeometrien, während es bei Siliziklastika durch Diagenesevorgänge und damit verbundenen Lösungserscheinungen zu unterschiedlichen Porengrößen kommt. Dies führt zu einem großen Anteil geschlossener Poren.

Die intrinsische Permeabilität (κ) ist eine Gesteinsgröße, welche die Durchlässigkeit für ein poröses Medium angibt. Die hydraulische Durchlässigkeit (κ_i) bezieht zusätzlich die Dichte und Viskosität der Flüssigkeit mit ein. Diese können über die Porenverteilung oder die Messung mit der Darcy-Gleichung ermittelt werden.

METHODIK

Mit dem Hg-Porosimeter wurden Plug-Proben mit einer Länge und einem Durchmesser von jeweils etwa 2,5 cm, untersucht (Abbildung 1). Die Durchführung der Porositätsmessungen erfolgt mit Quecksilber (Hg), welches aufgrund seiner geringen Benetzbarkeit und hohen Oberflächenspannung verwendet wird. Zur Dichtebestimmung der Plug-Gesteinsproben wird ein Helium-Gaspyknometer, sowie zusätzlich das Hg-Porosimeter genutzt. Die untersuchten Proben aus dem Emscher Mergel sind aus einem Teilstück der Bohrung Pferdekamp 1 aus der Tiefe 495,68 – 495,96 m gebohrt. Für die Proben aus dem Bentheimer Sandstein wurden Plugs aus Gesteinsblöcken vom Typ Gildehaus gebohrt.

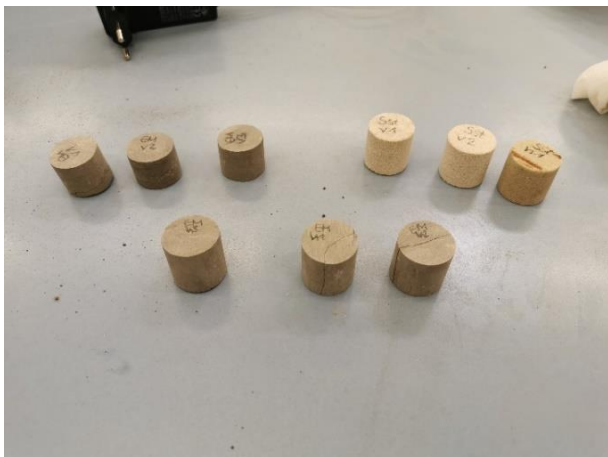


Abbildung 1: Plug-Proben des Emscher Mergel und Bentheimer Sandstein

Zur Herstellung der Plug Proben werden passende Gesteinsblöcke des Bentheimer Sandstein gewählt und das etwa 30 cm lange Teilstück der Bohrung des Emscher Mergel in weitere Teilstücke gesägt. Diese Teilstücke werden horizontal oder vertikal ausgerichtet auf eine Runde Platte positioniert und mit Gips stabilisiert. Im Anschluss können mit der Gesteinssäge von oben Stücke herausgesägt werden, die im Anschluss auf die richtige Länge gesägt und planparallel geschliffen werden.

Tabelle 1: Ergebnisse der Porosimetrie-Untersuchungen an Plug-Proben der Emscher-Formation und des Bentheimer Sandsteins

	Gesamtes Porenvolumen [m ² /g]	Mittlerer Porendurchmesser [µm]	Durchschnitt Porendurchmesser [µm]	Gesamt Dichte [g/mL]	Skelettdichte [g/mL]	Porosität [%]
EM h1	9,951	0,03475	0,02582	2,29	2,685	14,7094
EM h2	10,658	0,02954	0,02326	2,274	2,6471	14,0959
EM h3	10,145	0,03322	0,0257	2,2735	2,669	14,8192
EM v1	10,581	0,03544	0,02677	2,2369	2,6579	15,8393
EM v2	12,31	0,028	0,02128	2,2497	2,6385	14,736
EM v3	11,475	0,02646	0,02175	2,2858	2,666	14,2636
Sst v1	0,147	28,10055	3,1934	2,0061	2,6233	23,5259
Sst v2	0,31	26,49321	1,35345	2,0846	2,668	21,866
Sst h1	0,269	27,70771	1,64421	2,0318	2,6207	22,4717

RESULTATE

Die Ergebnisse der Messungen sind als Übersicht in Tabelle 1 dargestellt. Der Emscher Mergel hat im Mittel eine Porosität von 14,7 %, der mittlere Porendurchmesser liegt bei 0,03 μm . Der Bentheimer Sandstein hat dagegen eine durchschnittliche Porosität von 22,6 % und einen mittleren Porendurchmesser von 27,43 μm . Abbildung 2 verdeutlicht die Unterschiede: während die Porosität und der mittlere Porendurchmesser beim Bentheimer Sandstein ähnlich hoch sind, liegen die Werte beim Emscher Mergel weit auseinander.

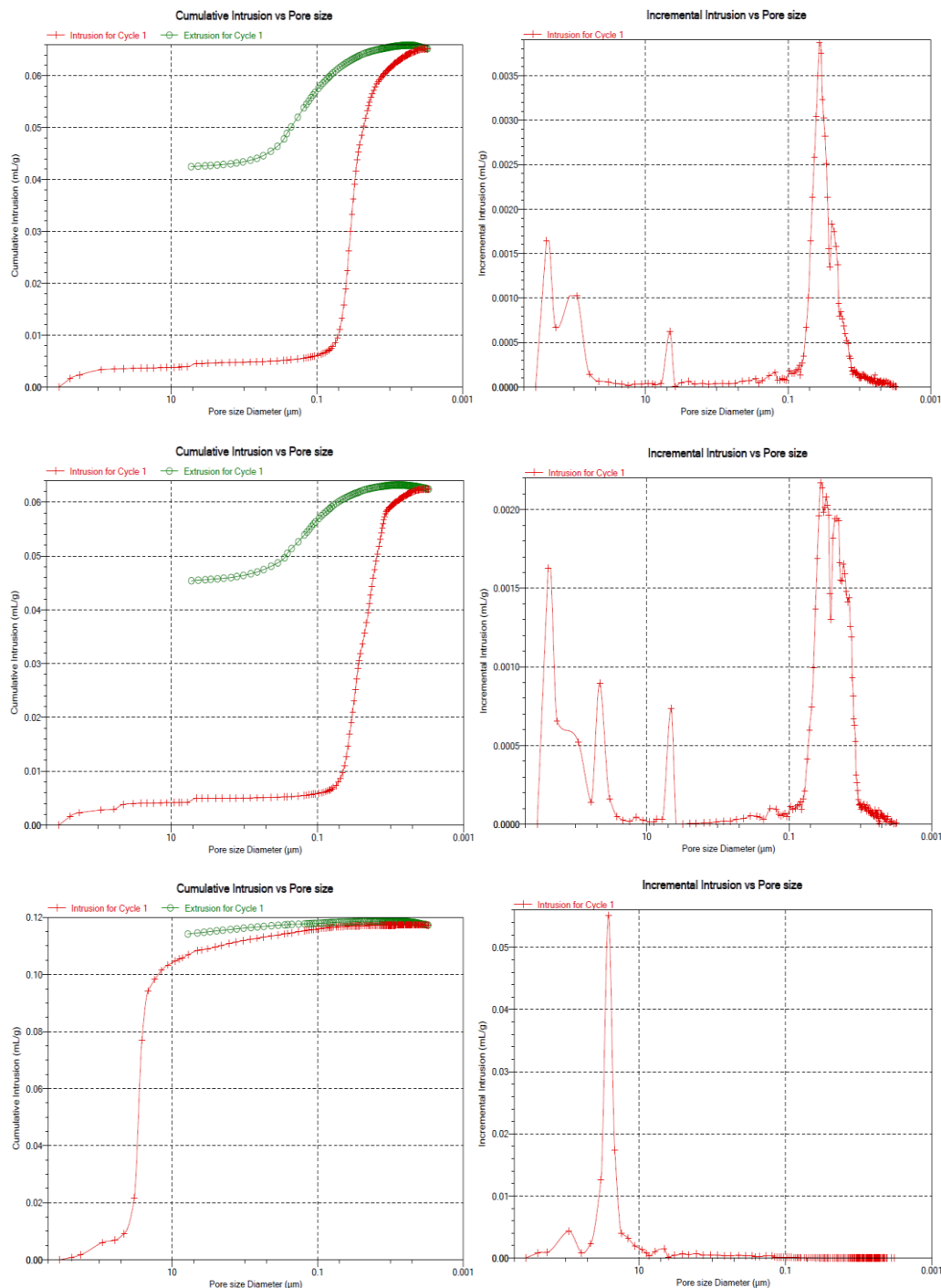


Abbildung 2: Quecksilber-Intrusions- und Extrusionsverläufe an folgenden Plug-Proben: EM h3 (oben), EM v3 (mitte), BS v1 (unten); Kummulative Intrusionssvolumen vs Porengröße und Intrusionssvolumen-Inkremente vs Porengröße sind jeweils pro Probe dargestellt.

In der Hg- porosimetrie wird in einem sog. Penetrometer die Probe unter Druck mit Quecksilber umspült. Je nach Druckaufgabe wird das Quecksilber in die Porenräume gedrückt. Dabei kommt es auf den sog. kleinsten Porenhalsdurchmesser an, welche Poren mit dem nicht benetzbaren Fluid Quecksilber gefüllt werden. Neben diesem wichtigen Durchmesser, der für die Permeabilitätsbestimmung herangezogen werden kann, können auch Porengeometrien anhand der Druck-Volumen-Kurven abgeleitet werden. In den Versuchen wurden jeweils Drücke bis zu 414 MPa oder 60.000 psia angewendet, was einem kleinsten Porendurchmesser von ca. 0,006 μm oder 60 Angström entspricht. Größte Poren bis zu 360 μm bilden die Obergrenze der zu messenden Porendurchmesser. Die Kurvenverläufe der Volumeninkremente vs. Porengrößen zeigen bei den beiden Emscher-Formations-Plugs jeweils eine ausgeprägte Bimodalität im Bereich 0,02-0,04 μm . Die horizontal gebohrte Probe zeigt dabei eine stärkere Einregelung und eine Dominanz der größeren Porendurchmesser. Die vertikal gebohrte Probe zeichnet sich durch eine 50:50 Verteilung zweier Porenvolumen aus. Der Bentheimer Sandstein als Pendant zeigt eine unimodale Porengröße bei ca. 25 μm , zylindrische bis äquidistante Porengeometrien und eine sehr gute Durchlässigkeit.

INTERPRETATION

Der Emscher Mergel hat mit im Mittel 14,7 % eine vergleichsweise hohe Porosität im Vergleich zu seinen Porendurchmessern. Der mittlere Porendurchmesser mit 0,03 μm ist dagegen sehr gering. Der Bentheimer Sandstein hat im Vergleich dagegen mit durchschnittlich 22,6 % eine hohe Porosität und mit einem mittleren Porendurchmesser von 27,43 μm sehr große Poren. Dies bedingt eine hohe Durchlässigkeit. Aufgrund des niedrigen Porendurchmessers hat der Emscher Mergel trotz seiner hohen Porosität sehr schwache Durchlässigkeiten für Fluide.

Für eine Übertragung der ermittelten hydraulischen Eigenschaften auf einen größeren Betrachtungsmaßstab, wie Gesteinsformationen, sind Modelle notwendig. Da die messbaren Proben nur einen Bruchteil des Gebirges wiedergeben ist es wichtig, im ersten Schritt die hydraulisch relevanten Strukturelemente zu identifizieren. Damit können im nächsten Schritt repräsentative Proben aus den gewünschten Bereichen genommen werden. Die räumliche Anordnung und hydraulische Durchlässigkeit stehen in enger Beziehung zueinander und sind beide skalenabhängige Eigenschaften des Gebirges. Diese Eigenschaften sind für eine richtige Interpretation der Untersuchungsergebnisse wichtig zu betrachten. Sehr schwach durchlässige Gesteine, wie der Emscher Mergel, sind kleinskalig durch Plugs eindeutiger messbar.

Veröffentlichungen aus dem Projekt

Aus dem Projekt sind fünf Veröffentlichungen bereits publiziert oder zur Publikation eingereicht. Details finden sich im Publikationsverzeichnis ab Seite 71 unter den Referenznummern [10], [11], [12], [13] und [45] .



REAKTIVER STOFFTRANSPORT BEI INITIALER FLUTUNG VON STILLGELEGTEN KOHLEBERGWERKEN

Prof. Dr. M.-Th. Schafmeister, Greifswald (Projektleiterin)

Prof. Dr. S. Hilberg, Salzburg (Projektleiterin)

Diego Alexander Bedoya Gonzalez (wiss. Mitarbeiter)

Projektdauer: 2019 – 2022

Kurzfassung der Projektergebnisse

Die Forschungsaktivitäten des Dissertationsprojektes konzentrierten sich auf die Erstellung eines numerischen Modells, welches die Strömung und den reaktiven Transport von Schadstoffen durch geklüftete Gesteinsabfolgen, welche sich aus dem Strebbau von Kohleflözen ergeben, mathematisch darstellt. Das Modell berechnet dabei den Einfluss des porösen Mediums als auch des anthropogen geklüfteten Gebirges in Bezug auf die Wassermenge und die -qualität. Zu diesem Zweck wurde das Westfeld des Ibbenbürener Reviers als Fallstudie ausgewählt. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Ergebnisse auch auf andere Bergbaufolgelandschaften übertragen werden können. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde das Forschungsprojekt in 4 Phasen unterteilt:

Zu Beginn des Projektes wurde zunächst die vorhandene Literatur über die geomechanische Entwicklung von untertägigen Steinkohlebergwerken sowie die gängigen hydrogeologischen Modelle, die auf diese angewandt werden, zusammengestellt und studiert. Auf Grundlage bestehender Arbeiten und einer umfassenden Durchsicht von Bergbauberichten, Stilllegungsplänen und wissenschaftlichen Artikeln wurde schließlich das konzeptionelle Modell des Ibbenbürener Westfeldes entwickelt.

Im Jahr 2020 konzentrierten sich die Aktivitäten auf die Untersuchung von Bohrkernproben des Westfeldes. Die Proben wurden zunächst makroskopisch analysiert, um das Vorhandensein von bergbaubedingten Bruchzonen festzustellen. Anschließend wurde deren Einfluss auf die Wechselwirkung zwischen Wasser und Gestein mit Hilfe von Mikroskopie, Rasterelektronenmikroskopie (REM), energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX), Röntgenbeugung (XRD) und Röntgenfluoreszenz (XRF) untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass es eine erhebliche Wechselwirkung zwischen dem Grundwasser und dem minder durchlässigen Gestein gibt, die durch Bruchstrukturen begünstigt wird. Die Ergebnisse dieser Phase wurden in der Fachzeitschrift „Minerals“ veröffentlicht und auf der Goldschmidt-Konferenz 2021 vorgestellt.

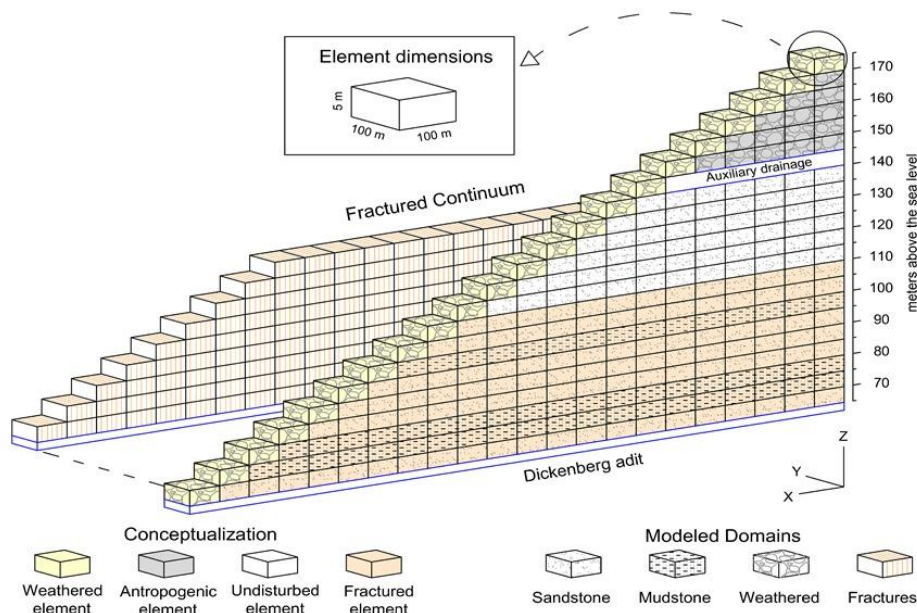


Abbildung 1: Modelldiskretisierung für das doppelte Kontinuummodell des Ibbenbürener Westfeldes. Die Grundwasserneubildung wirkt auf die verwitterten Elemente am oberen Ende der Säulen und eine offene Randbedingung ist am unteren Rand entlang der Strecke definiert. Für jedes orange gefärbte Element ist das Modellierungsnetz in zwei Kontinua aufgeteilt.

Die in den beiden vorangegangenen Phasen gewonnenen detaillierten Informationen wurden verwendet, um ein Doppel-Kontinuum (DK)-Fluidströmungsmodell für das Untersuchungsgebiet zu erstellen. Hierfür wurde

die Software TOUGHREACT eingesetzt, deren numerische Möglichkeiten und Eignung zunächst eingehend geprüft und angepasst wurden. Parallel dazu wurde das DK-Modell mit Messdaten parametrisiert, darunter lithologische, stratigraphische und strukturgeologische Informationen sowie Tiefen der abgebauten Sohlen und hydraulische Parameter. Die Modellergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen dem berechneten und dem gemessenen Grubenwasserabfluss. Das konstruierte Modell war in der Lage, das bimodale Fließverhalten des Grubenstollens zu reproduzieren, indem es ein durchlässiges, geklüftetes Kontinuum mit einer minder leitfähigen Gesteinsmatrix koppelt. Während die Strömung aus dem geklüfteten Kontinuum in den Wintermonaten zu intensiven Abflussereignissen führt, bestimmt die Gesteinsmatrix einen gleichmäßigen Abfluss im Sommer. In der Studie wird auch der Einfluss einzelner und kombinierter Modellparameter auf die simulierte Kurve durch eine detaillierte Sensitivitätsanalyse bewertet. Die Ergebnisse der Konzeptualisierung und des vollständigen Modells wurden im „Hydrogeology Journal“ veröffentlicht und auf der IMWA-Konferenz 2021 sowie einer Schulung über oberflächennahe geothermische Energiesysteme vorgestellt.

Im Jahr 2022 konzentrierte sich die Arbeit auf die Erweiterung des Doppelkontinuum-Strömungsmodells zu einem reaktiven DK-Transportmodell. Diese Erweiterung ermöglicht die Beschreibung der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Entstehung und des Transports von Schadstoffen, die aus der Interaktion zwischen Wasser und Gestein resultieren. Derzeit berücksichtigt das Modell Prozesse wie die Oxidation von Schwefelmineralen, die Ausfällung von Eisenoxiden, die Variation der hydraulischen Eigenschaften der Gesteinsschichten und die Ionenanreicherung des Grubenwassers (z.B. Eisen, Sulfat, Nickel, Zink und Blei). Es wird erwartet, dass der DC-Ansatz eine Verbesserung gegenüber herkömmlichen Grubenwassermodellen darstellt, welche die oben genannten Prozesse anhand von Boxmodellen oder äquivalente poröse Medien behandeln. Erste Teilergebnisse werden auf der 28. Tagung der Fachsektion Hydrogeologie (FH-DGGV) und auf der 17. Karpatenbeckentagung für Umweltwissenschaften vorgestellt. Ebenso wird die vollständige Studie für eine Veröffentlichung in einer peer-review Zeitschrift im zweiten Halbjahr 2022 vorbereitet.

Veröffentlichungen aus dem Projekt

Aus dem Projekt sind acht Veröffentlichungen bereits publiziert oder zur Publikation eingereicht. Details finden sich im Publikationsverzeichnis ab Seite 71 unter den Referenznummern [1], [3], [6], [7], [23], [40], [41] und [42]. 5 Vorträge wurden auf internationalen Konferenzen gehalten.



BEURTEILUNGSGRUNDLAGEN UND -KRITERIEN FÜR GRUBENWASSER

Prof. Dr. G. Wieber, Mainz (Projektleiter)

Dr. M. Stemke (wiss. Mitarbeiterin)

Dipl.-Geol. P. Quensel (wiss. Mitarbeiter)

Projektdauer: 2017 – 2022

Kurzfassung der Projektergebnisse

Im Rahmen der Arbeiten zum Thema „Beurteilungsgrundlagen und -kriterien für Grubenwasser“ liegt der Schwerpunkt auf drei Aufgabenbereichen:

1. Ermittlung von Hintergrundwerten (HGW) für die durch den Bergbau angetroffenen Grubenwässer.
2. Ermittlung und Bewertung der Spurenelementgehalte (z.B. Inwertsetzung kritischer Rohstoffe) in den Grubenwässern in Hinblick auf mögliche Anreicherungen.
3. Grubenwasserhydraulik und Auswirkungen von Grubenwasseranstiegsprozessen.

TEILPROJEKT 1: HINTERGRUNDWERTE FÜR DIE DURCH DEN BERGBAU ANGETROFFENEN GRUBENWÄSSER

Im Rahmen dieses Teilprojekts sollten „Hintergrundwerte“ für Grubenwässer des Steinkohlebergbaus abgeleitet werden. Grubenwässer sind definiert (Burghardt et al., 2017) als „alles Wasser, das mit Tief- und Tagebauen in Kontakt steht oder stand.“

Unter Hintergrundwerten werden die weitgehend geogen bedingten Konzentrationen von Grundwasserinhaltsstoffen verstanden (BLA GEO & LAWA, 2015). Sie dienen der Zustandsbewertung der Grundwasserkörper nach der EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL 2000). Gemäß der Grundwasserverordnung wird der geogene Hintergrund über das 90. Perzentil der Verteilung der Stoffkonzentrationen im Grundwasser der für den Grundwasserkörper maßgeblichen hydrogeologischen Einheit (BLA GEO & LAWA, 2015) definiert. Dabei gestaltet sich die Anwendung der Methode auf Grubenwässer schwierig, da sie aus Wässern unterschiedlicher Herkunft bestehen (Wieber & Stemke, 2021). Die hydrochemische Beschaffenheit ist in Abhängigkeit von dessen Genese stark unterschiedlich.

Walter (2008) hat eine Methode entwickelt, um Anomalien anthropogener aber auch geogener Natur in Datenkollektiven zu erkennen. Die von ihm entwickelte Excel Anwendung basiert auf dem statistischen Verfahren von Lepeltier (1969). Bei Darstellung der nach Größe sortierten Analyseergebnisse auf Wahrscheinlichkeitspapier entsteht eine Gerade soweit eine Normal- oder Lognormalverteilung vorliegt (Wieber, 2002). Die Ordinate ist nach dem Gauß'schen Integral geteilt. In Gebieten mit Anomalien weisen die Geraden Knickpunkte auf. Diese sind darauf zurückzuführen, dass in der betrachteten Häufigkeitsverteilung mehrere Normal- bzw. Lognormalverteilungen vorliegen, die unterschiedliche Mittelpunkte auf der Abzisse aufweisen. Das Excel-basierte Worksheet zur Auswertung von Wasseranalysen wurde bereits für die Ermittlung von Hintergrundwerten oberflächennaher Wässer eingesetzt.

Ziel unserer Untersuchungen ist die Prüfung, ob mithilfe des Worksheets für die Wasserhaltungsstandorte des Steinkohlebergbaus sinnvolle Gruppierungen der ermittelten Analyseergebnisse und Ableitungen von „Hintergrundwerten“ möglich sind. Insgesamt konnten Analyseergebnisse von ca. 4.800 Proben aus den Revieren an der Saar und in Nordrhein-Westfalen ermittelt werden. Der Analysenumfang ist allerdings sehr unterschiedlich. Eine weitere Anwendung kann sich daraus für die Ableitung von Flutungsniveaus ergeben.

TEILPROJEKT 2: INWERTSETZUNG VON GRUBENWÄSSERN DES STEINKOHLEBERGBAUS

Bei der Inwertsetzung der Grubenwässer lässt sich zwischen einer stofflichen und energetischen Nutzung unterscheiden. Hinsichtlich der stofflichen Verwertung wurde das Augenmerk auf die kritischen Rohstoffe (Tab. 1) gelegt (European Union, 2020; Marscheider-Weidemann et al., 2016). Dies sind Stoffe, bei denen ein Mangel besteht oder zukünftig zu erwarten ist.

Hinsichtlich der energetischen Verwertung bietet sich die geothermische Nutzung mittels Wärmetauscher-technologie an. Zu diesem Thema liegen diverse Einzeluntersuchungen sowie eine zusammenfassende Studie des LANUV (2018) vor. Vom *Forum Bergbau und Wasser* wurden zu diesem Thema weitere Fremdaufträge vergeben, zu denen eigene Veröffentlichungen in diesem Schlussbericht vorliegen. Überschläglich eigene

Berechnungen ergeben bei einer Wasserhaltung von 100 Mio. m³/a entsprechend 3.200 L/s und einem angenommenen ΔT von 10 K eine geothermische Leistung von ca. 400 MW. Ein weiterer Forschungsauftrag befasst sich mit dem Thema „Niedrigtemperatur-Stromgewinnung und Energiespeicherung“.

Tab. 1: Kritische Rohstoffe (European Union, 2020)

Antimon	Gallium	Lithium	Phosphor	Tantal
Baryt	Germanium	Magnesium	Phosphorit	Titan
Bauxit	Hafnium	Metalle der Platingruppe	Scandium	Vanadium
Beryllium	Indium	Naturkautschuk	Seltene Erden	Wismut
Borat	Kobalt	Graphit	Siliciummetall	Wolfram
Flussspat	Kokskohle	Niob	Strontium	

Hinsichtlich der stofflichen Nutzung von Grubenwasserinhaltsstoffen wurden einige interessante Anreicherungen identifiziert. Weitergehende Untersuchungen zur Verifizierung und Extraktion werden am Beispiel der auslaufenden Grubenwässer des Westfeldes des Anthrazitbergwerkes Ibbenbüren auf Lithium und seltene Erden durchgeführt.

In dem Bergwerk Ibbenbüren lässt sich eine Zunahme der Lithiumkonzentrationen mit zunehmender Teufe auf über 20 mg/L feststellen (Abb. 1). Die aus dem gefluteten Westfeld über den Dickenberger Stollen auslaufenden Grubenwässer weisen bei starken Schwankungen einen mittleren Abfluss von 8,1 m³/min auf (Wieber & Stemke, 2022). Die durchschnittliche Lithiumkonzentration wurde mit 0,6 mg/L erfasst und liegt somit ca. dreimal so hoch wie im Meerwasser (Merkel & Sperling, 1998).

In Cooperation mit dem KIT wurden selektive Sorptionsversuche auf MnO-Basis durchgeführt. Dabei wurden die Lithiumkonzentrationen im Sorptionseluat verringert und das Sorbens mit max. 1,7 mg/g Lithium beladen. Es fanden jedoch mit zunehmender Dauer weitere geochemische Reaktionen statt, die geklärt werden müssen. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass Li-Extraktion aus den Grubenwässern des Dickenberger Stollens generell möglich ist. Zur Optimierung sind weitere Untersuchungen erforderlich.

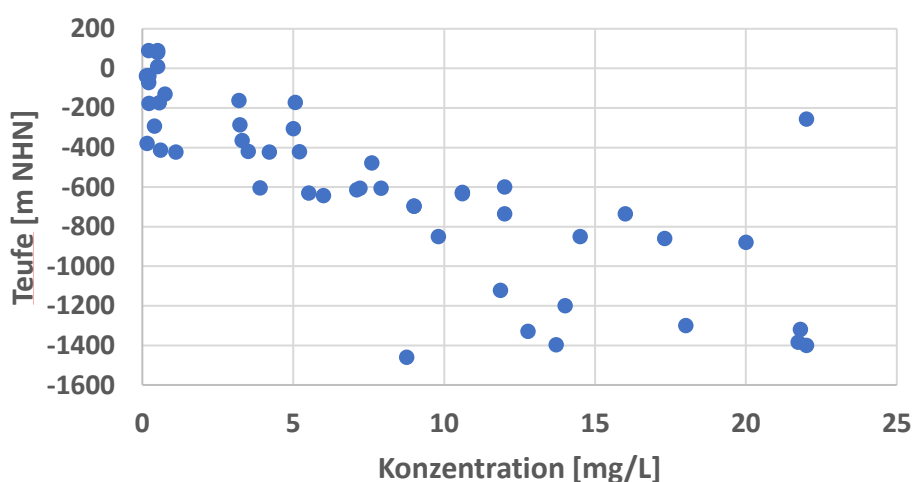


Abb. 1: Lithiumgehalte in den Grubenwässern des Anthrazitbergwerkes Ibbenbüren

Außerdem wurden in den auslaufenden Grubenwässern des Dickenberger Förderstollens Seltene Erden nachgewiesen. Aufbauend auf einem abgeschlossenen geförderten Projekt „Recycling von Seltenen Erden aus Elektroschrott durch selektive Anreicherung an heimischen Tonmineral-Rohstoffen“ (BMBF Förderung) werden aktuell Laborversuche durchgeführt, ob diese auch aus den Grubenwässern des Anthrazithbergwerkes Ibbenbüren gewonnen werden können. Die Untersuchungen des zugrundeliegenden Forschungsprojektes (Diedel et al. 2020) haben gezeigt, dass die in der Lösung enthaltenen REE-Metalle durch Adsorption an die Tonminerale - selbst bei einer sehr niedrigen Konzentration und in Gegenwart anderer Metalle - nahezu vollständig aus der Lösung entfernt werden können. Optimale Adsorptionsergebnisse der REE-Ionen werden im pH-Bereich von 5,0 - 6,5 erreicht. Mit dem Abschluss unserer Voruntersuchungen ist ebenfalls im Sommer 2022 zu rechnen.

Neben Lithium und Seltenen Erden wurden weitere kritische Stoffe in den Grubenwässern identifiziert, die im Rahmen ergänzender Auswertungen verifiziert und bewertet werden sollen. Soweit die aktuell laufenden Forschungen zum Vorkommen und Gewinnung von Lithium und Seltenen Erden positive Ergebnisse liefern, sollten sich weitere Forschungen anschließen.

TEILPROJEKT 3: HYDRAULISCHE UNTERSUCHUNGEN IN GEFLUTETEN BERGWERKEN

Die Grubenwasserhydraulik in gefluteten Bergwerksanlagen ist sehr komplex und viele Fragen sind bisher nicht abschließend geklärt (Wolkersdorfer, 2008; Wieber, 1999; Wieber & Stemke, 2021). Nach Wieber et al. (2019) kann es bei Änderungen der Randbedingungen auch zur Veränderung von Fließwegen kommen (Abb. 1). Im Rahmen von Langzeituntersuchungen werden – aufbauend auf bereits durchgeführten Untersuchungen – aktuell die Piezometerhöhen in mehreren Schächten gefluteter Verbundbergwerke kontinuierlich gemessen. Eine Fortsetzung der Messungen und deren Auswertung ist vorgesehen. In diesem Zusammenhang sollen auch Multitracerversuche erfolgen. Die Entwicklung einer Sonde für punkt- bzw. teufengenaue Eingabe der Tracersubstanzen ist bereits weit fortgeschritten. Feldversuche sind zeitnah vorgesehen.

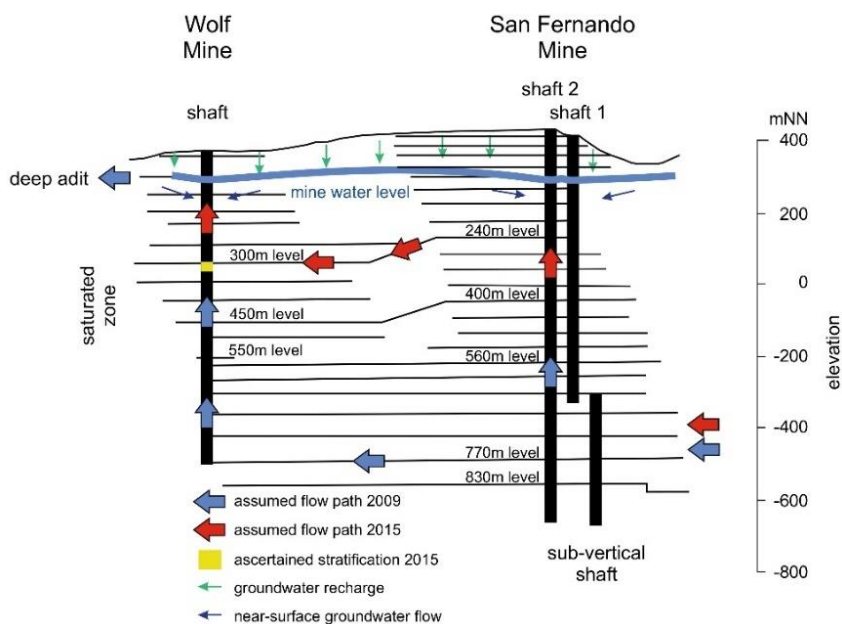


Abb. 1: Hydraulik der Gruben Wolf und San Fernando mit unterschiedlichen Fließrichtungen und Schichtungen (aus: Wieber et al., 2019)

Des Weiteren wurden in einem gefluteten Schacht physiko-chemische Mehrfachmessungen in den oberen Teufen bis ca. 60 m unter Wasseroberfläche durchgeführt (Wieber et al., 2016) und mehrere Schichtungen festgestellt (Abb. 2).

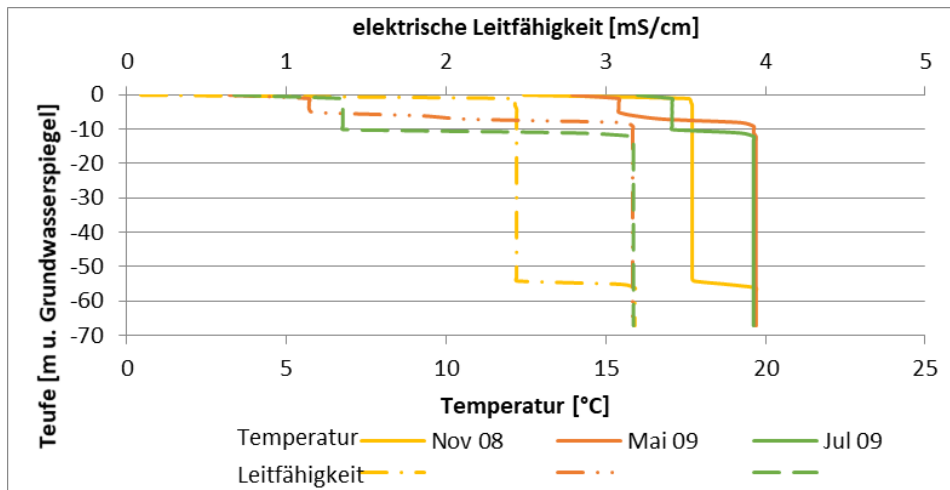


Abb. 2: Schichtung im Schacht Grube Georg (gemäß Wieber et al., 2016)

Daraus wurde ein Modell für die dynamische Entwicklung von Schichtungen in Begwerksschächten und deren Kollaps entwickelt (Wieber et al., 2016). Für diese Anlage liegt nun die Genehmigung des Bergwerkeigentümers vor, die Untersuchungen bis zur Endteufe von annähernd 1.000 m unter Rasenhängebank durchzuführen.

Diese laufenden Untersuchungen sollen fortgeführt und mit Danksagung an die Stiftung Bergbau und Wasser veröffentlicht werden.

LITERATUR

- Bund - Länder – Ausschuss Bodenforschung (BLA-GEO) & Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (Sept. 2015): Hydrochemische Hintergrundwerte im Grundwasser und ihre Bedeutung für die Wasserwirtschaft. – 22 S.
- Diedel, R. et al. (2020): Recycling von Seltenen Erden aus Elektroschrott durch selektive Anreicherung an heimischen Tonmineral-Rohstoffen. – KMU Abschlussbericht Förderkennzeichen 033RK042A,B,C,D: 41 S..
- EG-WRRL 2000: Richtlinie 2000/60/EG vom 23.10.2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. – Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 327 vom 22.12.2000, S 1.
- European Union (2020): Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability: 4 Abb.; Brussels – [<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A52014DC0297>; letzter Zugriff 07.07.2021]
- LANUV (2018): Potentialstudie warmes Grubenwasser. – LANUV Fachbericht 90: 154 S., 40 Abb., 34 Tab., Recklinghausen.
- Lepeltier, C. (1969): A simplified statistical treatment of geochemical data by graphycal representation. – Econ. Geol., 64: 538-550, Lancaster PA.
- Marscheider-Weidemann, F.; Langkau, S.; Hummen, T.; Erdmann, L.; Tercero Espinoza, L.; Angerer, G.; Marwede, M.; Benecke, St. (2016): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016. – DERA Rohstoffinformationen, 28: 353 S., Berlin.
- Merkel, B. & Sperling, B. (1998): Hydrogeochemische Stoffsysteme, Teil II: DVWK Schriften, 117: 397 S.; Bonn.

- Walter, T. (2008): Determining natural background values with probability plots. – EU Groundwater Polycy Developments Conference 13.-15. Nov. 2008, UNESCO, Paris (France).
- Wieber, G. & Stemke, M. (2019): Pump Tests in Deep Mine Ore Shafts for the Evaluation of a possible geothermal Use. – In: Proceedings of the IMWA 2019 Conference – “Mine water: Technological and Ecological Challenges”: 375 – 378, 3 Fig., Perm.
- Wieber, G. & Stemke, M. (2021): Grundlagen des Wasseranstiegs in stillgelegten deutschen Steinkohlegruben. In: bb, 04-2021: S. 48-52, 8 Abb., 1 Tab., Bonn.
- Wieber, G. & Stemke, M. (2022): Kritischer Rohstoff Lithium: Gehalte und Potentiale in den Grubenwässern des stillgelegten Anthrazithbergwerkes Ibbenbüren. – scriptum online, 22: 15 S., 6 Abb., 2 Tab.; Krefeld. [https://www.gd.nrw.de/pr_bs_scriptumonline-22_2022-02.pdf]
- Wieber, G. (1999): Die Grubenwässer des ehemaligen Blei-, Zink-, Kupfer- und Quecksilbererzbergbaus an Beispielen des westlichen Rheinischen Schiefergebirges und der Saar - Nahe - Senke: Hydraulik, hydrochemische Beschaffenheit und umweltgeologische Bewertung. – 250 S., 69 Abb., 57 Tab., Gießen (Microfiche, Habil. – Schrift).
- Wieber, G. (2002): Bodenverunreinigungen und Bodenschutz. – Weiterbildender Studiengang Angewandte Umweltwissenschaften, Studienbrief 1: 158 S., Koblenz.
- Wieber, G., Enzmann, F. & Kersten, M. (2016): Entwicklung und Veränderung der Dichteschichtung in Schächten gefluteter Erzbergwerke. – in: Mainzer Geowissenschaftliche Mitteilungen, Bd. 44: S. 205-226, 9 Abb., 4 Tab., Mainz (ISSN 0340-4404).
- Wieber, G., Enzmann, F. & Kersten, M. (2016): Pycnocline dynamics in an abandoned and flooded mine. – Proceedings of the 13th IMWA Symposium, 5 p., 3 fig., 3 tab., Leipzig.
- Wieber, G.; Stemke, M., Wonik, T., Enzmann, F., Kersten, M. (2019): Stratification Dynamics and Geothermal Potential of a Deep Shaft in the Flooded Wolf Mine, Siegerland/Germany. – In: Mine Water and the Environment, 325-334, 7 Fig., 1 Tab., Berlin (Springer)
- Wolkersdorfer, C. (2008): Water Management at Abandoned Flooded Underground Mines – Fundamentals, Tracer Tests, Modelling, Water Treatment. – 466 S., 126 Abb., 34 Tab.; Heidelberg (Springer).

Veröffentlichungen aus dem Projekt

Aus dem Projekt sind 12 Veröffentlichungen bereits publiziert oder zur Publikation eingereicht. Details finden sich im Publikationsverzeichnis ab Seite 71 unter den Referenznummern [26], [47], [54], [55], [56], [57], [58], [59], [60], [61], [62] und [63].



ERMITTLUNG WISSENSCHAFTLICHER GRUNDLAGEN FÜR NACHHALTIGE GRUBENWASSERANSTIEGSNIVEAUS IN EHEMALIGEN STEINKOHLENREVIEREN

Prof. Dr. Ch. Wolkersdorfer, Pretoria (Projektleiter)

E. Mugova, MSc (wiss. Mitarbeiterin)

Projektdauer: 2017 – 2022

Kurzfassung der Projektergebnisse

Im Rahmen des Teilprojektes „Ermittlung wissenschaftlicher Grundlagen für nachhaltige Grubenwasseranstiegsniveaus in ehemaligen Steinkohlenrevieren“ haben Prof. Dr. Christian Wolkersdorfer und MSc. Elke Mugova in mehreren, miteinander verknüpften Fragestellungen das Thema untersucht. Da in den nächsten Jahren die ehemaligen Steinkohlebergwerke in Ibbenbüren, dem Saarland und dem Ruhrgebiet geflutet werden sollen, musste geklärt werden, was nachhaltige Flutungsniveaus sind und wie sich diese einstellen lassen.



Abb. 1: SANKEY-Diagramm der Untersuchungsziele und der durchgeführten Untersuchungen, um diese zu erreichen

Unter nachhaltigen Flutungsniveaus ist ein Grubenwasserspiegel zu verstehen, der zu keiner negativen Beeinträchtigung von Schutzgütern oder zu Gebäudeschäden führt. Zudem sind die Kosten der Wasserhaltung eine Funktion der Förderhöhe. Damit geht einher, dass der CO₂-Fußabdruck bei hohem Niveau des Grubenwasserspiegels abnimmt. Um dies zu erreichen, sind folgende Punkte wichtig:

- » **Pumpaufwand so gering wie möglich:** Bei einem nachhaltigen Flutungsniveau sollte sichergestellt sein, dass der langfristige Pumpaufwand und somit die Pumpkosten auf ein Minimum reduziert sein sollten. Dies bedeutet, dass der Wasserstand des Grubenwassers so hoch wie möglich angesetzt sein sollte, ohne andere Schutzgüter negativ zu beeinflussen.
- » **Keine Beeinträchtigung des Trinkwassers:** Wesentlich für die Lage des Flutungsniveaus ist, dass im Zusammenhang mit allen anderen Maßnahmen und auf der Basis hydraulischer Prinzipien keine Schadstoffe in das zur Trinkwasserförderung genutzte Grundwasser gelangen.

- » **Grubenwasserqualität so gut wie möglich:** Ein nachhaltiges Flutungsniveau hat eine bestmögliche Qualität des Grubenwassers sicherzustellen. Wie die Vielzahl ausgewerteter Messungen und Publikation zeigt, ist dies stets der Fall, wenn der Wasserspiegel möglichst hoch angesetzt wird und dessen Höhenschwankungen gering sind.
- » **Keine „nassen Füße“ oder Schäden durch Hebungen:** Für die Anwohner in den Regionen, in denen die Bergwerke geflutet werden sollen, ist es wichtig, dass die Keller nicht vernässen oder dass sich durch potenzielle Hebungen Risse an den Bauwerken bilden. Es ist zu kommunizieren, dass dessen Verursacher nicht primär das steigende Grubenwasser ist.

Um nachhaltige Flutungsniveaus zu erreichen, sind die Effekte der Erstspülung (first flush) zu berücksichtigen. Nahezu alle gefluteten Bergwerke zeigen einen charakteristischen Verlauf der Wasserqualität. Dabei halbieren sich nach einem Zeitraum, der etwa dem Flutungszeitraum entspricht, die Schadstoffkonzentrationen. Nach etwa vier „Spülungen“ sind oftmals die Hintergrundkonzentrationen erreicht. Mit Langzeitmessungen der WISMUT GmbH konnte die Erstspülung sowohl am Grubenwasserauslauf, als auch im gefluteten Bergwerk selbst untersucht werden. Es zeigte sich, dass sich die Grubenwasserqualität mit der Zeit über den gesamten Grubenwasserkörper verbessert.



Abb. 2: Wasserprobenahme am 550 m tiefen St-Barbara-Schacht am Uranbergwerk Urgeiriça/Portugal.



Abb. 3: Eosin-Y-Lösung vor dem Befüllen der Tracer-aufgabesonde LydiA am Bergwerk Metsämonttu/Finnland.

In fast allen gefluteten Untertagebergwerken stellt sich im Laufe der Zeit eine Dichteschichtung ein. Messungen von Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit in etwa 30 Schächten zeigen, dass Schichtung fast immer an der obersten vollständig überfluteten Sohle auftritt. Dabei überschichtet qualitativ gutes, meist sauerstoffhaltiges Wasser qualitativ schlechteres, in der Regel sauerstoffarmes, H_2S -reicheres Wasser. Welche Mechanismen dabei zur Ausbildung der Schichtung führen, ist im Detail noch zu erforschen. Bekannt ist bisher, dass die Schichtung sich verhältnismäßig schnell einstellt und sowohl „plötzlich“ als auch „allmählich“ auftreten kann. Strahlwasser (Jet) scheint bei der Ausbildung eine Rolle zu spielen. Dichteschichtungen lösen sich oftmals auf, wenn äußere Kräfte auf das System einwirken. Dabei handelt es sich z.B. um Pumpen des Wassers, Errichten von Entwässerungstollen, Brechen von Dämmen oder Streckenverstürze. In Bergwerken mit gravitativem Auslauf über Stollen ist Schichtung meist langzeitstabil, vor allem in tieferen Bergwerksbereichen. Diese Schichtung wirkt als hydraulische Barriere und lässt sich dazu einsetzen, qualitativ gutes von schlechtem Grubenwasser zu separieren. Abpumpen oder Auslaufen muss oberhalb der Schichtgrenze stattfinden.

Um zu erkennen, welche Wege das Grubenwasser im gefluteten Bergwerk nimmt, ist es unerlässlich, die hydraulischen Randbedingungen des Systems zu verstehen. In der Regel strömt das Grubenwasser dem niedrigsten Potential zu, in Konvektionswalzen lokal auch entgegen der Gravitation. Zudem lassen sich über Kenntnisse der Durchflussgeschwindigkeiten in gefluteten Bergwerken die Zeiträume quantifizieren, in denen

Schadstoffe ausgetragen werden. Tracertests in Grubenwasser zeigen, dass diese Geschwindigkeiten zwischen $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ und $1,7 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (90% Konfidenzintervall) liegen.

In der Arbeitsgruppe wurden dazu verschiedene Untersuchungen vorgenommen, die sich in drei Gruppen gliedern lassen:

- » Literaturrecherche
- » Laboruntersuchungen
- » Felduntersuchungen

Jede dieser Untersuchungen soll eine oder mehrere Fragen beantworten, die relevant sind, um ein nachhaltiges Flutungsniveau zu definieren.

Ziel der Felduntersuchungen war es, die bisher bekannten Dichteschichtungen zu verifizieren und zu ergänzen. Dazu wurden in Finnland (Abb. 4), Portugal und Spanien verschiedene In-situ-Parameter sowie Wasseranalysen (Abb. 2) teufenabhängig untersucht. Während die Ergebnisse in Finnland und Portugal den Erwartungen weitgehend entsprachen, war dies in Spanien nicht der Fall. Dies lag daran, dass anders als im Risswerk angegeben, zwischen den beiden Schächten keine Verbindung nachzuweisen war. Sowohl in Finnland (Abb. 4) als auch in Portugal und Spanien ließ sich Überschiebung hochmineralisierten, reduzierten und folglich H_2S -reichen Wassers mit weniger mineralisiertem, oxidiertem Wasser nachweisen. Aus den Ergebnissen des Tracertests in Metsämonttu (Abb. 3) lässt sich ableiten, dass Grubenwasser sowohl nach Unten als auch nach Oben strömt, aber die Grenze der Dichteschichtung vermutlich nicht überschreitet. Auch über längere Distanzen findet ein Wasseraustausch im Grubengebäude statt.

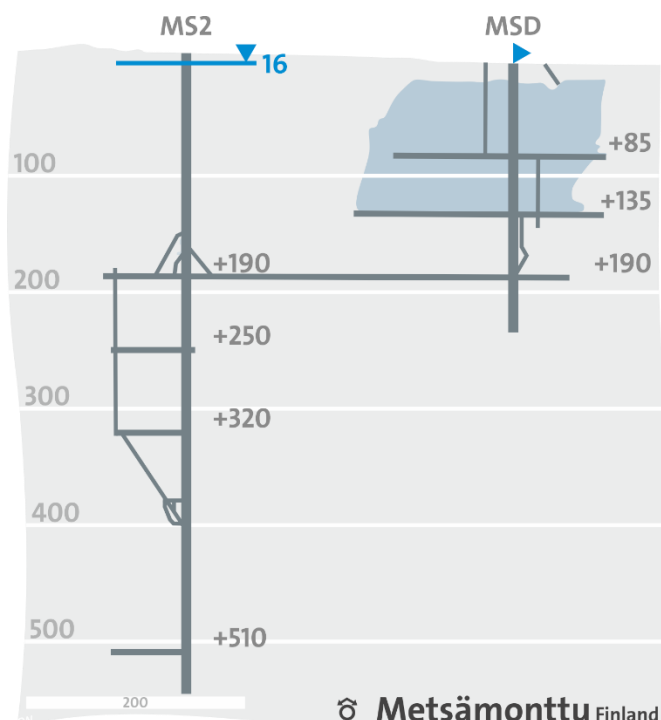


Abb. 4: Saigerriss mit Schacht 2 (links) und Schacht 1 des Polymetallbergwerks Metsämonttu/Finnland.

Beim Flutungsexperiment am 10 m tiefen Nikolaus-Bader-Schacht wird in vier Teufen die zeitliche Entwicklung der Temperatur und elektrischen Leitfähigkeit untersucht. Dies soll Erkenntnisse zum Aufbau und zum Zusammenbrechen von Dichteschichtung bringen. Bisherige Ergebnisse zeigen, dass die oberflächen-nahe Schichtung bei Außentemperaturen von unter 0°C sehr schnell zusammenbricht und sich ab dem

Frühsommer allmählich wieder aufbaut. Wegen der Coronapandemie müssen die beiden in Südafrika geplanten Untersuchungen am analogen Grubenmodell AMM (Agricola Mine Model) an der *Tshwane University of Technology* (TUT) und dem Tracertest im *Eastern Basin des Witwatersrand* auf 2022 verschoben werden.

Wie das SANKEY-Diagramm (Abb. 1) zeigt, wurden für Fragestellungen zur Dichteschichtung als Behandlungsmaßnahme Untersuchungen zu den Strömungswegen und der -geschwindigkeit angestellt. Aus der umfangreichen Literaturrecherche zu gefluteten Bergwerken mit Messungen der physiko-chemischen Parameter Temperatur und elektrische Leitfähigkeit ließen sich bislang 30 geeignete Bergwerke lokalisieren. Es zeigt sich, dass in der überwiegenden Zahl der Bergwerke eine Dichteschichtung auftritt, wobei Bergwerke mit nur einem Schacht und wenigen angeschlagenen Strecken („Einschachtbergwerk“) oftmals keine Schichtung aufweisen, wohingegen Bergwerke mit vielen Schächten und angeschlagenen Strecken („Mehrschachtbergwerk“, Abb. 1) eine deutliche Dichteschichtung zeigen. In der Regel tritt der Dichtesprung mit der größten Dichtedifferenz an Sohlen auf, die über mehrere Schächte oder Abbaue miteinander verbunden sind. Bei Wiederholungsmessungen zu verschiedenen Zeitpunkten sind diese oftmals an der gleichen Stelle zu finden.

Aus der Summe aller bisherigen Untersuchungen lässt sich ableiten, dass ein nachhaltiges Flutungsniveau so hoch wie möglich anzusetzen ist, da von den Tausenden von Grubenflutungen weltweit bislang nur ein Fall bekannt ist, bei dem es zur Kontamination eines zur Trinkwassergewinnung genutzten Aquifers kam. In nahezu allen Mehrschachtbergwerken besteht eine deutliche, langfristig stabile Dichteschichtung.

Tagungen und Veröffentlichungen

Aus dem Projekt sind 24 Veröffentlichungen bereits publiziert oder zur Publikation eingereicht. Details finden sich im Publikationsverzeichnis ab Seite 71 unter den Referenznummern [8], [26], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [49], [50], [51], [52], [53], [65], [66], [67], [68], [69] und [70].

Sämtliche Publikationen der Arbeitsgruppe Wolkersdorfer sind auf folgender Webseite einsehbar und stehen dort zum Herunterladen bereit: www.forum-bergbau-wasser.de/artikel.



BEVÖLKERUNGUMSFRAGE ZUM THEMA GRUBENWASSER

Prof. Dr. Ch. Wolkersdorfer, Pretoria (Projektleiter)

E. Mugova, MSc (wiss. Mitarbeiterin)

Dr. S. Walter (Kooperationspartnerin)

Projektdauer: 2020 – 2021

Während der Dialogveranstaltung des „Forum Bergbau und Wasser“ im Februar 2019 in Saarbrücken zeigte sich, dass die Kommunikation zwischen Wissenschaftlern, Unternehmen und der Bevölkerung weiterentwickelt werden muss. Etliche der Begriffe und Inhalte, die im Zusammenhang mit Grubenwasser und Grubenflutungen wichtig sind, scheinen außerhalb von Unternehmen und Wissenschaft unterschiedlich wahrgenommen zu werden.

Für die Datenerhebung wurde der Mixed-Mode-Ansatz verfolgt, d.h. die Daten wurden über mehrere Kanäle erhoben. Somit kann die Erreichbarkeit aller Zielgruppen gewährleistet werden, ältere Menschen konnten z.B. eher über die telefonische Befragung kontaktiert werden. Die Befragung wurde via Telefon- (CATI) und Onlinebefragung (CAWI) durchgeführt. Als Grundgesamtheit wurden alle deutschsprachigen, volljährigen Einwohner der Gebiete Ibbenbüren, Ruhrgebiet, Saarland definiert. Die Stichprobenziehung erfolgte nach einem geschichteten Zufallsprinzip in mehreren Schritten.

Seite 51 von 112

ableiten. Deutliche Unterschiede gibt es jedoch in den verschiedenen Altersgruppen. Bei den über 75-jährigen geben 10,5% Ewigkeitsaufgaben/Kosten/Lasten an, bei der jüngsten Gruppe der 18- bis 29-jährigen nennen 30,0% den Begriff Bergbau. In den verschiedenen Revieren sind ebenfalls deutliche Unterschiede zu erkennen.

Der Begriff Grubenflutung wird von den Befragten geringfügig positiver gesehen als der Begriff Grubenwasseranstieg. Im Vergleich zu anderen Umfragen weltweit sind die Ergebnisse ähnlich, was darauf hindeutet, dass die Erfahrungen mit dem Bergbauunternehmen die Emotionen gegenüber Sanierungsmaßnahmen und die Risiken, die die Menschen ihnen zuschreiben, beeinflussen. Allerdings wünschen sich die Menschen transparente und verständliche Informationen, stehen der Grubenwasseraufbereitung positiv gegenüber und lehnen Grubenflutungen generell ab.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die lokale öffentliche Meinung zu Grubenflutungen und Bergbauthemen nicht wesentlich unterscheidet, aber im Raum Ibbenbüren im Vergleich zum Ruhrgebiet und dem Saarland insgesamt positiver ist. Im Allgemeinen ist das Interesse an bergbaubezogenen Themen sowie an Fragen des Umweltschutzes oder der erneuerbaren Energien gering, aber diejenigen, die sich für eines der Themen interessieren, interessieren sich auch für die anderen.

Aus den Antworten ergibt sich, dass konkretere Informationen nötig sind. Beispielsweise werden potenzielle Vernässungen und Gebäudeschäden oft auf die Grubenflutung zurückgeführt. Außerdem glauben einige Anwohner, dass durch das Ansteigen des Grubenwassers in den Bergwerken, die gesamte Region unter Wasser stehen würde. Aus den Antworten auf die Frage „Überwiegen Ihrer Meinung nach die Vorteile oder die Probleme von Grubenwasser?“ ergibt sich, dass noch ein großes Potential besteht, die bisher nicht festgelegten Meinungen in Richtung positiver Einstellung zu bewegen (Abb. 2).

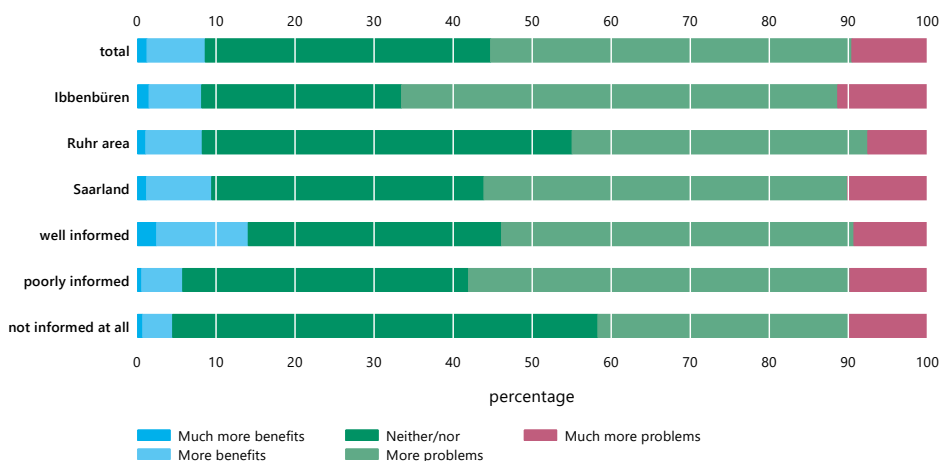


Abb. 2: Antworten auf die Frage „Überwiegen Ihrer Meinung nach die Vorteile oder die Probleme von Grubenwasser?“

Die Teilnehmer gaben an, dass sie sich mehr Informationen über Grubenflutungen wünschen. Von den Akteuren, die sich mit Grubenwasser befassen, wird das Bergbauunternehmen am ehesten in der Lage gesehen, potenzielle Probleme zu lösen, während von den Politikern am wenigsten erwartet wird, dass sie diese lösen.

Veröffentlichungen

Die Ergebnisse der Umfrage werden zur Zeit für die wissenschaftliche Veröffentlichung vorbereitet (siehe [hier](#)).



FÖRDERUNG EXTERNER FORSCHUNGSVORHABEN



QUANTIFIZIERUNG DER THERMISCHEN UND HYDRODYNAMISCHEN VORGÄNGE BEI DER NUTZUNG DES ERDWÄRMEPOTENZIALS VON GEFLUTETEN BERGBAUSCHÄCHTEN AM BEISPIEL DES EDUARD-SCHACHTS, ALSDORF

Projektleiter: T. König, Energeticon gGmbH, Aachen

Schwerpunkt: Inwertsetzung der energetischen Nutzungspotenziale

Fördersumme: 103 Tsd. €

Förderdauer: 24 Monate

Kurzfassung der Projektergebnisse

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden die Betriebsdaten der Wärmepumpe sowie Temperaturmessungen an der Erdwärmesonde im Eduard-Schacht in Alsdorf aufgezeichnet. Im Laufe des Projekts wurde das DTS-Monitoring weiter ausgebaut. Zu Beginn des Projekts lagen die DTS-Temperaturen als unkorrigierte und teils unplausible Rohdaten vor. Im Rahmen des Projekts wurde das System angepasst und absolute Vergleichsmessungen durchgeführt. Dadurch war eine Korrektur der DTS-Temperaturen möglich.

Es wurden verschiedene Simulationsrechnungen durchgeführt, um die thermische Kapazität des Schachts zu bewerten. Für die Modellrechnungen wurde auf Untersuchungsergebnisse der vorangegangenen Forschungsprojekte sowie der im Laufe des Projekts aufgezeichneten Daten zurückgegriffen.

Die Simulationsrechnungen konnten nachweisen, dass im Vergleich zum aktuellen Nutzungsprofil erheblich größere Wärmemengen dauerhaft dem Untergrund entnommen werden können und die Sonde mit einer deutlich größeren Leistung betrieben werden kann. Die Berechnungen konnten eine mögliche jährliche Heizarbeit von mindestens 1 GWh für eine langfristige Nutzung nachweisen. Aufgrund von Konvektionsströmungen sowie der teilweisen Durchströmung des alten Bergwerkgebäudes ist davon auszugehen, dass auch größere Lasten nachhaltig dem Grubenwasser entzogen werden können. Zudem ist, im Vergleich zu einer konventionellen Erdwärmesonde, eine mehr als doppelt so große mögliche Entzugsleistung der Sonde zu erwarten.

Eine weitere Steigerung der Leistungsfähigkeit der Entzugsleistung kann beispielsweise durch die Verwendung größer dimensionierter Sonden oder durch den Einbau mehrerer Sonden in einem Schacht erreicht werden. Für künftige Projekte können so die Anfangsinvestitionen, die sich hier zu einem erheblichen Teil aus den Bohrkosten ergaben, auf größere Heizleistungen und eine größere Heizarbeit umgelegt werden. Vor diesem Hintergrund sind insbesondere die noch offenen oder nicht vollständig verfüllten Grubenschächte von besonderem Interesse. Alleine im Ruhrrevier gibt es nach LANUV (2018) über 80 ehemalige Bergwerksschächte, in denen bereits jetzt bzw. infolge des weiteren Grund- und Grubenwasseranstiegs zukünftig Wassersäulen mit einer Höhe von über 200 m zur Verfügung stehen. Da die Kosten des laufenden Betriebs maßgeblich durch die Stromkosten für die Wärmepumpe verursacht werden, können künftige Projekte hinsichtlich einer wirtschaftlichen Betriebsführung insbesondere für z.B. kommunale Energieversorger von Interesse sein, die solche Anlagen durch eigenen Strom kosteneffizienter betreiben könnten.

Mit dem installierten Messsystem besteht die Möglichkeit auch nach Abschluss dieses Forschungsvorhabens die Temperaturbedingungen im Schacht zu monitorieren. Hierbei stehen jetzt zwei Messsysteme zur Verfügung. Mögliche Abkühlungen in der Wassersäule infolge einer stärkeren künftigen Nutzung der Wärmepumpe in den kommenden Heizperioden können durch das DTS-Monitoring an zwei Positionen im Schacht untersucht und bewertet werden. Durch die größere Entfernung des Hybridkabels von der Erdwärmesonde ist dieses nicht unmittelbar durch den Betrieb der Wärmepumpe beeinflusst. Dadurch können gegebenenfalls auftretende Temperaturänderungen des Grubenwassers unabhängig von der direkten Beeinflussung durch die Sonde untersucht werden. Auch Änderungen des Temperaturregimes im Schacht, die sich durch möglicherweise neue Strömungsverhältnisse infolge der vollständigen Flutung des Schachtes/Bergwerkgebäudes sowie durch Änderungen der Strömungsverhältnisse zu den benachbarten Abbaubereichen ergeben können, können künftig untersucht werden. Damit bildet das installierte Messsystem eine wichtige Basis für weitere Untersuchungen zum Verständnis des Temperaturregimes in gefluteten Altbergbau-bereichen.

Hier wird angeregt, weiterführende Studien durchzuführen, die vor allem einer Verifizierung und Verbesserung der Modelle dienen sollten. Hier könnten zum Beispiel vollnumerische Programme (Comsol oder ähnliche) zum Einsatz kommen, die eine vollständige physikalische Lösung der Strömungsverhältnisse im Schacht, den Strecken und der Sonde erlauben. Solche Modelle sind aufgrund ihrer extrem langen Rechenzeiten nicht geeignet, um Langzeitbetrachtungen durchzuführen, können aber als Referenzmodelle genutzt werden, um numerische, teilnumerische und analytische Simulationsprogramme zu verifizieren und die komplexen Strömungsbedingungen bei freier Wasserströmung mit vereinfachenden Algorithmen abzubilden. Damit könnten Berechnungswerkzeuge geschaffen werden, die zur schnellen und robusten Prognose der Temperaturentwicklung genutzt werden könnten und als Planungsgrundlagen zur Bewirtschaftung des unterirdischen Raumes in Altbergbaubereichen zum Einsatz kommen.

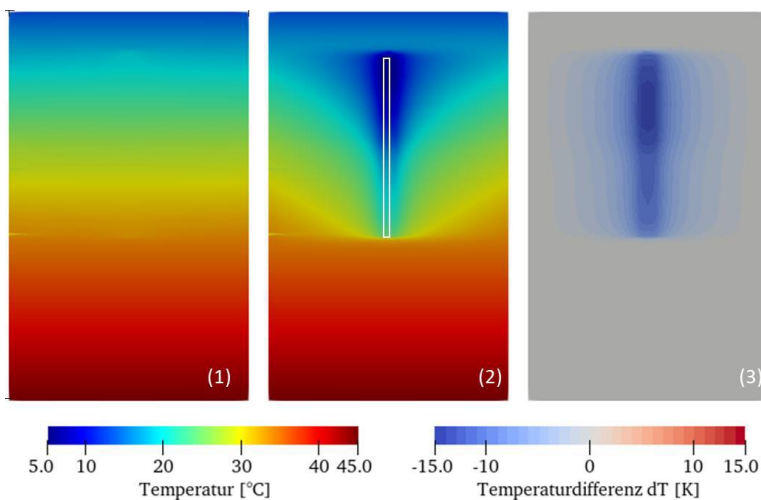


Abb. 1: Temperaturverteilung nach 30-jähriger Simulationszeit ohne Wärmeentzug (1), mit einer jährlichen Heizarbeit von 600 MWh (2) sowie Temperaturdifferenz der zwei Modelle (3)

Neben diesem zentralen Thema des Forschungsvorhabens zur Prognose und Kapazitätsabschätzung von Schächten ist zu erwähnen, dass DTS Kabel erfolgreich zum Monitoring des Grubenwasseranstieges eingesetzt werden können. Mit dem an der Sonde verbrachten Kabel konnte der Anstieg eindeutig nachgezeichnet werden. Das Grubenwasser hat zwischenzeitlich vermutlich den mit Beton verfüllten Bereich des Stahlrohrs der Sonde bzw. die Betonverfüllung des Schachts erreicht. Dadurch ergibt sich in den DTS-Daten an der Erdwärmesonde ein Temperatursprung, anhand dessen die Lage des Gruben- bzw. Grundwasserspiegels beobachtet werden kann. Es ist davon auszugehen, dass auch über das Hybridkabel in der Pegelleitung künftig der Anstieg des Grubenwasserspiegels beobachtet werden kann. Die DTS-Messungen in der Pegelleitung zeigen deutliche Temperaturunterschiede zwischen dem wasser- und luftgefüllten Bereich. Unter der Annahme, dass die Pegelleitung hydraulisch mit dem Gebirge gekoppelt ist, ist auch ein Monitoring des Grubenwasserspiegels über die DTS-Messungen in der Pegelleitung möglich.

Ausführlicher Abschlussbericht des Projekts

Der vollständige Abschlussbericht des Projekts auf der Webseite des *Forums Bergbau und Wasser* zu finden.



MÖGLICHKEITEN DER NIEDRIGTEMPERATUR- STROMGEWINNUNG UND ENERGIESPEICHERUNG ZUR INWERTSETZUNG DES ENERGETISCHEN NUTZUNGSPOTENTIALS VON GRUBENWASSER

Projektleiter: Prof. Dr. S. Wohnlich, RUB Bochum

Kooperationspartner: Prof. Dr. D. Rudakow, Dnipro University of Technology

Schwerpunkt: Inwertsetzung der energetischen Nutzungspotenziale

Fördersumme: 163 Tsd. €

Förderdauer: 24 Monate

Kurzfassung der Projektergebnisse

ENERGIEGEWINNUNG ODER STROMPRODUKTION AUS GRUBENWASSER – VISION ODER REALITÄT?

Der Wandel von der Kohleproduktion zu einem Energiebergbau ist politisch und gesellschaftlich gewünscht und steht aktuell mehr denn je in der Diskussion. So kommt im Zusammenhang mit dem Ende des Steinkohlenbergbaus eine Wahrnehmung der damit verbundenen Infrastruktur als Gefahrenquelle auf. Der Wunsch, ehemalige Schachtanlagen verwahrt und gesichert zu wissen, steht andererseits jedoch im Widerspruch zu den Bemühungen von Wissenschaftlern, eben diese vorhandene und zumindest zum Teil nutzbare Infrastruktur einer nachhaltigen und gewinnbringenden Nachnutzung zuzuführen.

Das im Frühjahr 2019 an der Ruhr-Universität Bochum (RUB) aufgenommenen FuE-Projekt verfolgt exakt diesen Zweck. Es möchte Möglichkeiten aufzeigen, wie insbesondere das im Rahmen der Ewigkeitsaufgabe der RAG Aktiengesellschaft im gehobenen Grubenwasser enthaltene Energiepotential nachhaltig in Wert gesetzt und genutzt werden kann. Hierzu wurden im Rahmen des Projektes sowohl nutzbare und in der Entwicklung befindliche Technologieansätze geprüft, als auch eine Bewertung des an Standorten vorhandenen Energiepotentials vorgenommen.

Die Wärmergewinnung stellt nach wie vor die am weitesten verbreitete Nachnutzungsform für nutzbare Energie aus der Nachsorge der aufgelassenen Einrichtungen der RAG Aktiengesellschaft und den nutzbaren Bergbauinfrastruktureinrichtungen dar. Allerdings werden bislang große Anteile des vorhandenen Potentials nicht genutzt. Um dem entgegen zu wirken, sind einzelne Großprojekte, wie beispielsweise das Zukunftsprojekt Wasserstadt Aden, in Vorbereitung.

Aber der sich vollziehende Strukturwandel in den Bergbauregionen Deutschlands bringt darüber hinaus weitere alternative Nutzungsformen sowie Gelegenheit zum Ausbau bekannter Anwendungen mit sich. Somit gilt es, Möglichkeiten zu evaluieren und Anwendungsbereiche für innovative Technologien zu bewerten.

Nutzungen erneuerbarer Energieträger stoßen auf ehemaligen Zechengeländen, auf Landschaftsbauwerken und ähnlichen Bergbauflächen bereits auf gute und positive Resonanz. Aus diesem Grund werden sie innerhalb des Projektes ebenfalls mit betrachtet. Hierdurch sollen Anregungen für die Nachnutzung der bislang nicht genutzten Areale gegeben und gleichzeitig die Möglichkeit von Synergien betrachtet werden, durch die eine Nutzung ermöglicht werden könnte.

Der Fokus der Projektbearbeitung im Jahr 2021 lag auf einer Ausweitung der seit Sommer 2019 und im Jahr 2020 durchgeführten Recherche, die situationsbedingt nur in extrem eingeschränktem Maß erfolgen konnten. Aus der Sicht der technischen Anwendung kann eine (Vor-)Bewertung vorhandener und in Entwicklung befindlicher Technologien zur Energieerzeugung erfolgen, die Möglichkeiten zur Nutzung des vorhandenen Energiepotenzials aufgezeigt haben.

Selbstgestellter Auftrag des Projektes war es, neben diesen Technologien additive Ansätze für eine Nutzung bzw. Weiterentwicklung am Markt befindlicher Systeme aufzuzeigen. Es wurden eine Auswahl von Technologien herausarbeitet, die für eine Nachnutzung infrage kommen könnten. Allerdings sind diese Ansätze zum Teil als eher experimentell zu bewerten. Dennoch aber bergen sie, neben der reinen Wärmenutzung, auch das Potenzial zur Erzeugung von elektrischem Strom.

In der Abschlussphase des Projektes wurde ein weiterer eher als traditionell zu bewertender Blickwinkel hinzugefügt. Es handelt sich hierbei um den Einsatz von Turbinen, die die Energie des sich bewegenden Wassers nutzen. Dies erfolgte, da sich Hinweise auf Einsatzmöglichkeiten dieser sich auch weiterentwickelnden Technik ergeben hatten.

Im Verlauf des Projektes konnte, aufgezeigt werden, dass für die Gewinnung von elektrischer Energie Ansätze in verschiedenen Anwendungsbereichen verfügbar sind. Im Wesentlichen sind dies:

- » die Möglichkeit, einen thermomagnetischen Motor zum Einsatz zu bringen,
- » der Einsatz innovativer ORC-basierter Technologien, die für den Niedrigtemperaturbereich geeignete Arbeitsmittel verwenden, und
- » elektrochemische Anwendungen, insofern die Salinität der Förderwässer hierfür geeignet ist.

Weiterhin könnten Turbinenanwendungen an geeigneten Stellen eingesetzt werden.

Der im Projekt formulierte Ansatz einer Zuführung additiver Energie, durch die das nutzbare energetische Potenzial ggf. ergänzt werden kann, erbrachte verschiedene Ansätze und sollte im Einzelfall näher geprüft werden.

Als das vielversprechendste Konzept zur Nutzung der an Standorten vorhandenen Energiepotentiale wird der Einsatz einer im Einzelfall zu konzipierenden und anzupassenden Systemtechnologie erachtet, durch die eine möglichst umfängliche Nutzung des Energiepotentials sowie ggf. nutzbarer additiver Energiequellen erfolgen kann. Hinsichtlich der Anwendung von Einzeltechnologien bei einer Verstromung bieten in der Entwicklung befindliche elektrochemische Verfahren sowie turbinenbasierte Anwendungen zurzeit die besten Chancen.

Eine Übersicht möglicher Anwendungen in einer solchen Systemtechnologie wird in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

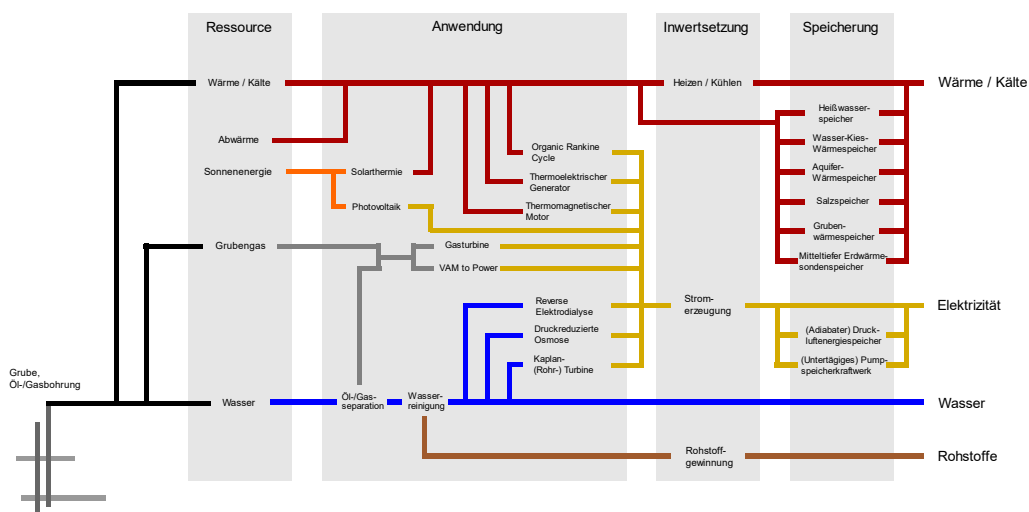


Abb.1: Mögliche Niedrigtemperaturanwendungen im Bergbaufeld – Prinzipskizze

Eine vielversprechende Entwicklung randlich des Projektes wird im Bereich „intelligent power switches“ gesehen, die einen kombinierten direkten Einsatz von zum Beispiel Solarstrom zusammen mit netzbasierter Energie ermöglichen. Hier wird z.B. beim Betrieb der in der Wasserhaltung der Bergbauunternehmen eingesetzten Förderpumpen ein attraktiver Ansatz zur Optimierung der Kosten gesehen.

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedenen Bachelor- und Masterarbeiten erstellt. Hierbei fokussieren die einzelnen Arbeiten auf Recherchen zur Bewertung von regionalen, technisch basierten oder anderen Teilaspekten. Diese sind im Verlauf des Projektes zusammengetragen und gemeinsam mit weiteren Ergebnissen zentral dokumentiert worden, um ein möglichst weitreichendes Bild zu erhalten. So wurde z.B. das geogene Wärmepotential ausgewählter Bergbaureviere (i. S. einer Wasserhaltungsprovinz) erörtert und hinsichtlich vordefinierter Nutzungsbereiche bewertet. Eine besondere Herausforderung dabei stellt immer

wieder die vorhandene Datenbasis dar, welche für eine Bewertung notwendig ist. Im Rahmen des Projektes konnten aktuelle Daten zu den Revieren nur in eingeschränktem Umfang genutzt werden. Bei einer weiteren Verfolgung des Themas liegt eine Herausforderung bei der Einrichtung an die Situation angepasster geeigneter Recherchewege, die eine Vertiefung an dieser Stelle ermöglichen. Eine zentrale Forderung aus dem Projekt ist die Schaffung einer allgemein zugänglichen, zentralen georeferenzierten Datenbank mit allen während des aktiven Bergbaus geschaffenen und nach Ende der Bergbauaktivitäten ggf. fortgeschriebenen Daten. Eine solche Einrichtung ist Voraussetzung für die erfolgreiche Bearbeitung wissenschaftlicher Fragestellungen zum Nachbergbau und der nachhaltigen Bewältigung der langfristigen Bergbaufolgen.

Die angestrebte Entwicklung einer Bewertungsmatrix für die Einstufung potenzieller Standorte für den Einsatz einer zu definierenden Systemtechnologie konnte auf Grund einer unvollständigen Datenbasis nicht realisiert werden. Allerdings konnte ein Vorschlag für die Vorbewertung potentieller Standorte formuliert werden. Die Basis hierfür liefern die entwickelten Modellansätze und Berechnungsmethoden des ukrainischen Projektpartners. In Kombination mit zu vertiefenden standortspezifischen Bewertungen (z. Zt. nur Ranking) können so wichtige Parameter hinsichtlich einer erfolgreichen Nachnutzung von Schachtstandorten verarbeiten werden, um diese bewertbar zu machen. Dabei wird eine standortspezifische Variantenbetrachtung und deren Bewertung auf Basis unterschiedlicher Szenarien empfohlen.

Das Ziel, einen oder mehrere mögliche Pilotstandorte zu identifizieren, für die dann eine erste Studie zur Machbarkeit und Vorplanung durchgeführt werden könnte, war situationsbedingt nicht umsetzbar. Die Ergebnisse versprechen aber, dass dies in Zukunft ggf. möglich sein und dann auch eine Transformation auf andere Bergbaustandorte erfolgen kann. Hierdurch kann dann auch ein gewinnbringender Beitrag zur Energiewende in Bergbauregionen mit vergleichbaren oder ähnlichen Herausforderungen geleistet werden. Dort könnten Untersuchungen zum Einsatz der Niedrigtemperatur-Technologie bzw. von Niedrigtemperatur nutzenden Systemen für Wärmeanwendungen oder auch zur Stromgewinnung dann frühzeitig untersucht und umgesetzt werden, um den regionalen Strukturwandel dann möglichst positiv zu beeinflussen. Ein Wissens- und Technologietransfer in andere Bereiche kommt neben seinem Beitrag zur nachhaltigen Nutzung der Energie aus Grubenwasser dann auch als Benefit dem globalen Klimaschutz zugute.

ERGEBNISSE

Die wesentlichen Ergebnisse des Projektes sind:

- » Aktive und ehemalige Areale des Steinkohlebergbaus bieten insbesondere im Kontext betriebener Wasserhaltungen ein attraktives Energiepotential für Wärmeanwendungen und/oder den Einsatz von Niedrigtemperaturtechnologien.
- » Es sind Technologien vorhanden bzw. in der Entwicklung, die Niedrigtemperaturnutzungen respektive den Einsatz geförderter Bergbauwässer oder der vorhandenen Bergbauinfrastruktur zur Energie- und Stromproduktion ermöglichen.
- » Das wachsende Angebot an intelligenten Mehrkomponentensystemen und die daraus ableitbaren Möglichkeiten sollten hinsichtlich der Verbesserung der Effizienz von Anwendungen aber insbesondere auch im Hinblick auf das Potential innovativer Technologieentwicklungen beobachtet und bewertet werden.
- » Die entwickelten Modelle bieten in Kombination mit anderen Standortdaten bereits auf vergleichsweise geringer Datendichte die Möglichkeit zur Erstbewertung von Entwicklungsprojekten.
- » Niedrigtemperaturanwendungen sollten im Rahmen der Planung von Flächenentwicklungsprojekten respektive der Nachnutzung berücksichtigt werden.
- » Eine Bewertung von effizienzsteigernden Komponenten sollte neben der ökonomischen Betrachtung auch unter Hinweis auf umweltrelevante oder ökologische Sichtweisen erfolgen.

RESUMEE

Insgesamt kann festgestellt werden, dass das Projekt Ansätze für den möglichen Einsatz innovativer Technologien in der Zukunft aufzeigt. Es werden insbesondere durch die Nutzung intelligenter Mehrkomponentensysteme Chancen gesehen, die nachhaltige wasserwirtschaftliche Bewirtschaftung der aufgelassenen Bergbauinfrastruktur mit energetisch optimierten Lösungen zu verbinden. Mit Hilfe der in dem Projekt entwickelten Modelle wird es möglich, das energetische Potential einzelner Bergbauregionen zu beurteilen und bewerten. Ein verbesserter Zugriff auf die während des Bergbaus ermittelten Daten mit Hilfe eines zentralen Dateninformationssystems könnte diesen Ansatz weiter vertiefen. Aus Sicht der Projektteams wird daher empfohlen, dies weiter zu verfolgen und umzusetzen.

Literatur

- Grab, T., Storch, T., Eichinger, S., Gross, U.: Wetting behaviour of propane drops on solid materials. in: ASTFE – American Society of Thermal and Fluid Engineers (Hrsg.) Proc. of First Thermal and Fluids Engineering Summer Conf. Thermal Fluids Engineering Addressing Grand Challenges. New York (September 2015)
- Schiffer, R., Möllerherm, S. Wohnlich S.: Energiebergbau – Möglichkeiten der Um- und Nachnutzung bergbaulicher Infrastruktur durch energetische Nutzung des Grubenwassers. Tagungsband Bergbau, Energie und Rohstoffe 2019. Übergang zu neuen Zeiten, 11.-13. September 2019. Hrsg.: THGA/FZN und DMV. Technische Hochschule Georg Agricola, 1 Abb., S. 308-317, Bochum.
- Schiffer, R., Möllerherm, S. Wohnlich S.: Energiebergbau – Um- und Nachnutzung bergbaulicher Infrastruktur durch eine energetische Nutzung des Grubenwassers –Chance oder Fiktion? in: Erdöl Erdgas Kohle (OIL GAS European Magazine), 136. Jg. (2020), 4-2020, S. 34–37, 1 Abb., 1 Tab.; ISSN 0179-3187, Hamburg

Ausführlicher Abschlussbericht des Projekts

Der Abschlussbericht des Projekts ist auf der Webseite des *Forums Bergbau und Wasser* zu finden.



AUSWIRKUNGEN EINES UNGEHINDERTEN GRUBENWASSERANSTIEGS SOWIE DER EINSTELLUNG ALLER POLDERMASSNAHMEN IM EINZUGSGEBIET VON EMSCHER UND LIPPE AUF DAS OBERFLÄCHENNAHE GRUNDWASSER

Projektleiter: Dipl.-Geol. M. Getta, Emschergenossenschaft Essen

Schwerpunkt: Nachhaltige Grubenwasseranstiegsniveaus

Fördersumme: 224 Tsd. €

Förderdauer: 24 Monate

Kurzfassung der Projektergebnisse

ZIELE

Ziele des Projekts waren Untersuchung von Auswirkungen auf das oberflächennahe Grundwasser bei vollständiger Beendigung der Grubenwasserhaltung in den vom Steinkohlebergbau geprägten Bereichen des Emschergebietes und des südlichen Lippeverbandsgebietes sowie der Auswirkungen der Beendigung aller Maßnahmen zur Polderentwässerung in den Einzugsgebieten der Oberflächengewässer. Beide Regime (Grubenwasser und oberflächennahe Gewässer) werden unabhängig voneinander bewirtschaftet, da keine direkten hydraulischen Wechselwirkungen zwischen ihnen bestehen.

Der betrachtete ungehinderte Grubenwasseranstieg und die Überschwemmungen der Poldergebiete stellen rein theoretische Szenarien dar.

METHODEN UND ERGEBNISSE

Für diese Studie erfolgte die Ermittlung von überschwemmungsgefährdeten Flächen im Emscher- und Lippegebiet auf topografischer Basis, basierend auf Flächenverschnitten mit einem GIS-System. Zudem wurden das Volumen der Überschwemmungen ermittelt und Abschätzungen zur Wasserbilanz für die Überschwemmungsflächen im Einzugsgebiet der Emscher durchgeführt. Bezogen auf das Untersuchungsgebiet wurden Vorflutpumpwerke und Brunnen im Emscher- und Lippeverbands-Gebiet sowie Pumpwerke der RAG betrachtet. Bei der Interpretation der überschwemmungsgefährdeten Flächen müssen die Einschränkungen durch die Methodik berücksichtigt werden. Die errechneten Flächen und Volumina ausgehend von EGLV und RAG Pumpwerken wurden rein unter topografischen Gesichtspunkten betrachtet und zeigen somit nicht eine zu erwartende, sondern eher eine überzeichnete Situation.

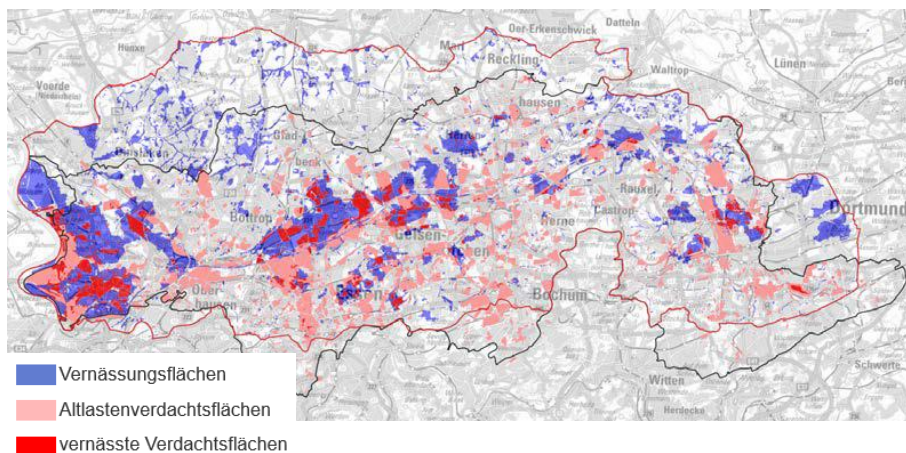


Abbildung 1: Betroffenheit im Hinblick auf die allgemeine Umweltsituation (Altlastenverdachtsflächen). Verdachtsflächen liegen nur für das Emschergebiet vor (schwarze Linie)

Im Münsterländer Kreidebecken (NRW und Niedersachsen, Deutschland) wird für das im gesamten Becken verbreitete untere Grundwasserstockwerk der Schichten des Cenomans und Turons (Untere Oberkreide) ein hydraulischer Druckausgleich zwischen dem Nord- und Südrand des Kreidebeckens angenommen. Für den Fall eines ungehinderten Grubenwasseranstiegs im Grundgebirge (Karbon) würde sich in diesem Grundwasserleitersystem eine hydraulische Druckpotenzialfläche ausbilden („worst-case“-Szenario), welche sich ausgehend von hydrogeologisch begründbaren hydraulischen Druckpunkten am Nord-, Ost und

Südrand des Beckens über das Beckeninnere aufspannen lässt. Die auf den potenziellen hydraulischen Druckpunkten des Beckens basierende und mittels ArcGIS interpolierte Druckpotenzialfläche weist ein generelles Gefälle nach Westen mit ihrem höchstgelegenen Druckpunkt im Nordosten (Fosbergquelle bei Bielefeld) und ihrem niedrigsten Druckpunkt im Südwesten (Ruhrbogen in Oberhausen) auf. Die Druckpotenzialfläche ist zukünftig für die „worst-case“-Betrachtung von Grubenwasseranstiegsszenarien in stillgelegten Bergwerken oder von aufsteigenden Tiefengrundwässern in oberflächennahen Grundwasserleitersystemen verwendbar.

AUSBLICK

Mit dem großräumigen Grundwassermodell können weitere Szenarien zur Prognose der Auswirkungen eines Grubenwasseranstiegs durchgeführt werden:

- » Flächiger Grundwasserzutritt im Falle eines Grubenwasseranstiegs in Bereichen geringmächtigen Emscher-Mergels (bisher nur Zutritt in Tiefenversickerungsbereichen simuliert)
- » „Kurzschluss“ des Grundwasserkontaktes zwischen dem tiefem Grundwasserstockwerk und dem oberen Grundwasserstockwerk an Schächten im Emschergebiet
- » Prognosen zur Steuerung des Grubenwasseranstiegs

Tagungen und Veröffentlichungen

Die Arbeitsgruppe bereitet derzeit zwei wissenschaftliche Publikationen vor. Des Weiteren war ein Beitrag für die FH-DGGV Tagung vom 24.-26.3. 2022 in Jena angemeldet (vgl. Referenz [37] auf Seite 85.)

Ausführlicher Abschlussbericht des Projekts

Der Abschlussbericht des Projekts ist auf der Webseite des *Forums Bergbau und Wasser* zu finden.



DATEN AUS DER VERGANGENHEIT ALS GRUNDLAGE FÜR DIE ZUKÜNFTIGE STEUERUNG EINES NACHHALTIGEN GRUBENWASSERANSTIEGS

Projektleiter: Prof. Dr. T. Kirnbauer, THGA Bochum

Schwerpunkt: Nachhaltige Grubenwasseranstiegsniveaus

Fördersumme: 33 Tsd. €

Förderdauer: 24 Monate

Kurzfassung der Projektergebnisse

Daten zur Beschaffenheit der Grundwässer vor dem Eingriff des Menschen in die verschiedenen Grundwassersysteme des Ruhrgebiets (einschließlich Tiefenwässer, Solen und Thermalwässer) fehlten bislang vollständig. Ziel des Projekts war es, die isotopengeochemische Zusammensetzung von Grundwässern im Ruhrgebiet für den Zeitraum vor ihrer bergbaubedingten Absenkung zu rekonstruieren.

Als zentrales Ergebnis dieses Projekts stellt sich heraus, dass die untersuchten Minerale Baryt, Calcit, Pyrit/Markasit, Coelestin und Strontianit aus dem Steinkohlengebirge und dem Deckgebirge zwei unterschiedlichen Fluid-Systemen zugeordnet werden können, die räumlich voneinander getrennt und zeitlich voneinander entkoppelt sind, ein atektonisches, rezentes bis subrezentes System und ein tektonisch induziertes, fossiles System.

1. ATEKTONISCHES REZENTES SYSTEM IM STEINKOHLENGEBIRGE

Gebunden an die großen, hydraulisch leitenden NW–SE-streichenden Abschiebungen des Ruhrgebiets stiegen bis zur bergbaubedingten Grundwasserabsenkung NaCl- und Ba-reiche Tiefensolen auf und vermischten sich im Bereich des Steinkohlengebirges mit sulfatreichen Wässern. Das der Pyritoxidation entstammende Sulfat fiel als Baryt der Ba-Mineralisation (cs, z) innerhalb von Gesteinen des Oberkarbons und des Zechsteins aus. Es ist keine einzige Stelle bekannt, an der sich die Ba-Mineralisation (cs, z) in den Gesteinen des Kreide-Deckgebirges gebildet hat.

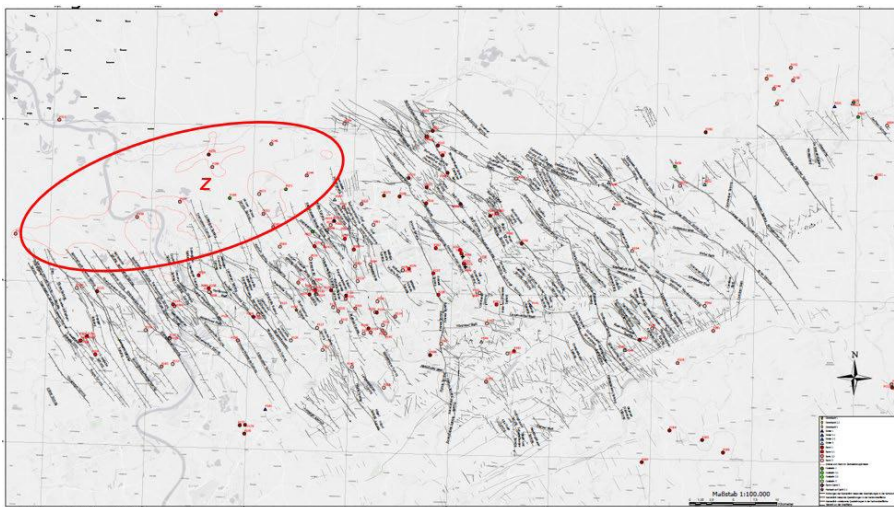


Abb. 1: Geographische Verbreitung der Ba-Mineralisation (cs, z) im Ruhrgebiet (rote Nummern), kombiniert mit einer tektonischen Karte. Das Verbreitungsgebiet der Ba-Mineralisation (cs, z) in Gesteinen des Zechsteins ist mit einer roten Ellipse dargestellt. (verändert nach Westhues (2021): Visualisierung von Störungen und Mineralgängen im Ruhrkarbon. Bachelor-Arbeit an der TH Georg Agricola, Bochum).

Alle Stellen, an denen im Ruhrkarbon Baryt der Ba-Mineralisation (cs, z) gefunden wurden, lassen sich also im Nachhinein als hydraulische Aufstiegswege von NaCl- und Ba-reichen Tiefensolen identifizieren, an denen vor der bergbaubedingten Grundwasserabsenkung Thermalsolen aufstiegen.

Da die Ba-Mineralisation (cs, z) ein rezentes bis subrezentes System ist, werden mit der Einstellung von Pumpmaßnahmen nach Einstellung des Bergbaus auch die Tiefensolen entlang der häufig als Störungszonen ausgebildeten Abschiebungen wieder aufsteigen. Im Bereich der nun vorhandenen bergmännischen Hohlräume können sie allerdings ihre vorher „kanalisierten“ Aufstiegswege auch verlassen.

2. TEKTONISCH INDUZIERTES FOSSILES MINERALSYSTEM IM OBERKREIDE-DECKGEBIRGE

Gebunden an bedeutende tektonische Bewegungen im Zuge der Frühphase der Alpen-Orogenese (Oberkreide, Paläogen) kam es zu kurzfristigen Ereignissen, in denen auf die Auflösung des Zechstein-Salinars (wohl z1) zurückgehende Tiefensolen aufstiegen und vor allem im zentralen Münsterland im Oberkreide-Deckgebirge die Ca-Sr-Ba-Mineralisation (cro) abschieden. Es handelt sich dabei um ein fossiles Mineralsystem, das an aktive Tektonik gebunden war.

Für die Betrachtung der Grundwasserverhältnisse in der Zeit des Nachbergbaus spielt diese Mineralisation keine Rolle, da nicht damit zu rechnen ist, dass in der erdgeschichtlichen Lebensdauer von Homo sapiens dieses tektonische System erneut aktiviert wird.

Ausführlicher Abschlussbericht des Projekts

Der Abschlussbericht des Projekts ist auf der Webseite des *Forums Bergbau und Wasser* zu finden.



ÖKOLOGISCH-WASSERWIRTSCHAFTLICHE AUSWIRKUNG DES GRUBENWASSERKONZEPTS DER RAG AG AUF DEN RHEIN

Projektleiterin: PD Dr. C. Winkelmann, Uni Koblenz

Schwerpunkt: Ökologisch-wasserwirtschaftliche Auswirkungen

Fördersumme: 300 Tsd. €

Förderdauer: 24 Monate

Kurzfassung der Projektergebnisse

Das Ziel dieses Vorhabens war die Abschätzung der Einflüsse des Grubenwasserkonzepts der RAG AG auf die ökologische Qualität des Rheins im Sinne der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) sowie auf die Resilienz der Lebensgemeinschaft unter den geänderten Umweltbedingungen. Während mit großer Wahrscheinlichkeit die Entlastung der Rheinzuflüsse (Emscher, Lippe, Ruhr) zu einer Verbesserung der ökologischen Qualität oder zumindest zu einer Reduktion der Umweltbelastung führen wird, sind die Effekte auf die Lebensgemeinschaft des Rheins schwieriger zu prognostizieren. Die Schwierigkeit liegt in der Komplexität der Reaktion des Ökosystems, insbesondere da das Ökosystem Rhein bereits verschiedenen Umweltbelastungen unterliegt, deren Effekte sich gegenseitig verstärken oder dämpfen können.

Daher fokussierten wir in diesem Projekt auf die potentiellen Einflüsse einer Erhöhung von Wassertemperatur und Salzkonzentration auf die Struktur und Funktion des Nahrungsnetzes der Gewässersohle (benthisches Nahrungsnetz), um sie zur Prognose der Entwicklung von WRRL Indikatoren zu nutzen. Zur Überprüfung des ökologischen Potenzials gemäß WRRL sind die biologischen Qualitätskomponenten Fische und Makrozoobenthos oft ausschlaggebend, insbesondere bezüglich der erwarteten potentiell problematischen Einflüsse der Grubenwassereinleitung (erhöhte Temperaturen und Salzkonzentrationen).

WASSERWIRTSCHAFTLICHE ANALYSE UND ERSTELLUNG VON BELASTUNGSSZENARIEN

Im wasserwirtschaftlichen Teil des Projektes (Teilprojekt A) wurden Einleitungsszenarien entwickelt und die daraus resultierenden thermo-chemischen Änderungen vorhergesagt. Dabei wurden verschiedene Szenarien des Klimawandels einbezogen, um die Prognose zukünftiger ökologischer Effekte so realitätsnah wie möglich zu gestalten.

Als Wirkung der geplanten Grubenwassereinleitungen in den Rhein wird eine Steigerung der mittleren Temperatur um 0,01 °C und eine Erhöhung der mittleren Chloridkonzentration um ca. 10 mg L⁻¹, was zu einer Steigerung der elektrischen Leitfähigkeit um ca. 20 µS cm⁻¹ prognostiziert.

NAHRUNGSNETZ UND BENTHISCHE LEBENSGEMEINSCHAFT

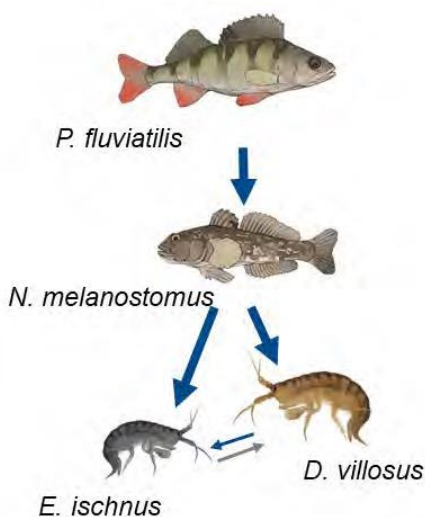


Abb. 1: Darstellung der wahrscheinlich bedeutsamsten Nahrungsnetzbeziehungen und der wichtigsten Arten (blaue Pfeile: Fraßdruck, Pfeildicke zeigt Intensität, grauer Pfeil: Konkurrenz)

Die Analyse der Struktur des Nahrungsnetzes fußt auf Daten zur Benthosbesiedlung im Bereich der zukünftigen Einleitungen (km 979). Die Analyse anhand der Besiedlungsdaten zeigt eine starke Bedeutung

von Flohkrebse (Amphipoden, *Dikerogammarus villosus* und *Echinogammarus ischnus*) und die Recherche der Zusammensetzung der Fischfauna ergibt eine hohe Bedeutung der invasiven Schwarzmundgrundel (*Neogobius melanostomus*) als benthivore Fischart und den einheimischen Flussbarsch als benthivore und piscivore Konsumenten.

Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass moderat erhöhte Salinitäten ($1000\text{--}2000\text{ }\mu\text{S cm}^{-1}$) weder die Wachstumsrate noch das Überleben der untersuchten Fischarten beeinflussen. Bezüglich steigender Temperaturen reagiert der Flussbarsch (*Perca fluviatilis*) tatsächlich empfindlicher als die Schwarzmundgrundel und zeigt eine Reduktion der Wachstumsrate bei $24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Für die Schwarzmundgrundel konnte keine Optimaltemperatur abgeschätzt werden, da keinerlei Temperatureffekte auf die Wachstumsrate zu erkennen waren.

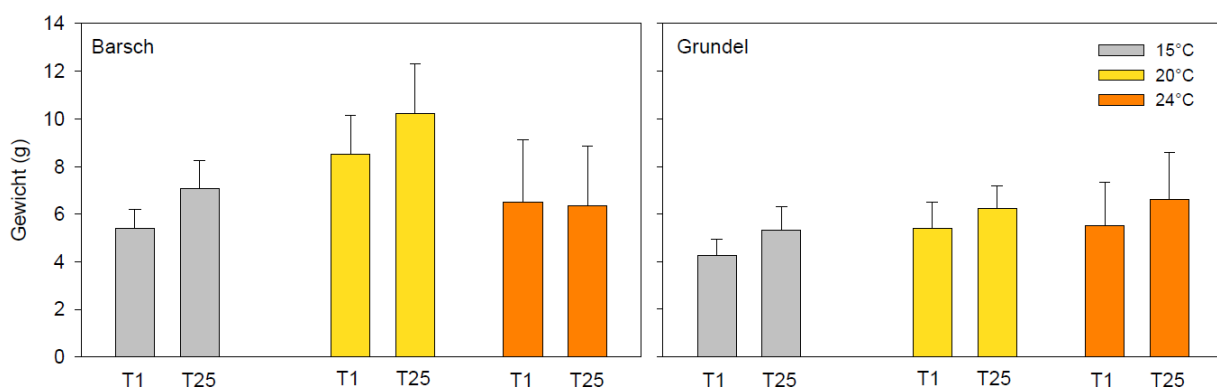


Abb. 2: Veränderung der mittleren Biomasse ($\pm$ Standardabweichung) von Flussbarsch und Schwarzmundgrundel bei unterschiedlichen Temperaturen über 26 Tage

Bei momentanen Chloridkonzentrationen zwischen 100 und 120 mg L^{-1} und elektrischen Leitfähigkeiten zwischen 500 und $800\text{ }\mu\text{S cm}^{-1}$ im Rhein und vor dem Hintergrund der experimentellen Ergebnisse zur Auswirkung moderater Erhöhung von Temperatur und Salinität auf wichtige Fische und Wirbellose sind die in Teilprojekt A prognostizierten Veränderungen als ökologisch wenig bedeutsam einzustufen. Obwohl nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Tiere physiologische Reaktionen auf diese Veränderungen zeigen, ist davon auszugehen, dass diese Reaktionen sehr schwach sind und im Rauschen der Umweltvariabilität verschwinden. Es sind also aufgrund der prognostizierten Änderungen weder direkte Effekte auf die aquatische Biodiversität noch auf die Nahrungsnetzstruktur zu erwarten.

Der Fakt, dass in den Experimenten keine deutliche Veränderung des Wachstums oder des Verhaltens der Fische nachgewiesen wurde, darf aber nicht so interpretiert werden, dass die hier untersuchten moderaten Temperatur- und Salinitäts erhöhungen keinen Stressoren für die Organismen darstellen.

Ausführlicher Abschlussbericht des Projekts

Der Abschlussbericht des Projekts ist auf der Webseite des *Forums Bergbau und Wasser* zu finden.



PUBLIKATIONEN AUS DEM FORUM BERGBAU UND WASSER

ARTIKEL IN FACHZEITSCHRIFTEN UND TAGUNGSBÄNDEN

- [1] Bedoya Gonzalez, D. A., Rinder, T. & Hilberg, S. (2020): Evidences of water-rock interaction in a porous and fractured coalmine overburden - Towards a reactive transport model for coalmine drainage. Grundwasser und Flusseinzugsgebiete: Prozesse, Daten, Modelle, Leipzig: Fachsektion Hydrogeologie e.V. in der DGGV, Leipzig.

The intrusive activities of hard coal mining irreversibly modify the physical and chemical properties of the original rock sequence, resulting in changes of both chemical composition and hydrodynamic behavior of the groundwater. Thus, fluid flow and mass transport are expected to occur in porous and fractured media, according to the geomechanical response of the rock sequence to long-wall mining activities. Consequently, toward a comprehensive model of mine water chemical evolution over time, different spatial scales have to be considered as input. Taking these into account, the present study assesses the water-rock interaction and the reactive transport of solutes through a disturbed sedimentary sequence of a former coalmine.

The Ibbenbüren Westfield is situated on the Dickenberg, a horst structure composed of Carboniferous rocks and topographic elevated with respect to the surrounding Mesozoic and Quaternary units. Mining works took place until 1979, with excavations that went down to about 600 m below ground. The mine flooding after closure was completed when the groundwater reached the Wilhelm-shaft (66 m a.s.l.), from where it is now drained through the Dickenberg adit. As a result, the water table is now above the surrounding areas. Therefore, the chemical composition of the mine drainage, with a high content of iron and sulfate, may be substantially influenced by water-rock interaction of percolating rainwater through the carboniferous rocks. To test this hypothesis we investigate evidences of rock alteration of two drill cores pierced through the rock sequence above the adit. Special focus was given to both the porous units of the sequence and the alterations related to fracture surfaces.

A combined mineralogical and elemental analysis was done on 22 thin sections using petrographic microscope, Scanning Electron Microscope (SEM) and X-ray diffraction microscope (XRD). The aim was the identification of alteration products that indicate water-rock interaction processes within the sedimentary sequence. Batch experiments were carried out for the quantification of acid forming potential and to evaluate the influence water-rock interaction for the mine drainage quality in general.

The results are used to set up a conceptual water-rock interaction model, establishing the relevance that each flow medium (porous and fractured) has for the mine drainage quality. In the next step, our findings will be integrated into a reactive transport model, using TOUGHREACT to forecast the long-term evolution of mine drainage.

- [2] Bedoya Gonzalez, D. A., Rinder, T. & Hilberg, S. (2021): Signs of water-rock interaction in fractured coalmine overburdens – First steps for setting a double-continuum reactive transport model, Goldschmidt Conference 2021.

Underground hard coal mining tends to redistribute the stress state of the surrounding rock volume, leading to movement, deformation and failure of the rock layers above the mined seam. Overburden disruptions affect subsurface water bodies and their flow conditions. Fractures along the bedrock change the hydrogeological system, altering water flow paths and increasing the surface of rock exposed to water interaction. At the Ibbenbüren West Field this has resulted in elevated iron (>2000 mg/L) and sulfate (≈4000 mg/L) contents. The present study assesses the water-rock interaction and the reactive transport of solutes through the disturbed sedimentary sequence with the aim to identify and quantify relevant key parameters governing mine drainage composition.

The drainage of the Ibbenbüren Westfield is on an elevated position with respect to the surrounding areas. Accordingly, the actual chemical signature may be the result of the interaction between percolating rainwater and the Carboniferous rock sequence above the adit. To test this hypothesis, the present study combines several analytical techniques to identify and characterize evidences of water-rock interaction in the overburden. Petrographic microscopy, Scanning Electron Microscopy (SEM), X-ray diffraction microscopy (XRD) and X-ray fluorescence spectrometry (XRF) are applied on 22 rock intervals belonging to two full diameter core samples pierced above the drainage.

Results are used to set up a conceptual model that establishes the relevance of each flow medium (porous and fractured) in the mine drainage quality. Mining-derived fractures would play an important role by allowing the interaction of meteoric water with the rather low permeable sandstones layers. In such a system, water propagates rapidly through the fractures, while slowly invading the tight matrix blocks. Fluid exchange is achieved by pressure and chemical difference between both mediums. In the next step, our findings will be integrated into a reactive transport model, using TOUGHREACT to forecast the long-term evolution of mine drainage.

- [3] Bedoya-Gonzalez D., Kessler T., Rinder T. & Schafmeister M. T.: A Double Continuum model (TOUGH2) for characterizing flow and discharge in a mechanically disrupted sandstone overburden. *Hydrogeology journal* (2022). <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02507-3>

Underground hard coal mining usually disrupts the mechanical equilibrium of rock sequences, creating fractures within minor permeable rocks. The present study employs a dual-continuum model to assess how both fractured and porous sandstone media influence the percolation process in post-mining setups. To test the approach, the software TOUGH2 was employed to simulate laminar fluid flow in the unsaturated zone of the Ibbenbüren Westfield mining area. Compared to other coal mining districts in Germany, this area is delineated by the topography and local geology, leading to a well-defined hydrogeological framework. Results reveal good agreement between the calculated and measured mine water discharge for the years 2008 and 2017. The constructed model was capable of reproducing the bimodal flow behavior of the adit by coupling a permeable fractured continuum with a low-conductivity rock matrix. While flow from the fractured continuum results in intense discharge events during winter months, the rock matrix determines a smooth discharge limb in summer. The study also evaluates the influence of individual and combined model parameters affecting the simulated curve. A detailed sensitivity analysis displayed the absolute and relative permeability function parameters of both continua among the most susceptible variables. However, a strong a priori knowledge of the value ranges for the matrix continuum helps to reduce the model ambiguity. This allowed for calibration of some of the fractured medium parameters for which sparse or variable data were available. However, the inclusion of the transport component and acquisition of more site-specific data is recommended to reduce their uncertainty.

- [4] Bedoya-Gonzalez, D. A., Hilberg, S., Kessler, T., Schafmeister, M.-T. & Rinder, T. (in prep.): Modelling chemical and temporal evolution of coal mine drainage from the Ibbenbüren Westfield through a reactive transport model (TOUGH).
- [5] Bedoya-Gonzalez, D. A., Hilberg, S., Kessler, T., Schafmeister, M.-T. & Rinder, T. (accepted): Application of a Double Continuum model to describe reactive transport in disrupted coal mining areas: a case study of the Ibbenbüren Westfield, Germany. *Grundwasser-Klima-Gesellschaft: Fachsektion Hydrogeologie e. V. in der DGGV e.V.*

Underground hard coal mining operations irreversibly disrupt the pre-existing mechanical equilibrium of the geological media. The employment of high-recovery methods modifies the stress field of the sedimentary sequence, generating movement and failure of the rock layers above and below mined seams. These disruptions also affect the original state of the hydrogeological system, altering flow paths and increasing the surface of rock exposed to air and water. Some of these changes have generated, for example, huge volumes of mine water with elevated iron (>200 mg/L) and sulfate (≈4000 mg/L) contents at the Ibbenbüren Westfield coalmine. , the present study setup a Double Continuum (DC) model to characterize the water flow and reactive transport of solutes in this area. By using this approach, the mining zone can be treated as a coupled hydrogeological system, where fluid flow and mass transport occur in the porous and fractured media simultaneously.

The studied area is a former mining zone situated on a topographically elevated horst structure composed of Carboniferous rocks. As the groundwater table is maintained above the surrounding areas, the quantity and quality of the discharged water depend on two factors: i) the seasonal fluctuation of infiltrated precipitation, and ii) its interaction with the fractured and matrix continuums. To characterize these processes, the software TOUGHREACT is employed for modeling Darcy-type fluid flow in the variably saturated porous medium. Discretization of the physical medium is made from mineralogical and chemical analyses previously performed by the authors on several core samples, while properties of the water-conducting fracture zones (e.g., growth, density and permeability) are obtained from an extensive literature research.

The modelling results display good agreement with measured mine water discharge. While the fractured continuum reacts readily to constant precipitation events during wet seasons (rapid percolation), water is stored and released over some weeks from matrix blocks after the main recharge event has occurred (slow percolation) Based on the results from the numerical model, the coupled dissolution and precipitation reactions, governing mine drainage chemistry, including extensive oxidation of pyrite, are quantified. These outcomes add an important aspect to coalmine models, as they can be used to forecast water inflows within mining-disrupted sequence as well as long-term evolution of the mine drainage. Additionally, the DC approach may improve the characterization of the rebound process in post-mining locations.

- [6] Bedoya-Gonzalez, D. A., Kessler, T. & Schafmeister, M.-T. (2021): Employment of A Double Continuum Model to Characterize Groundwater Flow In Underground Post-Mining Setups: Case Study Of The Ibbenbüren Westfield. In: Stanley, P., Wolkersdorfer, C., Wolkersdorfer, K.: Mine Water Management for Future Generations. p. 47 – 53.

Underground hard coal mining operations irreversibly disrupt the pre-existing mechanical and hydraulic equilibrium of the geological media. High-recovery methods such as longwall or high-extraction room-and-pillar mining modify the stress field of the rock sequence, generating movement and failure of the rock volume above and below mined seams. Induced fractures in the bedrock increase the hydraulic conductivity and alter the flow paths of percolating groundwater. Consequently, rock sequences can be conceived as coupled hydrogeological systems, where fluid flow and mass transport are expected to occur in the porous and fractured medium simultaneously. In an effort to assess the influence of each medium on a vertical flow system, the present study employs a Double Continuum (DC) model, which chiefly considers the interaction between the two overlapping media.

This study is based on the characterization of water-conducting fracture zones (e.g. growth, density and permeability) to describe groundwater percolation at the Ibbenbüren West Field. The site is a former mining zone situated on a topographically elevated horst structure composed of Carboniferous rocks. As the groundwater table is maintained above the surrounding areas, the amount of disposed water out of the zone depends on two factors: i) the seasonal fluctuation of the meteoric water, and ii) its interaction with the fractured and matrix continuums during percolation. Thus, the software package TOUGH2 is employed to describe the Darcy-type fluid flow in the variably saturated porous medium.

Model results displayed good agreement with measured mine water discharge. While Fractured Continuum reacted readily to constant precipitation events during wet seasons (rapid percolation), water is stored and released over some weeks from matrix blocks after the main recharge event has occurred (slow percolation). This behavior generates a gradual decrease in the discharge signal over the transition to dry seasons. Moreover, lags in the discharge are observed for rainfall events following dry months because of matrix re-watering.

The outcomes of the approach add an important aspect to mine water models, as they could estimate the relevance of each geological medium with respect to mine drainage quality (e.g. Acid Mine Drainage generation). Findings can be integrated into reactive transport models to forecast the long-term evolution of the mine drainage. In addition, the method may improve the characterization of the rebound process in post-mining locations or forecast water inflows within mining-disrupted sequence.

- [7] Bedoya-Gonzalez, D., Hilberg, S., Redhammer, G & Rinder, T., (2021): A Petrographic Investigation of the Carboniferous Sequence from the Ibbenbüren Mine: Tracing the Origin of the Coal Mine Drainage. Minerals. 11, 5, doi:10.3390/min11050483.

The mine drainage of the Ibbenbüren anthracite coal mine is characterized by exceptionally high concentrations of dissolved iron and sulfate. The elevated position of the coal field with respect to the surrounding area makes the neighboring sediments an unlikely source of these elements. Accordingly, it has been hypothesized that interaction between infiltrating rainwater and the fractured overburden is a key process governing the mine drainage chemistry. To test this hypothesis, two full-diameter core samples drilled above the discharging adit of the coal mine were investigated. The methodology combined several analytical techniques to identify and characterize traces of water-rock interaction related to both diagenesis and relatively recent weathering processes along open fractures. The coupled appearance of kaolinite-dickite-illite minerals in weathered and unweathered rock sections was clearly connected to the burial history of the Carboniferous sequence. In contrast, the formation of iron (oxide-) hydroxides together with the presence of oxidized pyrite in weathering profiles along both sides of the fractures was positively related to the geochemical footprint of the coal mine drainage. Thus, open fractures, possibly originated from mining activities, may play a significant role in the drainage chemistry, especially considering the rather poor hydraulic conditions of the overburden.

- [8] Burghardt, D., Coldewey, W. G., Melchers, C., Messer, J., Paul, M., Walter, T., Wesche, D., Westermann, S., Wieber, G., Wisotzky, F. & Wolkersdorfer, C. (2017): Glossar Bergmännische Wasserwirtschaft. – 79 p., Neustadt/Wstr. (Fachsektion Hydrogeologie in der DGGV).

- [9] Campos, J. A., Barbosa, P. M., Brandão, L., Camargo de Azevedo, A., Casanova, M., Cord, A. G., N.; Giese, E. C., Händel, F., Jager, N., Jessen, G. H., Lepenies, R., Marchezini, V., Pujoni, D., Salma, A., Sánchez, A. S., Schierz, A., Stemke, M., Ussath, M., Val, P., Whaley-Martin, K., Yamamoto, F. Y. & Zorzal-Almeida, S. (2019): A new vision of sustainable management in mining and post-mining landscapes. – 1—28 p., Halle (Saale) (Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. Nationale Akademie der Wissenschaften).

Die Gewinnung und Verwertung von Bodenschätzen ist für die industrielle und gesellschaftliche Entwicklung unerlässlich. Bergbautätigkeiten und schwere Minenunfälle haben jedoch ernsthafte Umweltbeeinträchtigungen verursacht mit langfristigen Konsequenzen für Natur und Mensch. Die Häufigkeit solcher Katastrophen und deren sozioökonomische und ökologische Auswirkungen erfordern einen dringenden Paradigmenwechsel in den Strukturen und Prozessen der Bergbauindustrie. Der vorliegende wissenschaftspolitische Report skizziert eine neue Vision des Bergbaus und präsentiert Maßnahmen, mit denen dieser Paradigmenwechsel hin zur nachhaltigen Gestaltung von Bergbau(folge)landschaften gesteuert werden kann.

Die in diesem Dokument abgegebenen Empfehlungen lassen sich in vier übergeordneten Handlungsfeldern zusammenfassen: (1) Perspektivenwechsel mit neuem Fokus auf die Landschaftsskala und die Bedeutung von Wassermanagement; (2) Obligatorische Finanzierung unabhängiger Forschungszentren durch die Bergbauindustrie und verpflichtende Zusammenarbeit zwischen Bergbauunternehmen und wissenschaftlichen Beiräten; (3) Festlegung internationaler Normen und Schaffung von Transparenz im Wissensmanagement; (4) Proaktive Entwicklung von Notfallplänen und Maßnahmen zur Schadensbegrenzung.

Die im Report aufgezeigten Handlungsempfehlungen richten sich an alle relevanten Akteure und umfassen alle Phasen von Bergbauaktivitäten, d.h. Planung, Management, Überwachung, Prävention und Rekultivierung. In diesem Sinne sollten während der gesamten Dauer des Bergbaubetriebs Informationen und Befugnisse zwischen allen relevanten Parteien geteilt werden.

Diese Handlungsempfehlungen wurden mit den folgenden Zielsetzungen entwickelt: 1. Förderung des lokalen Engagements und des Aufbaus von Kapazitäten; 2. Schaffung von Möglichkeiten für die Wissenschaft, ein integraler Bestandteil des gesamten Bergbauprozesses zu werden und ihr freien Zugang zu Daten zu ermöglichen; 3. Festlegung von internationalen und gesetzeskonformen Standards, um Sorgfalt und Transparenz zu gewährleisten und gleichzeitig die generierten Daten zwischen den Interessengruppen auszutauschen; 4. Institutionalisierung einer effektiven Beteiligung von Interessengruppen in allen Phasen des Bergbaus, um so seine Auswirkungen zu minimieren und sozioökonomischen Wohlstand für alle Beteiligten sicherzustellen.

*Dieser wissenschaftspolitische Report zielt darauf ab, die aktuelle Bergbausituation in vielen Ländern zu verbessern. Die Autor*innen sind überzeugt, dass ein Paradigmenwechsel hin zu nachhaltigen Bergbau(folge)landschaften möglich ist, wenn er durch gemeinsame Anstrengungen von Politik, Bergbauunternehmen, Wissenschaft und Öffentlichkeit eingeleitet wird.*

- [10] Genth, T., Sessing, J., Jasnowski-Peters, H. & Melchers, C. (2021): Clay mineral quantification in the Upper Cretaceous Emscher formation – evaluating a potential hydraulic barrier during mine water rebound in the Ruhr District. Paper presented at the GeoKarlsruhe, Karlsruhe.

The sealing potential of geological formations ("cap rocks") plays an important role in long-term industry projects associated with mine water rebound, carbon sequestration and nuclear waste disposal. It is an important criterion in risk management and monitoring concepts. Clay content and mineralogy were used as screening parameters in order to estimate permeability in the Upper Cretaceous Emscher Formation. The Emscher Formation consists of monotonous grey to greenish alternating clay-, silt- and marlstones with a high amount of micrite. Distribution of clays was quantified on core and cuttings material using combined X-ray diffraction and Rietveld refinement. An important task was to evaluate content and changes in clay mineralogy with respect to expandable clays. The aim is to assess its self-sealing potential. Core sections and cuttings were retrieved from groundwater monitoring wells drilled in the northern part of the Ruhr District. The aim of these wells is to record hydraulic potential in the overburden section during mine water rebound in the Ruhr District. Classical lithological and sedimentological analyses of core section were conducted. Bulk geochemistry included total inorganic and organic carbon measurements. Elemental analyses on selected samples was determined using X-ray fluorescence spectroscopy. Clay mineral identification and quantification was performed on (a) bulk rock, (b) <2µm random powder and (c) <2µm oriented samples. For expandable clays, ethylene glycol and heating to 550°C was applied.

- [11] Genth, T., Sessing, J., Jasnowski-Peters, H., Dölling, B. & Melchers, C. (2021): Erste Ergebnisse der Sedimentanalyse der Emscher-Formation in der Bohrung Waltrop 1 unter besonderer Berücksichtigung der Tonmineralogie. – scriptum online, **19**:1—21.

Der Bohrkernabschnitt 16 – 71 m der Bohrung Waltrop 1, am nordöstlichen Ortsausgang von Waltrop, wurde im Bereich der dort anstehenden Emscher-Formation (Obersantonium) lithologisch und geochemisch-mineralogisch untersucht. Im Fokus standen dabei die Ermittlung der Tongehalte und die detaillierte Analyse der Tonmineralogie mithilfe der Röntgendiffraktometrie unter Berücksichtigung des Anteils quellfähiger Tonminerale. Für die im Kernmaterial größtenteils als Wechselfolge von grauen bis schwach grünlichen Ton-, Schluff- und Kalkmergelsteinen ausgebildete Emscher-Formation wurde anhand von 34 Proben über das gesamte Profil hinweg ein durchschnittlicher Tongehalt von 14 – 24 Gew.-% ermittelt. Anhand von sieben zuvor gemahlenen, anschließend unorientiert gemessenen sogenannten Bulk- Proben wurde ein Tonmineralspektrum, bestehend aus Smektit, Illit (Muskovit) und Kaolinit, nachgewiesen. Die Illit/Smektit-Mischkristallreihe ist hier durch fast reine Illit-Anteile mit Beimengungen von Smektit in der Größenordnung von 10 – 20 % charakterisiert. Auf die Bulk-Zusammensetzung bezogen, korrespondiert ein höherer Kalkgehalt im unteren Kernabschnitt mit höheren Werten von Illit/Smektit. In der texturiert gemessenen Tonmineralfraktion < 2 µm wurde viel Mikroquarz angetroffen (durchschnittl. 58 Gew.-%). Die Zusammensetzung der Tonfraktion ist als sehr reif im Hinblick auf den Transportweg des Sediments zu klassifizieren. Da am Südrand des Münsterländer Kreide-Beckens zur Ablagerungszeit keine großen Deltabereiche existierten, sind Umlagerung oder ein weit entferntes Liefergebiet mögliche Erklärungen für das angetroffene Tonmineralspektrum.

- [12] Genth, T.; Jasnowski-Peters, H.; Rose, L.; Melchers, Ch. (submitted): Bulk- and Clay-mineral quantification in the upper Cretaceous Emscher Formation – evaluating a potential hydraulic barrier during mine water rebound in the Ruhr district. – Reconnect, IMWA 2022 Conference; Christchurch, NZ

The hydraulic conductivity of cap rock formations has an important role during a controlled mine water rebound process. The intrinsic permeability of the Upper Cretaceous Emscher Formation which has not been determined in terms of depth profiles and with regards to facies changes of the Emscher Formation is a key factor to assess during the mine water risk management and its monitoring concept. For estimation of the regional hydraulic parameters, a combined approach consisting of geophysical well logs calibrated with the clay mineralogy, permeability/porosity on core samples and on-site hydraulic field tests of specific borehole compartments are necessary to get a decent model of a 1D petrophysical behaviour of the entire Emscher Formation. The hydraulic test measurements as part of the scientific support during the drilling process of three groundwater monitoring wells drilled in the northern part of the Ruhr District. The lithology of the Emscher Formation consists of monotonous grey to greenish alternating clay-, silt- and marlstones with a high amount of hemipelagic micritic carbonates. Distribution of clays was quantified on core and cuttings material using combined X-ray diffraction and Rietveld refinement as post-processing method. An important task was to evaluate content and changes in clay mineralogy with respect to expandable clays. The aims are to assess its self-sealing potential in terms of tectonic structures and to correlate the clay distribution with the well logs in order to calibrate the various logs incl. resistivity and neutron porosity logs. Core sections and cuttings were retrieved from the groundwater monitoring wells. Classical lithological and sedimentological analyses of core section were conducted. Bulk geochemistry included total inorganic and organic carbon measurements. Clay mineral identification and quantification was performed on (a) bulk rock, (b) <2µm random powder and (c) <2µm oriented samples. For expandable clays, ethylene glycol and heating to 550°C was applied. As a result, the main minerals in the Emscher Formation are quartz, calcite, illite/muscovite and illite /smectite mixed layer clays. An increasing amount of calcite is in contrast to a decreasing amount of quartz within depth profiles. The amount of smectite within the smectite/illite mixed layer clays is up 80 wt. %. Quartz was present in all <2µm samples. The overall present quartz fraction in the <2µm fraction and the low amounts of smectites have shown, that the sealing potential of the formation is very heterogeneous and needs to be assessed in more detail.

- [13] Genth, T., Rose L., Jasnowski-Peters, H. & Melchers, C. (submitted): Evaluation der Durchlässigkeit des Deckgebirges im Rahmen des geplanten Grubenwasseranstiegs an der Ruhr – die Emscher Formation im Fokus. – Kassel22 Conference abstract - Kassel, Germany.

Der Anstieg des Grubenwassers und damit verbunden die Reduzierung der Grubenwasserhaltungsstandorte sind Hauptbestandteil des Grubenwasserhaltungskonzepts im ehemaligen Steinkohlenrevier des Ruhrgebiets. Für ein nachhaltiges Grubenwassermanagement ist die Berücksichtigung der hydraulischen Durchlässigkeit potentiell von Grubenwasser infiltrierender Formationen unerlässlich. Das oberste Schutzziel, der Schutz der Trinkwasservorkommen, ist durch einen Abstand zum Grubenwasser von 150 Meter dauerhaft zu gewährleisten. Für

ein umfassendes Bild der hydraulischen Verhältnisse des Deckgebirges erfolgt eine lithostratigraphische, petrologische und petrophysikalische Analyse der Grundwassermessstellen, die im Rahmen des integralen Monitorings der RAG AG zur Überwachung der Grundwassermessstände im Deckgebirge bereits erstellt wurden. Das Tonmineralogie-Inventar in einer überwiegend tonmergeligen Lithologie der Emscher Formation sowie erste Analysen der petrophysikalischen Kenngrößen Porosität und Permeabilität bzw. hydraulische Durchlässigkeit stehen dabei im Fokus. Die Emscher Formation ist über den Einzugsbereich des Grubenwasseranstiegs im Ruhrrevier trotz ihrer augenscheinlich monotonen Lithologie als faziell heterogen zu bezeichnen. Daher ist es wichtig, diese „Poroperm“-Daten und einen quantifizierten Anteil der Tonminerale über den gesamten Abschnitt der Emscher Formation zu erfassen. Diese Daten finden weiter Anwendung in der Evaluation der Bohrlochgeophysik und hydrogeologischen Modellierung.

- [14] Hilberg, S. (submitted): Digitale Lernspiele als interaktiver Einstieg in den Geologie - Unterricht. Pango Austria 2022, Montanuniversität Leoben.

Digitale Lernspiele ermöglichen es, die zeitlich und räumlich schwer greifbaren geologischen Prozesse anschaulich zu machen und bieten zudem zahlreiche Möglichkeiten zur Interaktion im digitalen Raum. Beginnend von kurzen Animationen bis hin zur virtuellen Realität im 3D-Raum kann die Geologie so auf spannende und aktivierende Weise in einen modernen Unterricht einfließen.

Im Vortrag werden zwei Beispiele von digitalen Lernspielen zu geologischen Themen für unterschiedliche Zielgruppen vorgestellt:

Beispiel 1: „Zwischen Regenwolke und Wasserhahn“ In drei Kapiteln wird das Thema Grundwasser und Wasserversorgung für die 3. Klasse NMS und AHS behandelt. Jedes Kapitel ist im Rahmen von einer Schulstunde selbständig einzeln oder in Gruppen zu bearbeiten. Im Kapitel 1 geht es darum zu erfahren, was mit dem Regen, der auf die Erde fällt passiert, wie er zu Grundwasser wird, wie Grundwasser fließt und welchen Gefahren es ausgesetzt ist. Das Kapitel 2 befasst sich mit dem Wasser im Gebirge. Wie schaut es in einem Karstgebirge aus? Woher kommt das Quellwasser? Warum leben Höhlenforscher gefährlich, wenn es draußen regnet? Im Kapitel 3 geht es um die Wasserversorgung und es wird gezeigt, was alles passieren muss, damit unser Wasser immer ausreichend und sauber aus dem Wasserhahn rinnt. Quizfragen und kurze Spielphasen zwischendurch lockern auf und helfen, das Erlernte zu festigen. Die Schülerinnen und Schüler werden am Ende mit einer Urkunde belohnt.

Beispiel 2: „Nach dem Kohlebergbau“ Das Lernspiel wurde speziell für Schülerinnen und Schüler ab 15 Jahren in aktuellen oder ehemaligen Bergbauregionen entwickelt. Es soll Einblicke in den Bergbau geben und die Umweltprobleme diskutieren, die durch den Bergbau auftreten können. Es zeigt zudem, welche Aufgabe nach der Stilllegung eines Bergwerkes noch übrigbleiben und warum diese als „Ewigkeitsaufgaben“ bezeichnet werden. Die Schülerinnen und Schüler können in drei Kapiteln selbständig erfahren, wie eine Lagerstätte (in diesem Fall Kohle) entstanden ist, wie ein Bergwerk von innen aussieht und was ein Bergmann untertage alles braucht. Es geht aber auch um Grubenwasser, warum es die Umwelt gefährden kann und wie man damit umgeht. Das dritte Kapitel thematisiert, dass ein Bergbau für alle Zeiten seine Spuren hinterlässt und manche Probleme auch nach der Stilllegung noch viele Generationen beschäftigen werden. Die Spielerinnen und Spieler sind häufig im 3D-Raum unterwegs und können sich den Themen interaktiv nähern. Am Ende jedes Kapitels steht ein Quiz, um das Gelernte zu festigen. Parallel zum Spiel führen die Schülerinnen und Schüler ein „Grubenbuch“, in dem die wichtigsten „take home messages“ festgehalten werden. Wer das Spiel erfolgreich absolviert hat, macht ein Selfie in Bergmannskluft.

- [15] Jasnowski-Peters, H. & Melchers, C. (2021): Natural Tracers For Mine Water Fingerprinting – A First Step To A Hydrogeochemical Monitoring Plan For Risk Assessment During Mine Water Rebound In The Ruhr District Area, Germany. Paper presented at the International Mine Water Association Congress, Wales.

Bromide as natural tracer in combination with hydrochemistry and isotope geochemistry has been applied to distinguish regional aquifers from mine water derived from Upper Carboniferous hosted former hard coal mining area in the Ruhr District, Germany. The hydrogeochemical dataset successfully identified different origins of salinity, i.e. halite dissolution vs. seawater evaporation. Cl/Br ratios and molar Na/Cl ratios of mine water differ significantly compared to groundwater in Upper Cretaceous host rocks consisting of Coniacian-Santonian and Cenomanian-Turonian fractured aquifers. The bromide tracer has the potential to be used for risk management purposes during mine water rebound in order to verify containment.

- [16] Jasnowski-Peters, H. & Melchers, C. (submitted): Natural Tracers For Mine Water Fingerprinting II – a multi tracer approach to unravel underground fluid movements during Mine Water Rebound in the Ruhr District Area.- IMWA 2022 Conference abstract– Christchurch, NZ.
- [17] Jasnowski-Peters, H. & Melchers, C. (submitted): Natürliche Tracerstudien zur Bestandsaufnahme und als Monitoring-Tool der Evaluation von Grubenwassermigration – der geplante Grubenwasseranstieg im Ruhrrevier.-Kassel22 Conference abstract - Kassel, Germany.

Das hydrogeochemische Monitoring des Grubenwasseranstiegs konzeptes im Ruhrrevier ist eine zentrale Aufgabe des Nachbergbaus. In erster Linie gilt es mit Hilfe von natürlichen Spurenelementen, sog. natürlichen Tracern, die im Grubenwasser aufgrund der Interaktion mit dem Nebengestein und als Produkte von in-situ Prozessen enthalten sind, die Fließwege des Grubenwassers während des Grubenwasseranstiegs zu verfolgen. Der Grubenwasseranstieg im Ruhrrevier ist in Bezug auf Anstiegshöhen in den jeweiligen Wasserprovinzen und Deckgebirgsmächtigkeit und Lithologie als sehr heterogen zu bezeichnen. Umso wichtiger ist es, ein genaues Bild der durch Grubenwasser in der Vergangenheit bereits veränderten Hydrogeochemie einzelner Formationen zu gewinnen und Grubenwasser im Untergrund eindeutig zu identifizieren. In diesem Rahmen stehen im Ruhrrevier die Abgrenzung von Grubenwasser zum regionalen Cenomanium-Turonium Aquifer und zum Formationswasser der Emscher Formation (Unterconiacium-Mittelsantonium) eine wichtige Rolle. Die Bestandsaufnahme durch ein exaktes hydrogeochemisches Monitoring ermöglicht es in Zukunft Prognosen von Grubenwasseranstiegsmodellen und deren Chemismus zu verbessern. Mittels Hydrogeochemie lassen sich Rückschlüsse über das Ausmaß von in-situ Prozessen wie die Sulfidoxidation, die den Grubenwasserchemismus maßgeblich beeinträchtigt, während des Grubenwasseranstiegs ziehen. Als Auge in den Untergrund besitzen diese Tracer einen hohen Stellenwert in einer zwar gut überwachten, aber nur noch limitiert zugänglichen Grubenbauinfrastruktur. Es werden eigene und Literaturdaten aus den letzten 60 Jahren für eine kombinierte Tracerstudie vorgestellt. Diese Tracerstudie bildet einen bedeutenden Pfeiler des Monitorings für einen kontrollierten und nachhaltigen Grubenwasseranstieg an der Ruhr.

- [18] Jasnowski-Peters, H. & Melchers, C. (in prep.): Deep regional aquifer systems of the Ruhr District and the Munsterland Basin, a review of groundwater hydrogeochemistry in relation to hard coal mine waters. (to be submitted to Applied Geochemistry/Chemical Geology).

Für das hydrochemische Monitoring im Rahmen eines kontrollierten Grubenwasseranstiegs im ehemaligen Steinkohlenrevier des Ruhrgebietes ist die Kenntnis der hydrochemischen Typisierung tiefer Aquifere in diesem Raum von zentraler wissenschaftlicher und rechtlicher Bedeutung. Die hydrochemische Charakterisierung des Cenomanium/Turonium Tiefenwassers im Münsterländer Kreidebecken und der Formationswässer im Karbon sind Teil des hydrologischen Prozeßverständnisses als ein Pfeiler eines integrierten Risikomanagementkonzeptes für den kontrollierten Grubenwasseranstieg. Die Tiefenwässer der Kreide und des Karbons sind Na-Cl basierte Wässer. Sie sind hochsalinar und erreichen Leitfähigkeiten bis zu 200.000 µS/cm. Mittels hydrochemischer Zusammensetzung der Hauptkationen und -anionen sind Mischungen dieser Solen nur schwer nachvollziehbar. Bestehende hydrochemische Literaturdaten und eigene Analysen wurden zusammengetragen und bewertet, um eine Identifikation dieser Tiefenwässer zu ermöglichen. Geochemische Hinweise auf die Genese des Cenomanium-Turonium Aquifers konnten durch die Analyse des Spurenelementes Brom und dessen Verhältnis zu Chlor repräsentiert in den Anionen Bromid (Br-) und Chlorid (Cl-) erzielt werden. In der Literatur wurden bislang Modellvorstellungen von konnatem Restlösungen ehemaligen Kreide-Meerwassers, Konvektion hydrothermal überprägter Wässer aus tieferen Stockwerken, Auspresswässer infolge von Kompaktion tonhaltiger Sedimente sowie die Auflösung von Halit (NaCl)-dominierten Evaporiten des Zechstein und anderer Steinsalz-führender Formationen (Oberer Buntsandstein, Röt) durch Migration innerhalb des artesisch ausgebildeten Tiefenwassersystem im Münsterländer Kreidebecken diskutiert. Eine Evaluation der geochemischen Daten erbrachte signifikante Hinweise auf die Genese der Halitablaugung für die hydrochemische Zusammensetzung des Cenomanium-Turonium Aquifers wie er sich in den Heilbädern des Münsterländer Kreidebeckens zeigt. Die Herkunft des Steinsalzes spricht größtenteils für Zechstein, kann aber lokal auch von Rötsalz dominiert sein. Eine eindeutige geochemische Unterscheidung beider Salinare anhand von Bromidkonzentrationen im Steinsalz und Schwefelisotopie an Sulfaten konnte nicht erfolgen. Im Vergleich zu den Formationswässern des Karbons unterscheidet sich das Cenomanium-Turonium Tiefenwasser in seiner Bromid/Chlorid Verteilung deutlich. Eine weitere auffällige Bromid/Chlorid-Signatur ist im östlichen Ruhrgebiet innerhalb des Kreidedeckgebirges aufgetreten, die höhere Bromid/Chlorid Verhältnisse im Vergleich zum Karbon-Tiefenwasser zeigt und nicht auf eine Zechsteinablaugung zurückgeht. Die Br/Cl Daten sprechen hier für eine erhöhte Bromkonzentration aus organischem Material (Organobromide) mariner Herkunft (Typ II). Die TOC-haltigen Sedimente der bis zu 600m mächtigen Emscher Formation in diesem Bereich sind der Ursprung der

erhöhten Bromgehalte. Die Emscher Formation dient beim Grubenwasseranstieg als natürliche hydraulische Barriere und ist der Grund für die artesisch gespannten Wässer im Münsterländer Kreidebecken. Beim Grubenwasseranstieg und Infiltration der Emscher Formation mit karbonischem Tiefenwasser würde mit dem Br/Cl Verhältnis ein weiterer Marker zur Verfügung stehen, um die beiden aus TOC-haltigen Sedimenten stammenden Formationswässer, die beide extensive Sulfidoxidation zeigen, und somit ähnlich hohe Eisen- und Sulfatkonzentrationen beinhalten, zu unterscheiden. Die Brom-Verteilung der Tiefenwässer dient somit als ein mögliches erstes Kriterium für ein flächendeckendes geochemisches Screening und kann bei Mischungen dieser Tiefenwässer bzw. als Marker für deren Migration im Untergrund genutzt werden.

- [19] Jasnowski-Peters, H., Teichert, B. M. A. & Melchers, C. (submitted): Wissenschaftliche Begleitung des Grubenwasseranstiegs in den deutschen Steinkohlerevieren – hydrogeochemisches Monitoring, natürliche Tracerstudien und in-situ Prozessverständnis. Paper presented at the FH-DGGV Tagung Jena 2022, Jena.

Das Grubenwassermanagement ist die zentrale Aufgabe im Nachbergbau. Das Augenmerk liegt hier auf einer kontrollierten, nachhaltigen und wirtschaftlich verträglichen Lösung. In diesem Rahmen werden die Auswirkungen eines Grubenwasseranstiegs und das Einleiten von Grubenwässern auf die Schutzgüter, die innerhalb von Umweltverträglichkeitsprüfungen analysiert werden, betrachtet. Für einen kontrollierten Grubenwasseranstieg ist ein Risikomanagement mit einem integrierten Monitoringkonzept erforderlich, das insbesondere die potentiellen Einwirkungen des Grubenwasseranstiegs auf die regionale Hydrologie evaluiert und Mechanismen für den Fall einer Infiltration von Grubenwasser bereithält. Für das hydrochemische Monitoring im Rahmen des kontrollierten Grubenwasseranstiegs im ehemaligen Steinkohlenrevier des Ruhrgebietes ist die Kenntnis der hydrochemischen Typisierung („Baselines“) regionaler, tiefer Aquifere in diesem Raum von zentraler wissenschaftlicher und rechtlicher Bedeutung. Die hydrochemische Charakterisierung des Cenomanium/Turonium Tiefenwassers im Münsterländer Kreidebecken und der Formationswässer im Oberkarbon sind Teil des hydrologischen Prozessverständnisses als zentraler Teil des integrierten Risikomanagementkonzeptes im Ruhrrevier. Die Tiefenwässer der Kreide und des Oberkarbons sind Na-Cl basierte Wässer. Sie sind hochsalinär und erreichen Leitfähigkeiten bis zu 200.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Mittels hydrochemischer Zusammensetzung der Hauptkationen und Anionen sind Mischungen dieser Solen nur schwer nachvollziehbar. Bestehende hydrochemische Literaturdaten und eigene Analysen wurden zusammengetragen und bewertet, um eine Identifikation dieser Tiefenwässer und deren Verteilung im Untergrund zu ermöglichen. Geochemische Hinweise für die signifikante Unterscheidung beider salinärer Grundwässer konnten durch die Analyse des Spurenelementes Brom und dessen Verhältnis zu Chlor repräsentiert in den Anionen Bromid (Br^-) und Chlorid (Cl^-) erzielt werden. Eine Verschneidung des natürlichen Tracers Bromid mit weiteren Spurenelementen wie Lithium (Li) und stabiler Isotopengeochemie (δD , $\delta^{18}\text{O}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) liefert eindeutige Hinweise zu deren Genese und Typisierung der Wässer in Bezug auf Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen. Die hydrochemische Zusammensetzung sowie die gelöste Gaszusammensetzung von Grubenwässern ist durch thermochemische und geomikrobiologische Prozesse wie die Sulfidoxidation und Sulfatreduktion maßgeblich bestimmt. Erste Ergebnisse der Evaluation dieser komplexen Prozesse im Rahmen des Grubenwasseranstiegs, an Dichteschichtungsphänomenen und im Hinblick auf eine langzeitliche Grubenwasserhaltung werden präsentiert. Das Verständnis und die Steuerung dieser geomikrobiologischen Vorgänge wird diskutiert.

- [20] Jasnowski-Peters, H., Teichert, B. M. A., Genth, T., Rose, L. & Melchers, C. (2021): Mine water rebound in German hard coal mines – geochemical and petrophysical data support for an integrative monitoring plan. Paper presented at the GeoKarlsruhe, Karlsruhe.

Mine water rebound in German hard coal mine areas operated by RAG AG and RAG Stiftung is a showcase for post-mining associated research. It is a long-term, cost intensive and multidisciplinary project affecting highly populated urban areas like the Ruhr District. RAG is facing long-term liabilities as regulatory framework for the rebound process. Currently, mine water is pumped from levels down to 1200 meters to be discharged into local rivers and monitoring water wells were drilled in the vicinity to identify any hydraulic potential changes in the overburden sections in support of the project's risk assessment. Mine water management issues comprise control and forecast of mine water levels including to determine a financially and environmentally sustainable level, mine water treatment, evaluating hydraulic barriers, but most importantly, protecting groundwater for domestic use and even more critical, regional drinking water reservoirs. We identified natural hydrochemical tracers, worked on in-situ processes affecting mine water chemistry and progressed with petrophysical measurements including clay mineralogy to deliver a first step towards an integrative monitoring approach to manage such liabilities. A suite of own and literature-based hydrogeochemical and petrophysical data are presented to better describe the regional hydrology and geology.

- [21] Jasnowski-Peters, H. & Melchers, C. (2022): Mine water rebound in the former hard coal mining area of the Ruhr District – hydrogeochemical monitoring for a sustainable, ecological and economical feasible post-mining approach. Mining Report 158 (4),333-343.

Mine water rebound including mine water management and water treatment are key perpetual tasks for the operating mine company RAG Aktiengesellschaft, Essen/Germany, and associated foundation RAG Stiftung, Essen/Germany, since hard coal mining in the Ruhr District ceased at the end of 2018. The scientific support of the mine water rebound process includes a robust risk management and associated hydrogeochemical monitoring to verify containment and conformance of mine water during the entire rebound process. Hydrogeochemical monitoring of mine waters becomes increasingly important in the view of a limited access to the mine workings. The aim is to design a monitoring guideline, which is fit for purpose, i. e. sustainable, ecological and economically feasible, and supports the optimization of the rebound process, i. e. identifying a mine water level, which is selfregulating. Here, the authors report on a hydrogeochemical data repository on mine water and formation waters of the overburden. The goal is to identify natural tracers which qualify as toolset to prevent and mitigate loss of containment, i. e. detect infiltrating mine water into surrounding aquifers. Extensive studies during the last 60 years have investigated the hydrochemistry of mine waters in the Ruhr District. However, a tracer concept for Upper Carboniferous hosted mine water and the understanding of the entire hydrogeological system in the Ruhr area remains largely a gap of knowledge. The integration of bromide vs. chloride concentration, molar Na/Cl ratios and water isotopes, deuterium and oxygen-18, was able to distinguish saline Upper Carboniferous mine waters from the regional saline Cenomanian-Turonian aquifer and determine the origin of salinity. Further, bromide to chloride ratios was evaluated to distinguish formation water of the Emscher Formation, which resembles mine waters in terms of elevated sulfate and iron concentrations. Hence, first assessment of trace elements within mine and formation waters resulted in candidates for mine water characterization and identifying its potential mixing with formation waters during rebound.

- [22] Kessler, T. & Schafmeister, M.-T. (2021): Finite-element modelling approach to study flow processes during groundwater rebound in abandoned underground hard coal mines. Paper presented at the Proceedings of the 14th International Mine Water Association Congress (IMWA), Wales.

After the abandonment of underground hard coal mines, groundwater rebound constitutes a challenge for post-mining management of collieries. Of particular interest is the temporal evolvement of the rebound and the steady-state groundwater level after shut-down of pumps. Popular rebound models such as pond-and-pipe models employ a finite-volume approach balancing the entire void space (including mine workings, mined coal seams, cavities and pore space) and the inflow of groundwater. Such models are efficient and capable of predicting the internal rebound, yet lacking a reliable information value of groundwater behaviour in the contiguous rock matrix.

This study extends the pond-and-pipe approach to fully discretized finite-element models, where in addition to the mine workings adjacent hydraulic flow paths, i.e. faults, fractures and porous media are taken into account. Two former hard coal mining sites in the Ruhr area in Germany are selected. Both sites are hydraulically isolated from other mines and currently undergo a controlled groundwater rebound at an advanced stage. For the model setup, mine workings, mined seams and tectonic structures are geometrized and located within the three-dimensional modelling space. A high-resolution meshing algorithm is applied to discretize all mining cavities at reasonable element sizes. Unlike many other applications, the discretized model is finally validated by means of remote groundwater monitoring wells.

The pond-and-pipe models define flow functions only at water transfer points between two hydraulically disconnected volumes. The fully-discretized finite-element models in contrast need to be parameterized in their entire extent. The approach is thus costly in terms of computation time and data requirements. The advantages are the depiction of physically-based flow and transport processes and spatially differentiated rebound curves that can be computed for any point within the modelling space.

If properly set up, fully-discretized models can reduce the uncertainties of volume-balance models, since specific processes or flow barriers can be accounted and weighted for. The finite-element approach is thus suitable for rebound calculations in the periphery of mine workings, e.g. to support local groundwater management of nearby towns or to model future groundwater-surface water interaction of streams and rivers. It further provides a numerical foundation for chemical and reactive transport simulations, that consider rock-water interactions along the percolation paths through the rock matrix.

- [23] Kessler, T., Bedoya-Gonzalez, D. A. & Schafmeister, M.-T. (2020): Reactive Transport Modelling Within the Hydraulic Framework of Failure Zones Due to Underground Mining. Paper presented at the 27. Tagung der Fachsektion Hydrogeologie e.V. in der DGGV: Grundwasser und Flusseinzugsgebiete: Prozesse, Daten, Modelle, Leipzig.

Hard coal mining in Germany has left numerous abandoned underground collieries that become flooded once the temporary pumping is stopped. Infiltration of meteoric water and groundwater inflow from adjacent aquifers generate acid mine drainage (AMD) oxidizing sulfide-bearing minerals like pyrite along their percolation pathways into the depth. These acidic compounds eventually enter mine shafts and adits, possibly back-feeding into overlying groundwater reservoirs. In order to estimate and manage AMD, it is essential to quantify the evolution, residence times, and reaction kinetics of predominant chemical species in the overburden. In the case of longwall mining, the overburden typically divides into three types of failure zones (cavity, fissure and bending zone), developed by the geomechanical response of the rock sequence (collapse of the hanging wall). Each of them is characterized by different geochemical milieus and mass transport behavior depending on the vertical distance from the seam. The water-rock interaction, for example, varies vertically above the underground works, assuming reactive mass transport throughout each of the failure zones. It is considered being dominant in a non-fractured porous medium compared to a highly broken setting, since both, specific surface and fluid residence are larger. The objective of this study is to assess reactive mass transport processes with regard to the hydraulic framework of failure zones above mine collieries. It is intended to test the applicability of state-of-the-art reactive mass transport modelling tools for spatially variable settings in collapsed underground seams. Particular focus is directed towards the combination of saturated and unsaturated flow conditions adjacent to void spaces and the representation of pathways as single-continuum or multiple-interacting continuum approach (MINC). This preparative step allows us to choose and parameterize a suitable reactive mass transport model for AMD in deep underground mines. The work presents a number of artificial geometric scenarios illustrating the redox reactions of pyrite within the different failure zones. The modeling tasks are carried out with the TOUGHREACT software package.

- [24] Kessler, T., Eckart, M. & Schafmeister, M.-T. (2019): Numerische Ansätze für die Diskretisierung und hydraulische Simulation von untertägigen Bergwerksflutungen. – Proceedings 1. Fachkonferenz GeoMAP. – S. 47—52, Freiberg.

Im Dezember 2018 wurde im letzten aktiven deutschen Steinkohlebergwerk Prosper Haniel der Betrieb eingestellt. Mit der Stilllegung der Kohlenförderung beginnen die Aufgaben des Nachbergbaus und damit an vielen ehemaligen Bergwerksstandorten die Flutung und die nachgelagerte Wasserhaltung des Bergwerkes. Bei einer Bergwerksflutung werden in erster Linie die Pumpen auf den Sohlen des Bergwerks abgeschaltet und der Grundwasserspiegel steigt aufgrund von Zuflüssen langsam auf ein bestimmtes Niveau an. Der Wasserzustrom setzt sich aus meteorischem Infiltrationswasser, Tiefenzuläufen aus geklüfteten Aquiferen und Formationswasser zusammen. Wie sich die Komponenten quantitativ aufteilen hängt von der Struktur und den hydraulischen Eigenschaften der überlagernden Schichten und vom Grundwasserfließgeschehen in der Tiefe ab. Anders als in herkömmlichen Strömungsmodellen in porösen Medien nach Darcy, wird die Wasserbewegung in Grubenhohlräumen mindestens während des Wasseranstieges als turbulent charakterisiert. Grubenflutungen sind daher meist eine Kombination aus Matrixfluss und Hohlraumströmung. Die Modelle können basierend auf der Strömungscharakteristik in drei Ansätze unterteilt werden: a) physikalisch motivierte Modellkonzepte, welche die Strömung zwischen Hohlräumen und Matrix differenziert berechnen, b) semi-explizite Parametermodelle (Boxmodelle), welche die Flüsse über definierte Volumina bilanzieren, sowie c) voll diskretisierte, numerische Kontinuum Modelle. Zwei dieser Ansätze [b) und c)] werden in diesem Beitrag vorgestellt. Aktuelle Modellentwicklungen umfassen auch unstrukturierte, tetraedrischen Diskretisierungen, welche kleinräumige Strukturen in großen Modellgebieten recheneffizient abbilden können. Die Kalibrierung über die Volumenströme lässt dabei eine hohe Genauigkeit der prognostizierten Anstiegskurven zu und erlaubt die Berechnung von Schadstofffrachten in bestimmten Wasserprovinzen. Numerische Ansätze können das reale Fließgeschehen in Grubengebäuden inklusive der unterschiedlichen Fließtypen differenziert abbilden. Die Modelle lassen sich allerdings aufgrund der Komplexität schwer diskretisieren und erfordern eine strenge Validierung der Randbedingungen. Bei der Weiterentwicklung numerischer Modellansätze für Grubenwasseranstiege können insbesondere Parametermodelle als wertvolle Benchmark dienen und sollten als solche wissenschaftlich berücksichtigt werden.

- [25] Kessler, T., Kories, H. & Schafmeister, M.-T. (in prep.): Experiences with quantitative numerical modelling of groundwater rebound in abandoned coal mines.

Modeling of mine water rebound in abandoned underground mines is an ongoing challenge for post-mining

management, for example in the former Ruhr hard-coal mining area in Germany. Apart from the estimation of flooding periods, public and political decision-makers want to know future mine water levels and flow rates at specific locations, e.g. surface water bodies, towns or industrial areas in the vicinity of the mine, and hydrogeological reactions in the neighbored groundwater bodies. Different numerical approaches have been developed and adapted to estimate the dynamics of mine water rebound. The most common approach are so called pond-and-pipe models that are based on volume balances of spatially delimited mining volumes and special hydraulic connections between the volumes, e. g. roadways or shafts. The methodological approach of these numerical models is often according to the finite volume method. The advantage of this method is a variable delineation of mining volumes depending on water transfer points. This facilitates a minimum number of mesh elements and the inclusion of many collieries within one large mining area. Mine water rebound arises out of known water in- and outflows and the estimated void volume of each model cell, typically calculated for the entire mine building. If water levels at specific points within the mine building or in the adjacent rock matrix are of interest, models require a fine-scale meshing algorithm. Finite-element models proved to be a suitable approach to discretize mining structures, voids and surrounding rock matrix at a reasonable scale. Such models need to be parameterized at every model cell and thus, are built on a broader data basis of hydraulic parameters. This contribution compares the application of the two described modeling approaches by means of a closed mining site in the Ruhr area, where mine water rebound has been observed for some 15 years. Focus was laid on the required parameter sets, the calibration, uncertainty and the interpretation of the model outcomes. First results show a high complexity regarding the parameterization of spatially refined finite-element models. It seems important to identify a reasonable level of abstraction in order to keep the model functional, but at the same time reduce the model uncertainties to an acceptable standard. However, if properly setup, such models have greater capabilities and can reduce the uncertainties, if continuously optimized with monitoring data collected during the ongoing groundwater rebound. And they also prove the results of the coarsely discretized mine water models according to the finite volume method.

- [26] Kessler, T., Mugova, E., Jasnowski-Peters, H., Rinder, T., Stemke, M., Wolkersdorfer, C., Hilberg, S., Melchers, C., Struckmeier, W., Wieber, G. & Schafmeister, M.-T. (2020): Grundwasser in ehemaligen deutschen Steinkohlenrevieren – ein wissenschaftlicher Blickwinkel auf Grubenflutungen. – Grundwasser, 25(4):259–272, 2 Abb., 1 Tab.; doi:10.1007/s00767-020-00460-0.

Zum Ende des Jahres 2018 wurde in Deutschland der Steinkohlenbergbau eingestellt. Damit beginnt auch in den bis zuletzt aktiven Revieren die Phase des Nachbergbaus inklusive einer dauerhaften Wasserhaltung. Diese beinhaltet typischerweise eine teilweise Grubenflutung und die Ableitung von Grubenwasser in nahegelegene Vorfluter. Im Blickpunkt der öffentlichen und wissenschaftlichen Diskussion stehen bergbauliche Schadstoffquellen und deren Risiken für die oberflächennahen Trinkwasserressourcen. Es existieren eine Reihe Kriterien und Kontrollmechanismen, um potenziellen Schadstoffaustrag zu erkennen und zu verhindern. Dazu zählen moderne Monitoringprogramme und Modellanwendungen, welche bestehende Schadstoffprognosen verbessern können. Daneben ist auch eine rechtlich und fachlich begründete Bewertung von Gefahrenszenarios eine entscheidende Größe für nachhaltiges Risikomanagement. Der Grubenwasseranstieg eröffnet jedoch auch Chancen, ehemalige Bergwerke für energetische Nutzungen umzurüsten. Bereits heute werden Heizkraftwerke mit Grubenwasser betrieben und es besteht großes Ausbaupotenzial. Dieser Beitrag diskutiert die Chancen und Risiken von Grubenflutungen in Deutschland und gibt einen Ausblick, welche Entwicklungen und Herausforderungen in Zukunft zu erwarten sind.

- [27] Konovalov, Y., Kessler, T. & Schafmeister, M.-Th. (2021): Groundwater Flow Field Estimation in the Overburden of a Hard Coal Mine in Westphalia (NRW) by Means of a Numerical Model. MSc Thesis, Universität Greifswald, Institut für Geographie und Geologie, Greifswald.

In the surroundings of the Westfalen underground coal mine exist irregular groundwater flow patterns such as local depressions and varying groundwater flow directions. The groundwater head map is based on a geostatistical data analysis of the Ruhrkohle AG (RAG) and led to the question whether or not these particularities might have been caused by mining activities, namely minewater pumping, rebound or mining subsidence. In order to respond to this hypothesis, a numerical modeling study was considered to assess and evaluate the varying flow pattern in the near-surface aquifer around the Westfalen mine.

The main objectives of this thesis are the following: 1) compare RAG groundwater data with other available data sources, such as ELWAS database; 2) perform groundwater flow modelling by means of the finite-element method using the FEFLOW modeling software package; 3) calibrate the simulated model with the observed groundwater level data (ELWAS) and validate it; 4) assess the resulting discrepancies between the RAG groundwater level interpolation and the simulated model.

A finite-element model was constructed in the vicinity of the underground hard coal mine Westfalen. The finite-element method (FEM) proved to be a legitimate approach to further develop and to verify interpolated datasets. That is based on a comparison of a geostatistical data analysis of observed groundwater heads and the application of a numerical simulation, where the FEM model showed similar or better fitting results. Moreover, the simulated groundwater level distribution in FEFLOW was evaluated and compared with observed groundwater table heights. The resulting errors and deviations from the RAG data turned out to be acceptable in the framework of this study.

- [28] Mashishi, D. T., Wolkersdorfer, C. & Coetzee, H. (2022): The Whitehill Formation as a Natural Geochemical Analogue to the Witwatersrand Basin's Mine Water Issues, South Africa. – Environmental Science and Pollution Research International, 9 fig., 7 tab, [doi:10.1007/s11356-021-17699-6](https://doi.org/10.1007/s11356-021-17699-6).

Mining activities within the Witwatersrand Basin, South Africa, have led to many studies, particularly focusing on the generation of acid mine drainage (AMD) in the basin and the associated environmental effects. This study assesses whether gypsum in the Whitehill Formation is connected to acid rock drainage (ARD) resulting from reactions between the pyrite-bearing shale and carbonaceous rocks. To investigate this, the geochemical, geological and palaeoclimatic settings were investigated and a laboratory experiment with Whitehill Formation rock samples was conducted. XRF data of the rocks and modal analysis were used to determine the mineral composition of the Whitehill Formation. In addition, pH-redox equilibrium (Phreeqc) modelling was used for simulations. The results of this study show that metals precipitated from the water-rock solution form various mineral phases like those of the Witwatersrand Basin. Large-scale dolomite dissolution might not be expected.

- [29] More, K. S. & Wolkersdorfer, C. (2019): Disruptive Technologies in Mine Water Management – The Future. Paper presented at the Mine Water – Technological and Ecological Challenges (IMWA 2019), Perm, Russia. – S. 597–601; Perm, Russia (Perm State University).

This paper outlines the development of a mine water management system using "smart" technology. It will provide the mining industry with many advantages in mine water treatment and management, as it integrates the fourth industrial revolution in its system, such as nano-electric sensors being installed almost everywhere in the mine to monitor real time data and quantum computing for faster data processing that is being administered in the blockchain. This will enable a collection of all possible mine water treatment parameters and eventually the development of a "smart" mine water treatment plant.

- [30] More, K. S., Wolkersdorfer, C., Kang, N. & Elmaghraby, A. S. (2020): Automated Measurement Systems in Mine Water Management and Mine Workings – A Review of Potential Methods. – Water Resour. Ind.:Article 100136, 5 Abb.; [doi:10.1016/j.wri.2020.100136](https://doi.org/10.1016/j.wri.2020.100136).

There is limited research on the application of digital technologies at mine sites for treating and managing polluted mine water. This review will identify underlying models, theories and frameworks applied to the mines, and used to "smartly" treat and manage mine water. The aim is to provide informed details about these technologies in order to move the mine water management sector to the Industrial-Internet of Things (IIoT).

The Internet of Things (IoT), Wireless Sensor Networks (WSN), artificial intelligence, swarming drones and automation are the most widely used smart technologies in current industries, especially the mining industry. In recent years, automation has seen substantial growth in the mines, for example, self-driving trucks. In addition, a lot of work that usually was done by humans can be performed better and safer by machines and drones. WSN are used for automated measurement systems, especially for collecting flow data and physico-chemical parameters for managing and treating mine water. All of these are operated through the main smart technology which is the IoT. It is expected that these technologies will positively affect the mining industry in the long run, making it possible for the mines to reach their expected full-scale production more easily. In this study, latest digital technologies to optimise mine water management and state-of-the-art mines are reviewed and described. In addition, the advantages of using these digital technologies are investigated.

- [31] Mugova, E. & Wolkersdorfer, C. (2018): A Review of Mine Water Stratification. – In: Meier, G., et al. (eds): 18. Altbergbau-Kolloquium – Tagungsband. – S. 125—132, 2 Abb.; Nossen (Wagner).

The flooding of underground mines is a process which has been known for many years and has been investigated since mines reached a certain depth. Stratification in a flooded mine is the formation of layered water bodies with different physicochemical properties and is a natural phenomenon described by several authors. Focusing on underground mines, this review paper summarizes all knowledge about stratification in this context. Investigation methods like: shallow measurement with dippers or water sampling in a stratified system are explained. Furthermore, the application of numerical modelling, the use of small-scale testing facilities and tracer tests are overviewed.

Research results from numerous publications are summarized and compared, bringing to understanding the location at which stratification appears in a flooded underground mine, the properties and stability of the layers, as well as buildup and breakdown scenarios. In addition, it explains the future use of stratification and further research ideas. One key finding of the review paper is that existing research about the topic draws conclusions which are largely site-specific. The development of a stratified system is strongly dependent on the setup of the mine. Therefore, a classification might be useful for predictions and the application of stratification for mine water treatment.

- [32] Mugova, E. & Wolkersdorfer, C. (2019): Dichteschichtung als potentielle In-situ-Behandlung von Grubenwasser in gefluteten Untertagebergwerken. Paper presented at the Bergbau, Energie und Rohstoffe 2019, Bochum, 2019-09-11 – 13. – S. 155–159; Clausthal-Zellerfeld (Technische Hochschule Georg Agricola, Deutscher Markscheider-Verein e.V.).

Grubenwasser aus gefluteten Bergwerken ist oftmals ein Problem für Umwelt und Gesellschaft. Verschiedene aktive und passive Sanierungs- bzw. Grubenwasseraufbereitungsverfahren werden genutzt, um Schäden für Schutzgüter gering zu halten, wobei dies jedoch oft mit hohem finanziellem Aufwand verbunden ist. Dichteschichtung als natürliche In-situ-Behandlung könnte eine langfristige Lösung für geflutete Untertagebergwerke darstellen. Durch die Schichtung verbleiben höher mineralisierte Grubenwässer mit meist schlechterer Qualität in tieferen Bereichen des Grubengebäudes, oberflächennahe Grubenwässer weisen in der Regel eine bessere Qualität auf. Dies kann eine Minimierung oder den Wegfall der Grubenwasseraufbereitung zur Folge haben. Natürlich vorkommende Schichtung in gefluteten Untertagebergwerken ist ausführlich in der Literatur beschrieben. Eine künstlich beeinflusste Einstellung der Schichtung durch Hermetisierung oder Übersichtung mit Wasser geringerer Dichte ist Gegenstand der hier vorgestellten Forschungsarbeit.

- [33] Mugova, E. & Wolkersdorfer, C. (2019): Stratification in Flooded Underground Mines – State of Knowledge and Further Research Ideas. Paper presented at the Mine Water – Technological and Ecological Challenges (IMWA 2019), Perm, Russia. – S. 40–44; Perm, Russia (Perm State University).

Based on their physicochemical properties, water bodies can differentiate, resulting in stratification. Where stratification occurs, water with better quality is usually closer to the surface than higher mineralized water. The authors investigated if stratification in flooded underground mines can be used as a passive in-situ remediation method. After reviewing research results about stratification, it will be possible to give an overview about the state of knowledge, usage of terms as well as scenarios in which stratification occurs and breaks down. New approaches how to evaluate existing data as well as new research methods and further research ideas are described.

- [34] Mugova, E. & Wolkersdorfer, C. (2020): Stratification in Flooded Underground Mines – State of Knowledge and Further Research Ideas. – In: Kretschmann, J., Goerke-Mallet, P. & Melchers, C. (eds): Done for Good 2.0 – Results in Post-Mining Research. – S. 205–210, 1 Abb.; Bochum (Technische Hochschule Georg Agricola).

Based on their physicochemical properties, water bodies can differentiate, resulting in stratification. Where stratification occurs, water with better quality is usually closer to the surface than higher mineralized water. The authors investigated if stratification in flooded underground mines can be used as a passive in-situ remediation method. After reviewing research results about stratification, it will be possible to give an overview about the state of knowledge, usage of terms as well as scenarios in which stratification occurs and breaks down. New approaches how to evaluate existing data as well as new research methods and further research ideas are described.

- [35] Mugova, E. & Wolkersdorfer, C. (2022): Density Stratification and Double-Diffusive Convection in Mine Pools of Flooded Underground Mines – A Review. – Water Res., 6 fig., 2 tab.; doi:[10.1016/j.watres.2021.118033](https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.118033).

Layering of water bodies with different physico-chemical properties is called stratification. This physical effect is known from lakes or oceans but also occurs in flooded underground mines and has been studied in the past. This review gives a summary of their investigation methods, flow dynamics, stratification development and break down. Furthermore, the barrier effect of stratification is discussed, meaning that less mineralized water bodies (CF water bodies) on the top are separated from higher mineralized water bodies (WM water bodies) in the lower parts of the mine. This separation causes less mineralized water to discharge from the flooded mine and mine water treatment can be reduced or omitted. Various options to study mine water stratification will be discussed, thereunder tracer tests, camera-aided depth profile measurements and depth dependant mine water sampling. Studies about free convection and natural stratification as well as those about using artificial stratification to encapsulate the lower

quality water in the deeper mine parts will be presented. No forecasting tool for the existence or development of stratification in flooded mines was found in the literature. References and a discussion about the long-term stability of the stratification and its potential implementation will be given. The conclusions show that precise predictions of mine water stratification are currently not possible in all detail, but wherever stratification occurs, it is mostly stable over a longer period of time as the density difference between the CF and WM layers prevents their mixing.

- [36] Mugova, E. & Wolkersdorfer, C. (2022): Identifying Potential Groundwater Contamination by Mining Influenced Water (MIW) using Flow Measurements in a Sub-Catchment of the "Cradle of Humankind" World Heritage Site, South Africa. – Environ. Earth Sci. **81**(104): 1–12, 10 Abb., 5 Tab; doi:10.1007/s12665-022-10224-z.

To assess the potential risk of Mining Influenced Water (MIW) contaminating the "Cradle of Humankind" Unesco World Heritage site ("Fossil Hominid Sites of South Africa"), flow measurements were conducted in the Tweelopiespruit, a stream influenced by treated mine water from abandoned gold mines in the Witwatersrand gold fields (South Africa). A possible negative influence of the caves by MIW infiltrating into the dolostone aquifer was investigated by conducting flow measurements at different stream locations between June 2014 and February 2019 using the salt dilution method via sudden injection ('gulp method'). Both logging approaches, the manual method using a multi-meter and the automatic device using probes connected to a data-logger, show reasonable and comparable results in the turbulent flow regime. The general flow increases along the course of the Tweelopiespruit rivulet and only minor localized discharge losses can be observed. An immediate danger for the caves of the "Fossil Hominid Sites of South Africa" from infiltrating polluted mine water cannot be postulated, though smaller amounts of the stream water seem to infiltrate into the dolomitic aquifer.

- [37] Ottenjann, M.-B., Kons, S., Meßer, J., Werner, F., Getta, M. & Göbel, P. (2022): Rekonstruktion des Druckpotenzials für den unteren Grundwasserleiter im Münsterländer Kreidebecken im Falle eines ungehinderten Grubenwasseranstiegs im Grundgebirge. – Grundwasser, **27**(1):15–28; doi:10.1007/s00767-021-00506-x.

The Münsterländer Kreidebecken (NRW & Lower Saxony, Germany) is a cretaceous basin that contains a confined aquifer system in the layers of the cenomaniac and turon. This system is hydraulically influenced by the underlying basement (carboniferous) that was partly dewatered during decades of mining activity. In case of unhindered mine water rise ("worst-case" scenario) a piezometric surface is believed to re-establish that spans from the outer rim (unconfined) over the inside of the basin. On this rim points with hydrogeologically justifiable piezometric pressure were identified and used to interpolate a piezometric surface covering the whole basin. The interpolation was made using ArcGIS. It shows a surface that dips to the west with its highest elevation in the northeast (Fosberg spring near Bielefeld) and its lowest elevation in the southwest (Ruhrbogen in Oberhausen). The piezometric surface can be used in the future for "worst-case" analysis of mine water rise scenarios in closed mines and for the potential of deep groundwater rising through weak parts of the confining layer into shallow aquifer systems.

- [38] Rinder, T. & Hilberg, S. (2019): Hydrochemistry and isotope geochemistry of coalmine drainage from Ibbenbüren coalfield, Germany. – Goldschmidt Abstracts 2019. – S. 2835.

The colliery in the Ibbenbüren coalfield closed in December 2018 and now will be flooded. To facilitate the prediction of the future long-term development, a sampling campaign of the mine drainage and groundwater surrounding the coalfield was conducted in summer 2018. A coupled hydrochemical and isotopic approach is applied to identify the processes which govern the chemical evolution of the mine drainage.

Deep groundwater in the Ibbenbüren coalfield contains high loads in dissolved solids, exceeding several grams per litre. In contrast, the shallow groundwater in the part of the coalfield, which was abandoned already in 1979, is now characterised by high loads of dissolved iron and sulphate.

The coalfield is surrounded by Permian, Triassic and Jurassic sediments. The Sulfur isotopic composition of sulfate in waters, that are relatively close to the surface, points to pyrite oxidation as the main source of sulfate, with $\delta^{34}\text{S}$ values between -8,3 and +0,3 ‰. In contrast, the $\delta^{34}\text{S}$ values of the brines in the deepest part of the mine resemble the values of Upper Jurassic or Middle Triassic evaporates. In this case the infiltration of groundwater from outside of the coalfield is likely. The intermediate values are rather a result of mixing of the two endmembers, than being influenced by the surrounding Permian evaporites.

- [39] Rinder, T. & Hilberg, S. (subm.): Testing coal mine drainage sludge from the Ibbenbüren colliery for the sorption of toxic metals. Grundwasser-Klima-Gesellschaft: Fachsektion Hydrogeologie e. V. in der DGGV e.V.
- [40] Rinder, T., Bedoya-Gonzalez, D. & Hilberg, S. (2021): Tracing The Water – Rock Interaction In The Ibbenbüren Mine – Towards A Reactive Transport Model For Coal Mine Drainage. – In: Stanley, P., Wolkersdorfer, Ch. & Wolkersdorfer, K.: Mine Water Management for Future Generations. – p. 465 – 470; Cardiff, Wales, United Kingdom (Natural Resources Wales, The Coal Authority, Welsh Government, Cardiff University).

Currently, the coal mine drainage in Ibbenbüren causes highly saline brines, rich in iron and sulfate. With the closure in December 2018, the long-term liabilities related to the discharge of mine drainage from the abandoned mine are in public focus. The aim of this study is to examine the relevance of the individual processes of water-rock interaction in the overburden of the Ibbenbüren Westfield for the chemical composition of the drainage water. This is essential to facilitate the prediction of the long-term development of the water quality.

The colliery of the Ibbenbüren Westfield is situated in the Carboniferous rocks of the Dickenberg hill, a horst structure, elevated with respect to the surrounding Mesozoic sediments. Excavation in the coalfield took place until about 600 m below ground. It was closed in 1979 and flooded afterwards. The water table is now above the surrounding areas, draining through the Dickenberg adit. Therefore, the chemical composition of the mine drainage with a high content of iron and sulfate, may be substantially influenced by water-rock interaction of percolating rainwater through the carboniferous rocks. To test this hypothesis, we investigate evidences of rock alteration of two drill cores pierced through the rock sequence above the adit. Specific focus is given to both the porous units of the sequence and the alterations related to fracture surfaces. We also analyse the secondary iron phases in the mine drainage and the secondary sulfur containing phases in the mine shafts.

This is carried out through a combined mineralogical and elemental analysis on thin sections using a petrographic microscope, Scanning Electron Microscope (SEM), X-ray diffraction microscope (XRD) and XRF spectroscopy. Batch and flow through experiments are carried out for the quantification of acid forming potential and to evaluate the influence water-rock interaction for the mine drainage quality in general.

The results are used to set up a geochemical water-rock interaction model, establishing the relevance the individual mine drainage quality. In the next step, our findings will be integrated into a reactive transport model, using TOUGHREACT to forecast the long-term evolution of mine drainage.

- [41] Rinder, T., Dietzel M., Stammeier J.A., Leis A., Bedoya-González D., & Hilberg, S. (2020): Geochemistry of coal mine drainage, groundwater, and brines from the Ibbenbüren mine, Germany: A coupled elemental-isotopic approach. Appl. Geochemistry 121, 104693.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104693>

A coupled elemental-isotopic approach is applied to reconstruct the origin and chemical evolution of mine drainage, groundwater, and brines from the Carboniferous anthracite coal mine in Ibbenbüren, Germany. All solutions are characterized by an increase in salinity with depth, as well as by an increase in $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ isotopic ratios of dissolved SO_4^{2-} . Br/Cl and Na/Cl ratios in deep Na-Cl-type water indicate halite dissolution as the common source of salinity. $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ values increase up to +21.1‰ (VCDT), linking the salinity to the migration of groundwater from the surrounding Mesozoic sediments. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios between 0.7108 and 0.7135 and elevated alkali concentrations indicate ongoing water-rock interaction of the evaporite-derived brines with the Carboniferous siliciclastic rocks of the mine. A positive correlation of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios with $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ values suggests mixing of the brines with isotopically heavy formation water within the Carboniferous bedrock. The oxidation of pyrite is the dominant sulfate source in shallow mine drainage and groundwater with a relatively low ionic strength ($I < 0.035$), as indicated by $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ values between –8.3 and +0.3‰ (VCDT). Intermediate water compositions are the result of the dilution of brines with shallow water. In any case, modern meteoric water with $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ values between –6.9 and –8.65‰ (VSMOW) is the primary water source for brines, groundwater, and mine drainage.

- [42] Rinder, T., Dietzel, M., & Hilberg, S. (2020): Eine hydrochemische Systemanalyse zur Herkunft und Qualität des Grubenwassers im Ibbenbürener Ostfeld. Grundwasser und Flusseinzugsgebiete: Prozesse, Daten, Modelle, Leipzig: Fachsektion Hydrogeologie e.V. in der DGGV e.V. S. 186-187

Die Ableitung von schadstoffreichem Grubenwasser aus dem Bergwerk Ibbenbüren führt momentan zu erheblichen Belastungen im Vorfluter. Das Grubenwasser im Ostfeld des Bergwerks soll nach Stilllegung bis zu einer Höhe von

+63m NN steigen. In diesem Zusammenhang ist die Prognose der damit verbundenen langfristig zu erwarteten Wasserzusammensetzung von Interesse. Basis einer solchen Vorhersage bildet die genaue Kenntnis der hydrogeochemischen Prozesse, welche die aktuelle Zusammensetzung des Grubenwassers bestimmen. Mit dem Ziel einer solchen hydrogeochemischen Systemanalyse wurde im Sommer 2018 eine Beprobung des Grubenwassers im Ostfeld durchgeführt. In den 16 dabei entnommenen Proben wurden die anorganischen Haupt- Neben- und Spurenkomponenten, radiogene ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, Tritium) und stabiler Isotope ($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/\text{H}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) analysiert, um die Reaktionsmechanismen der Wasser-Gesteins-Interaktion zu identifizieren.

Die Proben des tiefen Grundwassers im Ostfeld sind durch hohe Gehalte an gelösten Ionen und vor allem Natrium und Chlorid charakterisiert. Über die Br/Cl Verhältnisse können diese Salzgehalte eindeutig der Steinsalzlösung zugeordnet werden. Die Analyse der stabilen Schwefel- und Sauerstoffisotopensignatur im Sulfat deutet für diese Wässer zusätzlich auf eine Herkunft aus den mesozoischen, das Ostfeld umgebende, Sedimenten hin. Lithium und Kaliumgehalte, sowie die Signatur des $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Verhältnisses zeigen eine weitergehende Interaktion des tiefen Grundwassers mit den Sedimenten des Karbons.

Demgegenüber treten die Salzgehalte in den höheren Bereichen des Ostfeldes zurück. Mit abnehmender Höhe entwickelt sich die Isotopensignatur des gelösten Sulfats in eine für Sulfid-Oxidation typische Richtung und ein Einfluss der mesozoischen Sedimente ist unwahrscheinlich. Intermediäre Wässer lassen sich über eine Mischung dieser beiden Endglieder plausibel erklären. Mittels Mischungsberechnungen und inverser geochemischer Modellierung wird versucht, den Einfluss unterschiedlicher geochemischer Prozesse auf die jeweiligen Wässer zu quantifizieren. Das Hauptaugenmerk liegt in der Quantifizierung der Sulfid-Oxidation in der damit verbundenen Menge an neu gebildeten Eisenhydroxiden.

- [43] Rinder, T & Hilberg, S. (subm): Forum Bergbau und Wasser – Hydrogeologische Begleitforschung zum Ende des Deutschen Steinkohlebergbaus - Hydrogeochemische Aspekte am Beispiel Anthrazitbergbau Ibbenbüren. Pangeo Austria 2022, Montanuniversität Leoben.

Nach dem Ende des industriellen Steinkohlenbergbaus in Deutschland mit dem Jahr 2018 bleiben in den betroffenen Regionen an Ruhr, Saar und Ibbenbüren umfassende Herausforderungen für nachfolgende Generationen. Zu diesen „Ewigkeitsaufgaben“ gehören auch und vor allem Fragen rund um das Grubenwasser. Im aktiven Bergbau wurde es an die Oberfläche gepumpt, um den Abbau zu ermöglichen. Mit dem Ende des Bergbaus werden Lösungen gesucht, um mit dem Grubenwasser umweltgerecht und gleichzeitig wirtschaftlich umzugehen. Ein nachhaltiges Grubenwassermanagement setzt ein hydrogeologisch-hydrochemisches Verständnis aller Prozesse im Grubengebäude aber auch in den jeweiligen Einzugsgebieten voraus.

Das Forum Bergbau und Wasser wird von einer Gruppe HydrogeologInnen aus Deutschland, Österreich und Südafrika gebildet. Es war zwischen 2017 und 2022 damit befasst, wissenschaftliche Grundlagen für ein langfristiges Grubenwassermanagement zu schaffen. Die Arbeitsgruppe der Universität Salzburg hat sich dabei vor allem den hydrochemischen und isopenhydrologischen Aspekten des Grubenwassers gewidmet.

Die Identifikation der individuellen geochemischen Prozesse, die zur jeweiligen Wasserzusammensetzung führen, bildet die Basis für Prognosen über die langfristige Entwicklung des Grubenwassers nach Flutung und ist die Grundlage zur Festlegung eines optimalen und nachhaltigen Grubenwasseranstiegsniveaus. Dies wird im Vortrag am Beispiel des Anthrazitbergbaus Ibbenbüren dargestellt. Mit dem Ziel einer hydrogeochemischen Systemanalyse wurde eine Beprobung des Grubenwassers in verschiedenen Höhenniveaus und der umgebenden tiefen und seichten Grundwasservorkommen durchgeführt. In den dabei entnommenen Proben wurden die anorganischen Haupt- Neben- und Spurenkomponenten, radiogene ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, Tritium) und stabiler Isotope ($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/\text{H}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) analysiert, um die Reaktionsmechanismen der Wasser-Gesteins-Interaktion zu identifizieren.

Die Proben des tiefen Grundwassers sind durch hohe Gehalte an gelösten Ionen und vor allem Natrium und Chlorid charakterisiert. Über die Br/Cl Verhältnisse können diese Salzgehalte eindeutig der Steinsalzlösung zugeordnet werden. Die Analyse der stabilen Schwefel- und Sauerstoffisotopensignatur im Sulfat deutet für diese Wässer zusätzlich auf eine Herkunft aus den mesozoischen, das Bergwerk umgebenden, Sedimenten hin. Lithium und Kaliumgehalte, sowie die Signatur des $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Verhältnisses zeigen eine weitergehende Interaktion des tiefen Grundwassers mit den Sedimenten des Karbons. Im Vergleich dazu verringern sich die Salzgehalte in den Grubenwässern aus den höheren Bereichen des Bergwerks deutlich. Mit abnehmender Tiefe entwickelt sich die Isotopensignatur des gelösten Sulfats in eine für Sulfid-Oxidation typische Richtung und der Einfluss der mesozoischen Sedimente geht zurück.

Die Ergebnisse der Fallstudie zeigen, dass ein kontrollierter Anstieg des Grubenwassers auf ein oberflächennahes Niveau zu einer Verringerung von Lösungsfrachten aus dem tieferen Aquifer führt. Ein auf Basis der Erkenntnisse optimiertes Grubenwasseranstiegsniveau führt mittel- bis langfristig zu einer erheblichen Energieeinsparung. Vor

allem aber kommt es durch die Entlastung der Vorfluter zu einer Verbesserung der Gewässerqualität und zur Regeneration der umgebenden Aquifere, Entwicklungen, die deutlich im Sinne der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie zu sehen sind.

- [44] Rinder, T. Yousefi, N. & Hilberg, S. (under review): Characterisation of coal mine drainage from the spoil tip of a Bavarian pitch coal mine. Applied Geochemistry

For more than 50 years, coalmine drainage from a former German pitch-coalmine is discharged into a nearby lake without any treatment. In addition, on the flow path between adit and lake the water percolates the waste rock pile. A closer examination of this apparently unmonitored coalmine discharge was carried out to examine the hydrochemical characteristics of the mine water discharge. Several water and solid samples in close distances, from the discharging area within the spoil tip and downstream towards lake Loidlsee, were collected for this study. The samples underwent detailed analysis, including chemical and isotopic analysis, focusing on the natural attenuation ability of mine water.

High initial concentrations of calcium, sulfate and iron and elevated contents of nickel, zinc and strontium are significantly reduced over the flow path, providing the water to enter lake Loidlsee environmentally non-hazardous. Unmonitored natural attenuation in this case seems sufficient to limit environmental impact of mine drainage. Uranium contents of the waste rock pile, however, warrant a closer examination in the future to avoid negative environmental impacts related to radioactivity of Uranium and its decay products.

Decreasing values are linked to (1) the formation of secondary iron precipitates, and accompanied sorption processes (2) the formation of secondary calcium carbonates along the mine drainage and (3) mixing with a different groundwater source along the flow path.

- [45] Rose, L et al. (submitted): First petrophysical data compilation on the effectiveness of an extensive hydraulic barrier during mine water rebound in the Ruhr District - the Upper Cretaceous Emscher Formation. Abstract IMWA 2022 Conference, Christchurch, NZ.

The extensive mine water rebound process in the former hard coal mining area of the Ruhr District covers an area of about 5000 km². Major changes of the hydrogeology in the area are anticipated which makes the assessment of the intrinsic permeability/hydraulic conductivity of potential cap rock formations in the region an inevitable task in the context of risk management. Robust horizontal and vertical permeability and effective porosity data from core material were measured for the Emscher Formation in order to assess future mine water infiltration potential. The Coniacian-Middle Santonian Emscher Formation acts as major aquitard in the region and protects superimposed drinking water reservoirs of the Upper Santonian Haltern Formation. The evaluation of the hydraulic barrier in the Emscher Formation is based on petrophysical data analysis of deep water wells drilled during the time period of 2018 to 2021. The scientific observation of these groundwater-monitoring wells by RAG AG includes hydraulic tests and an evaluation of geophysical well logs and clay mineralogy of the rock formations. The lithostratigraphic, petrological and petrophysical analyses of the up to 700 meter deep wells represents a workflow on independent derivation and measurement of permeability as a key aspect of ranking the cap rock efficiency. First data is reported on derived permeability data from mercury injection porosimetry, which covers an injection pressure regime of 0.1 to 400 bar. Skeletal density was previously determined using a helium gas pycnometer and was verified again in the porosimeter for internal quality control. The mineral composition of the Emscher Formation consisting of hemipelagic carbonates and fine grained siliciclastics results in a large spectrum of pores due to the complex composition and different pore sizes. In this case permeability of a porous medium is derived from critical pore throat diameter using the Katz and Thompson model. These petrophysical properties were quantitatively characterized on core plugs taken from available core material of the drilled water wells. The Emscher marly claystones have a comparatively unusual high porosity of 15% on average, while the extremely small pore radii of result in very low permeability for fluids.

Based on the hydraulic parameters measured plugs and core sections, it should be possible to upscale hydraulic properties to entire rock formations using models in the future in order to capture the heterogeneity of the rock formation including its anisotropy behaviour.

- [46] Schneider, P. & Wolkersdorfer, C. (2021): Dimensions of water management in the extractive industries. – In: Davis, C. & Rosenblum, E. (eds): Sustainable Industrial Water Use: Perspectives, Incentives, and Tools. – S. 73–87, 13 Abb.; London (IWA Publishing), doi:10.2166/9781789060676_0073.

The aim of this chapter is to provide the readers with limited technical knowledge about the field of mining with an overview of the dimensions of water management in mining. It describes the range of water management tasks required and provides information on how water management challenges can be addressed. Mining is the extraction

of raw materials from the Earth's crust by construction of surface openings (open pits, shafts, adits, inclines), the extraction of raw materials from the host rock by means of treatment plants, the dumping of residues in waste rock heaps or tailings ponds, the drainage and lowering of groundwater in large areas and all related transport activities. Mining activities require the management of water resources in the surface and underground watersheds. Commonly, mine site rehabilitation is also considered a mining activity, which includes the revitalization of mining areas after the extraction of raw materials. Technical measures for this are the groundwater rebound after switching off the pumps (mine flooding), the closure and dismantling of the mining facilities, the covering of heaps and tailings facilities and the reclamation of the land used for mining and their landscaping. Water management plays a substantial role in all phases of mining and in all types of mining activities (Grünewald, 2001; Tiwary, 2001; Wolkersdorfer et al., 2020). During the exploration phase, extensive hydrogeological studies must be carried out to allow comprehensive planning for the subsequent mine drainage including flood protection, water supply and disposal, disposal of liquid processing residues as well as to initiate the respective water management approval procedures within the overall permitting procedure framework for the mining site. As a rule, a hydrological-hydrogeological site model is created using the results of the site exploration, which provides information on the hydraulic properties of the subsoil in order to predict future dewatering scenarios (Rapantova et al., 2007).

- [47] Stemke, M. & Wieber, G. (2021): Utilisation of mine water from abandoned mines – example “anthracite mine Ibbenbüren”. Paper presented at the Mine Water Management for Future Generations, Cymru, Wales.

Sustainable and environmentally friendly energetic and non-energetic raw material extraction plays an increasingly important role in security of supply. The European Union compiles a list of critical raw materials at regular intervals. On this basis, mine water from the Ibbenbüren coal mine were examined. The results show that critical elements occur in the mine water. The concentration increases with depth. For the flooded Westfeld, the elements Al, B, Co, Li, Mg, Sr and Zn could be determined in the outflow and the loads determined. The calculation of the geothermal potential shows that about 900 single-family homes could be supplied with heat from the freely discharge mine water.

- [48] Stemke, M. & Wieber, G. (2021): Closure of German Hard Coal Mines – Effects and legal Aspects of Mine Flooding. – Mine Water and the Environment; doi:10.1007/s10230-021-00842-7.

Following the closure of the last hard coal mines in Germany, pumping is no longer necessary. However, the resulting rise of mine water can affect the environment. Laws have been enacted at the European and national level to protect properties. Within the framework of the approval procedure, it must be determined whether the cessation of pumping may cause unacceptable effects, including water pollution. With regard to water protection, the European Union has issued the Water Framework and Groundwater Directives, which have been implemented into German national law. These contain the prohibition of deterioration and the requirement for improvement, with the aim of maintaining or achieving good ecological and chemical status. However, before the target mine water level is reached, the water does not need to comply, since although the pumps are switched off, no mine water is being discharged. This also rules out permit requirements, which only go into effect when the target mine water level has been reached and mine water is discharging. Obviously, however, detailed planning before then is necessary.

- [49] Strosnider, W. H. J., Hugo, J., Shepherd, N. L., Holzbauer-Schweitzer, B. K., Hervé-Fernández, P., Wolkersdorfer, C. & Nairn, R. W. (2020): A Snapshot of Coal Mine Drainage Discharge Limits for Conductivity, Sulfate, and Manganese across the Developed World. – Mine Water Environ., **39**(2):165–172, 4 Abb., 1 Tab.; doi:10.1007/s10230-020-00669-8.

Coal mine drainage (CMD) negatively affects aquatic ecosystems around the world. This article presents the current state of regulatory guidelines and discharge limits established for selected parameters of concern in CMD: specific conductance (SC), SO_4^{2-} , and Mn. Though not exhaustive, this review provides a representative snapshot of the existing regulatory status in developed nations of North America, Australia, Asia, Europe, and Africa. It was found that most of the nations surveyed have a separate approach to regulating CMD apart from other water quality issues, varying from national or regional guidelines and standards to individual site licenses or permits. In addition, there is broad variability between nations and regions. The selected parameters have a range of required discharge concentrations and in the case of Mn, a variety of categories (i.e. dissolved, total, bioavailable). A few countries use toxicity testing to assist in determining discharge limits, while others take a watershed-based approach to determine mass loading of pollutants, considering the status of the receiving water body and dilution effects. Overall, the myriad approaches encountered underscores the complex and dynamic scientific, ecosystemic, and political landscape in which these regulatory systems have evolved.

- [50] Westermann, S., Dogan, T., Reker, B., Goerke-Mallet, P., Wolkersdorfer, C. & Melchers, C. (2017): Evaluation of mine water rebound processes in European Coal Mine Districts to enhance the understanding of hydraulic, hydrochemical and geomechanical processes. – In: Wolkersdorfer, C., Sartz, L., Sillanpää, M. & Häkkinen, A. (eds): IMWA 2017 – Mine Water & Circular Economy I. – S. 147—153, 2 Abb.; Lappeenranta (Lappeenranta University of Technology).
- The mine water table has been rising in many hard coal mining areas. Important insights have been gathered concerning the hydrodynamic, hydrochemical and geomechanical changes that accompany a mine water rebound. This contribution provides an overview of a current survey. This survey aims at developing a deeper understanding of the processes which allows to derive generally applicable causal relationships based on it. Such interdependencies are then to be transferred to the Ruhr area in order to contribute to an improved forecast regarding the possible impact a mine water rebound will have on the environment.*
- [51] Westermann, S., Dogan, T., Reker, B., Goerke-Mallet, P., Wolkersdorfer, C. & Melchers, C. (2020): Evaluation of Mine Water Rebound Processes in European Coal Mine Districts to Enhance the Understanding of Hydraulic, Hydrochemical and Geochemical Processes. – In: Kretschmann, J., Goerke-Mallet, P. & Melchers, C. (eds): Done for Good 2.0 – Results in Post-Mining Research. – S. 159—166, 2 Abb.; Bochum (Technische Hochschule Georg Agricola).
- The mine water table has been rising in many hard coal mining areas. Important insights have been gathered concerning the hydrodynamic, hydrochemical and geomechanical changes that accompany a mine water rebound. This contribution provides an overview of a current survey. This survey aims at developing a deeper understanding of the processes which allows to derive generally applicable causal relationships based on it. Such interdependencies are then to be transferred to the Ruhr area in order to contribute to an improved forecast regarding the possible impact a mine water rebound will have on the environment.*
- [52] Westermann, S., Goerke-Mallet, P., Reker, B., Dogan, T., Wolkersdorfer, C. & Melchers, C. (2017): Aus Erfahrungen lernen: Evaluierung von Grubenwasseranstiegsprozessen zur Verbesserung zukünftiger Prognosen. – 17. Altbergbau-Kolloquium – Tagungsband. – S. 259—273, 6 Abb., 1 Tab.; Nossen (Wagner).
- Mit Schließung der letzten beiden Schachtanlagen im Dezember 2018 endet (vorerst) der jahrhundertlange Steinkohlenbergbau in Deutschland. Es ist geplant, den Grubenwasserspiegel im untertägigen Grubengebäude großflächig im Ruhrgebiet, in Ibbenbüren und an der Saar ansteigen zu lassen. In zahlreichen stillgelegten Bergbaurevieren in Deutschland und Europa ist der Grubenwasserspiegel bereits angestiegen. Dort wurden vielfältige Erfahrungen im Zusammenhang mit dem Grubenwasseranstieg („Flutung“) und damit verbundenen Einwirkungen auf die Umwelt gesammelt. Viele Erfahrungen besitzen aufgrund der oftmals individuellen hydrogeologischen Eigenschaften der Kohlevorkommen nur eine regionale Gültigkeit. Andere Erfahrungen sind auch auf andere Reviere übertragbar. Der Beitrag beschreibt den Vorgang des Grubenwasseranstiegs aus hydrodynamischer Sicht und fasst die maßgeblichen Faktoren zusammen, die den Grubenwasseranstiegsverlauf steuern und beeinflussen. Anhand einer idealisierten Anstiegskurve erfolgt eine Phaseneinteilung des Grubenwasseranstiegsprozesses. Rahmen eines aktuellen Forschungsvorhabens am Forschungszentrum Nachbergbau der Technischen Hochschule Georg Agricola Bochum werden die bisherigen Erkenntnisse im Zusammenhang mit Grubenwasseranstiegen gesammelt und ausgewertet. Der Fokus ist hierbei nicht nur auf abgeschlossene oder weit voran geschrittene Grubenwasseranstiege in deutschen, sondern auch in weiteren Steinkohlenrevieren in Europa gelegt. Ziel ist es, aus den bisherigen Erfahrungen ein vertieftes Verständnis über alle relevanten Prozesse, die einem Grubenwasseranstieg zugrunde liegen, zu erlangen. Aus zurückliegenden Grubenwasseranstiegen sollen Rückschlüsse gezogen werden, die als Grundlage für die Optimierung der Prognosen und der Monitoringmaßnahmen hinsichtlich der potenziellen Einwirkungen auf die Umwelt dienen.*
- [53] Westermann, S., Reker, B., Goerke-Mallet, P., Wolkersdorfer, C. & Melchers, C. (2020): Hydraulics of Underground Mine Flooding – Optimization of Predication and Monitoring Procedures. – In: Kretschmann, J., Goerke-Mallet, P. & Melchers, C. (eds): Done for Good 2.0 – Results in Post-Mining Research. – S. 221—235, 7 Abb., 1 Tab.; Bochum (Technische Hochschule Georg Agricola).
- In 2018, the subsidized hard coal mining in Germany will end. Concurrently, this will terminate a shutdown process that lasted for decades and induced many tasks for the future. From 2019 onward, one of the foci in the Ruhr, Saarland and Ibbenbüren mining districts will be to establish a perpetual and eternal environmentally responsible*

mine drainage system. Controlled rebound of mine water is a complex process that can be linked to both risks and chances for the environment as well as the safety of the surface. Many abandoned underground hard coal mines in Germany and Europe have already been flooded. During the flooding processes, important insights and experiences relating to the mine water rebound process per se and its environmental impacts have been gathered. Due to the site specific hydrogeological characteristics, some of these experiences are of local importance, while others can similarly be used at other mining areas. Our study provides a systematic overview of selected European hard coal mine water rebound processes that already have or are about to be finished. The focus will be on the analysis of time and space-dependent flooding processes. It will describe the flooding process from a hydrodynamical point of view and summarize the important parameters controlling and influencing the process. Based on this analysis, the general properties and interdependencies of mine flooding are to be identified. In addition, the effects caused by the local conditions will be identified. Based on past mine flooding scenarios, and focusing on potential environmental effects, conclusions for optimising predictions and monitoring measures will be drawn. Finally, the project will provide a better understanding of the processes involved in mine water rebound which can be implemented in future mine closure plans. This will provide measures for transferring the experience-based knowledge to future mine water rebounds in other hard coal mining districts, thereunder the Ruhr, Saarland and Ibbenbüren mining districts.

- [54] Wieber, G. & Scheffer, E. (2019): Die Hydrogeologie der ehemaligen Braunkohlegrube Alexandria im Westerwaldrevier, Rheinisches Schiefergebirge. – Mainzer geowiss. Mitt, **47**:147—162.

Im Zusammenhang mit der Debatte um klimawirksame Gase ist in Deutschland der Ausstieg aus dem Steinkohleabbau beschlossen und vollzogen sowie aus dem Braunkohleabbau geplant. Diskussionen bestehen hinsichtlich des Grundwasseranstiegniveaus in den Bergwerken. Dabei werden auch immer häufiger Umweltprobleme durch Grubenwassereinleitungen problematisiert. Im Westerwald (Rheinisches Schiefergebirge) wurde bis in die 1960er Jahre Braunkohle durch untertägigen Abbau gewonnen. Die bedeutendste Grube stellte das Bergwerk Alexandria bei Höhn dar. Im Rahmen des Betriebsabschlusses wurden die obertägigen Anlagen zurückgebaut. Die Grubenwässer werden jedoch nach wie vor über den ehemaligen Tiefen Stollen gefasst und in die Nister abgeleitet. Sie besitzen hydrochemisch eine gute Qualität. Belastungen durch Versauerung, Auswaschung von Oxidationsmineralien sowie Freisetzung von Metallen bestehen nicht. Der Stollen weist mittlere Schüttungen von 320 l/s (Sommerhalbjahr) bzw. 382 l/s (Winterhalbjahr) auf. Wegen ihrer guten Qualität und hohen Schüttung werden sie als Rohwasser für die Trinkwassergewinnung genutzt.

- [55] Wieber, G. & Stemke, M. (2021): Grundlagen des Wasseranstiegs in stillgelegten deutschen Steinkohlegruben. – bbr, **04-2021**:48—52.

Mit Einstellung des Steinkohlebergbaus in Deutschland gilt es, im Rahmen von Abschlussbetriebsplanverfahren Regelungen zur Höhe des Grubenwasseranstiegs zu treffen. Aus ökologischen und ökonomischen Gründen ist dabei die Methode der Wasserhaltung anzupassen sowie das abzupumpende Wasservolumen und dessen Stofffrachten so gering wie möglich zu halten. Zudem weisen die Grubenwässer ein hohes geothermische Potenzial auf und enthalten Stoffe, die als kritisch für die Rohstoffversorgung gelten. Die Einleitungen sollten auf größere Gewässer beschränkt werden, um so die Anforderungen der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie zu erfüllen.

- [56] Wieber, G. & Stemke, M. (2022): Kritischer Rohstoff Lithium: Gehalte und Potenziale in den Grubenwässern des stillgelegten Anthrazitbergwerkes Ibbenbüren. – scriptum online:15,1—28.

Lithium zählt zu den kritischen Rohstoffen. Mit der Einführung und zunehmenden Nutzung von elektrisch betriebenen Fahrzeugen (Autos, Fahrräder und Roller) ist mit einer weiteren Zunahme des Bedarfs an Lithium zu rechnen. In den Grubenwässern des stillgelegten Bergwerks Ibbenbüren der ehemaligen RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH sind erhöhte Lithium-Gehalte von bis zu 22 mg/l analysiert worden. Die Konzentrationen nehmen mit der Tiefe zu. Das Flutungskonzept sieht allerdings nicht die gezielte Fassung stärker lithiumhaltiger Wässer aus tieferen Bergwerksteilen vor. Nach erfolgter Flutung werden die aus den Grubenbauen abfließenden Wässer vielmehr überwiegend aus Sickerwasser bzw. aus Grundwasserneubildung bestehen. Daher ist in diesen Wässern nicht mit stark erhöhten Lithium-Gehalten zu rechnen. Allerdings weisen die Abflüsse des gefluteten Westfeldes mit 0,6 mg/l Lithium-Gehalte auf, die immerhin den dreifachen mittleren Konzentrationen von Meerwasser entsprechen. Eine wirtschaftliche Gewinnung ist aber derzeit nicht möglich.

- [57] Wieber, G. & Stemke, M. (2019): Pump Tests In Deep Ore Mine Shafts For The Evaluation Of A Possible Geothermal Use. Paper presented at the Mine Water – Technological and Ecological Challenges (IMWA 2019), Perm, Russia. – S. 375–378; Perm, Russia (Perm State University).
- Mine water of deep abandoned and flooded ore mine shafts are suitable for geothermal use. In the presented case (Germany, Rhineland-Palatinate), geothermal water is pumped from a shaft of the San Fernando mine into a shaft of the Friedrich-Wilhelm mine. Further use is planned in the outlet of the Wolf mine. For this purpose both a sufficient water inflow and outflow must be guaranteed. In the years 2018 to 2019 the suitability of the shafts were tested by a long-term pumping test. The water level in San Fernando shaft reacts only marginally to water withdrawal, while the water level in Friedrich-Wilhelm shaft and in the outflow Wolf fluctuates considerably*
- [58] Wieber, G. (2018): Hydrogeologische Fragestellungen in bergrechtlichen Genehmigungsverfahren. – Bochumer geowissenschaftliche Arbeiten, H. 24: Grundwasser im Umfeld von Bergbau, Energie und urbanen Räumen. – S. 37–38, Bochum.
- [59] Wieber, G. (2019): Erzbergbau und Bergbaufolgelandschaften an der Unteren Lahn, Rheinisches Schiefergebirge. – Jber. Mitt. oberhein. Geol. Ver. 101. – S. 251–283, Stuttgart, doi:10.1127/jmogv/101/0011.
- An der Unteren Lahn, Rheinisches Schiefergebirge, sind bedeutende hydrothermal gebildete Gangerzlagertstätten verbreitet, die von der Römerzeit bis in die Mitte des letzten Jahrhunderts abgebaut wurden. Die Mineralisation besteht aus silberhaltigem Bleiglanz, Zinkblende und sulfidischen Kupfererzen. Als Gangart sind Siderit und Quarz verbreitet. Die Erzgänge fügen sich zu 7 „Gangstreifen“ zusammen. Die bedeutendsten Lagerstätten befanden sich auf dem Emser und dem Holzappeler Gangzug. Der Abbau erreichte Teufen von bis über 1.000 m. Die geförderten Roherze wurden meist in unmittelbarer Nähe der Förderstollen und -schächte aufbereitet. Eine den heutigen Ansprüchen genügende Stilllegung erfolgte nicht. Vielmehr wurden Bergbaufolgelandschaften zurückgelassen, die durch nur teilweise rekultivierte Haldenablagerungen mit z. T. übersteilten Böschungen und nur lückenhaftem Bewuchs charakterisiert sind. Während die Rückstände der Nassmechanischen und Nassmagnetischen Aufbereitung bodenmechanisch einfach abgelagert werden konnten, machte die Ablagerung der Flotationsschlämme eine geplante Deponierung erforderlich, um die Standsicherheit der Schlammteiche nicht zu gefährden. Voraussetzung war eine gezielte schnelle Entwässerung während der Ablagerung. Bei Laurenburg/Lahn befindet sich eine Flotationshalde, die in den 1990er Jahren saniert werden musste, da die Standsicherheit auf Dauer nicht gewährleistet war. Weitere Sanierungsziele waren eine ordnungsgemäße Wasserführung incl. Hochwasserentlastung sowie Fassung und schadlose Ableitung der Oberflächen- und Sickerwässer. Durch Abdeckung mit unbelastetem Boden konnte die Halde rekultiviert und Erosion weitgehend verhindert werden. 20 Jahre nach Sanierungsdurchführung ist der Schlammteich in Natur und Landschaft integriert.*
- [60] Wieber, G. (2020): Hydrogeologie und Wasserwirtschaft der Grubenwässer des ehemaligen Buntmetallerzbergbaus im Hunsrück, Rheinisches Schiefergebirge. – Mainzer geowiss. Mitt., **48**:225–252, 11 Abb., 6 Tab.
- Im Hunsrück (Rheinisches Schiefergebirge) ging ein intensiver Erzbergbau um. Die Erzvorkommen waren jedoch überwiegend nur von mittlerer bis geringer Bedeutung und wurden dementsprechend meist in Bergwerken geringer Größe und Teufe abgebaut. Daher sind auch die Schüttungen der auslaufenden Grubenwässer gering und zudem meist nur gering mineralisiert. Eine Ausnahme stellt die Grube Gute Hoffnung mit einer Gesamtteufe von über 800 Metern dar. Die letzten Bergwerke wurden in den 1960er Jahren geschlossen und geflutet. Die Grubenwässer stiegen bis auf das Niveau der morphologisch tiefsten Tagesöffnung an und fließen von dort in freiem Gefälle zum nächsten Vorfluter. Durch die Oxidation von (Di-)Sulfiden können saure Grubenwässer entstehen und erhebliche Frachten toxischer Spurenelemente freisetzen. In den wenigen bedeutenderen Gruben entstanden aber auch bedeutende Wasserreservoirs, die in der Vergangenheit teilweise als Rohwasser für die Trinkwassergewinnung genutzt wurden. Saure Grubenwässer mit hohen Buntmetallfrachten sind auf wenige Einzelfälle beschränkt und haben keinen maßgeblichen Einfluss auf die chemische und ökologische Gewässergüte der Gewässer*
- [61] Wieber, G., Lang, R. & Mays, M. (2021): Hydrogeologie und Wasserwirtschaft der Grubenwässer des ehemaligen Steinkohlebergbaus in Rheinland-Pfalz. – Mainzer geowiss. Mitt., **49**:221–238.
- Die oberkarbonischen Steinkohlenlagerstätten des Westfaliums und Stefaniums im Saarland reichen bis nach Rheinland-Pfalz. Dort sind jedoch nur noch Kohlenvorkommen des obersten Oberkarbons (Breitenbach-Formation) aufgeschlossen. Der Großteil der rheinland-pfälzischen Steinkohlengruben baute auf Flözen des Rotliegenden (Glan-*

Subgruppe). Diese besaßen wirtschaftlich eine geringe Bedeutung und wurden meist nur zu Zeiten der Energiearmut abgebaut. Daher entstanden untertägige Bergwerke mit oft nur relativ geringer Ausdehnung und dementsprechend geringem Volumen über Röschen gefasster und abfließender Grubenwässer. Zwar kommt es in einigen Grubenwässern zu Überschreitungen der Geringfügigkeitsschwellenwerte der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser und erhöhten Sulfatgehalten, die auf die Pyritoxidation zurückzuführen sind, schädliche Beeinträchtigungen der Oberflächengewässergüte lassen sich jedoch daraus nicht ableiten.

- [62] Wieber, G., Scheffer, E. & Stemke, M. (2019): Grubenwässer des ehemaligen Braunkohlebergbaus im Westerwaldrevier. – In: Mayer, G., Benndorf, J., Löbel, K.-H., Butscher, C., Tondera, D. & Busch, W. (eds): 19. Altbergbaukolloquium. 7. bis 9. November 2019, Montanuniversität Leoben., Nossen (Wagner).

The withdrawal from hard coal mining in Germany took place at the end of 2018. However, politicians and environmentalists are also calling for an end to lignite mining. There are public discussions regarding the level of groundwater rise in underground mines and possible environmental problems caused by contaminated mine water. In the Westerwald (Rheinisches Schiefergebirge) lignite was extracted by underground mining until the 1960s. The mines were then flooded. Thus, significant water reservoirs were created in an area that otherwise has hardly any usable groundwater resources on a large scale. The pit water from the Alexandria and Wilhelmsfund pits is collected via the Erb and Tiefen tunnels respectively and flows off at a free gradient to the surface. Due to their good quality and high fillings, they are used as raw water for drinking water production. There are no problems caused by acid pH values and the mobilisation of toxic trace elements. In particular, the water of the Alexandria mine, with fills of over 300 l/s, represent an indispensable water resource for the regional water supply.

- [63] Wieber, G., Stemke, M., Wonik, T., Enzmann, F. & Kersten, M. (2019): Stratification Dynamics and Geothermal Potential of a Deep Shaft in the Flooded Wolf Mine, Siegerland/Germany. – *Mine Water Environ.*, 38(2):325—334, doi:10.1007/s10230-019-00602-8.

Mine water hydraulics and geothermal potential of a deep shaft of the flooded Wolf mine in the Siegerland ore district of the Rhenish Massif in Germany were investigated. The electrical conductivity (EC), temperature, pH, and Eh were logged to 580 m below water table using multi-parameter borehole tools in 2009 and 2015. Some variations were detected, which were interpreted to indicate the inflow of water with almost the same temperature from the neighbouring San Fernando mine. Borehole camera observations showed that the deeper mine levels are directly connected to the shaft and are not blocked by natural or manmade barriers. The temperature was relatively uniform throughout the underground water catchment, but variations were found in pH and Eh. The EC profile was relatively uniform in 2009, but some anomalies were seen in 2015 between the depths of 80 and 220 m, indicating changes to the mine water dynamics. Stratification at a depth of 300 m was inferred from the investigation data. The logging results and calculations suggest that the mine could be exploited to supply sustainable geothermal energy. This flooded mine could supply up to a few gigawatt hours of energy per year, and could be used as an important source of low-carbon energy for heating and cooling nearby properties.

- [64] Wolkersdorfer, C. & Mugova, E. (2020): Temporäre Entwicklung der Dichteschichtung in einem gefluteten Bergwerksschacht eines Gold-Kleinbergbaus in Biberwier/Tirol [Temporary development of density layering in a flooded mine shaft of a small gold mine in Biberwier/Tyrol]. Paper presented at the Geoforum Umhausen, Umhausen. – S. 97—102, 3 Abb., 1 Tab.

Zur Untersuchung von Dichteschichtung in gefluteten Untertagebergwerken wurde der 10 m tiefe Nikolaus-Bader-Schacht in Biberwier/Tirol ausgepumpt und der darauffolgende Flutungsverlauf beobachtet. Nach kurzer Zeit bildete sich eine Dichteschichtung aus, welche im Herbst zusammenbrach und sich im Frühjahr erneut ausbildete. Datenlogger für Druck, Temperatur und elektrische Leitfähigkeit in vier verschiedenen Teufen des gefluteten Schachtes erlauben eine Langzeitüberwachung des Wasserkörpers, woraus Rückschlüsse über zeitliche Faktoren zur Ausbildung und Zusammenbruch von Dichteschichtung gewonnen werden können.

- [65] Wolkersdorfer, C. & Mugova, E. (2021): Effects of Mining on Surface Water. – *The Encyclopedia of In-land Waters*, 2nd edn. – p., 6 Abb., 2 Tab.; Oxford (Elsevier), doi:10.1016/B978-0-12-819166-8.00036-0.

Mining includes modern, small-scale, and artisanal surface mining, strip mining, placer mining, underground mining, solution mining, in situ mining, quarrying, or the extraction of groundwater. Approximately 240,000 km² of the Earth's surface are covered by abandoned, closed, or orphaned mines (Wolkersdorfer, 2008). There, pollution pathways include surface, groundwater as well as aerial deposition (Fig. 1), and potentially contaminated sediments might collect in the stream beds and lakes. Mining influenced water can develop acid (below pH 5.6), circumneutral (between pH 5.6 and 8), or basic pH values (above pH 8), and in terms of dissolved matter, it can be dilute,

mineralized, or saline (Nordstrom et al., 2015). Once inland waters are contaminated by mine water, their remediation can take long and may involve large financial burdens (ERMITE Consortium et al., 2004). Protecting the environment from pollution, both from tailings and from the mine workings is a complex problem (ERMITE Consortium et al., 2004), and its solution takes the combined efforts of many partners. Unquestionably, the best protection of the ecosystem would be to prevent mining entirely or, alternatively, recycle all used metals, rocks or aggregates (European Innovation Partnership on Raw Materials, 2016). Yet, both options are currently not feasible in face of the demand of a growing world population for raw materials. Therefore, responsible and sustainable mining uses a life cycle assessment including the "mining for closure" principle and the "cradle-to-grave" approach (Idowu et al., 2013; Northey et al., 2018; Peck et al., 2005; Wörlén et al., 2005). Examples in this article are not chosen to single out individual mine sites or mining houses, but as relevant examples describing a particular mechanism or case. Many of the well documented mine sites are operated by responsible companies that openly discuss their problems, while many heavily polluting mine sites (Earthworks and Oxfam America, 2004) are inadequately documented, because the owners restrict publication of unwanted results or access to these sites. In addition, it is noteworthy to state that responsible mining tries to avoid lasting environmental damages. Responsible mining ensures that the mining operation has its social license to operate and mining remnants are mitigated as well as remediated to near pre-mining conditions as best as possible (International Council on Mining and Metals, 2008).

- [66] Wolkersdorfer, C. (2017): Mine Water Hydrodynamics, Stratification and Geochemistry for Mine Closure – The Metsämonttu Zn-Cu-Pb-Au-Ag-Mine, Finland. – In: Wolkersdorfer, C., Sartz, L., Sillanpää, M. & Häkkinen, A. (eds): IMWA 2017 – Mine Water & Circular Economy I. – S. 132–139, 3 Abb., 1 Tab.; Lappeenranta (Lappeenranta University of Technology).

In the case of the Metsämonttu Zn-Cu-Pb-Au-Ag-mine in Finland, which was closed in the 1970ies, the mine water chemistry, isotopes, flow and the stratification in the mine was measured for a duration of two years. Based on the results, a still ongoing tracer test was initiated. The reason for this investigation was to understand which hydrodynamic and chemical processes are occurring in a closed underground mine and how this knowledge can be used for future mine closures or in-situ remediation options as so far no general conclusions can be reported. It was found that the mine water shows no substantial vertical stratification but that a horizontal stratification occurs which causes the water in the two shafts to be of different chemical and isotopic signatures. While the electrical conductivity in shaft 2 was low, close to low mineralized ground water, the electrical conductivity in shaft 1 was higher, showing an interaction between the ore deposit and the water. The current results of the tracer test also show that the mine water velocity seems to be very slow as no tracer was found after 3 months of operation of the tracer test.

- [67] Wolkersdorfer, C. (2021): Reinigungsverfahren für Grubenwasser [Mine Water Treatment]. – 362 p., 114 Abb., 29 Tab.; Heidelberg (Springer), doi:[10.1007/978-3-662-61721-2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-61721-2).

Anlass dieser Zusammenstellung von Reinigungsverfahren für Grubenwasser war das Deutsch-Tschechische Gemeinschaftsprojekt Vodamin. Dieses hatte sich zum Ziel gesetzt, die Auswirkungen der Bergbauaktivitäten auf die Wasserqualität von Grund- und Oberflächenwässern zu untersuchen. Innerhalb des Arbeitspaketes 4 sollten Reinigungsverfahren für Grubenwasser vorgestellt und wenn möglich bewertet werden. Ziel dieser Publikation ist daher, auf eine Reihe von Verfahrensweisen zur Beurteilung von Grubenwasser einzugehen. Es werden die derzeit bekannten Methoden und Systeme zur Reinigung von Grubenwasser vorgestellt. Zunächst wird in einem Überblick dargelegt, was Grubenwasser ist, wie es klassifiziert werden kann und wie eine korrekte Probenahme zu erfolgen hat. Danach folgt eine Zusammenstellung der bekannten Methoden zur Reinigung von Grubenwasser, basierend auf der international üblichen Einteilung in aktive und passive Verfahren, (kontrollierte) natürliche Selbstreinigung sowie In-situ-Maßnahmen. Am Ende findet sich eine Darstellung von alternativen Nutzungsmöglichkeiten für aufgelassene Bergwerke, die auf das Grubenwasser abzielt. Eingestreuete, glosenartige Beiträge beleuchten mögliche Fallstricke der Probenahme oder des Managements.

Dazu wurden etwa 3000 Publikationen zum Thema Grubenwasserreinigung sorgfältig studiert und darauf basierend eine Zusammenstellung aller wichtigen, derzeit bekannten Verfahren gegeben. Ein umfassendes Literaturverzeichnis mit über 900 Einträgen erlaubt es dem Leser, weitergehende Informationen einzuholen. Da der Zugang zu Literatur individuell verschieden ist, gibt es zu jedem Verfahren stets mehrere Zitate, sodass in jedem Fall wenigstens eine Publikation zum Nachlesen gefunden werden sollte.

Bislang ist es nur eingeschränkt möglich, anhand der Wasseranalyse eine exakte Bemessung des Reinigungssystems zu planen. Daher sind vor einer Vollinstallation oftmals Laborversuche und Pilotanlagen notwendig, um die optimale Anlagenkonfiguration zu ermitteln. Künftige Forschungen und Entwicklungen sollten daher auf ein optimiertes

Prozessverständnis abzielen, um dem Ziel einer integrierten Grubenwasserreinigung näherzukommen. Dazu konnte auch das „Internet of Mine Water“ beitragen (siehe Abschn. 1.1), in dem alle relevanten Komponenten des Grubenwassermanagements zusammengefasst sind.

Zur Planung einer Grubenwasserreinigungsanlage ist eine zuverlässige und korrekte Probenahme mit Volumenströmen und Vor-Ort-Parametern unerlässlich. Obwohl es keine allgemein anerkannte Verfahrensweise gibt, haben sich Firmenstandards eingespielt, die weitgehend auf nationalen oder internationalen Standards beruhen. Einige Parameter sind grundsätzlich bei jeder Probenahme zu ermitteln, wohingegen andere nach Bedarf ermittelt werden können.

Insgesamt werden zwölf Gruppen von aktiven Reinigungsverfahren vorgestellt, die derzeit angewendet werden oder in fortgeschrittenen Entwicklungsstadien sind. Darunter befinden sich die Neutralisation, elektrochemische Verfahren, Membrananwendungen und einige bislang weniger bekannte Methoden. Auf spezielle Varianten, die meist aus patentrechtlichen Gründen nicht zum Einsatz kommen und sich nur minimal von anderen Verfahren unterscheiden, wird dabei nicht eingegangen. Von den passiven Verfahren werden elf vorgestellt. Dabei handelt es sich beispielsweise um Carbonatkanäle, konstruierte Feuchtgebiete, permeable reaktive Wände und reduzierende Alkalinitätssysteme. Verfahren, die bislang nur an einem oder zwei Standorten zum Einsatz kamen oder sich in einem sehr frühen Entwicklungsstadium befinden, bleiben dabei ebenfalls weitgehend unberücksichtigt. Drei alternative Methoden, die ein erhebliches Entwicklungspotenzial aufweisen, leiten über zu In-situ-Maßnahmen in Tagebauen und Untertagebergwerken. Zu den alternativen Methoden zählen (kontrollierte) natürliche Selbstreinigung, Änderung der Abbaubedingungen oder die im Anfangsstadium stehenden biometallurgischen Verfahren. Von den In-situ-Methoden werden die unterschiedlichen Inlake- Verfahren sowie die Rückspülung von Reststoffen näher beschrieben.

Abschließend folgt eine Zusammenstellung von alternativen Nutzungsmöglichkeiten. Diese sind aufgeteilt in Nutzung der aufgelassenen Bergwerke selbst und Nutzung der Reststoffe, die bei der Grubenwasserreinigung anfallen.

- [68] Wolkersdorfer, C., Mugova, E., Dagac, V. S., Charvetc, P. & Vitulec, J. R. S. (2021): Effects of Mining on Surface Water – Case Studies. – The Encyclopedia of Inland Waters, 2nd edn. – p., 6 Abb., 2 Tab.; Oxford (Elsevier), doi:[10.1016/B978-0-12-819166-8.00085-2](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819166-8.00085-2).

Selecting suitable case studies for mining influenced surface waters is an easy task because there are so many well-described studies from around the world. However, this does not imply that all mining operations cause pollution in the receiving water bodies or are prone to tailings dam failures—it just means that those that occur are often well studied. The intention behind selecting the following sites as case studies was: to describe and illustrate some important mining influenced rivers/streams; to describe the pollution sources and potential remediation options in these rivers/streams; and, to indicate that irresponsible conduct could cause severe regional, social and environmental effects. In addition, these sites are all located in mining areas of outstanding importance to human's mining history—which will be left to historians and archeologists to document. Besides the case studies presented, here could also be a case study about the Loisach rivulet near Biberwier in Tirol, which once was affected by lead, zinc, and silver mining, but now is a beautiful mountain stream. Or the Sabie River in South Africa could be shown, which is partly fed by abandoned gold mine discharges, and now used as drinking water and for recreational purposes for the town and tourists of Sabie. Moreover, this section could include the Metsämonttu mine in Finland, where natural attenuation and a small constructed aerobic wetland decrease the iron concentrations below the detection limit before the mine water enters a Natura 2000 protected river system. However, images of clean water are less impressive in this context than images of red or orange water—though the Cape Breton Island section shows a clean-water image for Cadegan's Brook, which is an excellent example of successful remediation measures. This section's intention is also to present case studies from which we can learn how to tackle the problems associated with polluted mine water and with the storage of mining residues, such as tailings. From a large range of possible case studies that can illustrate environmental management of mining, seven have been chosen because of their importance in this context. Yet, all case studies are representative for the many thousands of mining influenced streams, rivers, and lakes around the world.

- [69] Wolkersdorfer, C., Nordstrom, D. K., Beckie, R., Cicerone, D. S., Elliot, T., Edraki, M., Valente, T. M., França, S. C. A., Kumar, P., Oyarzún Lucero, R. A. & Soler, A. I. G. (2020): Guidance for the Integrated Use of Hydrological, Geochemical, and Isotopic Tools in Mining Operations. – *Mine Water Environ.*, 39(2):204—228, 7 Abb., 2 Tab., 5 Anl.; doi:[10.1007/s10230-020-00666-x](https://doi.org/10.1007/s10230-020-00666-x).

This paper summarizes international state-of-the-art applications and opportunities for employing and deploying hydrological, geochemical, and isotopic tools in an integrated manner for investigations of mining operations. It is intended to aid formulation of more integrated approaches for evaluating the overall sustainability of mining projects. The focus is particularly on mine waters, including: environmental water sources, mine water dynamics, and as a source and vector for pollution in the wider environment. The guidance is generic to mining projects and not just reflective of a particular extraction (e.g. coal, metalliferous, uranium) industry. A mine life cycle perspective has been adopted to highlight the potential for more integrated investigations at each stage of a mining operation. Three types of mines have been considered: new (i.e. those in the planning stage), active (i.e. working mines), and historical mines (i.e. inactive and abandoned mines). The practical usage of geochemical analyses and isotopic studies described here emphasise characterisation, dynamics, and process understanding for water quality considerations in tandem with water resource and environmental impact implications. Both environmental (i.e. ambient) and applied (i.e. injected) tracers are considered. This guide is written for scientists (including isotope specialists) who have limited or no mine water experience, environmental managers, planners, consultants, and regulators with key interests in planned, active, and legacy mining projects.

- [70] Wolkersdorfer, C., Shongwe, L. & Schmidt, C. (2016): Can natural Stratification prevent Pollution by Acid Mine Drainage? Paper presented at the IMWA 2016 – Mining Meets Water – Conflicts and Solutions, Leipzig/Germany. – S. 115—121; Freiberg (TU Bergakademie Freiberg).

Acid mine drainage (AMD) from underground or open pit mines is considered one of the most problematic liquid pollutants in the mining environment. Therefore, it is crucial for mine operators to either prevent AMD or to purify the water once it emerges to surface water courses. Though a number of AMD prevention techniques exist, they are not as far developed as would be necessary for preventing AMD discharges regularly. Therefore, the standard method to eliminate pollutants, acidity and solids from AMD are active or passive treatment techniques. After mining ceases, it would be of importance to have methods available that can either prevent the discharge of AMD or the treatment is conducted in-situ of the abandoned mine. Various authors investigated or proposed to use the effects of natural stratification as a means to prevent AMD discharging from abandoned mines. Natural stratification is the layering of water bodies, in this case in a flooded underground mine, by water of various chemical or physical properties. These physicochemical differences result in density differences which, consequently, may cause the stratification of mine water bodies. Stratification in flooded underground mines has long been known to occur under certain conditions, but a detailed study of its causes has not been conducted yet. This paper will present stratification investigations in flooded underground mines and investigate if natural stratification is able to prevent surface water courses from being polluted by AMD. Based on the Straßberg/Germany, the Georgi Unterbau/Austria, the Frances Colliery/England and the 1B Mine Pool/Canada, the natural stratification and its causes will be described and the reasons for its breakdown be discussed. The presentation will describe the stratification pattern, the water chemistry and why the systems cannot be used as reliable options for long term in-situ remediation. It will not considered forced stratification which can be caused by manmade structures. One of the key findings of this investigation is that natural stratification is not stable and can be broken down by a variety of external forces. Proposing to use natural stratification as a means for in-situ remediation or to prevent the discharge of AMD to the environment is therefore not feasible. In case of their breakdown, the polluted AMD will cause damages to the natural environment if no other means for water treatment are available. Consequently, for a full understanding of stratification in flooded underground mines, more work will be necessary and analogue laboratory as well as numerical models need to be conducted for a better understanding of the processes involved.

- [71] Yousefi, N., Rinder, T. & Hilberg, S. (submitted): The mine drainage from the spoil tip of a Bavarian pitch coal mine – a history of unmonitored natural attenuation. Pangeo Austria 2022, Montanuniversität Leoben.

For more than 60 years, since the abandonment of coal mining in the Hausham colliery, mine drainage from the site percolates an associated spoil tip over a distance of several 100 meters, before discharging into a nearby lake – the Loidlsee. Generally, coal mine drainage is often characterized by poor water quality, e.g. low pH values, high concentrations in dissolved toxic metal ions and high salinity, posing environmental risks for receiving streams. With this in mind, a closer examination of this apparently unmonitored coal mine discharge was carried out in summer

2020. A coupled elemental and isotopic approach was applied to reconstruct the origin and chemical evolution of mine drainage. Water samples were taken along the mine drainage and from surface waters in the close vicinity of the mine drainage. In addition, solid samples from secondary phases along the mine drainage were analysed.

At the discharge location the mine water carries a pH-value around 6.5, an electrical conductivity of 2,710 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and high concentrations of sulphate ($> 1,000 \text{ mg}/\text{l}$) and iron (2,8 mg/l) and elevated contents of nickel. These values are significantly reduced over the course of the mine water flow, providing the water to enter lake Loidlsee environmentally non-hazardous. Decreasing values are linked to (1) the formation of secondary iron precipitates, (2) the formation of secondary calcium carbonates along the mine drainage and (3) mixing with a different groundwater source along the flow path. $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ isotopic ratios of dissolved SO_4^{2-} point to the oxidation of sulphidic minerals such as pyrite. $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ values of the mine drainage differ significantly from those of the surface waters which is interpreted as evidence for several flow systems with varying retention times in the catchment.



DAS FBW IM DIALOG

Dialoge mit Bürgerinnen und Bürgern

Neben den fachlichen Forschungsaufgaben ist es ein wichtiges Ziel des *Forums Bergbau und Wasser*, einen offenen Austausch über die Chancen und Risiken eines Grubenwasseranstiegs nach dem Ende des Steinkohlenbergbaus im Ruhrgebiet, in Ibbenbüren und im Saarland zu unterstützen.

KONSTRUKTIVER AUSTAUSCH MIT EXPERTEN IN BOCHUM

Um erste Forschungsvorhaben vorzustellen und Impulse für weitere Forschungen zu erhalten, hat die Stiftung am 12. Dezember 2017 ihre erste Dialogveranstaltung an der Technischen Hochschule (TH) Georg Agricola in Bochum veranstaltet. Die zugehörige Presseinformation findet sich auf der Webseite des Forums: www.forum-bergbau-wasser.de/dialog-bochum. Rund 110 Experten aus Wissenschaft, Behörden, Politik, Verbänden und Unternehmen aus Nordrhein-Westfalen und dem Saarland diskutierten dort sachlich, konstruktiv und lebhaft über Themen, die sich als mögliche Forschungsprojekte für die Stiftung eignen könnten.

Die zur Diskussion gestellten Forschungsimpulse waren dabei vom fachlichen Know-how und der Vielfalt der versammelten Experten geprägt. Vertreten waren beispielsweise Institutionen wie die Ruhr-Universität Bochum, die TH Georg Agricola, die RWTH Aachen, die Universität Münster, die Bezirksregierung Arnsberg, der Geologische Dienst NRW, die Bergbehörden im Saarland, die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, der Naturschutzbund (Nabu) NRW, der Verein Bergbaugeschädigter Hauseigentümer, Landtagsabgeordnete und Fraktionsmitglieder von Kommunen aus NRW und dem Saarland sowie Ingenieur- und Beratungsunternehmen. Es gab dabei mannigfaltige Impulse aus verschiedensten Bereichen, die nach Ansicht der Teilnehmer geeignet sind, durch Forschungen neue Erkenntnisse für die Praxis zu generieren.

Die Veranstaltung endete in einer umfangreichen Ideensammlung, die ebenfalls auf der Webseite des Forums abrufbar ist.

GRUBENWASSER: NACHHALTIGE LÖSUNGEN ENTWICKELN

Fortgesetzt wurde die Reihe der Dialogveranstaltungen am 7. Februar 2019 in der Congresshalle Saarbrücken. Unter dem Thema „Grubenwasser: Nachhaltige Lösungen entwickeln“ wurde der Begriff „Dialog“-Veranstaltung ernst genommen. Anstelle einer klassisch vortragsdominierten Fachtagung zog sich ein „dialogisches Prinzip“ als roter Faden durch die Tagung: In immer neuen Konstellationen haben sich etwa 80 interessierte Diskutanten und die Wissenschaftler der Stiftung auf Augenhöhe zu einem spezifischen Thema ausgetauscht.

Die Ergebnisse dieser Diskussionen und Dialoge sind auf der Webseite des Forums Bergbau und Wasser dokumentiert und dort abrufbar (www.forum-bergbau-wasser.de/dialog-saarland).

GEBREMSTER DIALOG IN PANDEMIEZEITEN

Nachdem das Format der Saarbrücker Veranstaltung von allen Teilnehmern als äußerst befruchtend und zielführend eingeschätzt worden war, sollten weitere Veranstaltungen folgen. Fest terminiert waren bereits der 14. Mai 2020 in der Jahrhunderthalle Bochum sowie der 28. Oktober 2020 in der Congresshalle Saarbrücken. Eine dritte Veranstaltung in Ibbenbüren befand sich in der Planung. Alle Veranstaltungen mussten aufgrund der Covid-19-Pandemie abgesagt werden.

Kurzfristig abgesagt wurde zudem eine geplanter Dialog mit den Verantwortlichen und Interessierten der Stifterin RAG AG am 29. Oktober 2020 sowie ein für den 3. Februar 2021 geplanter Austausch mit den Aufsichtsbehörden in Nordrhein-Westfalen.

ONLINE-DIALOG

Aufgenommen wurde der Dialog dann am 7. Oktober 2021 in einer Online-Veranstaltung, die grob dem in Saarbrücken entwickelten Konzept folgte, aber auf persönliche Kontakte verzichtete und die Diskussionsgruppen ausschließlich per Video zusammenführte. Erstmals standen neben den Chancen und Risiken eines Grubenwasseranstiegs auch übergeordnete Themen der Wissenschaftskommunikation zur Debatte, etwa das „Vertrauen in Prognosen“ oder die Probleme des „Wissenstransfers“ bei den Ewigkeitslasten.

Rund 75 Teilnehmerinnen und Teilnehmer haben sich dieser besonderen Herausforderung gestellt und die Debatte zum Grubenwasseranstieg befruchtet. Details finden sich auf der Webseite des Forums (<http://www.forum-bergbau-wasser.de/ChancenRisiken>).

Der für 2020 geplante Dialog mit der Stifterin konnte dann ein Jahr später, am 11. November 2021, durchgeführt werden. Auch bei dieser Veranstaltung wurden alle Teilnehmerinnen und Teilnehmer online per Video zugeschaltet.

WISSENSCHAFTLICHER ABSCHLUSS

Am 2. Februar 2022 präsentierte das Forum Bergbau und Wasser dann erstmals die selbst erarbeiteten und beauftragten Forschungsergebnisse der breiten Öffentlichkeit. In 14 Fachvorträgen konnten sich Interessierte und Entscheidungsträger über die Erkenntnisse der beteiligten Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen informieren. Der Abstractband der Tagung ist auf der Webseite des Forums (www.forum-bergbau-wasser.de/abstractband) verfügbar. Er diente als Vorlage für diesen Abschlussbericht, der die Ergebnisse deutlich ausführlicher zusammenfasst.

WIE ES WEITERGEHT

Anfang 2023 steht die nächste Dialogveranstaltung in der Jahrhunderthalle in Bochum an. Hier möchte das *Forum Bergbau und Wasser* nicht nur mit Experten und Entscheidungsträgern, sondern auch mit der allgemeinen Öffentlichkeit über die Chancen und Risiken einer Grubenwasserflutung diskutieren. Neben einer Podiumsdiskussion wird es Themeninseln geben, auf denen man mit den Wissenschaftlern des Forums direkt in Kontakt treten, sich über ihre Ergebnisse informieren und über die Konsequenzen daraus beraten kann.

Infobroschüre Grubenwasser

Unter der Leitung der Professoren Wolkersdorfer und Melchers hat das Kuratorium eine Informationsschrift zum Thema Grubenwasser erstellt, die kurz und knapp in das Thema der Chancen und Risiken eines kontrollierten Grubenwasseranstiegs einführen soll. Die Broschüre „Blickfänge – Was Sie über Grubenwasser im Blick haben sollten“ ist im März 2020 erschienen und an weit über 300 Personen – vor allem Entscheidungsträger in den deutschen Steinkohleregionen – verschickt worden.

Eine Online-Version der Broschüre ist auf der Webseite des Forum Bergbau und Wasser einfach abrufbar (www.forum-bergbau-wasser.de/blickfaenge).



BILDUNGS- UND INFORMATIONEN INITIATIVEN



LERNSOFTWARE GRUBENWASSER

Prof. Dr. S. Hilberg, Salzburg (Projektleiterin)

Dipl. Ing. S. Meerwald–Stadler (Programmiererin)

Projektdauer: 2021 – 2022

Im Rahmen des Projekts soll eine interaktive Lernsoftware zum Thema Grubenwasser erstellt werden, die über beliebige Desktop-Browser abgerufen und bearbeitet werden kann. Zielgruppe sind Schülerinnen und Schüler ab 15 Jahre. Die Inhalte des Lernspiels wurden in Form eines Story-Boards vom FBW-Kuratoriumsmitglied Sylke Hilberg erarbeitet. Mit der technischen, didaktischen und grafischen Ausführung wurde im September 2021 Dipl. Ing. Susanne Meerwald-Stadler beauftragt, die ihrerseits SubunternehmerInnen mit Teilaufgaben betraut hat.

ZIELSETZUNG UND BEZUG ZUM STIFTUNGSZWECK

Neben der Forschung zum Thema Grubenwasser ist die Vermittlung und Publikation der Erkenntnisse an die Fachwelt aber auch an die nicht fachliche Öffentlichkeit ein wesentlicher Stiftungszweck des Forum Bergbau und Wasser. Dabei geht es einerseits um die Information der bereits interessierten Öffentlichkeit aber auch darum, Interesse bei der Bevölkerung in Bergbauregionen für das Thema Grubenwasser zu schaffen. Interesse setzt Information über und Verständnis für die Problematik voraus.

Die heutigen Jugendlichen z.B. im Ruhrgebiet sind die erste Generation, die ohne den bisher allgegenwärtigen Bergbau aufwächst, gleichzeitig aber mit dem Thema Ewigkeitsaufgabe Grubenwasserhaltung konfrontiert ist. Eine neutrale, fachlich korrekte und altersgerechte Information über das Thema fördert mittelfristig einen sachlichen Diskurs zwischen Bevölkerung und Fachexperten auf Augenhöhe und kann zu einer größeren Akzeptanz der Ewigkeitsaufgaben in der Bevölkerung beitragen.

Lernen mit digitalen Medien stellt eine moderne Form der Vermittlung von fachlichen Inhalten dar und spielt auch im Unterricht eine zunehmend große Rolle. Auch vor dem Hintergrund vergangener „Fernlehre-Phasen“ ist die Bedeutung digitaler Lernmaterialien größer denn je. Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz derartiger Medien ist, dass

- (1) die gewählten Vermittlungsmethoden interaktiv und altersgerecht sind und
- (2) Lehrpersonen sie ohne großen zusätzlichen Aufwand und eigene Einarbeitung im Unterricht einsetzen können.

TÄTIGKEITEN

Im Herbst 2021 wurde ein erster Entwurf des Story-Boards erstellt. Dieses umfasst neben einer Definition der Lernziele, eine Rahmenhandlung und darauf aufbauend die Entwicklung der mitwirkenden Charaktere.

Folgende Lernziele wurden definiert: Nach Bearbeitung des Lernspiels wissen Schülerinnen und Schüler

- » was ein Bergwerk ist und wie es aufgebaut ist
- » was Steinkohle ist und wie sie entstanden ist
- » warum die Steinkohle genau dort entstanden ist, wo sie im Bergbau gewonnen wurde
- » wie die Steinkohle gewonnen wurde und welche Aufgaben die Bergleute haben
- » etwas über die geschichtliche Entwicklung des Steinkohlebergbaus
- » wie das Wasser ins Bergwerk kommt
- » warum und wie das Grubenwasser abgesenkt wird
- » wie sich Grubenwasser von Grundwasser unterscheidet
- » was mit dem Grubenwasser im Bergwerk passiert
- » was mit dem Grubenwasser nach der Entnahme passiert
- » wie Grubenwasser gereinigt werden kann
- » was mit dem Grubenwasser passiert, wenn der Bergbau eingestellt wird
- » warum man von Ewigkeitsaufgaben spricht
- » warum Poldermaßnahmen notwendig sind

- » was der Unterschied zwischen Grubenwasserhaltung und Poldermaßnahmen ist
- » welche Bedenken und Befürchtungen die Bewohner der Steinkohlereviere im Zusammenhang mit Grubenwasser haben
- » welche Gefahren es gibt und wie ihnen entgegengewirkt werden kann
- » welche Chancen sich aus dem Grubenwasseranstieg ergeben können

Das Lernspiel besteht aus drei nacheinander zu bearbeitenden Kapiteln:

- » Allgemeines zum Steinkohlebergbau
- » Alles rund ums Grubenwasser
- » Grubenwasser im Nachbergbau

Die Rahmenhandlung bildet die Geschichte einer Austauschschülerin aus einer spanischen Steinkohleregion, die in Bochum zu Gast ist und mit Begleitung mit ihrer Gastfamilie Bergbau, Grubenwasser und Nachbergbau kennenlernt. Mit interaktiven, teilweise in 3D ausgeführten Szenen werden die o.g. Themen bearbeitet. Die Szenen werden mit Zeichnungen illustriert, denen entweder Fotos von realen Gegebenheiten oder Schema-skizzen als Grundlage dienten (Abb. 1 und 2). Ein Großteil der Informationen wird über gesprochene Texte transportiert, die von professionellen Sprechern aus der Region Ruhrgebiet aufgenommen werden. Zudem werden passend zu den jeweiligen Szenen Audiosequenzen und Hintergrundmusik eingespielt. Am Ende jedes Kapitels steht ein Quiz, in dem die wesentlichen Inhalte des Kapitels abgefragt werden können. In einer Begleitbroschüre, die Lehrpersonen digital zur Verfügung gestellt wird, werden die Lehrinhalte zusätzlich dokumentiert.

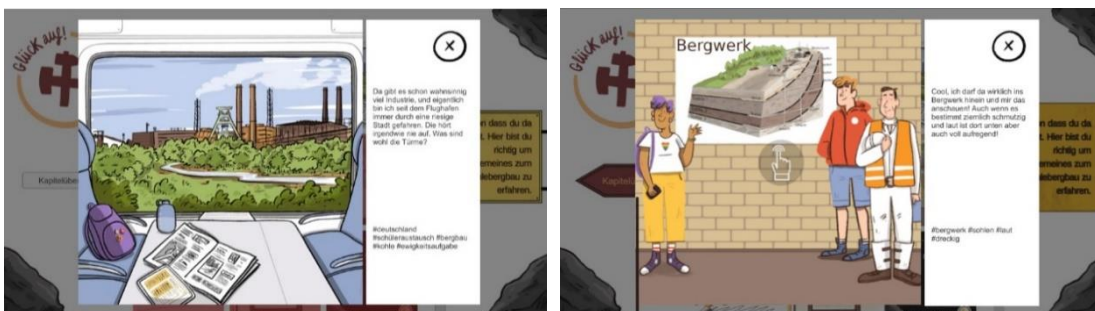


Abbildung 1 und 2: Beispiele für die grafische Aufbereitung der Spielszenen

Aufbauend auf dem Entwurf des Story-Boards werden alle Szenen in enger Abstimmung zwischen Programmiererin, Grafikerin, einer Expertin für digitales Lernen und der Fachexpertin des Kuratoriums in einem iterativen Prozess weiterentwickelt und für die Umsetzung konkretisiert.

Die Kapitel werden jeweils nach Fertigstellung Schülerinnen und Schülern einer Oberstufe mit Schwerpunkt Informatik zum Testen vorgelegt, von diesen auf Plausibilität und Authentizität beurteilt und anschließend finalisiert.

PROJEKTSTAND

Das Kapitel 1 ist weitgehend fertig gestellt und wird derzeit für die Testphase vorbereitet. Für die Kapitel 2 und 3 werden derzeit die Grafiken finalisiert und letzte Szenen für die Umsetzung konkretisiert.

Ein Vortrag auf einer internationalen Konferenz ist eingereicht (siehe Referenznummer [71] im Publikationsverzeichnis ab Seite 71).



INTERNETPORTAL GRUBENFLUTUNGEN

Prof. Dr. Ch. Melchers, Bochum (Projektleiter)

Prof. Dr. Ch. Wolkersdorfer, Pretoria (Projektleiter)

Dr. B. Reker, Bochum (wiss. Mitarbeiter)

Projektdauer: 2021 – 2022

Kurzfassung der Projektergebnisse

Im Rahmen des Projekts „Internetportal Grubenflutungen“ wurde mit Hilfe der Software „ArcGIS“ von ESRI eine Datenbank (Geo-Database) programmiert und in der ESRI-eigenen Webumgebung zur weiteren Nutzung hochgeladen. Die Datenbank ist für eine internationale Ausrichtung in englischer Sprache aufgebaut und bietet neben den wichtigsten Stammdaten eines jeden Bergwerks (z.B. Standort, Name, ID, Rohstoffe, Zeitraum der Abbautätigkeit, Flutungszeitraum) auch Freitextfelder für geologische, hydrogeologische und geschichtliche Hintergrundinformationen. Flutungsbezogene Daten und unterstützende Abbildungen können als Anhänge gespeichert werden. Chemische Analysedaten werden in einem Feature-Dataset, das über die Bergwerks-ID mit der Datenbank verknüpft ist, gespeichert und können für spätere Auswertungen und graphische Darstellungen ausgelesen werden.

BESCHREIBUNG DER DATENBANK

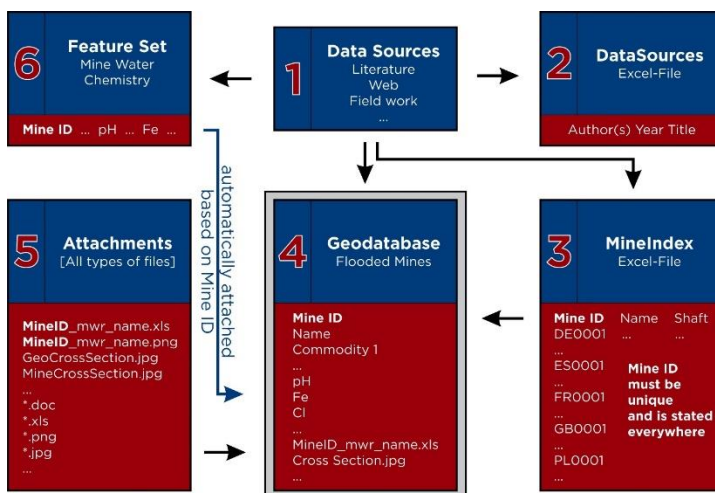


Abb 1: Flussdiagramm-Aufbau der Datenbank "Flooded Mines"

Bei der Datenbank handelt es sich um eine von ESRI entwickelte Geodatabase. In ihr werden alle wesentlichen Stammdaten hinterlegt. Dies geschieht entweder über eine standardisierte Vorauswahl mit Hilfe eines Drop-Down-Menüs oder über entsprechende Freitextfelder. Neben den Stammdaten können auch hydrochemische Messergebnisse in ein mit der Datenbank verknüpftes Featureset hinterlegt werden. Weitere Daten und Dateien aller Art können direkt in der Geodatabase als Anhänge hinterlegt werden (Abb. 1). Die roten Nummern in den einzelnen Kästen entsprechen dem idealen zeitlichen Ablauf der Dateneingabe:

- (1) Beginn der Datenerfassung mit Hilfe unterschiedlicher Quellen (z.B. Literatur, Geologische und Historische Karten, Web, Datenbanken, Feldarbeit).
- (2) Die genutzten Quellen sollen in einer Extraliste, die als Excel-Datei angelegt wurde, hinterlegt werden, damit die spätere Referenzierung in den entsprechenden Freitextfeldern der Datenbank sowie dem Feature Set der Hydrochemie und den Dateianhängen stattfinden kann.
- (3) Für die Vergabe des obligatorischen und unbedingt eindeutigen Minen-Indexes steht eine weitere Excel-Datei zur Verfügung. Darin werden in chronologischer Reihenfolge die Indizes der Bergwerke nach folgendem Schema vergeben: XYZZZZ
 - a. „XY“ steht für den zweistelligen Ländercode nach ISO 3166 Alpha 2
 - b. „ZZZZ“ steht für die fortlaufende Ziffer im jeweiligen Land, beginnend mit 0001.

- (4) Die Dateneingabe der wichtigsten Stammdaten jedes Bergwerks geschieht direkt in der Datenbank. Wichtig ist hier die Zuordnung des eindeutigen Minen-Indexes aus 3). Anhänge können an dieser Stelle auch direkt hochgeladen und für das einzelne Bergwerk hinterlegt werden.
- (5) Als Anhänge können selbst erstellte Grafiken (beispielsweise geologische Querschnitte oder Schnitte des Bergwerks), Fotos oder Excel-Dateien mit den einzelnen Messwerten des Grubenwasseranstiegs (soweit sie aus öffentlich zugänglichen Quellen stammen, ansonsten muss eine Freigabe der Dateneinhaber erfolgen) hinterlegt werden. Bei Dateien, die nicht selbst erstellt wurden, muss gegebenenfalls das Copyright beachtet werden. Die Digitalisierung von Messwerten aus veröffentlichten Flutungsdiagrammen erfolgte mit Hilfe einer Web-Applikation (WebPlotDigitizer).
- (6) Die Eingabe der hydrochemischen Daten erfolgt in einem Featureset, das mit der Geodatabase verknüpft ist. Die Zuordnung der Daten zu dem jeweiligen Bergwerk in der Datenbank erfolgt per Auslesung des Minen-Indexes, siehe 3). Folgende Parameter wurden ausgewählt:
 - a. Allgemeine Daten: MineIndex; Datum; Literaturquelle der Daten; Tiefe der Wasserprobe; Bemerkungen;
 - b. Allgemeine chemische Parameter: pH; Temperatur (°C); Redoxspannung (mV); Sauerstoff (%), Sauerstoff (mg/L); Schwebstoffe (mg/L);
 - c. Kationen (in mg/L): Eisen, Aluminium, Mangan und Zink (gefiltert); Natrium; Kalium, Calcium; Magnesium; Strontium; Lithium;
 - d. Anionen (in mg/L): Ammonium; Chlorid; Sulfat; Hydrogencarbonat; Nitrat; Nitrit; Phosphat.

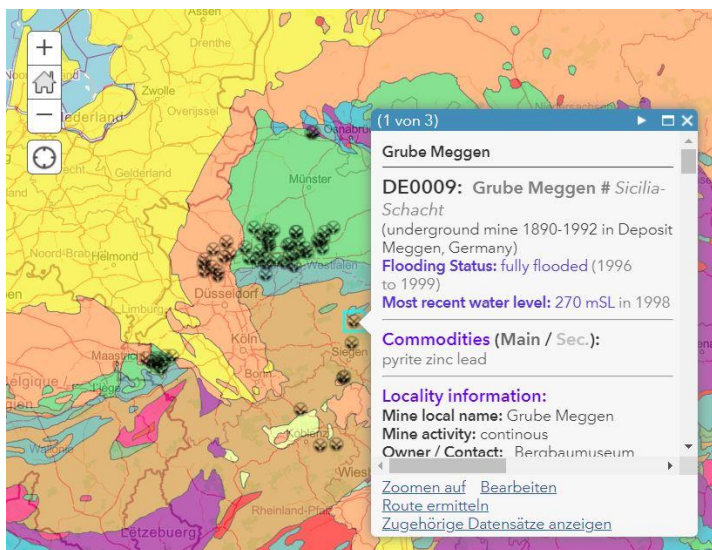


Abb. 2: Ansicht der Webkarte mit Darstellung der geologischen Verhältnisse und Beispiel für ein programmiertes HTML-Popup. Über „Zugehörige Datensätze anzeigen“ können auch alle chemischen Daten dieses Standorts eingesehen werden.

Für die Web-Visualisierung der Datenbank als Karte wurde das Kartenmaterial von Open Street Map als Grundkarte hinterlegt. Zusätzlich wird bei Maßstäben zwischen 1:5 Mio. und 1:50.000 eine geologische Grundkarte auf Basis der IGME 5000 (International Geological Map of Europe and Adjacent Areas, frei verfügbar über die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) angezeigt. Die Auswahl dieser sehr grobmaßstäblichen Datenbasis hatte zum Hintergrund, dass dies die einzige Kartengrundlage mit einer einheitlichen Darstellung von ganz Europa bietet, relativ schnelle Ladezeiten ermöglicht und für die meisten Fragestellungen und einen groben geologischen Überblick ausreichend ist. Die Farbgebung der Stratigraphie wurde anhand des internationalen Standards auf Grundlage der Internationalen Stratigraphischen

Kommission angepasst. Für einen detaillierteren Blick in die geologischen Verhältnisse wurde ein extra Shapefile generiert, in der die räumlichen Verläufe von geologischen Profilschnitten hinterlegt werden können.

Die dort eingetragenen Verläufe entstammen den Profilschnitten, die im Rahmen dieses Projekts mit Hilfe von Grafikprogrammen auf Grundlage der Schnitte in den jeweiligen geologischen Karten nachgezeichnet und digitalisiert wurden.

Für die Visualisierung der Datenbank wurde anschließend ein PopUp Fenster mit HTML programmiert, das alle wesentlichen Informationen eines Bergwerks übersichtlich darstellt.

AKTUELLER DATENBESTAND DER DATENBANK UND AUSBLICK

Im Rahmen des Projekts wurden bisher 124 Bergwerke in Deutschland, Großbritannien, Frankreich, Spanien, Portugal, Niederlande, Polen, Finnland, Österreich und Norwegen (Spitzbergen) unterschiedlichster Datenqualität und -quantität, teilweise inklusiver chemischer Analysedaten (593 Datensätze insgesamt) eingetragen. Für viele Bergwerke konnten außerdem aus Literaturdaten die Messwerte der Grubenwasseranstiege digitalisiert, aufbereitet und als Excel-Datei als Anhang in der Datenbank hinterlegt werden. Außerdem wurden für viele Bergbaureviere geologische, hydrogeologische sowie Bergbau-historische Beschreibungen in englischer Sprache verfasst und in der Datenbank hinterlegt. Auf Seiten der geologischen Profilschnitte wurden insgesamt 35 Schnitte unterschiedlichsten Alters recherchiert, interpretiert (und angepasst), georeferenziert und vereinheitlichend digitalisiert. Damit konnte ein Grundstock an Daten hinterlegt werden, der jedoch noch keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit haben kann. Ziel dieser Datenbank ist es, den Datenbestand in den nächsten Jahren kontinuierlich weiterzuentwickeln, zu dem auch Forscher aus aller Welt eingeladen sind, auf diese Daten zuzugreifen und im Gegenzug auch Daten für das fortwährende Wachstum der Datenbank zur Verfügung zu stellen. Die weitere Datenbankpflege kann vom Bearbeiter dieses Projekts, Bastian Reker, übernommen werden. Eine detaillierte Anleitung zur Bedienung und Dateneingabe der Datenbank ist darüber hinaus in Vorbereitung.

NOCH BESTEHENDE PROBLEME DER TECHNISCHEN UMSETZUNG SEITENS ESRI

Seitens der Firma ESRI werden derzeit zwei Online Karten-Viewer angeboten: Eine ältere („Map Viewer Classic“) und eine neue Version. Bei der neuen Version sind noch nicht alle Funktionen gegeben, beispielsweise gibt es Probleme mit den Dateianhängen der Datenpunkte und dem Übertrag der chemischen Daten in das programmierbare Pop-Up Fenster. Diese können nach derzeitigem Stand (Anfang 2022) nicht angezeigt werden. Aus diesem Grund wird bis auf Weiteres auf den alten Viewer für einen möglichst großen Funktionsumfang verwiesen. Nichtsdestotrotz gibt es auch beim alten Viewer Einschränkungen, wie auch nach Kontakt mit dem Support von ESRI von ihm bestätigt wurden. Die chemischen Daten können zwar angezeigt werden, aber nur eingeschränkt. Während bei der Desktop-Version von ArcGis Pro beispielsweise die Daten so aufbereitet werden können, dass Durchschnittswerte, Minima und Maxima sowie Anzahl der Datensätze tabellarisch angezeigt werden können, bietet die Online-Version nur die Auswahl einer einzigen Option – also entweder Durchschnittswert oder Minimumwert oder Maximalwert oder Anzahl der Werte. Dieses Problem konnte auch nach zahlreichen Versuchen nicht durch Programmierausdrücke mit der ESRI-eigenen Programmiersprache Arcade gelöst werden, sodass in der aktuellen Version der Datenbank im Pop-Up nur Durchschnittswerte angezeigt werden können. Der gesamte chemische Datenbestand zu einem Bergwerk kann aber im PopUp durch Auswahl „Zugehörige Datensätze anzeigen“ eingesehen werden (Abb. 2).



ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Anlass

Das *Forum Bergbau und Wasser* wurde im Jahr 2017 mit dem Ziel gegründet, die „Chancen und Risiken des Grubenwasseranstiegs“ in den drei ehemaligen Steinkohlenabbauregionen Ibbenbüren, Ruhrgebiet und Saarland zu untersuchen. Dazu fanden in den zurückliegenden fünf Jahren unter der Leitung von fünf national und international anerkannten Experten und Expertinnen eigene und externe Forschungen statt. Deren Forschungsergebnisse wurden in Fach- und Publikumszeitschriften publiziert und auf nationalen sowie internationalen Tagungen vorgestellt (www.forum-bergbau-wasser.de/artikel). In allen Fällen bestand das Interesse darin, das Thema Grubenflutung sowie deren positive und negative Auswirkungen zu verstehen und einem möglichst breiten Publikum vorzustellen.

Erreichtes

Um ein nachhaltiges Flutungsniveau definieren zu können, sind eine Reihe von Fragen zu klären, die sich auf die folgenden Untersuchungskomplexe fokussieren lassen: Gesteinsparameter, hydrogeologische und hydrogeochemische Verhältnisse, numerische und analoge Modellierung, Monitoring, historische Entwicklung und Hintergrundwerte der Wasserinhaltsstoffe, Grundwasserneubildung im Einzugsbereich von Kohlenbergwerken, weltweiter Vergleich mit bereits stattgefundenen Grubenflutungen und zeitlich-räumlicher Flutungsverlauf. Diese Fragenkomplexe wurden von Arbeitsgruppen der Kuratoriumsmitglieder selbstständig erarbeitet und publiziert.

Darüber hinaus hat das *Forum Bergbau und Wasser* externe Forschungsvorhaben zu drei Themenkomplexen ausgeschrieben und insgesamt fünf Projekte bewilligt:

- » Niedrigtemperaturstromgewinnung,
- » Grubenwassergeothermie,
- » Einstellung aller Grubenwasserpumpen und Poldermaßnahmen,
- » Ableitungen von Wasserqualitäten aus Wasser-Mineral-Gleichgewichten und
- » Auswirkungen von Grubenwassereinleitungen auf den Rhein.

Weiterhin erstellte das Kuratorium eine Internetseite (www.forum-bergbau-wasser.de), eine allgemein-verständliche Broschüre zum Thema Grubenwasser („Blickfänge“), ein Internetportal zu Grubenflutungen, eine Lernsoftware für Schülerinnen und Schüler sowie eine repräsentative Bevölkerungsumfrage in den Regionen Ibbenbüren, Ruhrgebiet und Saar.

Schließlich trat das *Forum Bergbau und Wasser* in verschiedenen Online- und Präsenzformaten mit der politischen, wissenschaftlichen und interessierten Öffentlichkeit in einen vielfältigen und konstruktiven Dialog. Dabei nahmen bis zu 200 Personen aus Politik, Wissenschaft, Genehmigungsbehörden, Bergwerksfirmen und der interessierten Bevölkerung teil.

Ergebnisse

Aus den bisherigen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass

- » aus ökologischen und ökonomischen Gründen ein optimales Flutungsniveau möglichst hoch anzusetzen ist,
- » sich teufen- und lageabhängig ein sehr unterschiedlicher Chemismus des Grubenwassers einstellen wird,
- » die numerische Modellierung großer Bergwerkskomplexe Prozesse raumzeitlich realistisch nachbildet, aber einen erheblichen Rechenaufwand erfordert und Vereinfachungen wie das Boxmodell ihre Berechtigung haben,

- » ohne externe Eingriffe Dichteschichtung stabil ist,
- » die Einleitung von ungereinigtem Grubenwasser in den Rhein bei Normalabfluss kaum messbare negative Auswirkungen nach sich zieht und einen kleineren Einfluss hat als Effekte durch die globale Erwärmung,
- » es bereichsweise ein großes Potenzial für die Nutzung der Grubenwassergeothermie gibt, und
- » langfristig oberflächennahes Grundwasser aus den Bergwerken austreten wird.

Im Zusammenhang mit einem potenziellen Ausfall aller Pumpen und Poldermaßnahmen, beispielsweise im Fall einer großräumigen Krise, sind die Auswirkungen geringer als bisher angenommen.

Aus der Bevölkerungsumfrage in den betroffenen Regionen ergibt sich, dass sich die Bürgerinnen und Bürger überwiegend zu wenig informiert fühlen, der RAG AG von allen Beteiligten am ehesten eine Lösung der Probleme zugetraut wird, und dass – entgegen den Erwartungen – der Begriff „Grubenflutung“ geringfügig positiver als „Grubenwasseranstieg“ gesehen wird.

Ausblick

In den zurückliegenden Jahren hat sich das *Forum Bergbau und Wasser* vornehmlich mit den Chancen und Risiken der Grubenflutung befasst.

Aus den erhaltenen Forschungsergebnissen lässt sich ableiten, dass ein möglichst hoher Grubenwasserspiegel aus chemisch-physikalischen Gründen und aus Sicht des Umweltschutzes die optimale Flutungsvariante ist.

Um dieses Ergebnis validieren zu können, vor allem aber um dieses Niveau und die relevanten Steuerungsmaßnahmen festzulegen, wären jeweils lokal relevante Fragen zu klären. Jedes Bergwerk ist für sich individuell; dennoch sind die ablaufenden chemisch-physikalischen Prozesse identisch. Basierend auf den nationalen und vor allem den internationalen Erfahrungen mit Grubenflutungen will das *Forum Bergbau und Wasser* in den kommenden Jahren dazu beitragen, ideale Lösungen für den Nachbergbau der RAG AG zu finden.

Zu klärende Fragen sind, in welchem Niveau sich langfristig eine Schichtung des Grubenwassers einstellen wird, welche Risiken mit der Wasserhaltung in großen Tiefen verbunden sind, welche Wasserqualität in welchem Schichtkörper zu erwarten ist, welche Wasser–Gesteins–Wechselwirkungen stattfinden, mit welchen Wasserqualitäten an den Übertrittstellen in die Anthroposphäre zu rechnen ist sowie der temporäre Verlauf der Erstspülung („first flush“). Mögliche, zusätzliche Projekte sollten sich mit den Fragekomplexen Bodenbewegung und Ausgasung in Abhängigkeit vom Grubenwasserstand, Monitoring- und Steuermaßnahmen für kontrollierten Grubenwasseranstieg auf höchstmögliches Niveau sowie den Ökobilanzen verschiedener Grubenwasserniveaus befassen.

Um dieses zu untersuchen, wären beispielsweise Messungen der für die Langzeitstabilität relevanten Dichteschichtung an gefluteten Bergwerken und analoge sowie numerische Modellierungen an Analogmodellen nötig. Ziel dabei ist es, die vorher getroffenen Aussagen bestätigen zu können. Auch Markierungsversuche, beispielsweise im Bergwerksbereich Friedlicher Nachbar, könnten dazu dienen, künftige Entwicklungen in Ibbenbüren, Ruhr und Saar zu prognostizieren oder Abschätzungen zur Einzugsgebietsanalyse der zuströmenden Grubenwässer erarbeiten zu können. Eine bislang nicht detailliert untersuchte Frage ist die nach einer möglichen stofflichen Nutzung von Grubenwasser. Diese ließe sich auf der Basis vorliegender hydrochemischer Ergebnisse und internationaler Forschungsprojekte evaluieren.

Zusammengefasst will das *Forum Bergbau und Wasser* in den kommenden drei Jahren unterstützen, ein holistisches Systemverständnis der Grubenflutungen in Ibbenbüren, im Ruhrgebiet und im Saarland zu erreichen.

Dieses soll auf den Forschungen des *Forum Bergbau und Wasser* aufbauen und im Bürgerdialog auch der breiten Öffentlichkeit vermitteln werden.

Für diese Aufgabe hat die Stifterin, die *RAG AG*, dem *Forum Bergbau und Wasser* drei weitere Förderjahre mit einer Fördersumme von insgesamt 1 Million Euro bewilligt. Damit möchte es – im weitesten Sinne – einen „Masterplan für Grubenflutungen“ erstellen, in dem die Gestaltung von Grubenflutungen bis zum höchstmöglichen Niveau wissenschaftlich fundiert erklärt wird.