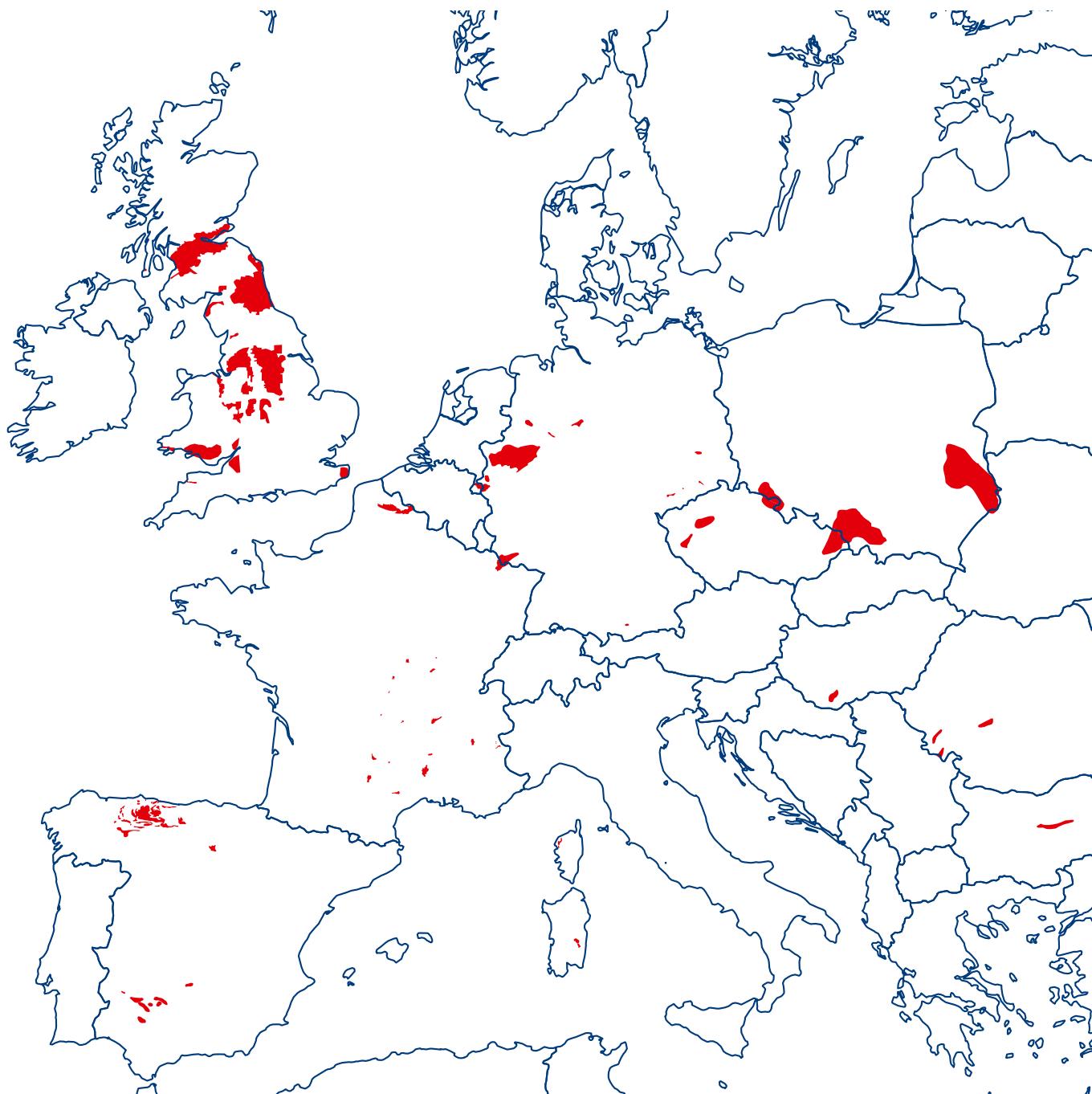




Evaluierung von Grubenwasseranstiegs- prozessen

Christian Melchers, Sebastian Westermann, Bastian Reker





Projektbericht

Evaluierung von Grubenwasseranstiegs- prozessen

im Ruhrgebiet, Saarland, in Ibbenbüren sowie
weiteren deutschen Steinkohlenrevieren und
dem angrenzenden europäischen Ausland

Prof. Dr. rer. nat. Christian Melchers
M.Sc. Sebastian Westermann
Dr. rer. nat. Bastian Reker

Technische Hochschule Georg Agricola,
Forschungszentrum Nachbergbau,
Herner Str. 45, 44787 Bochum

unter Mitwirkung von
Herrn Prof. Dr. rer. nat. Wilhelm Georg Coldewey,
Prof. Dr. Coldewey GmbH, Sperberweg 1, 48249 Dülmen
Herrn Dr.-Ing. Michael Eckart,
DMT GmbH & Co. KG, Am TÜV 1, 45307 Essen
Herrn Dipl.-Math. Holger Kories,
DMT GmbH & Co. KG, Am TÜV 1, 45307 Essen
Herrn Prof. Dr.-Ing. Dmitry V. Rudakov,
Dnipro University of Technology,
D. Yavornytskyi Avenue 19, 49005, Dnipro (Ukraine)
Herrn Dipl.-Geol. Peter Rüterkamp,
DMT GmbH & Co. KG, Am TÜV 1, 45307 Essen
Herrn Prof. Dr. rer. nat. Christian Wolkersdorfer,
Tshwane University of Technology,
SARChI Chair for Acid Mine Drainage Treatment,
Staatsartillerie Road, 0001 Pretoria (Südafrika)

Berichte zum Nachbergbau Heft 1

Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums Bochum 2019

Impressum

Berichte zum Nachbergbau

Herausgeber

Prof. Dr. rer. nat. Christian Melchers
Forschungszentrum Nachbergbau,
Technische Hochschule Georg Agricola Bochum

Anschrift

Technische Hochschule
Georg Agricola
Herner Straße 45
44787 Bochum

Dieses Werk ist urheberrechtlich
geschützt. Alle Rechte vorbehalten.

© Selbstverlag des Deutschen
Bergbau-Museums Bochum 2019

Gestaltung

wedeldesign, Bochum

Druck

Buch- und Offsetdruckerei Häuser KG, Köln

ISBN-10 3-937203-87-7

ISSN-13 978-3-937203-87-4

Die Technische Hochschule Georg
Agricola (THGA) ist eine staatlich
anerkannte Hochschule der DMT-
Gesellschaft für Lehre und Bildung
mbH, Bochum (Trägerin). Sie wird
durch den Präsidenten vertreten.

Inhalt

Danksagung	6
Vorwort	7
1. Einführung	8
1.1. Motivation und Zielsetzung	11
1.2. Grubenwasserkonzepte der RAG AG an Ruhr, Saar und in Ibbenbüren.....	12
2. Prozessbeschreibung des Grubenwasseranstiegs	18
2.1. Hydraulik	20
2.1.1. Beschreibung des Grubenwasseranstiegsverlaufs.....	20
2.1.2. Wasserströmung im Grubengebäude.....	22
2.1.3. Einflussfaktoren auf die Hydrodynamik eines Grubenwasseranstiegs.....	23
2.2. Bodenbewegung.....	34
2.3. Ausgasung.....	36
2.4. Grubenwasserchemie	39
2.5. Dichteschichtung.....	44
3. Grubenwassermanagement in europäischen Steinkohlenrevieren	46
3.1. Deutschland.....	54
3.1.1. Ruhr-Revier.....	55
3.1.2. Ibbenbüren	61
3.1.3. Aachen, Erkelenz und Südlimburg	64
3.1.4. Döhlen-Becken.....	67
3.2. Großbritannien.....	70
3.2.1. Yorkshire	71
3.2.2. Durham.....	73
3.2.3. East Fife	77
3.3. Frankreich: Lothringen und Warndt	82
3.4. Spanien: Asturien.....	88
4. Erfahrungen und Erkenntnisse.....	92
5. Zusammenfassende Bewertung	100
6. Schlagwortverzeichnis	104
7. Literaturverzeichnis.....	110
8. Publikationen	126

Begriffe, die im Schlagwortverzeichnis (Kapitel 6) definiert werden, sind im Text *kursiv* geschrieben. Die Markierung erfolgt jeweils an der Stelle, an der die Begriffe zuerst im Text verwendet werden.

Weiterführende themenbezogene Informationen werden in den Infoboxen genannt. Diese Infoboxen sind mit dem Symbol  versehen.

Danksagung

Den nachfolgend genannten Personen und Unternehmen gilt für die konstruktive und fachliche Diskussion ein ausdrücklicher Dank:

Herr Dr. Marwan Al Heib, INERIS Ecole des Mines de Nancy, Nancy, Frankreich

Herr A. d. M. Dr.-Ing. Volker Baglikow, VBHG, Herten

Frau Isabelle Balzer, RAG AG, Essen

Herr David Banks, Holymoor Consultancy Ltd., Chesterfield, Großbritannien

Herr Dr. Sean Burke, British Geological Survey, Keyworth, Großbritannien

Herr Prof. Dr. Francisco Javier de Cos Juez, Universität Oviedo, Oviedo, Spanien

Herr Antek Czapnik, Centralny Zakład Odwadniania Kopalń, Czeladź, Polen

Herr A. d. M. Dr.-Ing. Michael Drobniowski, RAG AG, Essen

Herr Pedro Riesgo Fernández, Universität Oviedo, Oviedo, Spanien

Herr Dr.-Ing. Lukasz Gawor, Silesian University of Technology Gliwice, Gleiwitz, Polen

Herr Erwin Goczoll (†)

Herr Dr. Luis Manuel Lara Gómez, Universität Oviedo, Oviedo, Spanien

Herr A. d. M. Dipl.-Ing. Stefan Hager, RAG AG, Essen

Herr Dr.-Ing. Michael Heitfeld, Ingenieurbüro Heitfeld-Schetelig, Aachen

Herr Nicolas Koeberlé, BRGM, Unité Territoriale Après Mine Est, Freyming-Merlebach, Frankreich

Herr Dipl.-Ing. Joachim Löchte, RAG AG, Essen

Herr A. d. M. Dipl.-Ing. Hermann Mühlenbeck

Frau Dr. Barbara Palumbo, British Geological Survey, Keyworth, Großbritannien

Herr Prof. Dr. Marek Pozzi, Silesian University of Technology Gliwice, Gleiwitz, Polen

Frau Prof. Dr. Nada Rapantova, VŠB Technical University of Ostrava, Ostrava, Tschechien

Herr Dietmar Renner, Wismut GmbH, Königstein

Herr Dr. Peter Rosner, Ingenieurbüro Heitfeld-Schetelig, Aachen

Herr Dr. Chris Satterley, Coal Authority, Mansfield, Großbritannien

Herr A. d. M. Dr. mont. Axel Schäfer, RAG AG, Saarbrücken

Herr A. d. M. Dipl.-Ing. Sönke Thomsen, RAG AG, Essen

Herr Dr. Ian Watson, Coal Authority, Mansfield, Großbritannien

Herr A. d. M. Dipl.-Ing. Carsten Wedekind, Wismut GmbH, Königstein

Ein besonderer Dank gilt der RAG-Stiftung für die Bereitschaft, diesen wichtigen Themenkomplex aufzubereiten, und für die finanzielle Förderung des Projekts.

Vorwort

„Erfahrung ist der Lehrer aller Dinge“

Gaius Julius Caesar



Der Bergbau beruht seit alters her auf Erfahrungen. Der Begriff „Bergbaukunde“ belegt dies zutreffend. Auch für den Nachbergbau sind Erfahrungen von größter Bedeutung. Dies gilt im Besonderen für das Grubenwassermanagement in den Revieren an Ruhr, Saar und in Ibbenbüren.

Die zentrale Aufgabe der vorliegenden Arbeit bestand daher in der Evaluierung erfolgter Grubenwasseranstiegsprozesse in europäischen Steinkohlenrevieren. Dazu haben die Autoren in den vergangenen drei Jahren verfügbare Daten zusammengetragen, ausgewertet und bewertet. Zudem wurden ausgewählte Steinkohlenreviere befahren. Durch diese Befahrungen wurde ein vertieftes Verständnis der regionalen Gegebenheiten erworben. Der Austausch mit den jeweiligen Entscheidungs- und Verantwortungsträgern lieferte wertvolle Hinweise zu den gemachten Erfahrungen und den nachbergbaulichen Wirkungszusammenhängen.

Die dezidierte Analyse des Grubenwasseranstiegsprozesses ist zudem

ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit. Der Prozess als solcher wird veranschaulicht und die kausalen Wirkungszusammenhänge aufgezeigt. Gleiches gilt für die grundlegenden hydrochemischen Prozesse im Grubenwasser. Zum generellen Verständnis werden wichtige Begrifflichkeiten erklärt und definiert. Dies gilt im Besonderen für die zentralen Begriffe „Grundwasser“, „Grubenwasser“ und „Trinkwasser“ sowie für die prozessbeschreibenden Begriffe „Grubenwasseranstieg“ und „Flutung“.

Nach langjährigem Steinkohlenbergbau an Ruhr, Saar und in Ibbenbüren besteht nun die historische Chance, in den Revieren einen Wasserhaushalt zu etablieren, der sich weitestgehend selbst reguliert. Im Hinblick auf zukünftige Generationen besteht nicht nur die Aufgabe, sondern die Verpflichtung, diesen Prozess sowohl unter ökologischen als auch unter ökonomischen Gesichtspunkten nachhaltig zu gestalten.

Da es bekanntlich nicht die Dinge sind, die die Menschen beunruhigen, sondern die Meinungen, die sie von

den Dingen haben, soll diese Arbeit auch dazu beitragen, den öffentlichen Diskurs an belegbaren Fakten auszurichten.

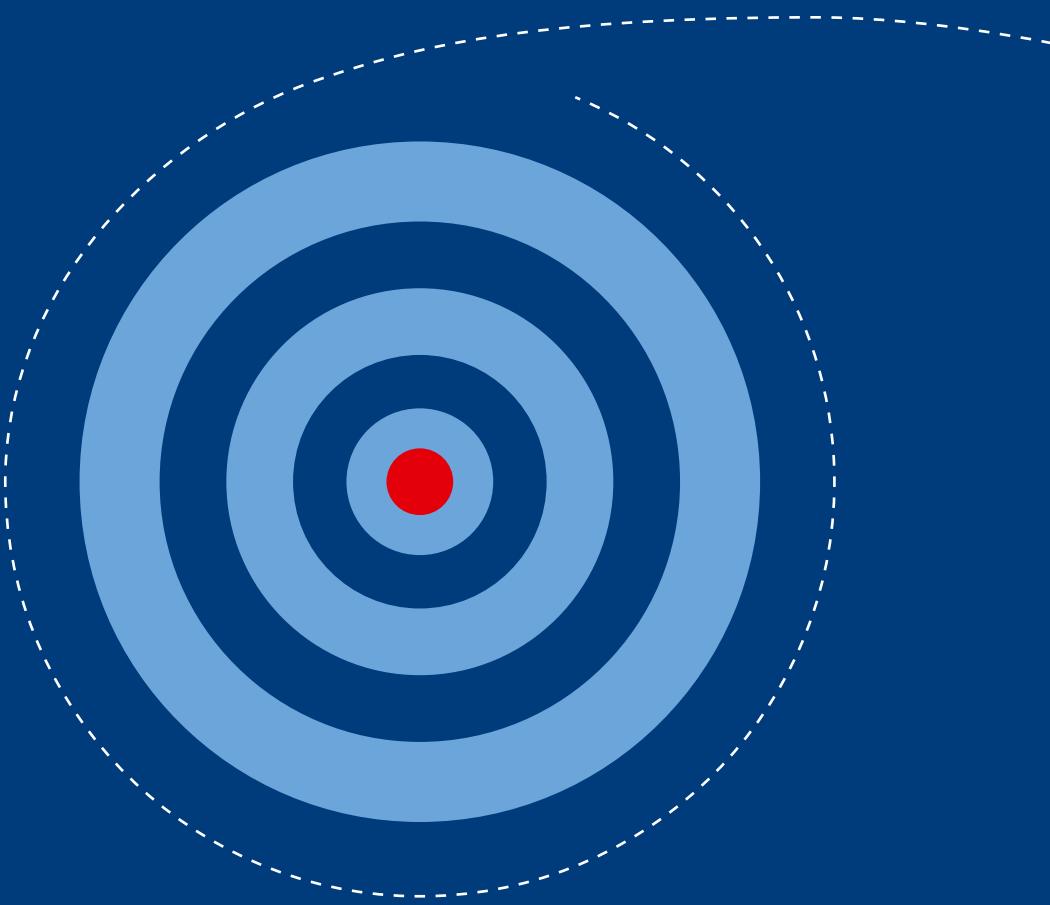
Ein besonderer Dank gilt all denjenigen, die durch ihre vielfältige Mitwirkung zum Gelingen dieses Projektes beigetragen haben. Vor allem gilt dieser Dank der RAG-Stiftung, die auf Grundlage ihres Engagements in den Bereichen Bildung, Wissenschaft und Kultur dieses Projekt maßgeblich gefördert hat. In Persona gilt dieser Dank Frau Bärbel Bergerhoff-Wodopia und Herrn Michael Kalthoff.

Für das Forschungszentrum
Nachbergbau

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "G. Melchers".

Prof. Dr. rer. nat. Christian Melchers

1. Einführung





Nachbergbau

Unter Nachbergbau ist die Gesamtheit aller Prozesse und Aufgaben nach Beendigung der Rohstoffgewinnung zu verstehen. Dazu zählt neben den unmittelbaren Aufgaben der Sicherung und Sanierung von bergbaulichen Hinterlassenschaften auch das langfristige und nachhaltige Management der *Lagerstätten* und der in Anspruch genommenen Flächen.

Klassische Themenfelder sind zudem das Risikomanagement im Altbergbau sowie die Renaturierung und Rekultivierung bergbaulicher Flächen. Wesentliche Aufgaben im Nachbergbau sind neben dem Grund- und Grubenwassermanagement im Stein- und Braunkohlenbergbau auch der Rückbau und die Verfüllung von montanen Erkundungs- und Förderbohrungen sowie die Verwahrung von Standorten der Öl- und Gasindustrie. Dazu zählt auch das Geomonitoring postmontaner Prozesse und Wirkungszusammenhänge. Die Grundlagen dafür liefert ein umfassendes Daten-, Informations- und Wissensmanagement.

Zentrale Aufgaben im Nachbergbau sind ebenso die Gestaltung und Begleitung der Veränderung montaner Strukturen und die Aktivierung in Hinblick auf Zukunftspotenziale.

Für die zukünftige Rohstoffgewinnung sind Aspekte des Nachbergbaus bereits während der Planung der Rohstoffgewinnung zu berücksichtigen, um die Beendigung unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten zu optimieren.

Wassertypen

Um Unklarheiten und mögliche Verwechslungen von Begriffen zu vermeiden, werden im Folgenden die Unterschiede zwischen „Grundwasser“, „Grubenwasser“, „Trinkwasser“ und „Abwasser“ aufgezeigt (COLDEWEY et al. 2017).

Grundwasser

In Abhängigkeit der Bildungsbedingungen, ihres Vorkommens und ihrer Migrationswege werden verschiedene Wassertypen in der Erdkruste unterschieden. Der Begriff „Grundwasser“ wird gemäß der DIN 4049-3 (1994) als „unterirdisches Wasser, das Hohlräume der Lithosphäre zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegungsmöglichkeit ausschließlich durch die Schwerkraft bestimmt wird“, definiert. Unter dem Begriff „Tiefes Grundwasser“ bzw. „Tiefenwasser“ wird „Grundwasser tiefer gelegener Grundwasserleiter, das infolge einer langen Aufenthaltszeit meist durch eine hohe Mineralisation und reduzierenden Eigenschaften gekennzeichnet ist und nur in geringem Maße am Wasserkreislauf teilnimmt“, verstanden (DIN 4049-3 1994). Im vorliegenden Bericht wird der Begriff „Tiefenwasser“ verwendet.

Grubenwasser

Weder in deutschen Normen noch in wasser- oder bergrechtlichen Gesetzgebungen ist der Begriff „Grubenwasser“ einvernehmlich definiert. Der Arbeitskreis Grubenwasser in der Fachsektion Hydrogeologie e. V. in der DGGV e. V. hat den Begriff „Grubenwasser“ wie folgt definiert: „Grubenwasser ist alles Wasser, das mit Tief- und Tagebauen in Kontakt steht oder stand. Dabei handelt es sich überwiegend um natürliches Wasser in Form von Sicker- und Grundwasser.“ Weiter heißt es: „Sogenanntes Tageswasser kann z. B. durch Niederschläge und Vorfluter bei fehlendem Deckgebirge unmittelbar in die Grubenbaue eindringen. Wasser aus dem Deckgebirge kann durch Poren-, Trennfugen- und Karsthohlräume sowie durch anthropogene Tagesöffnungen, z. B. durch Schächte, in die Grubenbaue eindringen. Tiefenwasser mit z. T. hoher Mineralisation (Sole) kann den Grubenbauen aus dem angrenzenden und liegenden (Liegende) Gebirgskörper zufließen“. Die Definition beinhaltet keine Aussage zur Grubenwasserbeschaffenheit, da diese in Abhängigkeit von der Genese des Grubenwassers und der jeweils zu betrachtenden Lithologie stark unterschiedlich ist.

Trinkwasser

Nach DIN 4046 (1983) gilt als Trinkwasser ein „für menschlichen Genuss und Gebrauch geeignetes Wasser mit Güteeigenschaften nach den geltenden gesetzlichen Bestimmungen sowie nach DIN 2000 (2017), DIN 2001-1 (2019), DIN 2001-2 (2018) und DIN 2001-3 (2015)“.

Abwasser

Gemäß § 54 Absatz 1 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) handelt es sich bei Abwasser um ein „durch häuslichen, gewerblichen, landwirtschaftlichen oder sonstigen Gebrauch in seinen Eigenschaften verändertes Wasser und das bei Trockenwetter damit zusammen abfließende Wasser (Schmutzwasser) sowie von Niederschlägen aus dem Bereich von bebauten oder befestigten Flächen gesammelt abfließendes Wasser (Niederschlagswasser).“

1.1.

Motivation und Zielsetzung

Im Jahr 2018 endete der subventionierte Steinkohlenbergbau in Deutschland. Die letzten beiden verbliebenen Steinkohlenbergwerke, das Bergwerk Ibbenbüren im Tecklenburger Land sowie das Bergwerk Prosper Haniel im Ruhrgebiet, wurden geschlossen. Mit dem Ausstieg aus der Steinkohlenproduktion ist geplant, das Grubenwasser in den Revieren an Ruhr, Saar und in Ibbenbüren kontrolliert ansteigen zu lassen. Diese Planung war für das Forschungszentrum Nachbergbau der Technischen Hochschule Georg Agricola Anlass, die im Zusammenhang mit Grubenwasseranstiegen in untertägigen Steinkohlenbergwerken bereits gewonnenen Erfahrungen auszuwerten und zu bewerten. Da europaweit bereits mehrere Steinkohlenreviere stillgelegt wurden und vielerorts der Grubenwasseranstieg bereits abgeschlossen ist, wurde der Blick auf die international gesammelten Erfahrungen erweitert. Die Untersuchungen erfolgten im Rahmen des Forschungsprojekts „Evaluierung von Grubenwasseranstiegsprozessen im Ruhrgebiet, Saarland, in Ibbenbüren sowie weiteren deutschen Steinkohlenrevieren und dem angrenzenden europäischen Ausland“. Die RAG-Stiftung förderte dieses Forschungsprojekt finanziell über einen Zeitraum von drei Jahren.

Während des aktiven Abbaubetriebs von Rohstoffen ist es in den meisten Gebieten unerlässlich, die Wasserzuflüsse in den Abbaubereichen zu regulieren. Ohne entsprechende Wasserhaltungsmaßnahmen behindert Wasser zum einen den Abbau betrieb bzw. macht diesen unmöglich. Zum anderen stellen unkontrollierte Wasserzuflüsse auch ein betriebliches Gefahrenpotenzial

dar. Dementsprechend reicht die Entwicklung der Grubenwasserhaltung ebenso weit zurück, wie die Entwicklung des Rohstoffabbaus selber. In vorindustrieller Zeit wurde das Grubenwasser über Entwässerungsstollen oberhalb des Vorfluterniveaus frei abgeleitet oder mit Muskelkraft zutage gefördert. Mit der Erfindung der Dampfmaschine im 18. Jahrhundert, deren erste Modelle zur *Entwässerung* von Bergwerken entwickelt wurden, standen erstmals Maschinen bereit, die nicht mehr mit Muskelkraft angetrieben werden mussten. Deutlich tiefere Abbaubereiche konnten dadurch erschlossen werden. Mit der weiteren Entwicklung leistungsstärkerer Maschinen wuchs die Nachfrage nach Steinkohle als kostengünstiger Energieträger, sodass der Abbau in immer größere Teufen vorangetrieben werden konnte.

Nach Beendigung des Rohstoffabbaus besteht keine betriebliche Notwendigkeit, das Grubenwasser (siehe Infobox zu „Wassertypen“) abzupumpen. Die Phase des Nachbergbaus (siehe Infobox zu „Nachbergbau“) beginnt. Eine Kernfrage dieser Phase ist, wie in Zukunft mit dem Grubenwasser langfristig umgegangen werden soll. Grundsätzlich ist es sinnvoll, das Grubenwasser kontrolliert ansteigen zu lassen, wobei der Prozess des Grubenwasseranstiegs sowohl mit Vorteilen, aber auch mit Risiken behaftet ist. Diese Vorteile und Risiken werden derzeit innerhalb der verschiedenen Interessengruppen kontrovers diskutiert. Die Vorteile eines Grubenwasseranstiegs (bzw. eines höheren Grubenwasserstands) sind von ökologischer und ökonomischer Natur. Ein wichtiger Aspekt ist die gerin-

gere Belastung der Vorfluter mit Grubenwasser, da sich sowohl die Einleitmenge verringert (quantitative Verbesserung) als auch die hydrochemische Beschaffenheit des Grubenwassers verbessert (qualitative Verbesserung). Grundlagen zu den dabei ablaufenden hydraulischen und chemischen Prozessen werden in den Kapiteln 2.1. und 2.5. erläutert. Einhergehend damit können die Kosten der Grubenwasserhaltung oder -aufbereitung gesenkt werden.

Neben den Vorteilen gibt es auch Risiken, denen jedoch in der Regel mit einem angepassten Grubenwassermanagement begegnet werden kann. Diskutiert werden unter anderem die flutungsbedingten Bodenbewegungen (Grundlagen dazu siehe im Kap. 2.2.), Vernässungserscheinungen an der Tagesoberfläche, Austreten von Gruben-gas (Grundlagen dazu siehe im Kap. 2.3.) und die Beeinträchtigung von Grundwasserleitern durch Grubenwasser.

1.2.

Grubenwasserkonzepte der RAG AG an Ruhr, Saar und in Ibbenbüren

Wasserhaltungsmaßnahmen sind für den Betrieb von Bergwerken zum Schutz der untertägig Beschäftigten notwendig. Da aktive und stillgelegte Bergwerke oftmals über das weitreichende Streckensystem miteinander verbunden sind, ist es auch in einigen stillgelegten Bereichen erforderlich, eine Wasserhaltung zu betreiben, um Wasserübertritte in aktive Bergwerke zu verhindern. Im Rahmen der Stilllegung eines Bergwerks ist eine Fortführung der Wasserhaltung nur durch einen neuen Schutzzweck begründet.

Mit der Beendigung des Steinkohlenbergbaus in den Revieren an Ruhr, Saar und in Ibbenbüren ist die Auf-

rechterhaltung der Wasserhaltung (Grubenwasserhebung) in dem Umfang, der während der aktiven Abbauphase betrieben wurde, jedoch nicht mehr erforderlich. Es ist daher geplant, die Grubenwasserhaltung an die aktuellen Erfordernisse anzupassen. Um eine Wasserhaltung hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit zu optimieren, sollte die langfristige Absenkung möglichst gering gehalten werden, wobei gleichzeitig negative Auswirkungen auf Mensch, Natur oder Infrastruktur ausgeschlossen sein müssen.

Mit dem Beschluss des Erblastenvertrags zwischen den „Kohleländern“ Nordrhein-Westfalen und Saarland

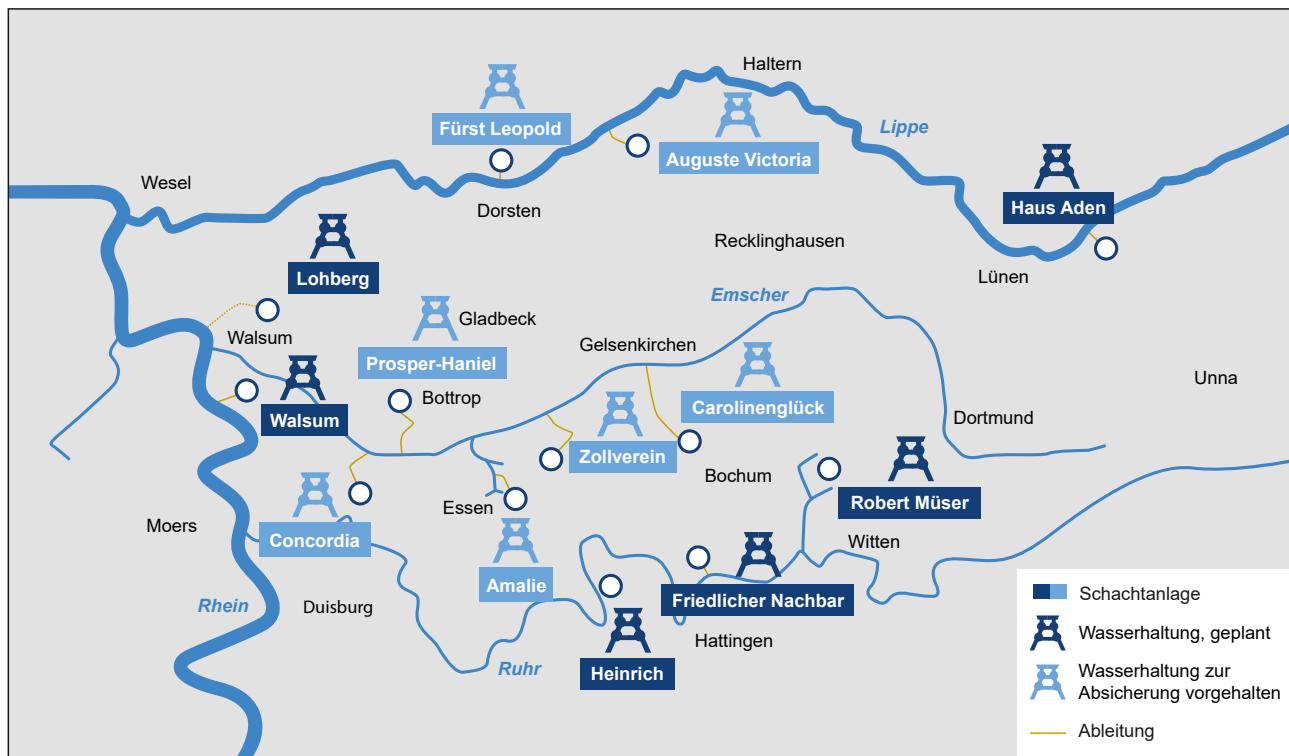


Abb. 1: Übersichtskarte über Grubenwasserkonzepte im Ruhr-Revier, verändert nach RAG AG (2016).

sowie der RAG-Stiftung verpflichtete sich die RAG AG, ein Konzept zur Optimierung der Grubenwasserhaltung zu erarbeiten. Das Konzept soll u. a. zu einer Verbesserung der Wasserqualität in den Oberflächengewässern führen sowie unter Beachtung des Schutzes von Mensch und Umwelt auch die Wirtschaftlichkeit, Sparsamkeit und Effizienz der umzusetzenden Maßnahmen berücksichtigen. Im Jahr 2014 stellte die RAG AG die Grubenwasserkonzepte für die ehemaligen Reviere an Ruhr, Saar und in Ibbenbüren vor (RAG AG 2014a; RAG AG 2014b). Die Maßnahmen sollen stets auf dem aktuellen technischen und naturwissenschaftlichen Kenntnisstand basieren. Als Folge eines Erkenntnisgewinns sind die umzusetzenden Maßnahmen entsprechend zu optimieren. Die Grubenwasserkonzepte beachten folgende Schutzziele:

- Gemeinschaden durch Verunreinigung von Trinkwasservorkommen soll ausgeschlossen werden.
- Gefährdung durch zusätzliche Methangasaustritte soll möglichst vermieden werden.
- Schäden von einem Gewicht durch Hebungen sollen möglichst vermieden werden.
- Gefährdung durch *Tagesbrüche* soll möglichst vermieden werden.

Für das **Ruhr-Revier** sieht das Grubenwasserkonzept der RAG AG bis 2035 einen schrittweisen Teilanstieg des Grubenwasserstands bis zu einem Niveau vor, welches den sicheren Schutz bedeutsamer Trinkwasservorkommen (siehe Infobox zu „Wassertypen“) gewährleistet. Um die Trinkwasservorkommen der Haldener Sande zu schützen, muss nach Einschätzung der RAG AG der Gru-



Abb. 2: Unterwassermotorpumpe am Wasserhaltungsstandort Walsum
(Foto: RAG Aktiengesellschaft, Volker Wiciok).

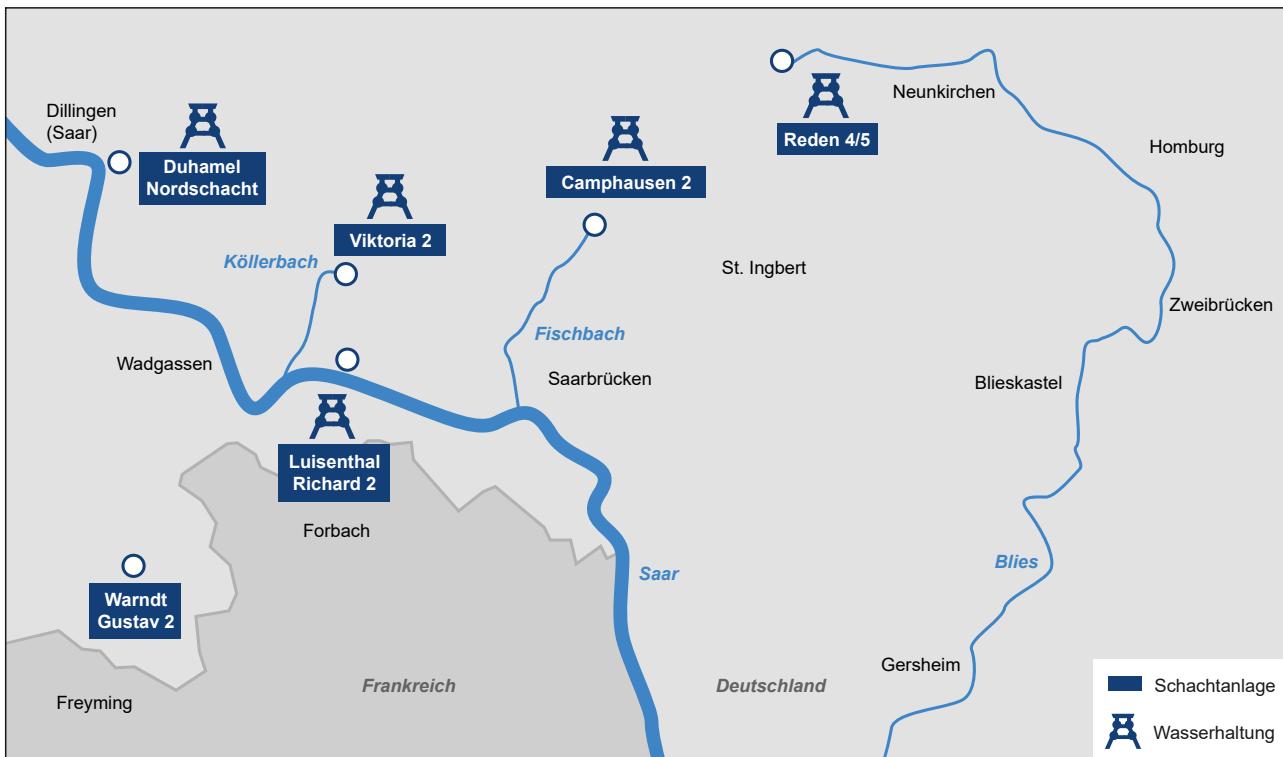


Abb. 3: Übersichtskarte über aktuelle Grubenwasserhaltungsstandorte im Saar-Revier (Stand: 2019), verändert nach RAG AG (2016).

benwasseranstieg auf rund 500 m unterhalb der Tagesoberfläche begrenzt werden (RAG AG 2014a).

Die Anzahl der Wasserhaltungsstandorte („Pumpstandorte“), an denen Pumpen dauerhaft betrieben werden, soll von 13 auf sechs Standorte reduziert werden, wobei diese Zentralisierung voraussetzt, dass das Grubenwasser untertägig den Wasserhaltungsstandorten zufließen kann (dunkelblaue Standorte in Abb. 1). Diese Zentralisierung wird erst durch den Teilanstieg des Grubenwassers ermöglicht. Die Reduzierung der Wasserhaltungsstandorte führt ebenso zu einer Entlastung der Vorfluter, indem künftig kein Grubenwasser in die Emscher eingeleitet und an der Lippe nur noch eine Einleitstelle betrieben werden soll.

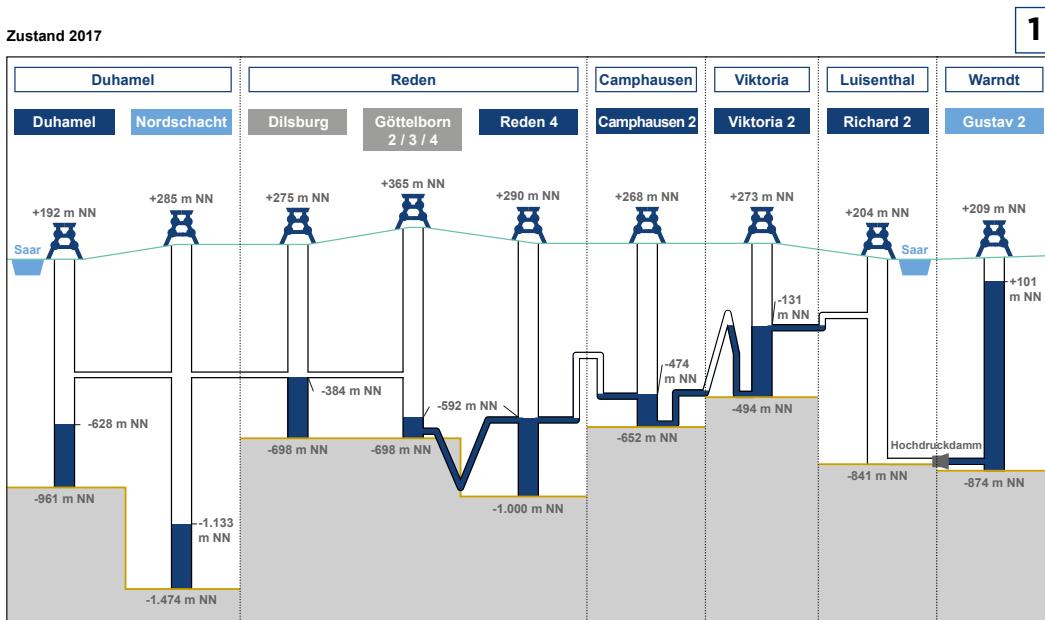
In Zukunft werden die bislang in untertägigen Pumpenkammern betriebenen Kreiselpumpen durch Unterwassermotorpumpen ersetzt, die in die Schächte installiert werden (Abb. 2). An jedem der sechs Wasserhaltungsstandorte werden

zusätzliche Pumpen vorgehalten, wodurch im Falle eines Pumpenausfalls eine Redundanz am jeweiligen Standort gegeben ist. Ein Zugang in das Grubengebäude ist mit dieser Maßnahme nicht mehr erforderlich bzw. auch nicht mehr möglich. Der Einbau, die Wartung und Steuerung der Unterwassermotorpumpen erfolgt zukünftig nur noch von Über Tage.

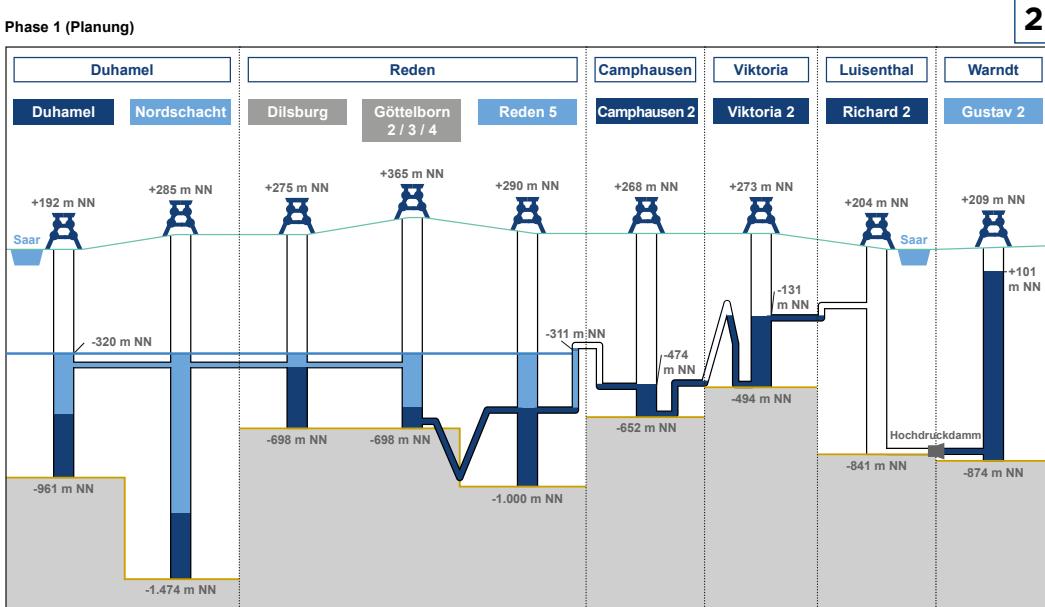
Zur Sicherstellung der Schutzziele werden weitere Standorte (Sicherungsstandorte) beim Rückzug aus dem Grubengebäude so hergerichtet, dass der steuernde Zugriff auf das Grubenwasser erhalten bleibt bzw. wieder hergestellt werden kann (hellblaue Standorte in Abb. 1). Diese können bei Bedarf in Betrieb genommen werden, sollten untertägige Strecken ihre Funktion als Fließwege zur Durchleitung von Grubenwasser im erforderlichen Maße verlieren.

Im **Saar-Revier** (Abb. 3) sieht das Grubenwasserkonzept einen Grubenwasseranstieg in zwei Phasen vor (RAG AG 2014b). In der ersten Phase

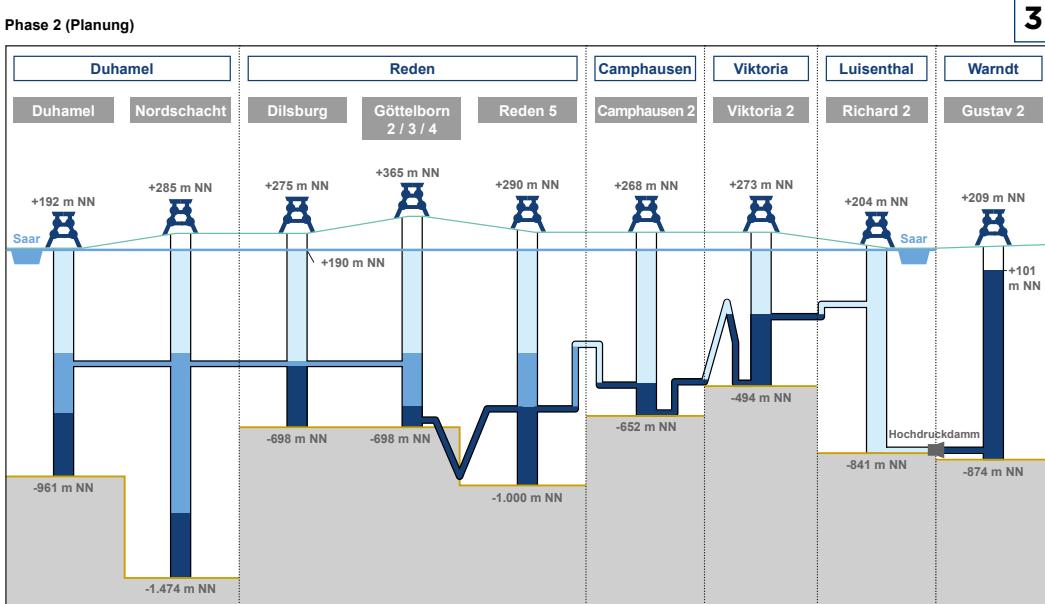
Zustand 2017



Phase 1 (Planung)



Phase 2 (Planung)



1

2

3

Abb. 4: Geplanter phasenweiser Grubenwasseranstieg im Saar-Revier, verändert nach RAG AG (2017).

- (1) Situation im Jahr 2017.
 - (2) Planung der Phase 1.
 - (3) Planung der Phase 2
- (Ableitung in die Saar ohne Einsatz von Pumpen).

Pumpstandort
Lotungsstandort
Standort

soll der Grubenwasserstand zunächst nur in den Wasserprovinzen Duhamel und Reden bis zu einem Niveau von -320 m NN ansteigen und gemeinsam am Standort Duhamel gehoben werden (Abb. 4). Dadurch wird ein Übertritt von Grubenwasser zur Wasserprovinz Camphausen vermieden, da dort nach wie vor eine Grubengasabsaugung und energetische Verwertung stattfindet. Im zweiten Schritt soll der Grubenwasserstand weiter ansteigen und auch die anderen Wasserprovinzen überstauen. Langfristiges Ziel ist es, das Grubenwasser drucklos über einen Stollen am Standort des ehemaligen Bergwerks Duhamel in die Saar abzuleiten. Wie im Ruhrgebiet sollen auch im Saar-Revier die Anzahl der Wasserhaltungsstandorte reduziert und Sicherungsstandorte vorgehalten werden.

Das Grubenwasserkonzept der RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH sieht für das **Bergwerk Ibbenbüren** ebenfalls einen langfristigen Zustand ohne Pumpmaßnahmen vor. Seit Anfang der 1980er Jahre wird der ehemalige Abbaubereich „Westfeld“ über den Dickenberger Stollen in die Ibbenbürener Aa entwässert. Das Grubenwasser des ehemaligen Abbaubereichs „Ostfeld“ soll zukünftig bis zum Niveau einer noch aufzufahrenden Strecke („Grubenwasserkanal“) ansteigen und dann – gemeinsam mit dem Grubenwasser des Abbaubereichs „Westfeld“ – drucklos abgeleitet werden.

Alle vorgenannten, langfristigen Grubenwasserhaltungen sind ein Teil der Ewigkeitsaufgaben (siehe Infobox zu „Ewigkeitsaufgaben“), deren Finanzierung im Rahmen des Vertrages über die Finanzierung der Ewigkeits-

aufgaben des Bergbaus der RAG AG (Innenverhältnis der RAG AG und RAG-Stiftung), dem sogenannten Ewigkeitslastenvertrag sowie dem Erblastenvertrag (Nordrhein-Westfalen und Saarland mit der RAG-Stiftung), geregelt ist. Mit diesen Verträgen verpflichtet sich die RAG-Stiftung, ab dem Jahr 2019 die Finanzierung der Ewigkeitsaufgaben zu übernehmen. Sollte das Vermögen der RAG-Stiftung nicht ausreichen, verpflichten sich die „Kohleländer“ Nordrhein-Westfalen und Saarland, die Finanzierung anteilig zu übernehmen. In diesem Fall regelt das Steinkohlenfinanzierungsgesetz eine Beteiligung durch den Bund.



Ewigkeitsaufgaben

Die RAG-Stiftung übernimmt seit Januar 2019 die Finanzierung der Ewigkeitsaufgaben. Das sind die Grubenwasserhaltung, die *Poldermaßnahmen* und die Grundwasserreinigung. Im Jahr 2006 hat die Wirtschaftsprüfungsgesellschaft KPMG ein Gutachten erstellt, in dem die finanziellen Lasten geschätzt und bewertet werden, die für die Bewältigung der aus den bergbaulichen Tätigkeiten resultierenden Konsequenzen erforderlich werden. In dieser Bewertung wurden die Kosten im Jahr 2006 mit 220 Mio. € pro Jahr kalkuliert.

Für die langfristige und umweltverträgliche **Grubenwasserhaltung** fällt der größte Anteil mit über 60 % der Gesamtkosten an (Abb. 5; RAG-STIFTUNG 2018). Nach Beendigung der Produktionsphase steigt das Grubenwasser

bis zu einem Niveau, das einen hinreichenden Abstand zu Trinkwasservorkommen gewährleistet (RAG AG 2016). Dadurch wird ein Kontakt mit dem Grundwasser sicher verhindert.

Die **Poldermaßnahmen** im Ruhrgebiet regulieren das Grund- und Oberflächenwasser in Bereichen, deren Topographie sich durch den Bergbau in den vergangenen 150 Jahren veränderte (RAG AG 2016). Um Vernässungen in den abflusslosen Bergsenkungsgebieten des Ruhrgebiets zu vermeiden, betreiben die Wasserwirtschaftsverbände (Emschergenossenschaft [EG], Lippeverband [LV] und Linksrheinische Entwässerungsgenossenschaft [LINEG]) und die RAG AG Pumpwerke, die dieses Wasser heben und in die Vorfluter leiten.

Auf ehemaligen Bergbauflächen, meist Kokereien, werden Verunreinigungen in den Böden und deren Auswaschungen in das Grundwasser beseitigt (**Grundwasserreinigung**; RAG AG 2016). Dadurch wird die Ausbreitung der Schadstoffe unterbunden. Dafür fällt der geringste Anteil der Ewigkeitsaufgaben an.

Die Schäden an der Infrastruktur (**Bergschäden**), die auf die bergbaulichen Aktivitäten zurückzuführen sind, die Sanierung und Sicherung von Schächten, der Rückbau von Betriebsanlagen sowie die Pensionsverpflichtungen sind nicht Teil der Ewigkeitsaufgaben (RAG AG 2016). Die Regulierung (Bergschäden) und Finanzierung erfolgt weiterhin durch die RAG AG.

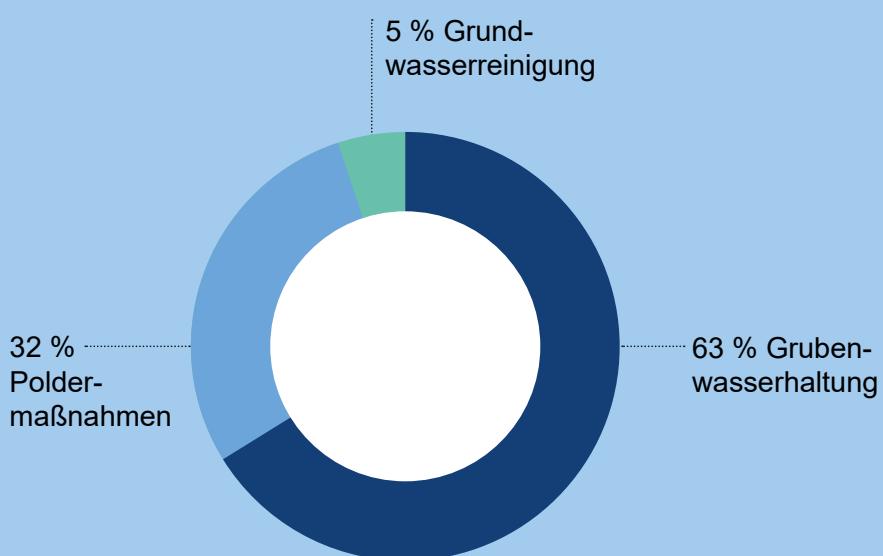
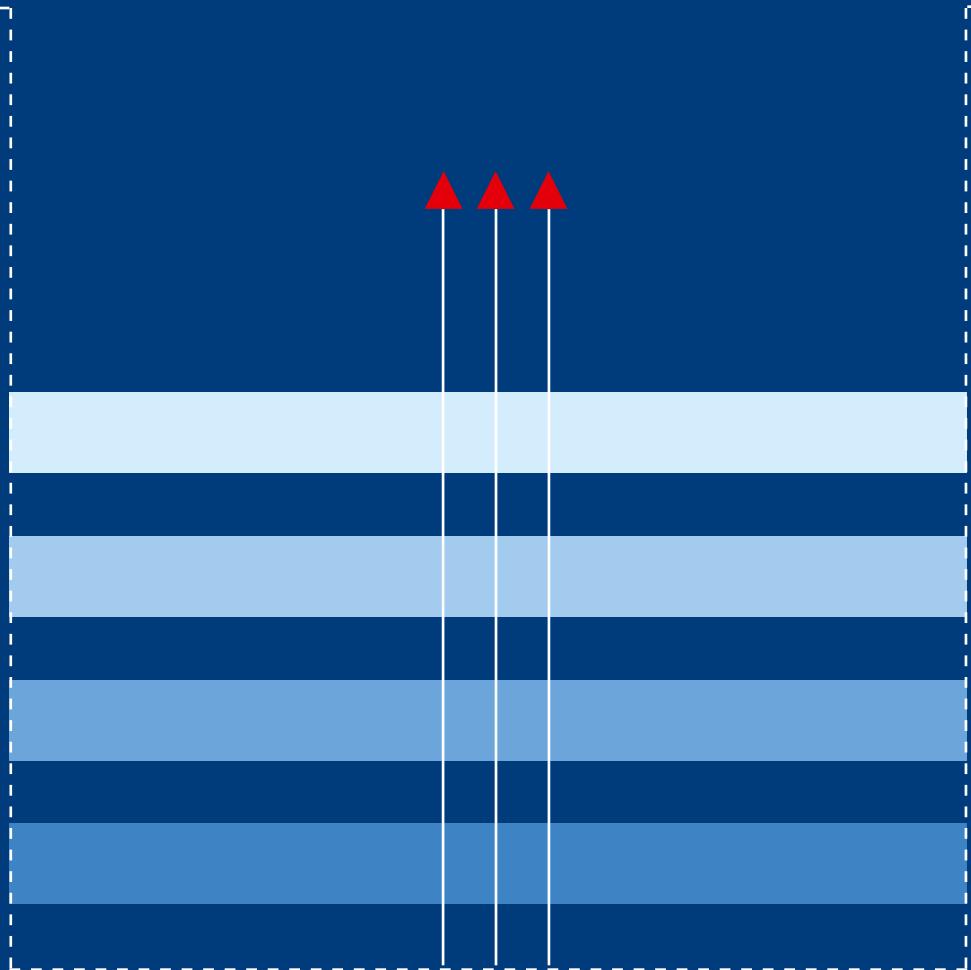
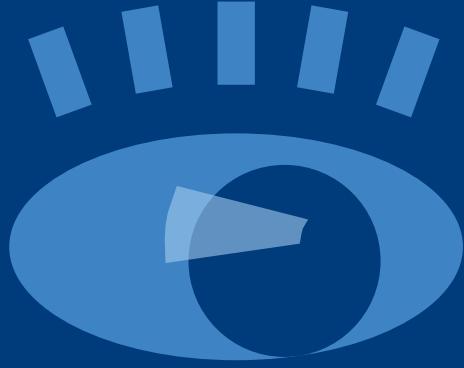


Abb. 5: Kostenaufteilung für die Ewigkeitsaufgaben, verändert nach RAG-STIFTUNG (2018).

2. Prozess- beschreibung des Grubenwasser- anstiegs



2.1.

Hydraulik

Grubenwasseranstieg

Da eine mögliche Verwechslungsgefahr bei den Begriffen Grubenwasseranstieg und Flutung besteht, werden im Folgenden die Definitionen beider Begriffe in Anlehnung an das Glossar Bergmännische Wasserwirtschaft (COLDEWEY et al. 2017) vorgestellt.

Grubenwasseranstieg

Der Begriff „Grubenwasseranstieg“ beschreibt den Anstieg des Wasserspiegels im Grubengebäude, der aus der Reduzierung oder Einstellung der Wasserhaltung (passive Flutung, Eigenflutung, Eigenwasseraufgang) oder durch Zuführung von Wasser (aktive Flutung, Fremdflutung) resultiert.

Flutung

Unter dem Begriff „Flutung“ wird allgemein der Prozess des Grubenwasseranstiegs im Tage- und Tiefbau, z. B. zur Erhöhung der geotechnischen Sicherheit, verstanden. Dieser beinhaltet die passive Flutung, d. h. der natürliche Grubenwasseranstieg nach Einstellung oder Reduzierung der Wasserhaltung, sowie die aktive Flutung, bei der der Grubenwasseranstieg durch Zuführung von Wässern beschleunigt oder die Wasserqualität verbessert wird.

Eine aktive Flutung wurde im deutschen Steinkohlenbergbau bislang nicht durchgeführt und ist eher im Braunkohletagebau aus sicherheitstechnischen Gründen üblich. Im vorliegenden Bericht wird einheitlich der Begriff „Grubenwasseranstieg“ verwendet, da dieser Begriff den Prozess als solchen zutreffend beschreibt.

Im Zuge eines Grubenwasseranstiegs (siehe Infobox zu „Grubenwasseranstieg“) steigt der Grubenwasserstand in einem untertägigen Grubengebäude an. Wird ein Bergwerk planmäßig stillgelegt, erfolgt mit der Außerbetriebnahme oder Reduzierung der Wasserhaltung der Grubenwasseranstieg kontrolliert. Dieser kann durch die Zuführung von Wasser beschleunigt werden. Neben geplanten Grubenwasseranstiegen können auch andere Ereignisse einen Grubenwasseranstieg verursachen. Wassereintrübe aus benachbarten Grubenbereichen, z. B. infolge zu gering dimensionierter Sicherheitsabstände (z. B. Großbritannien; JOB 1987a; JOB 1987b; VUTUKURI & SINGH 1995), Infiltration von Oberflächenwasser aus Vorflutern infolge tagesnahen Abbaus (z. B. Spanien; ORDÓÑEZ et al. 2012; Kap. 3.4.) oder Ausfall der Wasserhaltung durch höhere Gewalt, können dazu führen, dass das

Grubenwasser ansteigt. Liegen diese Ursachen für den Grubenwasseranstieg zugrunde, so erfolgt der Grubenwasseranstieg möglicherweise unkontrolliert (WOLKERSDORFER 1996).

In den nachfolgenden Abschnitten werden die im Zuge eines Grubenwasseranstiegs ablaufenden Prozesse und die einflussnehmenden Faktoren näher beschrieben.

2.1.1.

Beschreibung des Grubenwasseranstiegsverlaufs

Eine Auswertung abgeschlossener Grubenwasseranstiege in europäischen Steinkohlenrevieren ergibt ein Bild variierender Verläufe (Abb. 7). Der Grund dafür ist die Komplexität der Bergwerke hinsichtlich der

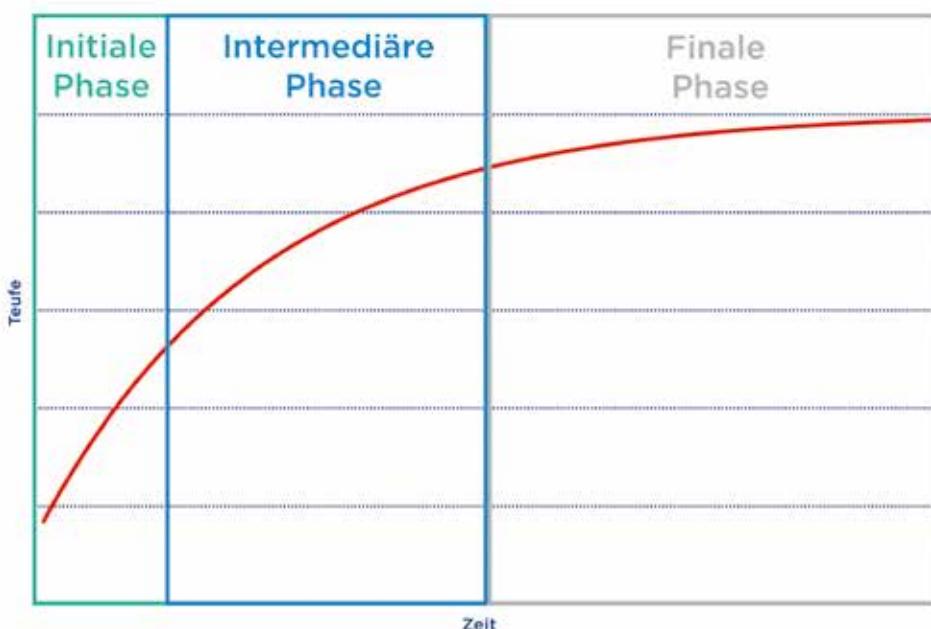


Abb. 6: Idealisierte Kurve eines Grubenwasseranstiegs mit Phaseneinteilung.

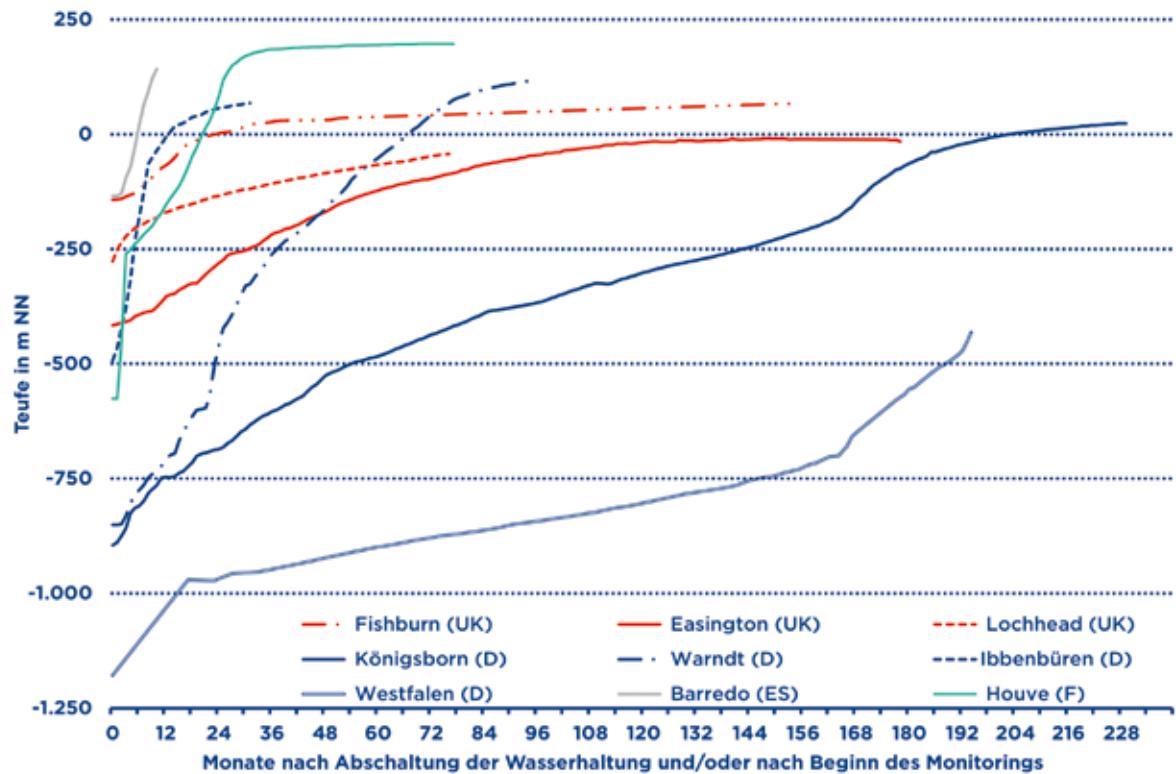


Abb. 7: Initiale Grubenwasseranstiege in europäischen Steinkohlenrevieren.

Geometrie ihres Grubengebäudes und den standortspezifischen hydrogeologischen Eigenschaften des umgebenden Gebirges. Im Zuge des Grubenwasseranstiegs in einem untertägigen Bergwerk spielt eine Vielzahl an hydrodynamischen Prozessen eine Rolle. Diese wiederum werden durch natürliche (vor allem hydrogeologische) und anthropogene (vor allem bergbauliche) Faktoren maßgeblich beeinflusst (FERNANDEZ-RUBIO 1979; WESTERMANN et al. 2018). Die Analyse einer Vielzahl von Grubenwasseranstiegen zeigt allerdings, dass oftmals eine grundsätzliche Einteilung des Grubenwasseranstiegs in eine initiale, intermediäre und finale Phase vorgenommen werden kann (Abb. 6).

Initiale Phase

(Türkis-farbiger Bereich in Abb. 6)

In der Betriebsphase eines Bergwerks werden die Bereiche unterhalb der tiefsten Sohle (*Unterwerksbau*) durch eine Vielzahl von temporären und dezentralen Wasserhaltungen (ggf. auch nur vereinzelte Pumpen) trocken gehalten. Da der Unter-

werksbau genehmigungsrechtlich räumlich oftmals eng begrenzt ist, steht dort in der Regel nur ein geringes flutbares Hohlraumvolumen zur Verfügung, welches nach Außerbetriebnahme der Wasserhaltung oder Reduzierung der Förderrate zunächst überstaut wird (WOLKERS-DORFER 2008; ROSNER 2011). Diese Anstiegsphase ist bedingt durch den Rückbau der dezentralen Wasserhaltungen nicht steuerbar. Da die geringe Wassersäule zu Beginn des Grubenwasseranstiegs nur einen geringfügig wirkenden hydrostatischen Gegendruck auf die Zuflusspunkte bewirkt, sind die Zuflussraten von Tiefenwasser zu Beginn des Grubenwasseranstiegs erhöht. Bedingt durch die Kombination aus geringem flutbarem Hohlraumvolumen und erhöhter Zuflussrate zeigen die Grubenwasseranstiege in der Anfangsphase die höchsten Anstiegsgeschwindigkeiten, die je nach lokaler Geometrie der Grubenbaue oftmals mehrere 100 m/a betragen können (Abb. 7). Der schnelle initiale Anstieg dauert bis zum Erreichen der tiefsten Übertrittsstelle an.

Intermediäre Phase

(blauer Bereich in Abb. 6)

Mit Erreichen der tiefsten Übertrittsstelle erfolgt ein lateral gerichteter Abfluss entlang der Strecken in Richtung der zentralen Wasserhaltung. Mit fortschreitendem Grubenwasseranstieg werden die *Hauptabbausohlen* eingestaut. Das durch den Rohstoffabbau geschaffene Hohlraumvolumen ist in diesem Bereich oftmals größer. Die Zuläufe von Tiefenwasser werden mit ansteigendem Grubenwasser sukzessive *hydraulisch überstaут* und somit „abgedrückt“, so dass der Gesamzufluss in das Grubengebäude abnimmt und sich die Anstiegsgeschwindigkeit verringert.

Während des Grubenwasseranstiegs überwiegen die Strömungen in den Schächten und Strecken; die Strömungen in das Gebirge (Sättigung) sind untergeordnet und zeitverzögert (ROSNER 2011; DENNEBORG et al. 2017). Die Anstiegsgeschwindigkeiten betragen in der Regel weniger als 100 m/a (Abb. 7). Erreicht die Grubenwasser(druck)fläche den

nicht durchbauten Bereich bzw. die Basis eines schwach durchlässigen Deckgebirges, nehmen die Anstiegs geschwindigkeiten im Grubengebäude aufgrund des geringen flutbaren Hohlraumes wieder deutlich zu. Eine solche Zunahme der Grubenwas seranstiegsgeschwindigkeit infolge des *Einstaus* eines schwach durchlässigen Deckgebirges dokumentiert z. B. der Grubenwasseranstieg im Bergwerk Königsborn (Ruhrgebiet [Deutschland]; Abb. 30 in Kap. 3.1.1.). Wird hingegen ein Deckgebirge mit erhöhter Durchlässigkeit eingestaут (z. B. Buntsandstein in Lothringen [Frankreich]; Abb. 7 und Abb. 54 in Kap. 3.3.), so reduziert sich die Anstiegsgeschwindigkeit des Grubenwassers und die Anstiegskurve flacht ab.

Finale Phase

(grauer Bereich in Abb. 6)

Der Grubenwasseranstieg ist beendet, sobald das Niveau des tiefsten Entwässerungsstollens erreicht wird oder der Ab- und Zufluss von Was ser in einem hydraulischen Gleich gewicht stehen. Es liegen dann quasistationäre Strömungszustände vor.

Sollte das Niveau des hydraulischen Gleichgewichts in der Nähe der Tagesoberfläche (oder auch darüber; dann artesisch gespannte Druckverhältnisse) liegen, so sind Vernässungserscheinungen an der Tagesoberfläche nicht auszuschließen. Dafür sind beispielsweise die Grubenwasseranstiege in den Bergwerken im Döhlen-Becken bei Dresden-Gittersee (Deutschland; Kap. 3.1.4.; MANN & WEDEKIND 2010) sowie im westlichen Bereich Lothringens (Frankreich) anzuführen (Kap. 3.3.).

Die idealisierte Kurve eines Gruben wasseranstiegs kann mathematisch durch die Sättigungsfunktion be schrieben werden und ist für Berg werke anwendbar, die hydraulisch von benachbarten Bergwerken isoliert sind (Abb. 6). Die Gleichung lautet wie folgt:

$$h_{\text{GbW},t} = \Delta h_{\text{GbW}} \cdot (1 - e^{-\beta t})$$

mit

- $h_{\text{GbW},t}$ Grubenwasserspiegel zum Zeitpunkt t (m NN),
- Δh_{GbW} Differenz der Grubenwasser spiegel am Ende und zu Beginn des Grubenwasser anstiegs (m NN),
- β kinetischer Parameter (1/d),
- t Zeit (d).

Es handelt sich dabei um eine Funktion mit einem Exponenten, die beschränkte Wachstumsprozesse beschreibt. Die Kurve der Funktion steigt streng monoton. In der ver wendeten Form ist das Wachstum, d. h. der Anstieg des Grubenwasser spiegels, nach oben beschränkt und degressiv, d. h., dass die Wachs tumsgeschwindigkeit – der Gruben wasseranstiegsgeschwindigkeit entspre chend – mit der Zeit kontinuierlich abnimmt.

2.1.2. Wasserströmung im Grubengebäude

Im Zuge eines Grubenwasseran stiegs in einem untertägigen Berg werk erfolgt der wesentliche Anteil der Wasserströmung im offenen Grubengebäude sowie in den auf

gelockerten Bereichen im *Hangenden* und *Liegenden* der Strecken (WOLKERSDORFER 1996). Die Geome trie des Grubengebäudes, d. h. die räumliche Anordnung der vertikalen (wie Schächte, Bohrungen), hori zontalen (wie Strecken, Stollen) und schrägen Elemente (wie Überhaue) sowie Abbaubereiche, geben dabei die maßgeblichen Fließwege für den Anstieg des Grubenwasserstands im Bergwerk vor.

Einzelne Grubenfelder oder auch benachbarte Bergwerke können über Strecken miteinander verbun den sein. Eine Verbindung zweier Bereiche kann auch über Bohrun gen, geologische sowie tektonische Elemente (wie *Störungen*, Klüfte) und wasserwegsame Abbauannähe rung (sowohl lateral als auch vertikal [*Sickerwässer* aus dem Hangenden]) erfolgen. Im gesamten Grubenge bäude herrscht daher weitgehend eine hydraulische Verbindung und somit ein nahezu einheitlicher Grubenwasserstand gemäß dem Prinzip der kommunizierenden Röhren. Vor aussetzung dafür ist allerdings, dass keine Störungen der freien Wasser strömung vorliegen (z. B. Wasserdämme, vollständig verbrochene Strecken). Sollte sich jedoch durch Behinderung der freien Wasser strömung oder auch an Abbauannäherungen der hydrostatische Druck einseitig erhöhen und die statischen Grenzwerte der Standsicherheit er reichen, kann dies ein Versagen der Sicherheitsabstände bewirken und zu unkontrollierten *Grubenwasser einbrüchen* in benachbarte Bereiche führen (JOB 1987a; JOB 1987b; VUTUKURI & SINGH 1995).

Die hydraulische Durchlässigkeit der Fließwege des Grubengebäudes

kann sich im Laufe der Zeit verändern, da geotechnische Prozesse zur Konvergenz und damit zur Verringerung des Streckenquerschnitts führen oder der Streckenausbau seine Tragfähigkeit verliert. Auch beim vollständigen Verbruch der Strecken geht jedoch erfahrungsgemäß die hydraulische Durchlässigkeit nicht vollständig verloren (WOLKERSDORFER 2008).

Zur Verbesserung der Sicherung der dauerhaften untertägigen Wasserwegsamkeit verlegt die RAG AG Rohre in die Strecken (Kap. 1.2.; RAG AG 2017). In regelmäßigen Abständen werden die Rohre unterbrochen und Körbe mit Kies- bzw. Schotter schüttungen eingebaut (Abb. 9). Diese Kiesschüttungen ermöglichen das Eintreten von Grubenwasser in die ausgelegte Rohrleitung und dienen zudem als Filterelement.

Eine Messtechnik zur Überwachung der Wasserströmung in einem stillgelegten Grubengebäude entwickelten MELCHERS et al. (2017). Eine Multiparametersonde aus der Tiefseetechnik zeichnet *in situ* kontinuierlich verschiedene hydraulische (z. B. Wasser- und Luftdruck, Grubenwasserströmungsgeschwindigkeit) und physikochemische Parameter (z. B. elektrische Leitfähigkeit, Temperatur, Methankonzentration) auf und übermittelt die Daten in Echtzeit an eine zentrale Stelle (Abb. 10). Diese Sonden wurden erstmalig an vier Standorten im Grubengebäude des stillgelegten Bergwerks Auguste Victoria in Marl (Ruhrgebiet; Deutschland) eingesetzt und sollen noch auf weiteren Bergwerken eingesetzt werden.

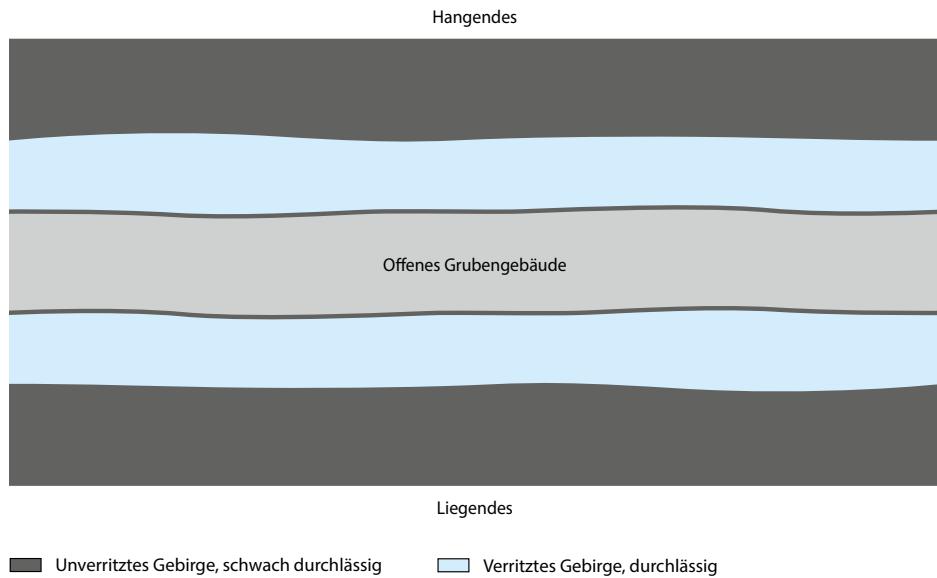


Abb. 8: Wasserwegsamkeiten in einem Bergwerk.

2.1.3. Einflussfaktoren auf die Hydrodynamik eines Grubenwasseranstiegs

Das Gebirge, in dem der Grubenwasseranstieg abläuft, zeichnet sich durch eine ausgeprägte räumliche Heterogenität aus. Diese Tatsache hat zur Folge, dass die hydrogeologischen Eigenschaften oftmals nur begrenzt bekannt sind oder nur eine lokale Gültigkeit besitzen. Die Faktoren, die den räumlich-zeitlichen Verlauf eines Grubenwasseranstiegs beeinflussen, zeichnen sich durch eine hohe Variabilität aus und unterscheiden sich je nach Bergwerk (bzw. Grubenwasserprovinz). Beschreibungen der hydrodynamischen Verhältnisse im untertägigen Bergwerk sowie Prognosen zum zeitlichen und räumlichen Verlauf zukünftiger Grubenwasseranstiege stellen daher stets nur Annäherungen der tatsächlichen Gegebenheiten dar (SAMMARCO 1995). Zu den natürlichen Einflussfaktoren zählen die Folgenden:



Abb. 9: Verlegung von Rohrleitungen mit eingeschalteten Kiesschüttungen zur Durchleitung des Grubenwassers
(Foto: RAG Aktiengesellschaft).

- Gesteins- und Gebirgsdurchlässigkeit,
- Volumina der Poren und Trennflächen,
- Wasserzuflussraten,
- Höhe der Grundwasserneubildungsrate,
- Mächtigkeit und Lithologie des Deckgebirges,
- nachbergbauliches Wassersstands niveau (anthropogene Beeinflussung möglich),
- Grundwasserstände im Einflussbereich des Grubenwasseranstiegs.

Neben den natürlichen, d. h. geologischen, hydrogeologischen und hydrologischen Faktoren beeinflussen auch die anthropogenen bedingten Veränderungen den Grubenwasseranstieg. Zu diesen anthropogenen Einflussfaktoren zählen:

- Bergbaulich geschaffene Hohlraumvolumina,
- Durchlässigkeit des Grubengebäudes,
- gezielte Steuerungsmaßnahmen, wasserhaltungsbedingter Absenkungstrichter,

die im Folgenden beschrieben werden.

Gesteins- und Gebirgsdurchlässigkeit

Die wichtigsten Parameter für die Beschreibung und Quantifizierung der Durchlässigkeit eines durch ein Fluid durchströmten Untergrunds sind der Durchlässigkeitskoeffizient k_f und der Transmissivitätskoeffizient T_{GW} . Der Durchlässigkeitskoeffizient beschreibt das Vermögen eines Gesteins, Wasser zu leiten (HÖLTING & COLDEWEY 2013). Während der Durchlässigkeitskoeffizient für ein Gestein angegeben wird (und daher auch als „Gesteinsdurchlässigkeit“ bezeichnet wird) und somit lediglich für eine kleinräumige Betrachtung der Durchlässigkeit („gesteinsspezifisch“) gültig ist, ist der Transmissivitätskoeffizient eine integrale Größe der Durchlässigkeitskoeffizienten über mehrere Schichten (wird daher auch als „Gebirgsdurchlässigkeit“ bezeichnet). Der Transmissivitätskoeffizient berücksichtigt sämtliche Inhomogenitäten des Gebirges (z. B. teufenspezifische Durchlässigkeit, Trennflächensystem).

Der Durchlässigkeitskoeffizient charakterisiert Gesteine von sehr schwach (nahezu undurchlässig) bis sehr stark durchlässig. Die Einteilung erfolgt gemäß DIN 18130-1 (1998). Die Klassifikation reicht von $> 10^{-2} \text{ m/s}$ (sehr stark durchlässig) bis $< 10^{-8} \text{ m/s}$ (sehr schwach durchlässig; Tab. 1).

Das Gesteinsgefüge kann durch anthropogene Aktivitäten (z. B. Bergbau, Tunnelbau) sowie *tektonische Vorgänge* gestört werden, wodurch sich die Durchlässigkeit in der Regel erhöht (Abb. 8). Daher ist zwischen der Durchlässigkeit gestörter (*verritz*t) und ungestörter (*unverritz*ter) Gesteine zu unterscheiden. Die Durchlässigkeit des Gebirges kann sich durch bergbauliche Aktivität um bis zu eine Zehnerpotenz erhöhen (BALTES 1998). Aufgrund der höheren Plastizität kehren feinkörnige Gesteine (z. B. Tonmergelstein) infolge des Gebirgsdrucks eher in ihren ursprünglichen Zustand zurück. Aus diesem Grund ist der Unterschied in den Durchlässigkeiten gestörter und ungestörter Gesteine gleicher Lithologie bei feinkörnigen Gesteinen



Abb. 10: Modifizierte Tiefseesonde zur Aufzeichnung des Grubenwasseranstiegs
(Foto: RAG Aktiengesellschaft, Markus Schneider, Martin Justa).

Tab. 1: Einteilung der Durchlässigkeitskoeffizienten k_f nach DIN 18130-1 (1998).

Einteilung	Durchlässigkeitskoeffizient k_f m/s
sehr stark durchlässig	$> 10^{-2}$
stark durchlässig	$10^{-2} - 10^{-4}$
durchlässig	$10^{-4} - 10^{-6}$
schwach durchlässig	$10^{-6} - 10^{-8}$
sehr schwach durchlässig	$< 10^{-8}$

(z. B. Tonstein) geringer als bei grobkörnigeren (z. B. Sandsteinen; BALTES 1998).

Oftmals basieren die Durchlässigkeitskoeffizienten auf Ergebnissen von Laborversuchen an Bohrkernen. Diese Ergebnisse repräsentieren daher nur bedingt die *in situ* gemessene, makroskopische Durchlässigkeit des Gebirges. Geohydraulisch relevante Inhomogenitäten des Gebirges (z. B. Kluftsystem, Störungen) können durch Gesteinsproben nicht berücksichtigt werden (HÖLTING & COLDEWEY 2013). Daher sind diese Werte nur als Annäherung an die tatsächliche Gebirgsdurchlässigkeit anzusehen. PAAS (1997) gibt beispielsweise an, dass die Gesteinsdurchlässigkeit von Siltgesteinen des unteren Oberkarbons etwa vier bis fünf Zehnerpotenzen (6×10^{-13} m/s bis $4,6 \times 10^{-15}$ m/s) geringer ist als die Gebirgsdurchlässigkeit (3×10^{-9} m/s bis 3×10^{-10} m/s).

Volumina der Poren und Trennflächen

Grubenwasser kann im Zuge eines Grubenwasseranstiegs den Poren

und Trennflächen (Klüfte, Störungen, Schicht- und Schieferungsflächen) zuströmen, wo es gespeichert werden und/oder diese durchströmen kann (HÖLTING & COLDEWEY 2013). Die Porosität beschreibt das Verhältnis des Volumens aller Hohlräume eines Gesteins zum Gesamtvolumen und bestimmt die Durchlässigkeit eines Gesteins. Feinkörnige Sedimente (wie Ton-, Schluffstein) verfügen über eine höhere Porosität als grobkörnigere Sedimente (wie Sande, Kiese). Die Porosität kann sich durch Fällungsprodukte (z. B. Calcit) oder durch Mineralum- oder -neubildungen verändern.

Jedoch steht nur ein Teil des Gesamtporenvolumens aufgrund des im Hohlräum vorhandenen und *adhäsiv* an den Körnern gebundenen

Haft-, Sicker-, Kapillar- und Adsorptionswassers für die Aufnahme und Speicherung von Wasser zur Verfügung (BLUME et al. 2010; Abb. 11). Dieser Anteil wird speichernutzbarer Hohlraumanteil oder effektiver (durchflusswirksamer) Porenanteil genannt (Tab. 2) und ist die wesentliche Größe für die Bewertung der Wasseraufnahmekapazität des Gebirges während eines Grubenwasseranstiegs. Speichernutzbare Hohlräume sind vor allem im Auflockerungsbereich des Grubengebäudes vorzufinden. Weiter vom Grubengebäude entfernt liegende Gebirgsbereiche sind durch bergbauliche Einflüsse nicht gestört, d. h., dass das Grubenwasser weder bei der Entwässerung aus diesen Bereichen des Gebirges in Richtung der Strecken noch im Zuge des Gruben-

Tab. 2: Größenordnungen für den Gesamtporenanteil n_p und effektiven Porenanteil n_{peff} für Lockergesteine, nach GARLING & DITTRICH (1979).

Art des Lockergesteins	Gesamt-porenanteil	Effektiver Porenanteil
	n_p %	n_{peff} %
sandiger Kies	25 - 35	20 - 25
kiesiger Sand	28 - 35	15 - 20
Mittelsand	30 - 38	10 - 15
schluffiger Sand	33 - 40	8 - 12
sandiger Schluff	35 - 45	5 - 10
toniger Schluff	40 - 55	3 - 8
schluffiger Ton	45 - 65	2 - 5

wasseranstiegs von den Strecken in diese Bereiche des Gebirges strömt.

In Festgesteinen beeinflussen vor allem der von der Petrographie abhängige Abstand zwischen den Klüften, die Kluftöffnungsweite sowie die Anzahl („Dichte“, „Vernetzungsgrad“) der Klüfte je Meter („Kluftziffer“) die hydraulische Durchlässigkeit des Gesteins (KARRENBERG 1981). Feinkörnigere Sedimente (z. B. *Tonstein*) verfügen in der Regel über ein dichteres Kluftsystem mit geringeren Kluftöffnungsweiten und folglich einem höheren Durchströmungswiderstand. Das Kluftsystem grobkörnigerer Sedimente (z. B. Sandsteine) ist hingegen weniger engständig und weist größere Kluftöffnungsweiten auf; der Durchströmungswiderstand ist folglich geringer. Aufgrund unterschiedlicher tektonischer Beanspruchung des Gebirges kann eine Verallgemeinerung der Werte für die gesteinsspezifischen Hohlraumvolumina von Klüften in Festgesteinen nicht erfolgen. Schätzwerte reichen vom niedrigen Promillebereich bis zu 10 % (BALTES 1998).

Wasserzuflussraten

Während und nach dem Betrieb eines Bergwerks fließt Grubenwasser in das Grubengebäude. Nach Außerbetriebnahme der Wasser-

haltung führt dieser Wasserzufluss dazu, dass der Grubenwasserspiegel im Grubengebäude ansteigt. Die Grubenwasserzuflüsse in ein Grubengebäude gliedern sich dabei in die überwiegend vertikale Infiltration von Grund- sowie Oberflächenwasser (im Folgenden als „Infiltrationswasser“ bezeichnet), in Zuflüsse von Tiefenwasser und in lateral gerichtete Zuflüsse von Grubenwässern aus benachbarten Grubengebäuden (Abb. 12).

Der Zufluss von Grubenwasser in das Grubengebäude erfolgt nur selten punktuell z. B. über Bohrungen, lokal z. B. entlang von Störungen, sondern häufiger flächenhaft von oben. Während der Abbauphase lassen sich diese Zuflüsse volumetrisch z. B. an Dämmen direkt messen oder indirekt über die entnommene Grubenwassermenge (abzüglich der von Übertage zugeführten Betriebswässer und den über die Wetterführung und Staubbindung untertege abgeführten Mengen) bestimmen. Während des Grubenwasseranstiegs sind die Wasserzuflüsse unterhalb des Grubenwasserspiegels nicht mehr im Einzelnen messbar. Hilfsweise können die Wasserzuflüsse dann aus dem Wiederanstiegsverlauf und dem angenommenen flutbaren Hohlraumvolumen orientierend abgeleitet werden.

Ein wesentlicher Teil des Wasserzuflusses besteht aus der Infiltration von Grund- und Oberflächenwasser (Infiltrationswasser), das „von oben“ in das Grubengebäude zusickert. Das Infiltrationswasser kann unmittelbar, d. h. (nahezu) unverzögert, in das Grubengebäude eindringen, wenn kein Deckgebirge vorhanden ist (Abb. 13-1). Die Höhe der vertikalen Zuflussrate entspricht in diesen Fällen annähernd der Grundwasserneubildungsrate innerhalb des Einzugsgebiets des Grubengebäudes. Ebenso kann die Versickerung von Vorflutern (Leckage) den Wasserzufluss in das Grubengebäude erhöhen, wie u. a. in den Bergwerken Barredo und Figaredo (Spanien) beobachtet wurde (ORDÓÑEZ et al. 2012). Einer der weltweit ersten Markierungsversuche (Tracertest) an einem Bergwerk wurde durchgeführt, um Wasserzuflüsse aus einem Oberflächengewässer zu lokalisieren (SEMMLER 1937).

Werden die flözführenden Schichten von einem Deckgebirge überlagert, erfolgt der Zutritt des Wassers in das Grubengebäude (wenn überhaupt) verzögert und reduziert (Abb. 13-2 und Abb. 13-3). Die Höhe der Zuflussrate hängt dann vor allem von der Mächtigkeit und den hydrogeologischen Eigenschaften des Deckgebirges sowie dem Druckniveau des Grundwasserstands im hangenden Grundwasserleiter ab. Der flächenhafte Zutritt von Infiltrationswasser lässt sich näherungsweise mit der abgewandelten Gleichung nach DARCY (1856) berechnen (Abb. 13):

$$\dot{V}_{\text{Inf}} = k_{\text{f,LS}} \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l_{\text{LS}}}$$

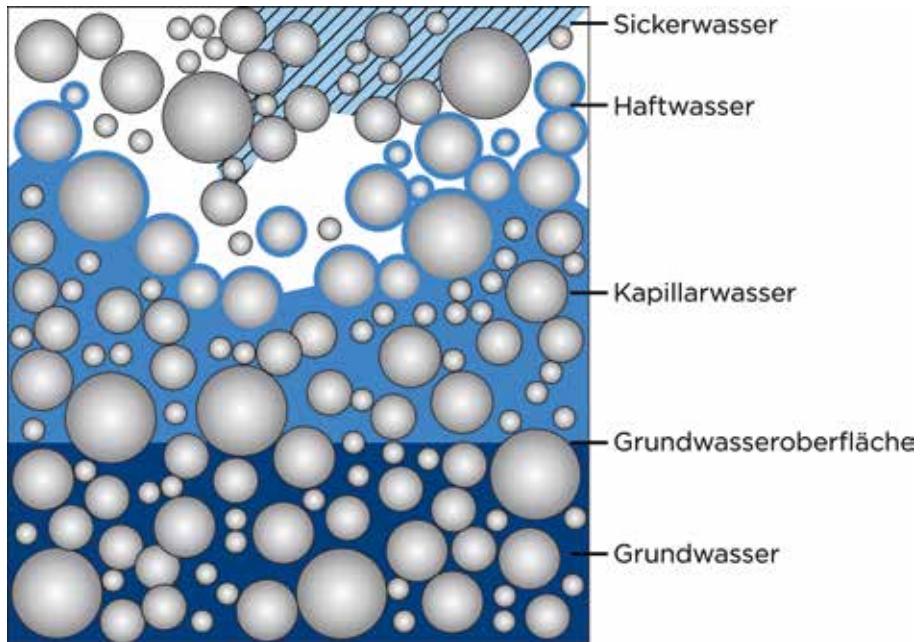


Abb. 11: Erscheinungsformen des unterirdischen Wassers, verändert nach ZUNKER (1930).

mit

- \dot{V}_{inf} Infiltrationsrate (m^3/s),
- $k_{f,LS}$ Durchlässigkeitskoeffizient der durchströmten, schwach durchlässigen Leckageschicht (m/s),
- A durchströmte Fläche (m^2),
- Δh Druckhöhenunterschied (m) (mit $\Delta h = h_{\text{Gw}} - h_{\text{Gbw}}$)
- h_{Gw} Grundwasser(druck)fläche im hangenden Grundwasserleiter [m NN],
- h_{Gbw} Grubenwasser(druck)-fläche [m NN]),
- Δl_{LS} Mächtigkeit der durchströmten, schwach durchlässigen Leckage-schicht (m).

Solange die Druckhöhe des Grubenwassers unterhalb der Basis der

schwach durchlässigen Schicht (Leckageschicht) liegt, erfolgt eine freie Zusickerung aus dem hangenden in den liegenden Grundwasserkörper (bzw. in das Grubengebäude; Abb. 13 und 45). Sobald die Druckhöhe des Grubenwassers die Basis der Leckageschicht erreicht, sind der hangende und liegende Grundwasserkörper hydraulisch miteinander verbunden. Die Zuflussrate ist nun auch von der Potenzialdifferenz Δh zwischen der Grubenwasser(druck)fläche h_{Gbw} und dem Grundwasserstand h_{Gw} im hangenden Deckgebirgsgrundwasserleiter abhängig (siehe Gleichung). Die Zuflussrate nimmt nun mit sukzessiv ansteigendem Grubenwasserstand linear ab. Der Zustrom aus dem hangenden Deckgebirge in das Grubengebäude erfolgt solange, bis die Grubenwasser(druck)fläche das Niveau des Grundwasserstands im



Abb. 12: Aufteilung der Zuflüsse in ein Grubengebäude.

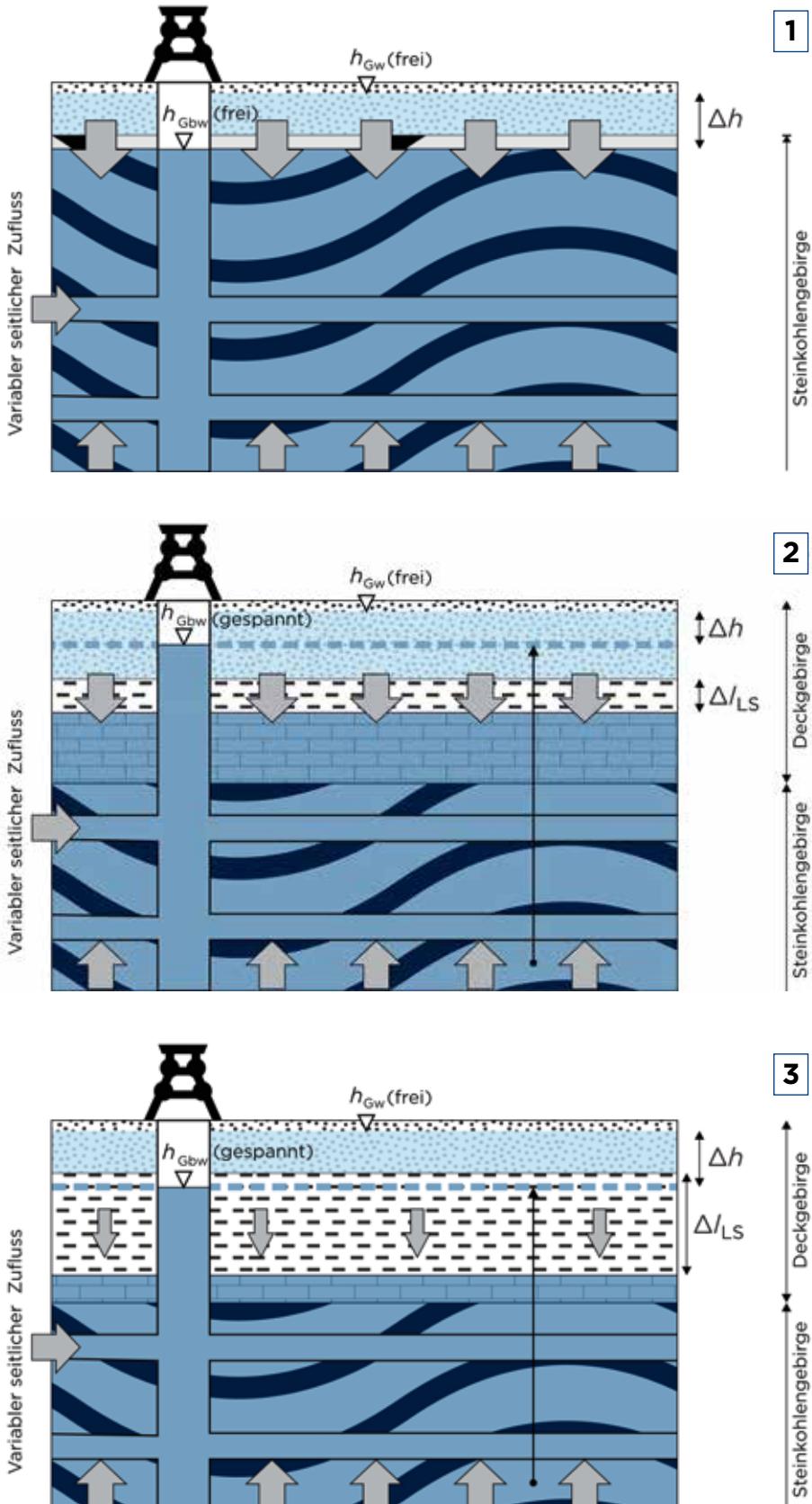


Abb. 13: Zuflussraten in ein Bergwerk (1) ohne Deckgebirge, (2) mit geringer bis mittlerer Deckgebirgsmächtigkeit und (3) mit hoher Deckgebirgsmächtigkeit. Die Dicke des Pfeils gibt die Höhe der Zuflussrate an.

Hangenden erreicht hat. Das Grubenwasser strömt erst dann aus dem Grubengebäude in den hangenden Grundwasserleiter, wenn die Grubenwasser(druck)fläche jene des Grundwassers übersteigt (DENNEBORG et al. 2017) (Kap. 3.2.3., Abb. 45).

In Abhängigkeit der Mächtigkeit und lithologischen Ausbildung des Deckgebirges nehmen die Zuflüsse von Tiefenwasser einen nennenswerten Anteil an der Gesamzuflussrate ein. Es gilt die vereinfachte Annahme, dass je mächtiger und/oder schwach durchlässiger das Deckgebirge ist, desto geringer ist der Anteil an Infiltrationswasser an der Gesamzuflussrate (siehe Gleichung).

Analog zu den Infiltrationsmengen zeigen auch die Zuflussraten von Tiefenwasser eine Entwicklung, die mit dem Grubenwasseranstiegsverlauf korreliert. Die Höhe der Zuflussrate wird in Abhängigkeit der Lage der Grubenwasser(druck)fläche zum Höhenniveau des Zuflussortes sowie des Speisungsniveaus ermittelt. Die Speisung von Tiefenwasser kann aus dem Liegenden, über z. T. weitreichende Störungen und bei tieferem Abbau aus dem Hangenden erfolgen. Ergebnisse von Modellrechnungen zeigen, dass die Zuflüsse von Tiefenwasser durch die Erhöhung des Auflastdrucks durch die Wassersäule zunehmend „abgedrückt“ werden (BANKS 2001).

Solange die Grubenwasser(druck)fläche unterhalb der Höhenlage des Zuflusses verbleibt, ändert sich die Zuflussrate nicht. Erst wenn die Grubenwasser(druck)fläche über der Teufenlage des Zuflusses liegt, ändert sich dessen Zuflussrate und nimmt sukzessive ab, je näher sich

die Grubenwasser(druck)fläche dem Speisungsniveau nähert. Ein Zufluss von Tiefenwasser ist vollständig unterbunden, sobald das Speisungsniveau eines Zuflusses durch die Grubenwasser(druck)fläche überstaut ist.

Höhe der Grundwasser-neubildungsrate

Eine wichtige Einflussgröße im hydrologischen Kreislauf stellt die Grundwasserneubildungsrate dar. Nach der DIN 4049-3 (1994) beschreibt der Begriff der Grundwasserneubildung den „Zugang von infiltriertem Wasser zum Grundwasser“. Wird der Begriff auf den Bergbau übertragen, so kann darunter der Zugang von Niederschlagswasser in das Grubengebäude und somit zum Grubenwasser verstanden werden („Grubenwasserneubildung“).

Schon früh wurde aufgezeigt, dass die Zuflussraten in Grubengebäude mit den Niederschlagsraten korrelieren. SEMMLER (1955) verglich die Entwicklung der mittleren Zuflussraten von Grubenwasser mit den Niederschlagsraten an benachbarten Niederschlagsmessstationen und stellte bei einer Vielzahl an Bergwerken fest, dass eine eindeutige Abhängigkeit zwischen beiden Größen auch bei höheren Deckgebirgsmächtigkeiten (von bis zu 450 m) vorliegt (Abb. 14 und Abb. 15). Bei Bergwerken mit Deckgebirgsmächtigkeiten von mehr als 800 m ist ein direkter Einfluss der Niederschlagsrate auf die Grubenwasserzuflüsse nicht mehr eindeutig erkennbar. SEMMLER begründet diese Beobachtung damit, dass der Anteil an infiltriertem Niederschlagswasser am Gesamtzufluss (Zufluss von Infiltrations- und Tiefenwasser) aufgrund der hohen

Deckgebirgsmächtigkeit zu gering ist, um die Höhe des Gesamtaufwandes maßgeblich zu beeinflussen.

Mächtigkeit und Lithologie des Deckgebirges

Ein wichtiges Kriterium, das den Aufbau eines Steinkohenvorkommens beschreibt, ist die Mächtigkeit und die lithologische Ausbildung des Deckgebirges. Je nach Ablagerungsbedingungen unterscheiden sich dessen Mächtigkeit und lithologische Ausbildung. So kann ein Deckgebirge aus schwach durchlässigen Tonmergelsteinen (Rheinisch-Westfälisches Steinkohlenrevier [Deutschland]) bis gut durchlässigen Sandsteinen (Lothringen [Frankreich]; mit schwach durchlässiger Basisschicht) bestehen. Ein Steinkohenvorkommen kann auch deckgebirgsfrei sein, wenn die wirtschaftlich nutzbaren Schichten an der Tagesoberfläche ausstreichen (z. B. Ibbenbüren, südliches Ruhrgebiet, Teile des Saar-Reviere [alle Deutschland], Asturien [Spanien] und der westliche Abbaubereich in Yorkshire [UK]). Die Ausbildung des Deckgebirges nimmt unmittelbar Einfluss auf die Höhe der Zuflussrate des Infiltrationswassers (siehe Ausführung unter „Wasserzuflussraten“).

Nachbergbaulicher Wasserstand

Sobald die Wasserhaltung eines Bergwerks außer Betrieb genommen wird, strebt die Grubenwasser(druck)fläche wieder das ursprüngliche, vor den bergbaulichen Aktivitäten vorherrschende (natürliche) Druckhöhenniveau an. Der nach Abschluss des Grubenwasseranstiegs sich langfristig einstellende Wasserstand wird als „nachbergbaulicher Wasserstand“ bezeichnet. Aufgrund der durch den Bergbau

verursachten Veränderungen der ursprünglichen hydrogeologischen Verhältnisse ist der Einstau des Grubenwassers bis zum natürlichen Niveau allerdings oftmals nicht möglich. Stattdessen endet der Grubenwasseranstieg in vielen Fällen, sobald das tiefste Entwässerungsniveau erreicht ist.

In nur seltenen Fällen ist das vor der Aufnahme der Abbautätigkeiten vorherrschende (natürliche) Wasserstandsniveau eindeutig und flächenhaft dokumentiert. Daher müssen hilfsweise Annahmen oder Analogievergleiche mit benachbarten Wasserprovinzen, in denen der Grubenwasseranstieg bereits vollzogen ist, getroffen werden. Hinweise auf das natürliche Druckniveau können beispielweise Quellen geben, die vor Aufnahme der bergbaulichen Aktivitäten eine Schüttung aufwiesen, dann aber durch die Grubenwasserabsenkungen infolge des modernen Steinkohlenbergbaus versiegten (HUYSEN 1855).

Grundsätzlich sollte stets die Wiedereinstellung des weitgehend vorbergbaulichen Wasserstands angestrebt werden. Neben Kosten und dem energetischen Aufwand für den Betrieb von Pumpen wird dadurch außerdem die Einleitung von höher mineralisierten Grubenwässern verringert, wodurch wiederum die Vorfluter weniger belastet werden.

Grundwasserstände im Einflussbereich des Grubenwasseranstiegs

Die Grundwasserverhältnisse im Einflussbereich des Grubenwasseranstiegs werden vor allem durch Wasserhaltungsmaßnahmen beeinflusst. Dessen Auswirkungsbereich hängt von der Dauer und flächen-

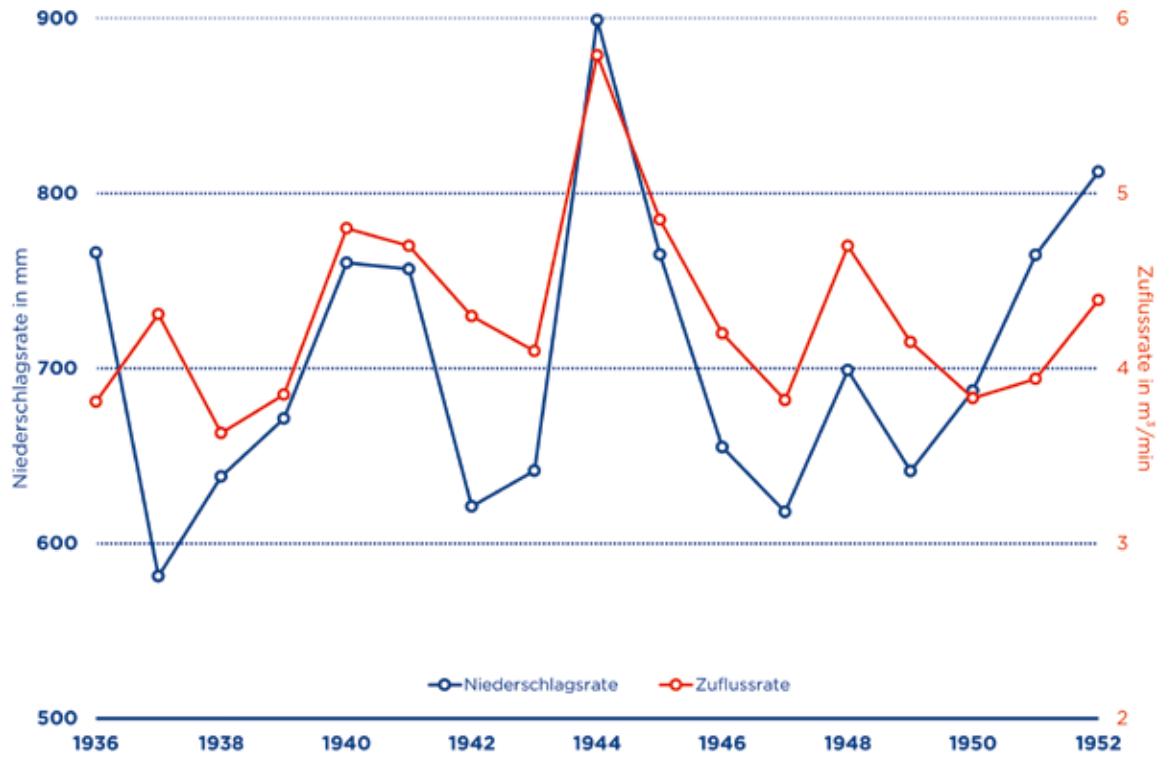


Abb. 14: Abhängigkeit der Grubenwasserzuflüsse von den Niederschlägen in den Jahren 1936 bis 1952 in einem Bergwerk mit einem Deckgebirge von 0-100 m. Daten reproduziert nach SEMMLER (1955).

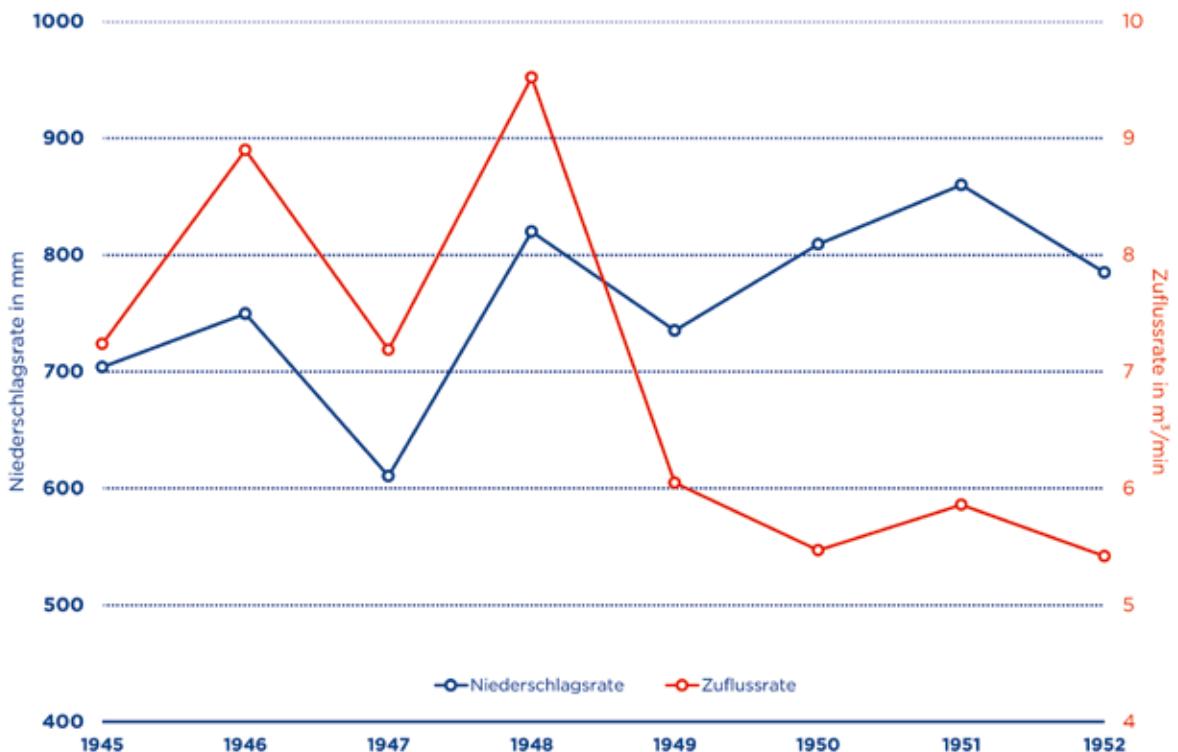


Abb. 15: Abhängigkeit der Grubenwasserzuflüsse von den Niederschlägen in den Jahren 1945 bis 1952 in einem Bergwerk mit 400 m Deckgebirge. Daten reproduziert nach SEMMLER (1955).

haften Ausdehnung der Abbautätigkeiten sowie deren Abbauteufen ab. Die Kenntnis über die aktuellen Grundwasserstände kann durch die Errichtung von Grundwassermessstellen erlangt werden.

Die Wasserzuflüsse in das Grubengebäude stehen in einem engen Zusammenhang mit den Grundwasserständen im Einflussbereich des Bergwerks. Diese beeinflussen ganz wesentlich die Zuflussrate sowohl während der Abbauphase als auch während des Grubenwasseranstiegs. Die Höhe der Zuflussrate von Infiltrationswasser verringert sich mit ansteigender Grubenwasser(druck)fläche (Abnahme der Potenzialdifferenz zwischen Grund- und Grubenwasserstand), da die Wassersäule mit fortschreitendem Grubenwasseranstieg einen zunehmend höheren Gegendruck gegen den Wasserzufluss aus dem Hangenden ausübt (siehe Ausführungen unter „Wasserzuflussraten“). Ebenso verringert sich die flächenhafte Ausbreitung des Absenkungstrichters, der erst den Zufluss von Grund- und Grubenwasser bewirkt. Die Verringerung der Zuflussrate von Infiltrationswasser führt zu einer Verlangsamung der Entleerung des hangenden „Reservoirs“, was wiederum in einem weiträumigen Erhöhen der Grundwasserstände im Einflussbereich des Grubengebäudes resultiert (Kap. 3.1.; Abb. 30). Übersteigt die Grubenwasser(druck)fläche jene des Grundwassers, kann das Grubenwasser auch in den hangenden Grundwasserleiter infiltrieren. Voraussetzung dafür sind jedoch hydraulische Wasserwegsamkeiten. Es wird davon ausgegangen, dass diese beschriebene hydraulische Veränderung im Zuge eines Grubenwasseranstiegs

überall dort auftreten kann, wo während der Abbauphase auch erhebliche Wasserzutritte aus dem Deckgebirge in das Grubengebäude beobachtet wurden (ROSNER 2011).

Bergbaulich geschaffene Hohlräumvolumina

Der Bergbau schafft durch das Abteufen von Schächten, das Auffahren von Strecken sowie den Abbau des Rohstoffs ein weit verzweigtes Netz an Hohlräumen im Untergrund, das als Grubengebäude bezeichnet wird. Hydrogeologisch handelt es sich dabei um einen „Bergwerksaquaifer“ („mine aquifer“ *sensu* WOLKERSDORFER 2008). Die bergmännisch geschaffenen Hohlräume können zwischen temporär offenen (Abbaubereiche, Abbaubegleitstrecken) und längerfristigen offenen Hohlräumen (z. B. Schächte, Sohlen) unterschieden werden.

Die Kenntnis über die teufen- und raumbezogene Verteilung und den Zustand der untertägigen Hohlräume ist wichtig für:

- die Prognose des Ablaufes des Grubenwasseranstieges hinsichtlich sowohl der räumlichen Ausdehnung als auch der Anstiegsgeschwindigkeit,
- die Bewertung von Ausgasungsvorgängen sowie
- die Beurteilung der Freisetzung und Mobilisierung von Stoffen und damit folglich für eine Abschätzung der möglichen Beeinträchtigung der Grund- und Grubenwasserbeschaffenheit (YOUNGER et al. 2002; WOLKERSDORFER 2008).

Wie in den geogenen Hohlräumen fließt und zirkuliert Wasser auch in den bergbaulich geschaffenen Hohl-

räumen und kann dort gespeichert werden. Diese füllen sich zu Beginn eines Grubenwasseranstiegs. Erst mit einer Zeitverzögerung von bis zu mehreren Jahrzehnten werden die Poren und Klüfte des gestörten Gebirges zwischen den Strecken (Gebirgsauflockerung) sowie (nur mit einem geringeren Anteil) des übrigen Gebirges mit Wasser gesättigt (DENNEBORG et al. 2017), da möglicherweise zunächst die in den Poren enthaltene Luft verdrängt werden muss. Die tatsächliche Entwicklung der Gebirgsättigung ist allerdings hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs sowie der Eindringtiefe, bezogen auf das Grubengebäude, nicht bekannt (DENNEBORG et al. 2017).

Die ehemaligen Abbaubereiche (*Alter Mann*) nehmen in deutschen Steinkohlenbergwerken einen wesentlich höheren Anteil an den bergbaulich geschaffenen Hohlräumen ein als die Strecken und Schächte. Der Anteil des Streckenvolumens deutscher Steinkohlenbergwerke, bezogen auf das ursprüngliche Abbauvolumen, beträgt im Mittel erfahrungsgemäß nur 2 % bis 3 %. Mit der Zeit verringert sich das Volumen der bergbaulich geschaffenen Hohlräume durch Setzung und Konvergenz. Das verbleibende Hohlräumvolumen wird als Resthohlräumvolumen bezeichnet und hängt von den folgenden Faktoren ab (YOUNGER et al. 2002; WOLKERSDORFER 2008):

- Abbauteufe,
- Durchbauungsgrad,
- Lage und Flächengröße des Abbaubereiches (Randbereich, zentraler Bereich),
- Anzahl gebauter und über-einanderliegender Flöze (Durchbauungsgrad),
- Mächtigkeit und *Einfallen* der Flöze,
- Druck des überlagernden Gebirges,
- Festigkeit des anstehenden Gesteins,
- Art und Menge des Versatzes,
- Art der Gewinnung.

Die Einbringung von Stoffen (Versatz) verringert das Hohlraumvolumen der Abbaubereiche. Bei der Bilanzierung der Resthohlraumvolumina ist zu beachten, dass sich in abgeworfenen Bereichen des Grubengebäudes „*Standwasserbereiche*“ bilden können, die durch den Zufluss von Tiefenwasser entstehen. Die Volumina der Standwasserbereiche sind von dem ermittelten Resthohlraumvolumen abzuziehen, da diese Bereiche nicht mehr für die Aufnahme von Wasser zur Verfügung stehen. Insgesamt ist die Bestimmung des verfügbaren Hohlraumvolumens eine sehr komplexe Aufgabenstellung, die in der Regel nur näherungsweise erfolgen kann.

Durchlässigkeit des Grubengebäudes

Die Strecken und Schächte dienen beim Grubenwasseranstieg vornehmlich dem Wassertransport und verdrängen die Grubenwetter. In Abhängigkeit des Nebengesteins, der Güte des Streckenausbaus, des Alters des Grubengebäudes und des Gebirgsdrucks kommt es in den Strecken durch Konvergenz zu einer Verringerung des ursprünglichen

Streckenquerschnitts. Ein vollständiger Verschluss der Strecke durch Konvergenz erfolgt erfahrungsgemäß jedoch nicht. Auch bei Verbruch der Strecken verbleibt ein Restquerschnitt mit einer Durchlässigkeit, die eine Wasserüberleitung erlaubt (YOUNGER et al. 2002). Die freie (unbehinderte) Wasserbewegung in Strecken kann nur durch den Einbau von Wasserdämmen unterbunden werden, wobei es jedoch häufig auch zu einer Umströmung des Dammes in der Auflockerungszone kommen kann (WOLKERSDORFER 2001).

Neben der Herstellung des offenen (längerfristig standsicherer) und mit der Zeit sich wieder schließenden Grubengebäudes erfährt das Gebirge durch bergbauliche Aktivitäten eine Veränderung der hydraulischen Eigenschaften. Durch die Bewegung des hangenden Gebirgskörpers in die geschaffenen Hohlräume entstehen neue Trennflächen bzw. wird der Abstand zwischen Trennflächen vergrößert. Es kommt zu einer Gebirgsauflockerung, die vornehmlich im Umfeld bergbaulicher Hohlräume entsteht. Diese Bereiche sind durch eine – im Vergleich zu den bergbaulich ungestörten Schichten – erhöhte Durchlässigkeit gekennzeichnet.

In den Konzepten zur langfristigen Grubenwasserhaltungen an Ruhr, Saar und in Ibbenbüren spielt das offene Grubengebäude hinsichtlich der Wasserüberleitung oftmals eine wichtige Rolle (Kap. 1.2., RAG AG 2014). In langfristig standsicher ausgebauten Strecken wird das Grubenwasser untertägig im freien Gefälle zu Wasserannahmestellen geleitet. Zudem werden Rohre mit Kiesfiltern in den vorgesehenen Strecken

verlegt (RAG AG 2017), die einen stetigen und ausreichenden Durchfluss von Grubenwasser zur Wasserannahmestelle gewährleisten sollen.

Gezielte Steuerungsmaßnahmen

Viele Grubenwasseranstiege erfolgten in der Vergangenheit bis in die 1970er Jahre offenkundig weitestgehend unkontrolliert. Möglichkeiten der gezielten Steuerung des Grubenwasserspiegels waren oftmals nicht vorhanden, so dass ein Grubenwasseranstieg beendet war, sobald ein hydraulisches Gleichgewicht zwischen Zu- und Abflüssen vorhanden war, das Niveau eines Entwässerungsstollens erreicht wurde (MÜHLENBECK 2015) oder aber es zu diffusen und unkontrollierten Grubenwasseraustritten an der Tagesoberfläche kam (MANN & WEDEKIND 2015).

Der räumliche wie auch der zeitliche Verlauf des Grubenwasseranstiegs kann aktiv gesteuert werden, um u. a. unkontrollierte Wasseraustritte an der Tagesoberfläche oder eine Beeinträchtigung von Trinkwasservorkommen zu vermeiden. Dazu werden Pumpen eingesetzt oder Wasserdämme eingebaut. Eine von alters her bewährte Methode zur Absenkung des Grubenwasserspiegels ist die Auffahrung eines Entwässerungsstollens. In der Anstiegsphase kann das Grubenwasser bis zu dem Sohlniveau des Entwässerungsstollens ansteigen. Dort wird es drucklos abgeführt. Auch in den aktuellen Planungen zur langfristigen Grubenwasserhaltung in den Revieren an der Saar (hier: zweite Phase; Kap. 1.2.; RAG AG 2014) und in Ibbenbüren nimmt die drucklose Abführung des Grubenwassers über einen „Gruben-

wasserkanal“ bzw. einen Stollen ein zentrales Element ein.

Der Grubenwasserstand wird vor allem durch Unterwassermotorpumpen gesteuert, die in Schächten installiert sind (Abb. 2). Deren Einsatz ermöglicht es, den Anstieg des Grubenwassers nach Bedarf zu regulieren, zu stoppen oder gar rückgängig zu machen.

Wasserhaltungsbedingter Absenkungstrichter

Die Entnahme von Wasser, wie es z. B. beim Tunnelbau oder der Entwässerung von Bergwerken erfolgt, verursacht eine Absenkung der Grundwasserdruckfläche, sofern die Entnahmerate größer als die Zuflussrate ist. Die räumliche Ausdehnung des Absenkungstrichters hängt vor allem von den hydrogeologischen Eigenschaften des Untergrunds ab, aus dem die Wasserentnahme erfolgt. Tektonische Strukturen (z.B. schwach durchlässige Störungen) können die Reichweite des Absenkungstrichters räumlich begrenzen. In homogenen und isotropen porösen Grundwasserleitern bildet sich – in idealisierter Form – ein rotationssymmetrischer Absenkungstrichter aus (HÖLTING & COLDEWEY 2013). Aufgrund der Heterogenitäten in Festgesteinen sowie in gebirgigem Gelände weicht die tatsächliche Form des Absenkungstrichters jedoch deutlich von dieser idealisierten Form ab.

Die flächenhafte Ausdehnung des Absenkungstrichters nimmt Einfluss auf die Höhe des zuströmenden Wassers. Es gilt: je größer der Absenkungstrichter ist, desto weitreichender ist der hydraulisch aktivierte Bereich, aus dem Wasser zufließen

kann. Mit ansteigendem Grubenwasser nimmt die Ausdehnung des Absenkungstrichters ab, folglich auch die des hydraulisch aktivierten Bereiches und somit die Zuflussmenge. In vielen Berechnungsformeln (z. B. SICHARDT 1928; KUSAKIN 1935; ROM 1939; KERKIS 1955) gehen für die Bestimmung der Absenkungsreichweite die folgenden Parameter ein:

- Durchlässigkeitskoeffizient des Untergrunds innerhalb des Absenkungstrichters,
- Absenkungsbetrag,
- vertikale Mächtigkeit der grundwasserleitenden Schicht,
- Infiltrations- und Entnahmemengen.

Es ist bei allen diesen Ansätzen zu beachten, dass sie aufgrund der Inhomogenitäten im Untergrund nur Annäherungen an die tatsächlichen Reichweiten geben. Die tatsächliche Reichweite oder die Form des Absenkungstrichters können nur durch ein ausreichend dimensioniertes Messstellennetz festgestellt werden, das aus Grund- und Grubenwassermessstellen besteht, die in unterschiedlichen Grundwasserleitern verfiltert sind (PLOTNIKOV & ROGINETS 1989).

2.2.

Bodenbewegung

Der untertägige Abbau von Steinkohle führt zu Konvergenzen, die vom Gebirge in Richtung der Tagesoberfläche übertragen werden. Dieser Bewegungsprozess wirkt sich an der Tagesoberfläche in einer dreidimensionalen Lageänderung aus. Die bergbaulich induzierten Bodenbewegungen unterteilen sich in eine vertikale Komponente (*Senkung, Schrumpfung, Sackung*) und horizontale Komponente (Verschiebung, Längenänderung). BUSCH et al. (2012) gibt die folgenden allgemeinen Ursachen für Bodenbewegungen an:

- großtektonische und seismische Ereignisse wie Subduktion, Erdbeben und sonstige Erschütterungen,
- Subrosions- und Erosionsvorgänge wie Verkarstungen und Salzauslaugungen,
- geologische und gebirgsmechanische Veränderungen der Erdkruste durch z. B. untertägigen Rohstoffabbau,
- hydrogeologische und hydrologische Veränderungen durch z. B. Wasserentzug oder -einstau.

Der letztgenannte Aspekt betrifft die Bodenbewegungen im Zuge eines Grubenwasseranstiegs. Diese Gebirgsbewegungen äußern sich an der Tagesoberfläche in Form von Lageänderungen, von denen die vertikale Komponente (Hebung) die maßgebliche ist.

Flutungsbedingte Bodenhebungen an der Tagesoberfläche sind schon seit über hundert Jahren Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Bereits HILLEGAART (1910) und BUNTZEL (1911) haben sich zu Beginn des 20. Jahrhunderts mit den Hebungen der Tagesoberfläche oberhalb von Abbaubereichen

beschäftigt. OBERSTE-BRINK (1940) berichtete erstmalig über Bodenhebungen im Ruhrgebiet, die in der deckgebirgsfreien Steinkohlenlagerstätte innerhalb der Wittener Mulde seit den 1930er Jahren beobachtet und zum damaligen Zeitpunkt schon mit einem Grubenwasseranstieg in Verbindung gebracht wurden. Er korrelierte die maximalen Hebungsbeträge mit den am stärksten durchbauten Abbaubereichen und interpretierte die Bodenhebung als Folge der Quellfähigkeit tonhaltiger Gesteine. Untersuchungen von SPICKERNAGEL (1975) zeigten, dass Bodenhebungen infolge eines Grubenwasseranstiegs bis zum *Senkungsnrand* reichen. Neben der Volumenzunahme tonhaltiger Gesteine seien die Bodenbewegungen zusätzlich noch durch die Auftriebskraft des aufsteigenden Wassers begründet. PÖTTGENS (1985) stellte im Zusammenhang mit dem Grubenwasseranstieg in den Bergwerken des Südlimburger Reviers heraus, dass die Anstiegsgeschwindigkeit des Grubenwassers Einfluss auf die Hebungsbewegung hat. Darauf basierend entwickelte PÖTTGENS ein erstes Modell, um die maximal zu erwartenden, flutungsbedingten Hebungsbeträge der Bodenhebungen zu prognostizieren. Diese resultieren im Wesentlichen aus Dehnungsvorgängen, die sich durch erhöhten Auftrieb und daraus bedingten veränderten Spannungsfeldern im Gebirge ergeben. Untersuchungen von ROSNER (2011) im Aachener (Deutschland) und Südlimburger Revier (Niederlande) belegen, dass die Bodenhebung dort mit einer Zeitverzögerung von rd. fünf Jahren nach Außerbetriebnahme der Wasserhaltung einsetzt. Sobald der Grubenwasserstand die Basis des Deckgebirges erreicht, verstärken sich die Hebungsbeträge

Tab. 3: Übersicht von Bodenhebungsbeträgen durch Grubenwasseranstiege in Steinkohlenrevieren (erweitert nach FENK & TZSCHARSCHECH 2007; D: Deutschland; NL: Niederlande; F: Frankreich; B: Belgien).

Revier	Abbauteufe m u. GOK	Hebungsbetrag der Tagesoberfläche bis cm	Quelle
Wittener Mulde (D)	< 440	17	OBERSTE-BRINK 1940
Erkelenz (D)	150 – 800	28	BAGLIKOW 2019
Aachen (D)	< 1.200	10	ROSNER 2011
Ibbenbüren (Westfalen; D)	< 625	10	GOERKE-MALLETT 2000
Zwickau (D)	< 1.150	17	FENK 2000
Lugau-Oelsnitz (D)	< 1.200	9	LOEBEL & DOHNER 2010
Döhlen-Becken (D)	390 – 650	6	GROSS & WEDEKIND 2006
Königsborn (D)	270 – 1.000	24	HEITFELD et al. 2012
Warndt (D)	< 1.750	20	MELCHERS & DOGAN 2014
Faulquemont (F)	600 – 925	13	BRANCHET & KAISER 2001
Südlimburg (NL)	260 – 770	28	ROSNER 2011
Kempen (B)	1.090	0,3 – 2,3 (je Jahr)	MELCHERS & DOGAN 2014
Lüttich (B)	< 1.000	0,25 (je Jahr)	MELCHERS & DOGAN 2014

und reichen bis 10 km über die Grenzen der Abbaufelder hinaus.

Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass sich die räumliche Verteilung und der zeitliche Verlauf der Bodenbewegungen in Abhängigkeit von den lokalen Abbaubedingungen unterscheiden. FENK & TZSCHARSCHECH (2007) stellten aus den Ergebnissen einer Literaturrecherche die Spannbreite der flutungsbedingten Hebungsbeträge in mittel- und west-europäischen Steinkohlenrevieren zusammen. Hebungsbeträge von 6 cm bis 27 cm konnten bislang nachgewiesen werden (Tab. 3).

Bergschäden infolge eines Grubenwasseranstiegs sind nur aus wenigen Steinkohlenrevieren bekannt, da die Tagesoberfläche üblicherweise mit einer flächenhaften und gleichmäßigen Hebung reagiert. An Unst-

tigkeiten, die bis an die Oberfläche reichen, sowie im Bereich tektonischer Störungen, an deren Seiten ein unterschiedlicher Abbau erfolgte bzw. der Grubenwasserstand unterschiedlich anstieg, kann es jedoch im Zuge eines Grubenwasseranstiegs zu schadensrelevanten Hebungsdifferenzen kommen (BAGLIKOW 2010). Auch kann der Grubenwasseranstieg Auslöser komplexer Wirkungszusammenhänge sein, die wiederum Schäden an Gebäuden und Infrastruktur verursachen. Belege und Hinweise gibt es im Erkelenzer Revier (BAGLIKOW 2003; BAGLIKOW 2010; Kap. 3.1.3.), im Aachener und Südlimburger Steinkohlenrevier (DEVENT & ROEST 2012; BAGLIKOW 2019; Kap. 3.1.3.) sowie im Döhlen-Becken (TUNGER 2009; Kap. 3.1.4.).

Sowohl bergbau- als auch flutungsbedingte Bodenbewegungen können

durch ein Monitoring beobachtet werden. Neben Höhenbeobachtungen auf Nivellementslien und an Höhenbolzen hat sich in den letzten Jahren die Radarinterferometrie (Persistent Scatterer Interferometrie [PSI]) als flächendeckendes und genaues Verfahren etabliert (BAMLER et al. 2008; BUSCH 2019). Zur Unterstützung der rechnerisch aufwendigen Auswertung werden bodengebundene Rückstrahler (Persistent Scatterer) benötigt.

2.3. Ausgasung



Abb. 16: Klassifikation von Kohlegasen, nach THIELEMANN (2002) und UNECE (2016).

In bergbaulich geprägten Gegenden wie dem Ruhrgebiet werden regelmäßig Ausgasungserscheinungen an der Tagesoberfläche beobachtet (THIELEMANN et al. 2001; HENSCHIED 2012). Nach THIELEMANN (2000) und UNECE (2016) wird zwischen Kohlegas, das bei der Kohlevergasung erzeugt wird, und Kohleflözgas unterschieden. Diese Gase sind aus einer fossil entstandenen Lagerstätte ausströmende Gasgemische aus Methan (CH_4), Kohlenstoffdioxid (CO_2), Kohlenstoffmonoxid (CO), Sauerstoff (O_2), Stickstoff (N_2) und weiteren höheren Kohlenwasserstoffen (Tab. 4). Kohlegas ist der Oberbegriff für natürlich gebildete Gase aus der Kohle und für anthropogen über die technische Kohlevergasung erzeugte Gase (Abb. 16). Alle natürlichen Gase aus der Kohle werden hingegen unter dem Begriff „Kohleflözgas“ zusammengefasst. Dazu zählen Flözgas und Grubengas (Tab. 4).

Während Flözgas (CSM: Coal Seam Methane) beispielsweise durch

Bohrungen aus Kohleflözen im ungestörten Gebirge freigesetzt wird und an den natürlichen Entstehungsraum gebunden ist, dringt Grubengas durch bergbauliche Aktivitäten unmittelbar oder zeitverzögert in künstlich geschaffene Hohlräume wie dem Grubengebäude ein. Das Grubengas wird wiederum in Coal Mine Methane (CMM, Freisetzung in aktiven Bergwerken durch Absaugung und Bewetterung) und Abandoned Mine Methane (AMM, Freisetzung in stillgelegten Bergwerken) unterschieden (UNECE 2016). Die Gase unterscheiden sich in den Konzentrationen der jeweiligen Einzelsubstanzen (Tab. 4), wobei den größten Volumenanteil Methan einnimmt.

Kohlenstoffmonoxid ist ein für den Menschen giftiges Gas, das beim Einatmen Gesundheitsschäden hervorrufen kann. Methan hingegen, als die einfachste strukturierte Kohlenwasserstoffverbindung, ist ein farb-, geruch- und geschmacklo-

ses Gas, das weder toxisch, noch gesundheitsschädlich oder -gefährlich ist. Es kann jedoch bei bestimmten Konzentrationen (zwischen 4,4 Vol.-% und 16,5 Vol.-%) mit dem Luftsauerstoff ein explosives Gasgemisch bilden (CHRISTENSEN 2007; Abb. 17).

Methan ist zum überwiegenden Teil organischer Herkunft (SCHOELL 1984). Je nach Genese und Herkunft wird zwischen „thermisch“ bzw. „thermogen“ und „bakteriell“ bzw. „biogen“ gebildetem Gas unterschieden. Als thermogen wird es bezeichnet, wenn das Gas als Abspaltungsprodukt der graduellen Umwandlung organischen Materials während der *Inkohlung* entstanden ist. Als bakteriell oder auch biogen wird es hingegen bezeichnet, wenn das Gas beim mikrobiellen Abbau organischen Materials entsteht. Während thermogenes Methan an flözführende Schichten gebunden ist, bildet sich biogenes Methan durch bakterielle Aktivität rezent. Anhand der chemischen Zusammensetzung der Ausgasung in Verbindung mit cha-

rakteristischen Isotopensignaturen können thermogenes und biogenes Methan voneinander unterschieden werden (Abb. 18). Dadurch lassen sich Bereiche, in denen eine rezente bakterielle Methanogenese abläuft, erkennen.

Aus dem Steinkohlenbergbau ist der Zutritt von Grubengas in das Grubengebäude allgemein bekannt. Abbautätigkeiten lockern den Gesteinsverbund ober- und unterhalb der Flöze auf, wodurch das Grubengas aus dem *Steinkohlengebirge* in das Grubengebäude strömen kann. Aus Sicherheitsgründen muss das Grubengas durch technische Maßnahmen wie die Zufuhr von Frischluft verdünnt (Bewetterung) oder beim Abbau von Flözen mit hohen Gasinhalten aus Bohrlöchern abgesaugt und entfernt werden (Vorentgasung).

Diese natürliche Ausgasung endet nicht mit der Stilllegung eines Bergwerkes. Es verbleibt ein Teil des Grubengases als natürlicher Restgasinhalt in den Abbaubereichen.

Dieser Restgehalt ist u. a. abhängig vom Durchbauungsgrad der Lagerstätte. Der Prozess der Grubengasfreisetzung kann noch Jahrzehnte nach Ende des Abbaus andauern. Besonders in den alten, nicht mehr bewetterten Abbaubereichen kann es zu einer Gasanreicherung kommen. Folglich können diese alten Abbaubereiche, vor allem, wenn sie in der Nähe von gasreichen Kohlenflözen liegen, noch immer über einen hohen Restgasinhalt verfügen. Die Höhe der Ausgasung nach Stilllegung hängt von der Konzentration des Restgases und von den Luftdruckschwankungen ab.

Bei niedrigem Luftdruck gelangt Grubengas aus dem Grubengebäude an die Tagesoberfläche. Bei hohem Luftdruck hingegen kann sich die Strömungsrichtung umkehren und Frischluft strömt in das Grubengebäude. Bevorzugte Strömungswege von der Tagesoberfläche in das Grubengebäude stellen die Schächte und sonstigen Tagesöffnungen des Bergbaus dar. Auch zurückgelassene Rohrleitungen (insbesondere Ent-

Tab. 4: Gliederungsübersicht für Kohleflözgase, nach THIELEMANN (2002).

Flözgas Coal Seam Methane (CSM)		Coal Mine Methane (CMM)		Grubengas Abandoned Mine Methane (AMM)	
Bestandteil	Vol.-%	Bestandteil	Vol.-%	Bestandteil	Vol.-%
CH ₄	90 – 95	CH ₄	25 – 60	CH ₄	60 – 80
CO ₂	2 – 4	CO ₂	1 – 6	CO ₂	8 – 15
CO	0	CO	0,1 – 0,4	CO	0
O ₂	0	O ₂	7 – 17	O ₂	0
N ₂	1 – 8	N ₂	4 – 40	N ₂	5 – 32
Höhere Kohlenwasserstoffe in Spuren					

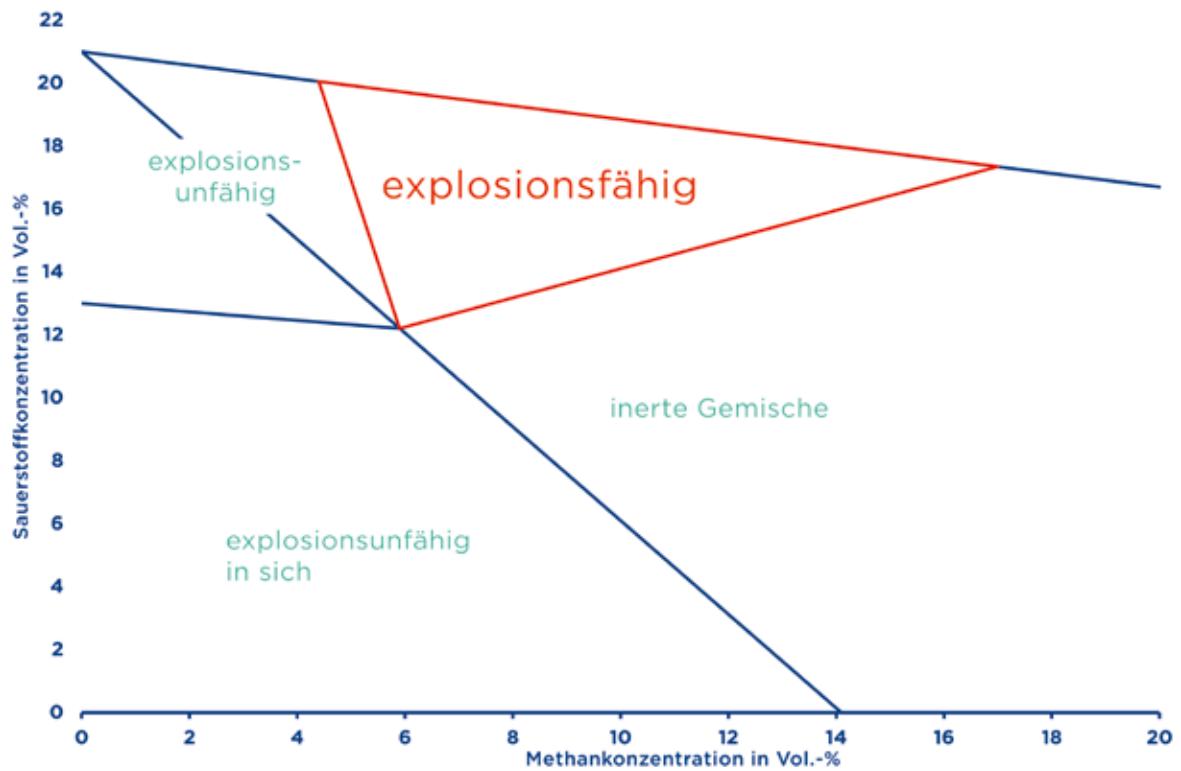


Abb. 17: Explosionsbereiche für Methan-Luftgemische, nach CHRISTENSEN (2007).

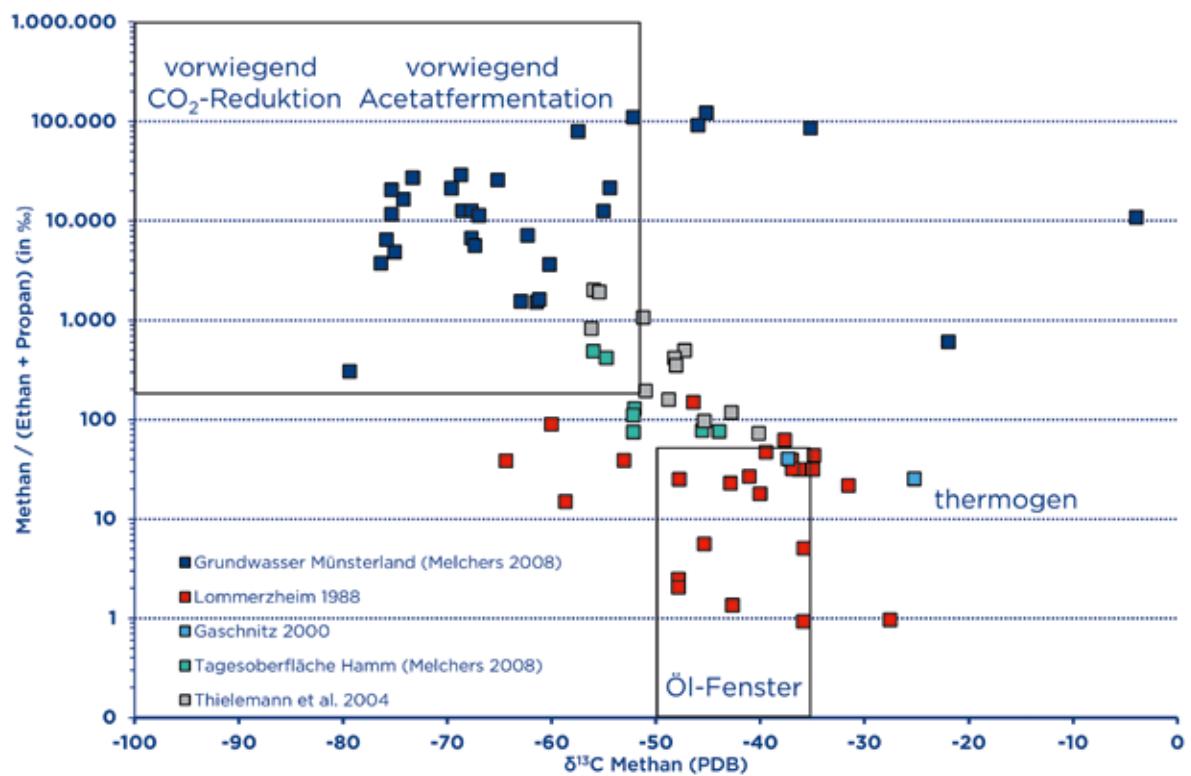


Abb. 18: Erweitertes Klassifikationsdiagramm, nach BERNARD et al. (1977; aus MELCHERS 2008).

2.4.

Grubenwasser-chemie

gasungsleitungen) bilden geeignete Pfade für das Grubengas. Zusätzlich kann Grubengas auch über tektonische Störungen in Kombination mit einer geringen Deckgebirgsschicht an die Tagesoberfläche gelangen. Während die Gasaustritte an den Entgasungsleitungen der Schächte und Tagesöffnungen punktuell genau verortet werden können, sind die Austritte an tektonischen Störungen häufig flächig und diffus.

Mit dem Grubenwasseranstieg verringert sich das für die Gasspeicherung zur Verfügung stehende Hohlräumvolumen. Das vorhandene Hohlräumvolumen wird zunehmend durch Wasser gesättigt und der Zutritt von Grubengas aus dem Steinkohlengebirge nimmt ab. Liegen isolierte Abbaue vor, die durch den Grubenwasseranstieg unter Druck stehen, kann es zu einer Verdrängung des Restgasinhalts kommen. Die freien Gase werden dadurch mobilisiert und können letztendlich zu Ausgasungen führen.

Sobald der hydrostatische Druck des ansteigenden Grubenwassers den verbleibenden Desorptionsdruck von Methan übersteigt, wird kein Grubengas mehr aus den Kohleflozen ausgetragen. Nach Überstauung aller Flöze und aller Abbaue (d. h. der Grubenwasserspiegel erreicht die Hangengrenze des Karbons) ist davon auszugehen, dass die Gasfreisetzungsr率 ein Minimum erreicht und damit der Ausgasungsprozess als abgeschlossen angesehen werden kann. Wie Versuche in Lothringen (Frankreich) indes gezeigt haben, werden auch nach Abschluss eines Grubenwasseranstiegs langfristig geringe Mengen an Methan im Grubenwasser gelöst und freigesetzt (KLINGER et al. 2013).

Die Wissenschaft der Hydrochemie als Teilgebiet der Hydrogeologie beschäftigt sich hauptsächlich mit den in Wasser vorhandenen Inhaltsstoffen. Diese Inhaltsstoffe können entweder gelöst oder ungelöst sein. Zu den gelösten Inhaltsstoffen zählen vor allem Elektrolyte, Anionen und Kationen, Gase, organische Verbindungen und aquatische Komplexverbindungen. Als ungelöste Inhaltsstoffe werden in der Regel partikuläre Bestandteile wie Feststoffe im Mikrometerbereich (z. B. Kolloide, feine Tonpartikel oder aber auch Mikroorganismen wie Bakterien) oder Emulsionen – fein verteilte Tröpfchen von in Wasser wenig bis nicht-löslichen Flüssigkeiten wie Fette oder Öle – verstanden. In der Regel wird die Grenze zwischen gelöst und ungelöst anhand der im praktischen Einsatz gängigen Porengröße der Probenfilter (0,45 µm) gezogen (WISOTZKY et al. 2018).

Löslichkeit

Bereits vor über 80 Jahren veröffentlichte NODDACK (1936) den Gedanken, dass in jedem Stoff, sei er natürlichen oder künstlichen Ursprungs, jedes (damals bekannte) chemische Element vorhanden ist. Dieses Postulat wurde auch als „Allgegenwart der Elemente“ bezeichnet. Aus heutiger Sicht spricht man in der *Thermodynamik* etwas abgeändert von der „Allgegenwart der Stoffe“. Diese besagt, dass grundsätzlich jeder Stoff in jedem anderen beliebigen Stoff in einer bestimmten Menge, abhängig von Druck und Temperatur, löslich ist und sich das System somit im thermodynamischen Gleichgewicht befindet. Auf Wasser oder speziell auf Grubenwasser übertragen bedeutet dies, dass es nach dem Durchdringen mehrerer

Gesteinsschichten auch mit jeder dieser Schicht zu diversen Lösungsvorgängen gekommen ist. Folgerichtig kann jedes natürlich vorkommende chemische Element in großen oder kleinen Konzentration enthalten sein (WOLKERSDORFER 2013).

In welchem Maße Grund- und Grubenwasser vor allem an gelösten Inhaltsstoffen angereichert ist, ist also eine Folge der Genese der Wässer, die wiederum von mehreren Faktoren abhängt. Dabei ist einerseits entscheidend, welche Art von Gesteinen das Wasser auf seinem Weg durchflossen hat und welche Zeit es hatte, die Minerale der Gesteine an- bzw. aufzulösen. Dabei spielt auch die Art der Minerale eine entscheidende Rolle, nämlich ob es sich um zumeist leicht lösliche Minerale (z. B. Steinsalz, Calcit, Gips etc.) oder um schwer lösliche Minerale (z. B. Silikate) handelt. Andererseits beeinflussen physikalische Parameter wie Druck und Temperatur des Wassers oder die Korngröße der Mineralphasen die Menge der gelösten Inhaltsstoffe. Dabei gilt für die meisten Stoffe, dass sie unter höheren Temperaturen und höheren Drücken wasserlöslicher werden. Die Korngröße der Minerale spielt eine erhebliche Rolle, da sie die effektive Oberfläche für die ablaufenden chemischen Reaktionen beeinflusst (LOTTERMOSER 2010; TREMBLAY & HOGAN 2014). Die Menge an gelösten Inhaltsstoffen wirken sich wiederum auf die Löslichkeit anderer Stoffe aus (beispielsweise, wenn zwei Mineralphasen gemeinsame Ionenpaare haben – z. B. NaCl und KCl) und können zu einer Änderung des pH-Wertes (siehe Infobox zu „Chemische Begriffe“) führen, was ebenfalls die Löslichkeit vieler Minerale steuert.



Abb. 19: Pyritaggregat mit typischer Längsstreifung der würfelförmigen Kristalle (Foto: Bastian Reker).

Einen weiteren Einfluss haben *Sorptionsprozesse* (Adsorption, Absorption und Desorption), die vor allem bei den natürlich vorhandenen oder in die Grubenbauen anthropogen eingebrachten organischen Stoffen, wie beispielsweise Hydraulik- oder Motoröle, stattfinden (DENNEBORG et al. 2017). Es gibt also viele unterschiedliche Prozesse, die sich gegenseitig beeinflussen können und zu höheren oder niedrigeren Auflösungsraten führen. Für das Grubenwasser entscheidend sind vor allem die Mineralphasen, die sich durch die Sulfidverwitterung (häufig auch vereinfacht als Pyritverwitterung oder -oxidation bezeichnet) gebildet haben und im Zuge des Grubenwasseranstiegs als gelöste Fracht transportiert werden.

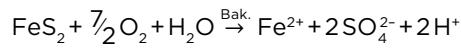
Sulfidkonzentration von Steinkohlen

Steinkohlenlagerstätten haben abhängig von ihrer Genese – marin oder terrestrisch gebildet – unterschiedliche Konzentrationen an Sulfiden und Disulfiden wie Pyrit (Abb. 19) oder Markasit. Oftmals besitzen marin bzw. paralisch gebildete Steinkohlen höhere Sulfidkonzentrationen als terrestrisch bzw. *lithisch* gebildete Steinkohlen. Unter Sauer-

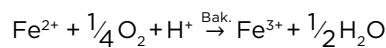
stoffabschluss sind diese Minerale weitestgehend stabil. Der Sauerstoff, der im Wasser gelöst transportiert werden kann, ist nicht ausreichend, um nennenswerte Mengen an Sulfiden zu verwittern. Im Zuge des Rohstoffabbaus und den damit verbundenen Wasserhaltungs- und Bewetterungsmaßnahmen kommt es jedoch zu einem erheblichen Eintrag an Luftsauerstoff. Im Zuge dessen beginnen die Sulfidminerale zu verwittern und es bildet sich eine Vielzahl unterschiedlicher Sekundärminerale, in der Regel als *Sulfat-Hydrate* wie Römerit, Jarosit oder Schwertmannit.

Disulfidoxidation

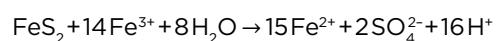
Der Prozess der Disulfidverwitterung beginnt, indem beispielsweise Pyrit mit Sauerstoff und Wasser reagiert, was zweiwertiges Eisen, Sulfat und Protonen freisetzt:



Das gelöste zweiwertige Eisen reagiert seinerseits mit Sauerstoff und den Protonen, wodurch dreiwertiges Eisen und Wasser entstehen:



Diese beiden Reaktionen werden in der Regel bakteriell durch die Bakterienstämme *Acidithiobacillus ferrooxidans* (Eisen- und Schwefel-oxidierend) und *Acidithiobacillus thiooxidans* (Schwefel-oxidierend) katalysiert (KELLY & WOOD 2000; JOHNSON & HALLBERG 2003) und um bis zu einen Faktor von 10^6 beschleunigt. Insbesondere die zweite Reaktion ist ein wichtiger Schritt, da dreiwertiges Eisen wiederum als Oxidationsmittel für das Disulfid wirkt:



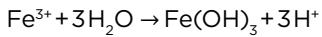
Es ist also ein sich mit der Zeit selber verstärkender Prozess, der mit Hilfe der bakteriellen Katalyse für die hohen Metall- und Sulfatkonzentrationen des Grubenwassers verantwortlich ist. Durch die Freisetzung von Protonen wird ferner die Acidität (siehe Infobox zu „Chemische Begriffe“) des Grubenwassers deutlich erhöht (SINGER & STUMM 1970). Die Partikelgröße der Disulfidminerale spielt ebenfalls eine entscheidende Rolle für die Kinetik der ablaufenden Zersetzungreaktion (TREMBLAY & HOGAN 2014). Als besonders reaktionsfreudig werden Pyritkristalle mit framboideo oder polyframboideo



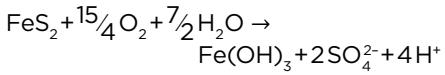
Abb. 20: Typische Folgen unkontrollierter Grubenwasseraustritte an der Tagesoberfläche mit den charakteristischen Eisenhydroxid-Ausfällungen in Südafrika (Foto: Bastian Reker).

Form angesehen (EVANGELOU 1995), die zumeist nur eine Größe im Mikrometerbereich aufweisen und damit eine große Oberfläche besitzen.

In einem letzten Schritt fällt das dreiwertige Eisen als Hydroxid unter weiterer Protonenfreisetzung aus:



Insgesamt können diese Reaktionen in folgender Summengleichung angegeben werden (YOUNGER 2000):



Dieser Prozess ist im Grunde genommen das, was auch als juvenile Acidität bezeichnet wird (siehe Infobox zu „Chemische Begriffe“). In der Regel verläuft er jedoch nicht vollständig

während der aktiven Wasserhaltungsmaßnahmen eines Bergwerks ab. Stattdessen bilden sich durch eingetragene Wässer und durch die Bewetterung eindringende Luftfeuchtigkeit besonders im acidischen Verwitterungsmilieu (CRAVOTTA 1993) eine Reihe verschiedener Eisensulfat-Hydrate infolge der Sulfidverwitterung. Diese Sekundärminerale werden auch als „acid generating salts“, also säureproduzierende Salze bezeichnet (RANDALL & OLYPHANT 1993). Sie bilden sich bzw. fallen aus, wenn die Löslichkeitsprodukte aus den Verwitterungslösungen im Bergwerk überstiegen werden (ALPERS et al. 1994). Die gebildeten Sulfate sind zumeist Eisen(II)- und Eisen(III)-Sulfate sowie eine Mischung aus beiden in Hydratform. Diese Reaktionsprodukte sind das, was YOUNGER (1997) als „vestigial acidity“ bezeichnet. In

WOLKERSDORFER (2013) wird dies als „rudimentäre Acidität“ übersetzt (siehe Infobox zu „Chemische Begriffe“). Da diese Salze sehr leicht wasserlöslich sind, werden sie im Zuge eines Grubenwasseranstiegs leicht gelöst und können auf diese Weise entweder selber wieder als Oxidationsmittel für die weitere Sulfidverwitterung zur Verfügung stehen oder als gelöste Fracht bis an die Tagesoberfläche transportiert werden. Dies ist die Ursache für den *First Flush* Effekt (siehe Infobox zu „Auswaschung eines Bergwerks [First Flush Effekt]“) und die häufige Beobachtung der gelblichen bis rötlichen Eisenhydroxid-Ausfällungen an der Tagesoberfläche (Abb. 20). Derart angereicherte Wässer werden in der internationalen Literatur auch als Acid Mine Drainage (AMD) bezeichnet.

Chemische Begriffe

Für den Begriff „Säure“ und „Base“ gibt es in der Chemie verschiedene Definitionen. Das einfachste und älteste Konzept nach ARRHENIUS definiert eine Säure als eine Wasserstoffverbindung, die in wässriger Lösung zerfällt und dabei in Wasserstoffionen (H^+) und negativ geladene Säurerestionen dissoziiert. Dabei ist die Säure umso stärker, je höher sie dissoziiert und folglich je höher die Aktivität bzw. Konzentration der Wasserstoffionen ist. Eine Base zerfällt in wässriger Lösung hingegen in Hydroxidionen (OH^-) und positiv geladene Baserestionen. Dabei gilt äquivalent wie bei der Säure, dass die Base umso stärker ist, je höher die Konzentration der Hydroxidionen ist (BINNEWIES et al. 2016). Das Verhältnis zwischen den H^+ - und OH^- -Ionen gibt dementsprechend an, ob eine Lösung sauer oder alkalisch (basisch) ist. Dies wird durch den pH-Wert zum Ausdruck gebracht, der als negativer dekadischer Logarithmus des Zahlenwerts der Aktivität der Wasserstoffionen definiert ist:

$$pH = -\log a(H^+)$$

Eine etwas neuere und allgemeinere Definition wurde mit dem BRÖNSTEDT-LOWRY-Konzept gegeben. Dort werden Säuren als Protonendonatoren und Basen als Protonenakzeptoren definiert. Für weitere Erläuterungen wird auf BINNEWIES et al. (2016) verwiesen.

Unter „Acidität“ versteht man in der Hydrochemie etwas allgemeiner die Summe der Komponenten im Wasser, die sauer reagieren, also dazu in der Lage sind, Wasserstoffionen freizusetzen. Dabei kann es sich um dissozierte Metalle oder um orga-

nische sowie anorganische Säuren handeln (HEDIN et al. 1994; WOLKERSDORFER 2013). Korrespondierend dazu beschreibt die Basenkapazität die Fähigkeit einer Lösung, Basen zu neutralisieren. Eine Flüssigkeit mit hoher Basenkapazität ist also sauer bzw. acidisch, während umgekehrt eine Flüssigkeit mit hoher Säurekapazität alkalisch ist. Ob ein Wasser netto acidisch oder netto alkalisch ist, entscheidet sich anhand der Differenz beider Parameter (HEDIN et al. 1994):

- netto alkalisch bzw. basisch:
Alkalinität > Acidität
(bzw. Säurekapazität > Basenkapazität)
- netto acidisch bzw. sauer:
Acidität > Alkalinität
(bzw. Basenkapazität > Säurekapazität)

Da sich der pH-Wert nur von der Aktivität der Wasserstoffionen im Wasser ableitet und nicht die Summe aller sauer oder basisch reagierenden Komponenten berücksichtigt, kann er nur als Hinweis für netto acidisches oder netto alkalisches Wasser dienen. In der Regel kann Grubenwasser erst unterhalb eines pH-Wertes von 5,6 immer als sauer bezeichnet werden (WOLKERSDORFER 2013). Wässer mit pH-Werten um 7 werden als zirkumneutral, Wässer mit einem pH-Wert > 7 als basisch bezeichnet.

Die Begriffe „rudimentäre Acidität“ („vestigial acidity“) und „juvenile Acidität“ („juvenile acidity“) wurden 1997 von YOUNGER geprägt. Als rudimentäre Acidität wird die Acidität bezeichnet, die durch das Auswaschen der im Rahmen der Sulfidverwitterung gebildeten Sekundärmine-

rale durch Grubenwasser freigesetzt wird (WOLKERSDORFER 2013; siehe oben). Als juvenile Acidität wird hingegen die Acidität bezeichnet, die direkt aus der Protonen- und Metallacidität (vor allem gelöstes Eisen, Mangan und Aluminium; HEDIN et al. 1994) der Disulfidoxidation im Schwankungsbereich des Wasserstands im ungefluteten Bergwerksbereich generiert wird (YOUNGER 1997).



Auswaschung eines Bergwerks (First Flush Effekt)

Der Begriff „First Flush“ wurde erstmals von YOUNGER (1997) erwähnt. Er beschreibt den initialen, steilen Anstieg und anschließenden allmählichen Abfall der zumeist Eisen- und Sulfatkonzentrationen nach Abschluss des Grubenwasseranstiegs in einem Steinkohlenbergwerk. Verantwortlich dafür ist die rudimentäre Acidität (siehe Infobox zu „Chemische Begriffe“), also die Auflösung bzw. Auswaschung von während der Disulfidoxidation gebildeten Sekundärmineralen. Die Dauer des Vorgangs wird mit folgender empirischer Formel (YOUNGER 2000; WOLKERSDORFER 2013) abgeschätzt:

$$t_f = f(aci_{rem}, r_w, V, K, h_{gw}) \approx (3,95 \pm 1,2) \cdot t_{wi}$$

mit

t_f Dauer des First Flush,

t_{wi} Dauer des Wiederaufbaus,

aci_{rem} Erniedrigung der Acidität,

r_w Verwitterungsrate der säurehaltigen Minerale,

V Volumen der Grubenhohlräume,

K Leitfähigkeit der Grubenhohlräume,

h_{gw} Grundwassernaubildungsrate.

Die Dauer des First Flush, d. h. der erhöhten Sulfat- und Eisenkonzentrationen, beträgt also in etwa viermal der Zeitspanne des Grubenwasseranstiegs (Abb. 21).

Zu unterscheiden sind zwei grundlegende Entwicklungen der Gesamtacidität (Abb. 21): Wenn die Menge

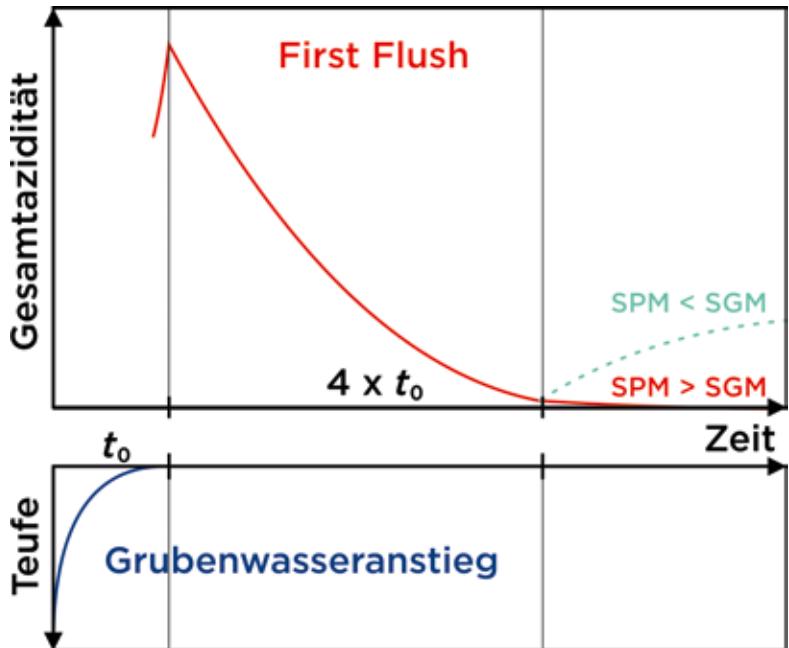


Abb. 21: Vergleich der Zeitspanne des Grubenwasseranstiegs mit der zeitlichen Entwicklung der Gesamtacidität während und nach dem First Flush (Achsen dimensionslos). SPM: Säurepuffernde Mineralphasen, SGM: Säuregenerierende Mineralphasen, verändert und erweitert nach WOLKERSDORFER & YOUNGER (2002).

der säurepuffernden Mineralphasen (Minerale, die bei der Auflösung Protonen verbrauchen, die Acidität also verringern; beispielsweise Karbonate) größer als die Menge der säuregenerierenden Mineralphasen ist, wird die Acidität und die Konzentration an Ionen (vor allem Eisen, Mangan, Aluminium) auf ein deutlich geringeres Niveau als zu Beginn des First Flush absinken. Unter säuregenerierenden Mineralphasen sind hauptsächlich die Sekundärminerale zu verstehen, die sich vor allem als Sulfate gebildet haben (siehe oben).

Eine andere Entwicklung stellt sich ein, wenn der umgekehrte Fall eintritt, also die Menge der säurepuffernden Mineralphasen kleiner als die Menge der säuregenerierenden Mineralphasen ist (grüne gestrichelte Linie in Abb. 21). Nachdem ein Minimum der Gesamtacidität erreicht ist, sind die puffernden Mineralphasen verbraucht und es kommt zu einem erneuten Anstieg der Acidität. Kurz- und Langzeit-Eisenkonzentrationen während des First Flush

(also zu Beginn und zu Ende dieses Prozesses) können anhand der Gesamtschwefelkonzentration der abgebauten Steinkohle abgeschätzt werden. Wenn diese Werte nicht gemessen wurden, können Abschätzungen anhand der Nähe der abgebauten Flöze zu marinen Horizonten erfolgen. Je kleiner der vertikale Abstand der marinen Horizonte zu den abgebauten Flözen ist, desto höher ist zumeist die Schwefelkonzentration. Dies deckt sich auch mit der Erfahrung, dass *marin* bzw. *paralisch* gebildete Steinkohlen in der Regel höhere Disulfidkonzentrationen besitzen als limnische Steinkohlen (siehe oben). Langzeitkonzentrationen können auch auf der Basis der räumlichen Nähe des Grubenwasser-austrittspunktes zum Ausbiss des nächsten assoziierten Kohlenflözes, also der Zone der möglichen fortbestehenden Pyritoxidation, abgeschätzt werden (YOUNGER & ADAMS 1999).

2.5.

Dichteschichtung

Liegen zwei oder mehr Fluide mit unterschiedlichen Dichten vor, können sie sich entweder vermischen oder geschichtet übereinanderliegen – je nachdem wie der vertikale Dichtegradient vorliegt. Die Differenzen können durch Unterschiede in der Temperatur, der Konzentrationen gelöster Inhaltsstoffe („Salinität“) sowie einer Kombination der beiden Faktoren hervorgerufen werden. Wenn demnach ausreichend große Dichteunterschiede zwischen den Flüssigkeiten vorliegen, kann es zu einer stabilen vertikalen Schichtung der Fluide mit der Ausbildung eines scharfen Grenzreichs kommen.

Bleiben beide Wassermassen stabil und es findet keine Durchmischung über den Grenzbereich statt, wird dieser Zustand als Dichteschichtung bezeichnet. In der Regel muss dazu das Fluid mit höherer Dichte unter dem Fluid mit geringerer Dichte liegen. In vielen Bergwerken trifft dieser Fall zu, da die seitlich zuströmenden Tiefenwässer deutlich höher mineralisiert sind als die oberflächennahen Wässer und damit eine höhere Dichte haben (MELCHERS et al. 2019). Diesem Trend wirkt aber der geothermische Gradient entgegen. Dadurch erwärmt sich das tiefere Wasser, was zu einer geringeren Dichte führt. Ob sich eine stabile Dichteschichtung letzten Endes ausbilden kann, hängt also davon ab, welcher dieser beiden Faktoren überwiegt bzw. wie sich im Einzelfall die Wechselwirkungen zwischen den Faktoren auswirken.

Insgesamt bewirkt eine Dichteschichtung, dass es nur einen sehr eingeschränkten Stoff- oder Wärmetransport zwischen zwei Flüssigkeiten

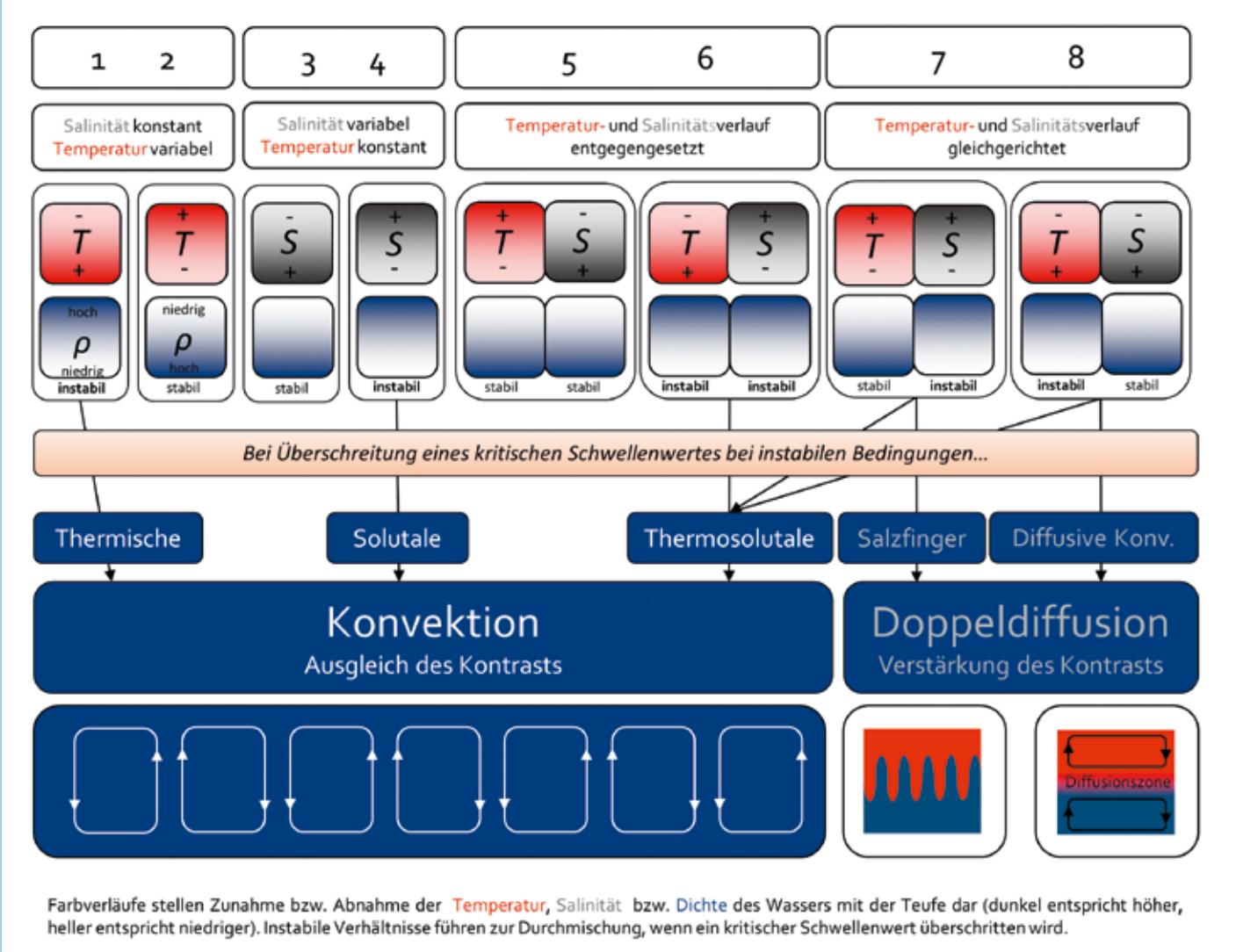
gibt. Ein Transport erfolgt bei einer Dichteschichtung primär über die Doppeldiffusion oder über Gravitation induzierte „interne Wellen“:

- Bei der **Doppeldiffusion** findet keine Durchmischung der Wassermassen statt (Abb. 22). Ein Stoff- und Wärmetransport spielt sich auf molekularer Ebene ab, wobei Wärme um einen Faktor 100 schneller übertragen wird als ein Ausgleich der Stoffkonzentrationen stattfinden kann (BERTHOLD 2009). Es wird bei der Doppeldiffusion zwischen der Salzfingerbildung und der diffusen Konvektion unterschieden (siehe Infobox zu „Triebkräfte der Dichteschichtung“).
- **Interne Wellen** bilden sich im Gegensatz zu normalen Oberflächenwellen innerhalb der Wassersäule, wenn eine kontinuierliche oder diskrete Dichteschichtung vorliegt. Sie sind eine Form der Schwerewellen, deren Antriebs- und Ausbreitungskraft durch die Gravitation bestimmt wird. Sie können als Ausdruck räumlich und zeitlich ausbreitender *Oszillationen* einer Dichteschichtung beschrieben werden (BÜTTNER et al. 2012). Wenn sie sich ungehindert ausbreiten können, bewirken sie – abgesehen von immer stattfindenden Diffusionsprozessen – keinen Wärme- oder Stofftransport in der Wassersäule. Allerdings können auch diese Wellen brechen, was zu einer turbulenten Durchmischung der Wasserschicht führen kann (BURCHARD et al. 2008).

Eine ausführliche Darstellung über die der Dichteschichtung zugrunde liegenden Prozesse ist BERTHOLD (2009) zu entnehmen.

Triebkräfte der Dichteschichtung

Salzfinger können sich bilden, wenn die Temperatur und die *Salinität* des Wassers in der tieferen Wasserschicht niedriger als in der oberflächennahen Wasserschicht sind (Abb. 22). Der Temperaturfaktor führt zu geringeren Dichten in der oberen Wassersäule, während der Salinitätsverlauf zu geringeren Dichten in der tieferen Wasserschicht führt. Beide Faktoren wirken also entgegengesetzt. Ein durch einen geringen Impuls ausgelenktes Wasserteilchen der oberen Wasserschicht (also warm und salinar) sinkt ab und gibt die Wärme schnell durch Diffusion an seine Umgebung ab, während die Salinität aufgrund der viel geringeren Diffusionsgeschwindigkeit nahezu konstant bleibt. Durch die nunmehr geringere Temperatur des Wasserteilchens erhöht sich seine Dichte, wodurch es weiter absinkt. In diesem Zuge nimmt kälteres und geringer salinares Wasser die Wärme auf und kann aufgrund der dadurch geringer werdenden Dichte weiter aufsteigen. Auf diese Weise entstehen zwischen zwei unterschiedlichen Wasserschichten fingerartige Strukturen, an deren Grenzen der Wärme- und Stoffausgleich mittels Diffusion, innerhalb der Grenzschichten aber über Konvektion erfolgt (BERTHOLD 2009). Ein interessanter Umstand dabei ist, dass bei der Betrachtung des Gesamtsystems der Salinitätstransport eine größere Rolle spielt als der Wärmetransport, obwohl der Diffusionsprozess deutlich langsamer vonstatten geht. Dies hat auch den Hintergrund, dass die Salzfinger eine gewisse Turbulenz erzeugen, über die der Stofftransport stattfinden kann.



Dies führt dazu, dass das oberflächennahe Wasser noch leichter und das tiefere Wasser noch schwerer wird. Insgesamt führt dieser Prozess also nicht zu einem Ausgleich des Dichtegradienten, sondern zu einer Verstärkung.

Wie die Salzfingerbildung ist auch die diffuse Konvektion eine Art der Doppeldiffusion (Abb. 22). Sie kann sich bilden, wenn kaltes Wasser mit höherer Dichte über warmen Wasser mit geringerer Dichte liegt und die Salinität in der tieferen Wasserschicht höher ist. Beide Faktoren bewirken also wiederum entgegengesetzte Dichtegradienten, aber im Vergleich mit der Salzfingerbildung mit umgekehrten Vorzeichen. Das warme Tiefenwasser gibt über Diffusion seine Wärme an das kühleres Oberflächenwasser ab, während die

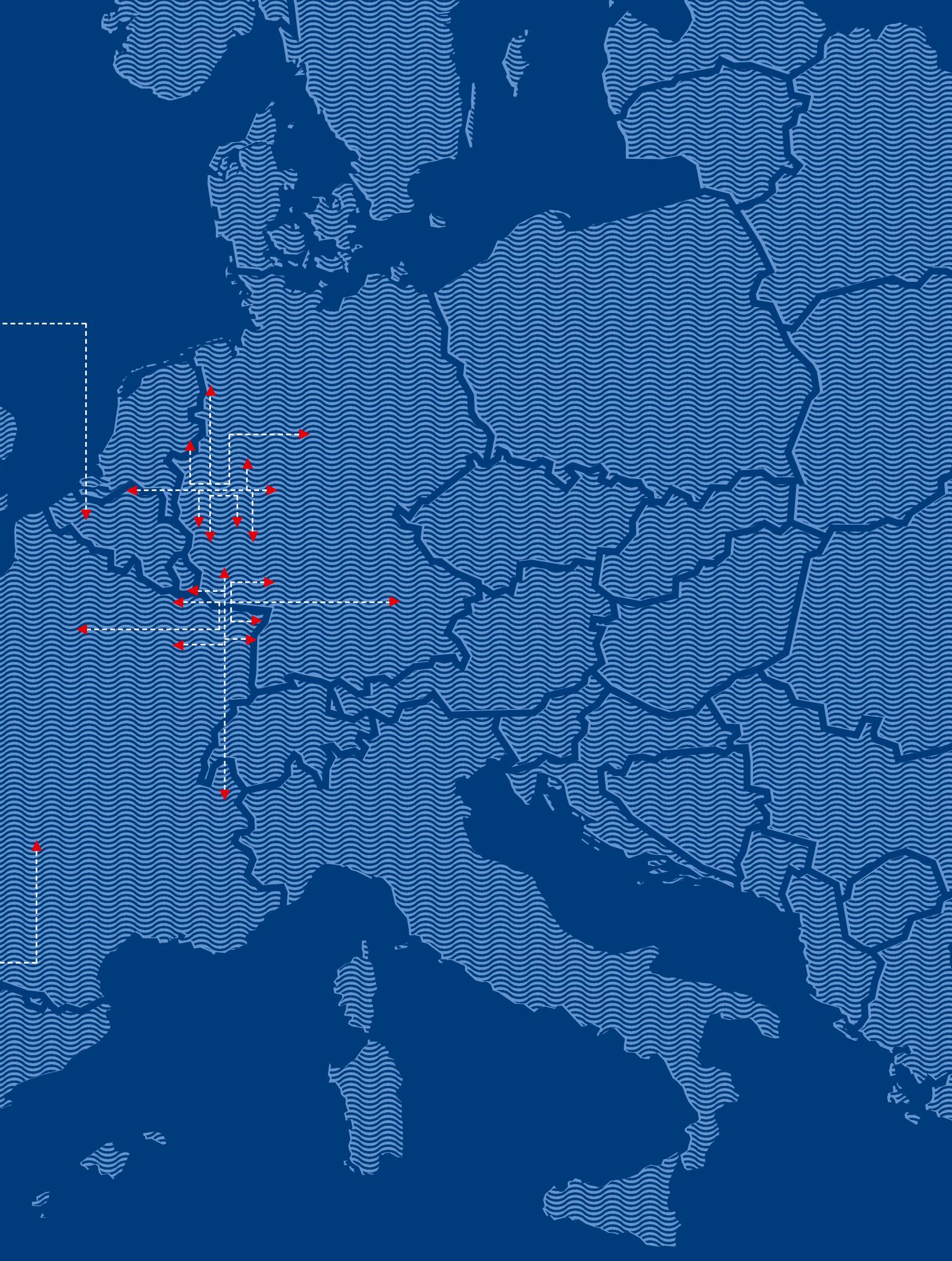
Salinität wiederum nahezu konstant bleibt. Folglich sinkt die Dichte des Oberflächenwassers, während die Dichte des Tiefenwassers steigt. Dies führt dazu, dass es auch zu einer Verstärkung des Dichtegradienten zwischen den Wasserschichten kommt. Insgesamt entstehen in beiden Schichten voneinander getrennte Konvektionszellen, deren Berührungsfläche die Diffusionszone darstellt. Wenn mehrere solcher Schichten vertikal übereinander liegen, bilden sich die typischen treppenähnlichen Strukturen der Salinitäts- und Temperaturprofile aus.

Insgesamt gibt es acht verschiedene Kombinationsmöglichkeiten der Temperatur- und Salinitätsgradienten, die entweder zu Konvektions- oder zu Doppeldiffusionsprozessen führen können (Abb. 22).

Abb. 22: Acht Kombinationsmöglichkeiten der unterschiedlichen Salinitäts- und Temperaturgradienten einer vertikalen Wassersäule sowie die resultierenden Transportprozesse, nach BERTHOLD (2009).

3. Grubenwasser- management in europäischen Steinkohlen- revieren





In vielen Ländern Europas wurde Steinkohle abgebaut. Große Steinkohlevorkommen liegen in Deutschland, in Großbritannien und in Polen. In Tabelle 5 sind die Steinkohlenreviere des europäischen Raumes aufgeführt. Elf davon werden in der vorliegenden Studie detailliert betrachtet.

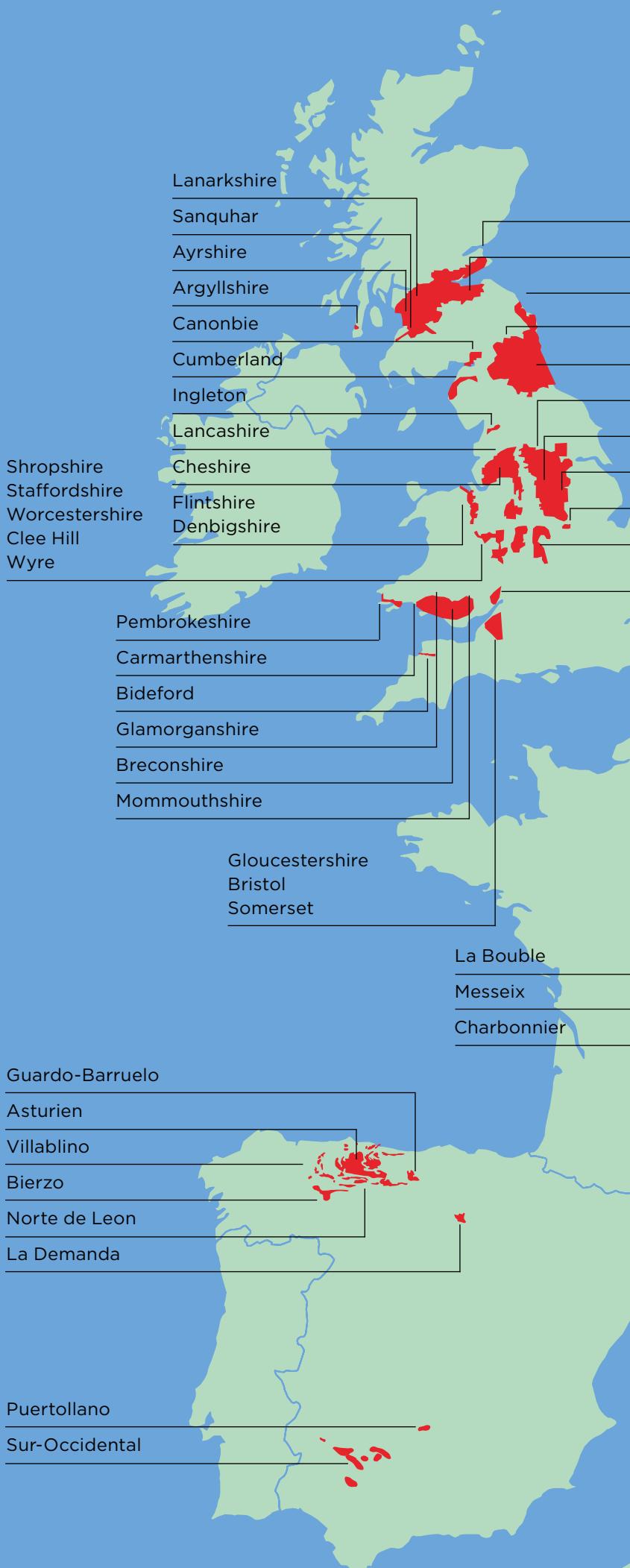
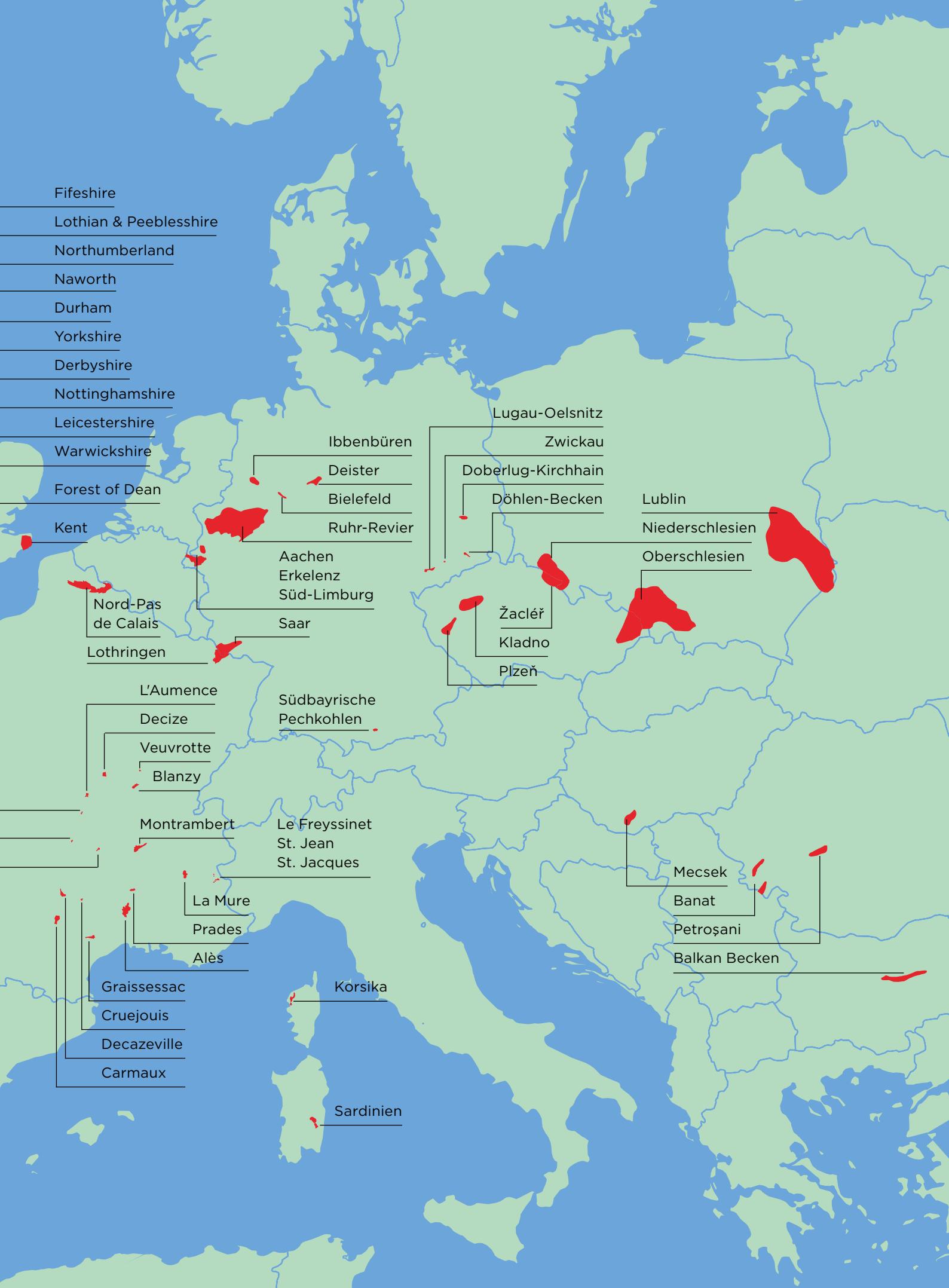


Abb. 23: Steinkohlevorkommen in Europa.
Räumliche Abgrenzung der Abbaubereiche
siehe Tab. 5.



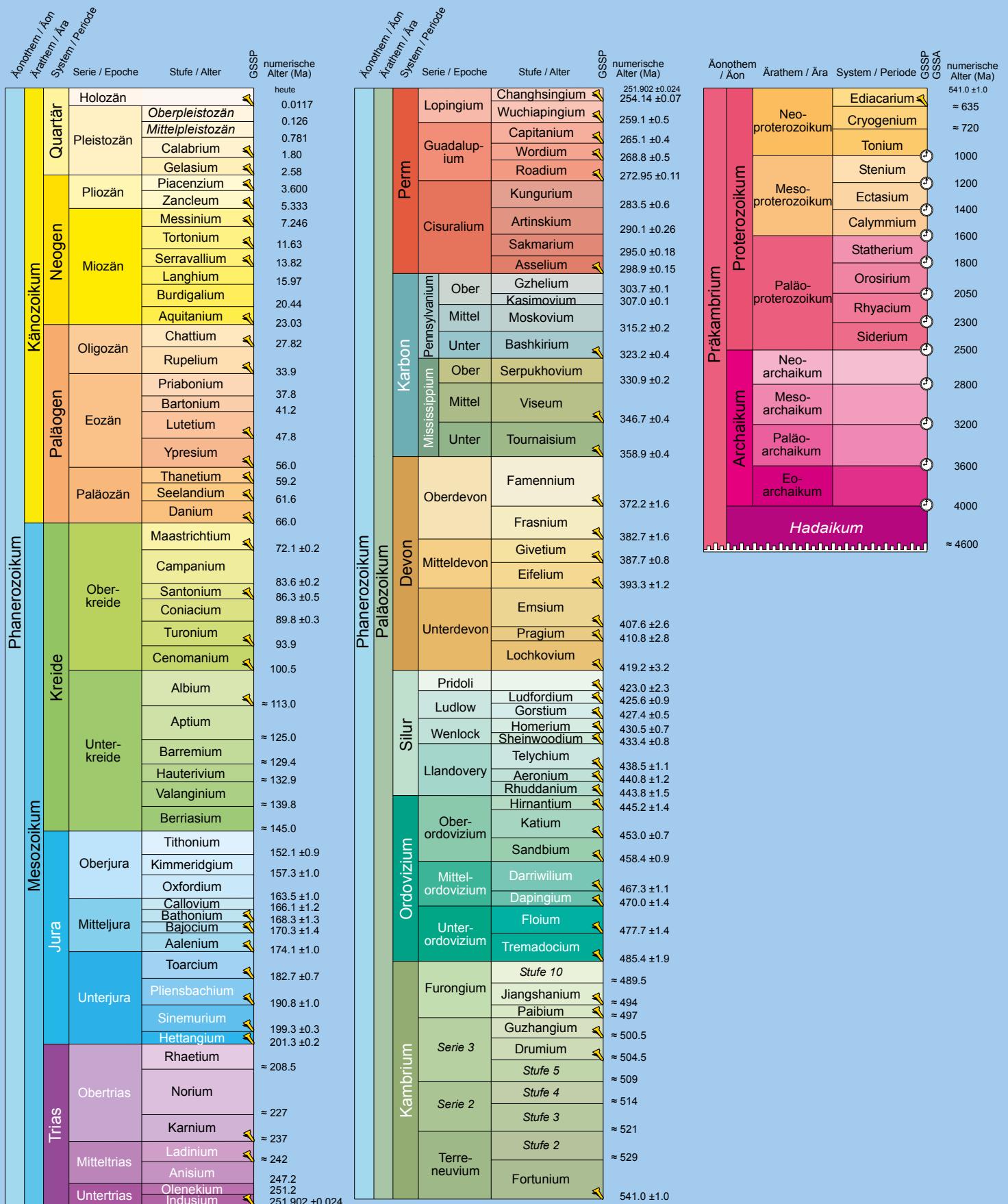


Abb. 24: Stratigraphische Tabelle nach COHEN et al. (2013).

Stratigraphie der Steinkohenvorkommen

Stratigraphie (oder auch als „Schichtentkunde“ bezeichnet) ist ein geologischer Wissenschaftszweig, der die Gesteine unter Betrachtung aller ihrer anorganischen und organischen Merkmale und Inhalte nach ihrer zeitlichen Bildungsfolge ordnet und eine Zeitskala zur Datierung der geologischen Vorgänge und Ereignisse aufstellt (MURAWSKI & MEYER 2010). Stratigraphie ist als Zweig der historischen Geologie die Grundlage zur Rekonstruktion der Entstehung der Erde.

In den Anfängen der Stratigraphie wurden die unterschiedlichen Steinsschichten nur qualitativ nach dem Prinzip, dass in tektonisch ungestörten Gebieten ältere Gesteine unter jüngeren liegen müssen, korreliert und eingeordnet. Mit diesem Prinzip konnte jedoch nur eine zeitliche Abfolge innerhalb eines lokalen oder regionalen Ablagerungsraumes erfolgen. Weiter entfernt liegende Gebiete mit gleich alten, aber anders gearteten Gesteinsserien konnten damit nicht korreliert werden. Erst die Berücksichtigung von Fossilien als Leitmarken konnte dazu beitragen, weiträumige Korrelationen zwischen unterschiedlichen Gesteinsserien herzustellen. Eine absolute Datierung der Gesteine mit Angabe des Alters in Jahren konnte erst mit der Entdeckung radioaktiver Zerfallsprozesse erfolgen. Dafür wird eine radiometrische Altersbestimmung anhand der Isotope der Elemente Kohlenstoff ($\delta^{13}\text{C}$), Sauerstoff ($\delta^{18}\text{O}$) und Schwefel ($\delta^{34}\text{S}$) genutzt.

Für die Einteilung der Erdgeschichte in eine stratigraphische Tabelle ist eine internationale Kommission zuständig (International Commission on Stratigraphy; Abb. 24; COHEN et al. 2013).

Insgesamt ist die stratigraphische Tabelle in fünf hierarchischen Stufen eingeteilt. Von der höchsten zur niedrigsten Stufe sind dies: Äon, Ära,

Periode, Epoche und Alter. Noch feinere Unterteilungen, unterhalb der Hierarchie „Alter“, sind vor allem den regionalen Gegebenheiten angepasst und dementsprechend auch nur von regionaler Bedeutung.

Jeder Hierarchie sind standardisierte Farben für die Erstellung geologischer Karten und Profilschnitte zugeordnet, die auch im vorliegenden Bericht verwendet werden. Abweichungen davon zur besseren Illustration werden an entsprechender Stelle erläutert.

Diese Tabelle wird fortwährend dem wissenschaftlichen Erkenntnisstand angepasst und besitzt weltweit Gültigkeit. Dadurch sind viele regionale Begrifflichkeiten wie beispielsweise die in Deutschland und teilweise in Europa gebräuchliche Untergliederung des oberen Karbons in Namurium (A bis C), Westfalium (A bis D) und Stephanium (A bis D) weggefallen und durch neue Namen mit anderen Zeiteinordnungen ersetzt worden. Da die alten Begrifflichkeiten jedoch nach wie vor auf regionaler Ebene eine stärkere Aussagekraft als die international festgelegten haben, werden in einigen Kapiteln dieses Berichts die regional gebräuchlichen Namen und Zeiteinordnungen für das Zeitalter des Karbons verwendet.

Die meisten Steinkohenvorkommen in den europäischen Revieren entstanden vor mehr als 300 Mio. Jahren im Oberkarbon. Die klimatischen (tropenähnlichen) Verhältnisse führten im Karbon zu einem enormen Pflanzenwachstum. Mit dem Absterben der Pflanzen begann die erste Stufe im Prozess der Inkohlung, der Umwandlung von Pflanzenmaterial in Kohle. Die Pflanzen starben ab und wurden vom Meer überspült. Dort verrotteten die Pflanzen nicht, sondern bildeten unter Abwesenheit von Sauerstoff Torf. Klastische Sedimente wie Ton oder Sand überlagerten zunehmend das organische Material und pressten unter hohen Temperaturen und mit Druck das Wasser heraus. Ebenfalls reicherte sich Kohlenstoff gegenüber den auch in der Ursprungssubstanz

befindlichen Mengen von Wasserstoff und Sauerstoff (und Stickstoff) immer stärker an. Aus dem Torf (Kohlenstoffanteil: 55–64 %, Wasseranteil: 35–39 %) entstand mit der Zeit Braunkohle (Kohlenstoffanteil: 60–75 %, Wasseranteil: 17–34 %) und dann Steinkohle (Kohlenstoffanteil: 78–90 %, Wasseranteil: 4–19 %) bis hin zu Anthrazit (Kohlenstoffanteil: 94–98 %, Wasseranteil: 1–3 %). Entscheidend für die Kohlebildung war der Wechsel zwischen Meer und Land. Nach dem Rückzug des Meeres wuchsen erneut Pflanzen und der Prozess wiederholte sich. Es bildeten sich im Idealfall vielfach Wechselseiterungen aus Sand-, Tonsteinen und Konglomeraten aus, in denen Steinkohleflöze eingelagert waren (Zyklothem).

Steinkohle wurde allerdings nicht nur im Oberkarbon gebildet. Mit der südwestlich von Hannover (Barsinghausen, Deister; Abb. 25) sowie im Weser-Ems-Gebiet (Minden) abgelagerten Wealdenkohle gibt es in Deutschland auch Steinkohlevorkommen aus der unteren Kreide (Berriasium; 145–140 Mio. Jahre). Wie in der Karbonzeit herrschte auch in der Kreide ein tropisches bis subtropisches Klima, dass das Pflanzenwachstum begünstigte und die Bildung von Kohle ermöglichte.

Ein erdgeschichtlich jüngeres Vorkommen, welches aber noch nicht zur Steinkohle gezählt wird, ist die Pechkohle in Südbayern (Region um Peißenberg, Hausham und Miesbach; Abb. 25). Dieses Vorkommen lagerte sich im Tertiär vor 40 bis 35 Mio. Jahren ab. Die Pechkohle ist eine stark inkohlte Hartbraunkohle.

Weltweit gibt es Steinkohlevorkommen, deren Entstehungszeitraum zwischen dem Karbon und der Kreide liegen. Davon liegen die größten Steinkohlevorkommen in Nordamerika, Asien und Australien.

Tab. 5: Steinkohenvorkommen in Deutschland und Europa

(Steinkohlenreviere in Deutschland nach LAHNER et al. [2004]; Steinkohlenreviere in Großbritannien nach NMRS [2019]; Steinkohlenreviere in Spanien nach IGME [1985]; Steinkohlenreviere in Frankreich nach GEINITZ et al. [1865], DM [1963] und DANIEL & JAMIESON [1992]; Steinkohlenrevier in Italien nach GEINITZ et al. [1865]; Steinkohlenreviere in Tschechien nach CLARKE & McCONVILLE [1998]; Steinkohlenreviere in Bulgarien nach MC CONVILLE et al. [1999]; Steinkohlenrevier in Ungarn nach BENSON [1999]; Steinkohlenreviere in Rumänien nach COUCH et al. [1990]; Steinkohlenreviere in Polen nach KOTARBA et al. [2002]; Steinkohlenrevier in Norwegen nach EURACOAL [2010].)

Deutschland		Großbritannien		Spanien		Frankreich	
Ruhrgebiet	Oberkarbon	Bideford	Oberkarbon	Peeblesshire	Oberkarbon	Lothringen	
Aachen	Oberkarbon	Kent	Oberkarbon	East Lothian	Oberkarbon	Nord-Pas de Calais	
Saarland	Oberkarbon	Somerset	Oberkarbon	West & Mid Lothian	Oberkarbon	Veuvrotte	
Ibbenbüren	Oberkarbon	Bristol	Oberkarbon	Lanarkshire	Oberkarbon	Decize	
Raum Osnabrück (Piesberg, Schafberg, Hügge)	Oberkarbon	Gloucestershire	Oberkarbon	Argyllshire	Oberkarbon	Blanzy	
Zwickau	Oberkarbon	Forest of Dean	Oberkarbon	Ayrshire	Oberkarbon	L'Aumance	
Lugau Oelsnitz	Oberkarbon	Newent	Oberkarbon	Sanquhar	Oberkarbon	La Bouble	
Döhlen-Becken	Perm, Karbon	Warwickshire	Oberkarbon	Canonbie	Oberkarbon	Messeix	
Doberlug-Kirchhain	Unterkarbon	Staffordshire	Oberkarbon	North Yorks Moors	Jura	Charbonnier	
Raum Halle (Saale) (Wettin, Plötz-Löbejühn)	Oberkarbon	Shropshire	Oberkarbon	Coxwold	Jura	Montrambert	
Erzgebirge (Borna-Ebersdorf, Hainichen, Flöha)	Oberkarbon	Cheshire	Oberkarbon	North Pennines	Unterkarbon	La Mure	
Südbayern (Peißenberg, Hausham, Miesbach)	Tertiär	Leicestershire	Oberkarbon	Crosby Ravensworth	Unterkarbon		
Landkreis Kronach	Oberkarbon (Stockheim, Reitsch)	Nottinghamshire	Oberkarbon	Yorkshire Dales	Unterkarbon		
Baden-Württemberg (Baden-Baden, Kinzigtal)	Oberkarbon	Derbyshire	Oberkarbon	Lune Valley	Unterkarbon		
Oberpfalz (Erbendorf)	Oberkarbon	Yorkshire	Oberkarbon	Buxton	Unterkarbon		
Harz	Oberkreide	Lancashire	Oberkarbon				
Deister	Unterkreide	Ingleton	Oberkarbon				
Schaumburger Land	Unterkreide	Stainmore	Oberkarbon				
Raum Bielefeld (Kloster Oesede, Halle [Westf.])	Unterkreide	Cumberland	Oberkarbon				
		Naworth	Oberkarbon				
		Durham	Oberkarbon				
		Northumberland	Oberkarbon				
		Pembrokeshire	Oberkarbon				
		Carmarthenshire	Oberkarbon				
		Glamorganshire	Oberkarbon				
		Breconshire	Oberkarbon				
		Monmouthshire	Oberkarbon				
		Denbigshire	Oberkarbon				
		Flintshire	Oberkarbon				
		Anglesey	Oberkarbon				
		Fifeshire	Oberkarbon				



Prades-et-Niegles

Ales

Decazeville

Carmaux

Cruejouis

Graissessac

Le Freyssinet

Eduits

Gr. Villard

St. Jean

St. Jacques

La Rame

St. Martin-de-Queyrieres

Korsika

Niederlande

Südlimburg

Oberkarbon

Belgien

Kempen

Oberkarbon

Lüttich

Oberkarbon

Hennegau

Oberkarbon

Tschechien

Žacléř

Kladno

Plzeň

Ostrava-Karvina

Bulgarien

Dobritch

Balkan Becken

Ungarn

Mecsek

Rumänien

Banat

Petroșani

Polen

Oberschlesien

Niederschlesien

Lublin

Italien

Sardinien

Norwegen

Spitzbergen

Höhenreferenzsysteme

Die meisten europäischen Länder haben ein eigenes Höhenreferenzsystem, was sich in der Regel auf die Meeresspiegelhöhe in einer küstennahen Stadt des eigenen Landes bezieht. In Deutschland wird „Normalhöhennull (NHN)“ als aktuelle Bezeichnung der Bezugsfläche für das Nullniveau bei Angabe von Höhen über dem Meeresspiegel verwendet. Es ersetzt das „Normalnull (NN)“, dessen Höhenangaben das Schwerefeld der Erde nicht berücksichtigten. Mit der Umstellung auf NHN fand eine Anbindung an das europäische Nivellementnetz (UELN) statt. Die Höhenangaben weichen nun nicht mehr von den anderen daran angeschlossenen Ländern ab. Die Bezugshöhe in Deutschland ist über einen Höhenfestpunkt an der Neuen St.-Alexander-Kirche in Wallenhorst (Landkreis Osnabrück) fixiert. Das Höhenreferenzsystem in Spanien ist „metros sobre el nivel del mar“ (Abk.: msnm) und bezieht sich auf die Meeresspiegelhöhe in Alicante. In Großbritannien findet man wahlweise die Angabe „ordnance datum“ (OD) oder „metres above sea level“ (m ASL bzw. m a.s.l.). Diese Angaben beziehen sich auf die Meeresspiegelhöhe in Newlyn. In Frankreich wird die Angabe „mètres au-dessus du niveau de la mer“ genannt, bezogen auf die Meeresspiegelhöhe in Marseille.

Da die Differenzen zwischen den einzelnen Systemen in der Regel nur wenige Zentimeter bis maximal zweieinhalb Dezimeter betragen und somit für die Betrachtungen in diesem Bericht irrelevant sind, wird im Folgenden nur die Angabe „NN“ verwendet.

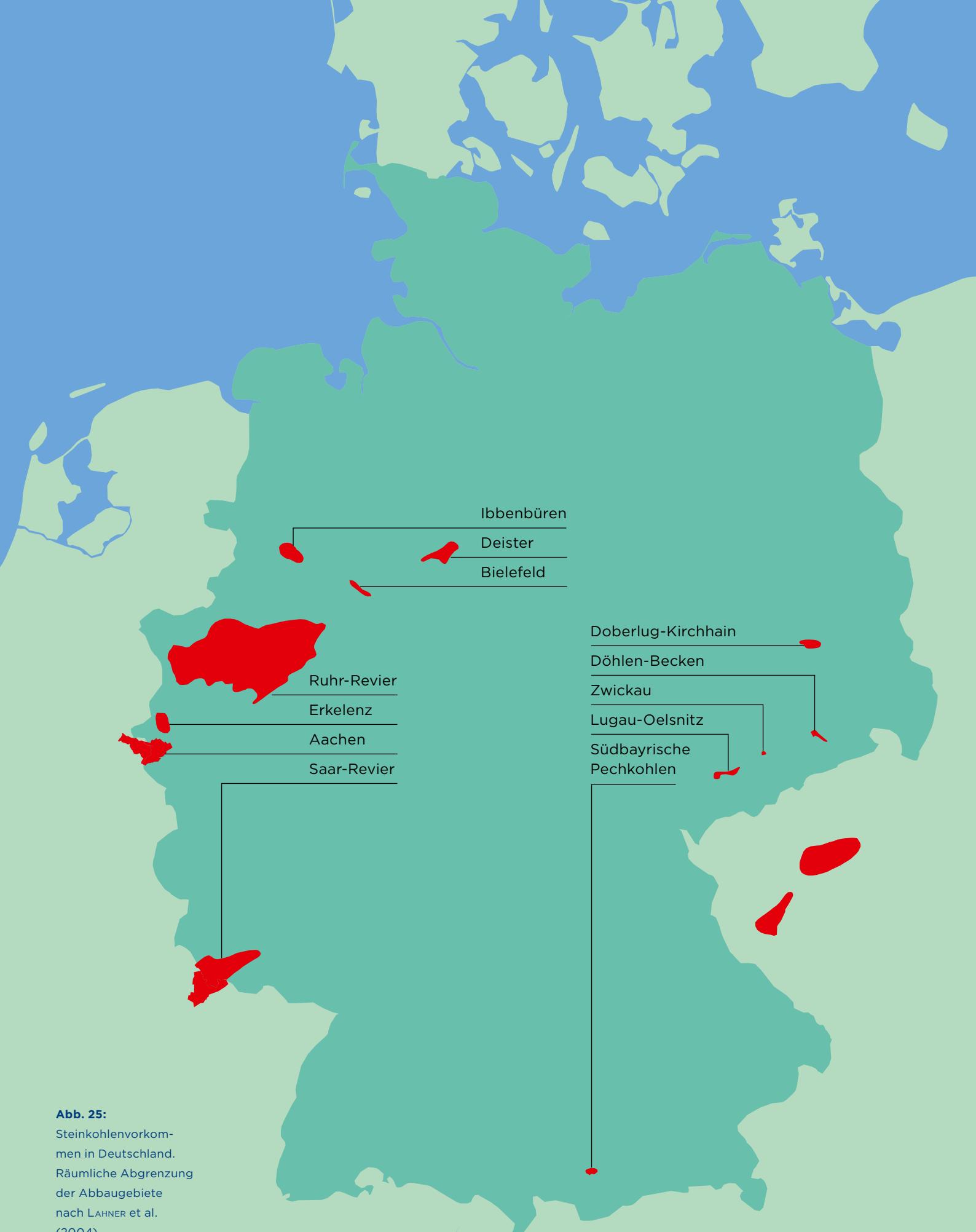


Abb. 25:

Steinkohlenvorkommen in Deutschland.
Räumliche Abgrenzung
der Abaugebiete
nach LAHNER et al.
(2004).

3.1.

Deutschland

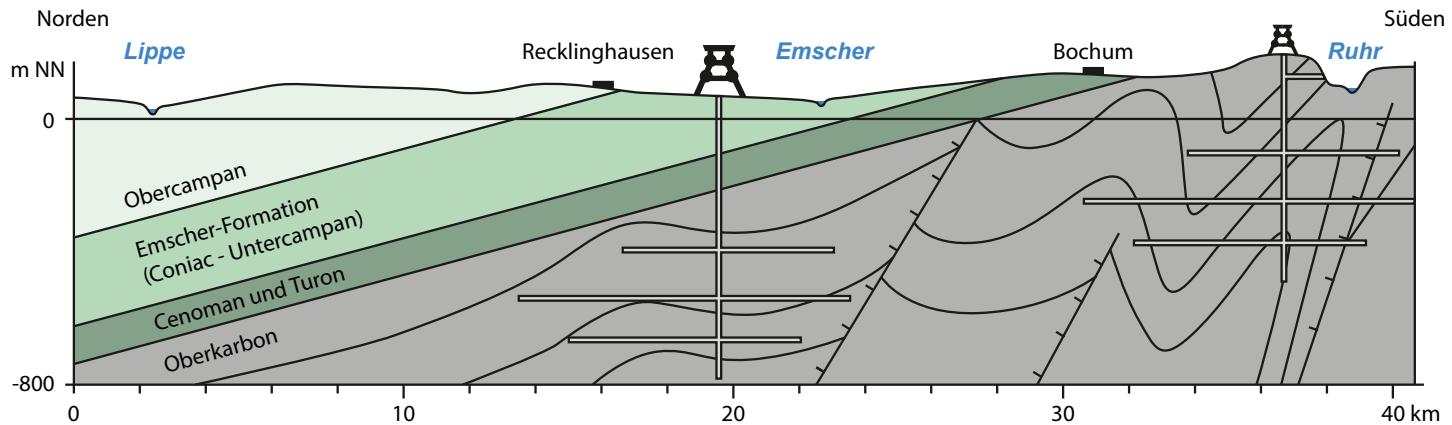


Abb. 26: Hydrogeologischer Schnitt (Nord-Süd) durch das Ruhr-Revier.

3.1.1. Ruhr-Revier

Im Ruhr-Revier (Abb. 25) wurde im Dezember 2018 mit dem Bergwerk Prosper Haniel der RAG AG das letzte Steinkohlenbergwerk geschlossen. Mit der Schließung endet eine Geschichte, die das Ruhrgebiet nachhaltig geprägt hat. In den 1950er Jahren, der Blütezeit des deutschen Steinkohlenbergbaus, waren mehr als 600.000 Menschen in 173, überwiegend im Ruhrgebiet liegenden, Bergwerken beschäftigt (GvSt 2019). Mit Beendigung des Rückzugs aus dem offenen Grubengebäude ist mit der endgültigen Stilllegung des Steinkohlenbergbaus im Ruhr-Revier der bislang umfangreichste Grubenwasseranstieg in einem europäischen Steinkohlenrevier geplant.

Geologie und Hydrogeologie

Das Gebirge der rheinisch-westfälischen Steinkohlevorkommen gliedert sich in das hangende *Deckgebirge* des Perms, der Trias, Kreide und des Tertiärs sowie in das liegende paläozoische Steinkohlen-

gebirge (Abb. 26). Das Deckgebirge und das Steinkohlengebirge unterscheiden sich hinsichtlich der Ge steinsbeschaffenheit, Tektonik und den hydrogeologischen Eigenschaften. Darüber hinaus muss zwischen dem westfälischen („Münsterländer Kreidebecken“) und dem niederrheinischen Raum („Niederrhein-Senke“) unterschieden werden (KUKUK 1938; DROZDZEWSKI et al. 1995).

Im Westfälischen Raum gliedert sich das Deckgebirge grundsätzlich in die drei lithologisch und geohydraulisch voneinander abgrenzbaren Stockwerke (vom *Hangenden* zum *Liegenden*):

- oberes Grundwasserstockwerk (z. B. Haltern- und Recklinghausen-Formation) im Hangenden des Tonmergelsteins (Mächtigkeit bis 200 m; Grundwasserleiter),
- tonige Horizonte (Mächtigkeit bis 100 m; Grundwassernichtleiter),
- Wechselfolge aus grundwasserleitenden und -nichtleitenden Schichten der Trias und Kreide (Mächtigkeit bis 300 m; Grundwasserleiter),
- unteres Grundwasserstockwerk der Kalkmergelsteine (Cenoman-

um und Turonium) im Liegenden des Tonmergelsteins (Mächtigkeit bis 300 m; Grundwasserleiter).

Im westlich anschließenden niederrheinischen Raum ändert sich der geologische Aufbau des Deckgebirges und die Schichten der Emscher-Formation dünnen zunehmend aus. Sie werden durch Schichten des Perms und Tertiärs ersetzt. Das Deckgebirge gliedert sich in lithologischer und geohydraulischer Sicht grundsätzlich in die vier Stockwerke (vom *Hangenden* zum *Liegenden*):

- oberes Grundwasserstockwerk im Hangenden der tonigen Schluffe (Mächtigkeit bis 20 m; Grundwasserleiter),
- tonige Horizonte (Mächtigkeit bis 100 m; Grundwassernichtleiter),
- Wechselfolge aus grundwasserleitenden und -nichtleitenden Schichten der Trias und Kreide (Mächtigkeit bis 300 m; Grundwasserleiter),
- Salzablagerungen des Perms (Mächtigkeit bis 200 m; Grundwassernichtleiter).

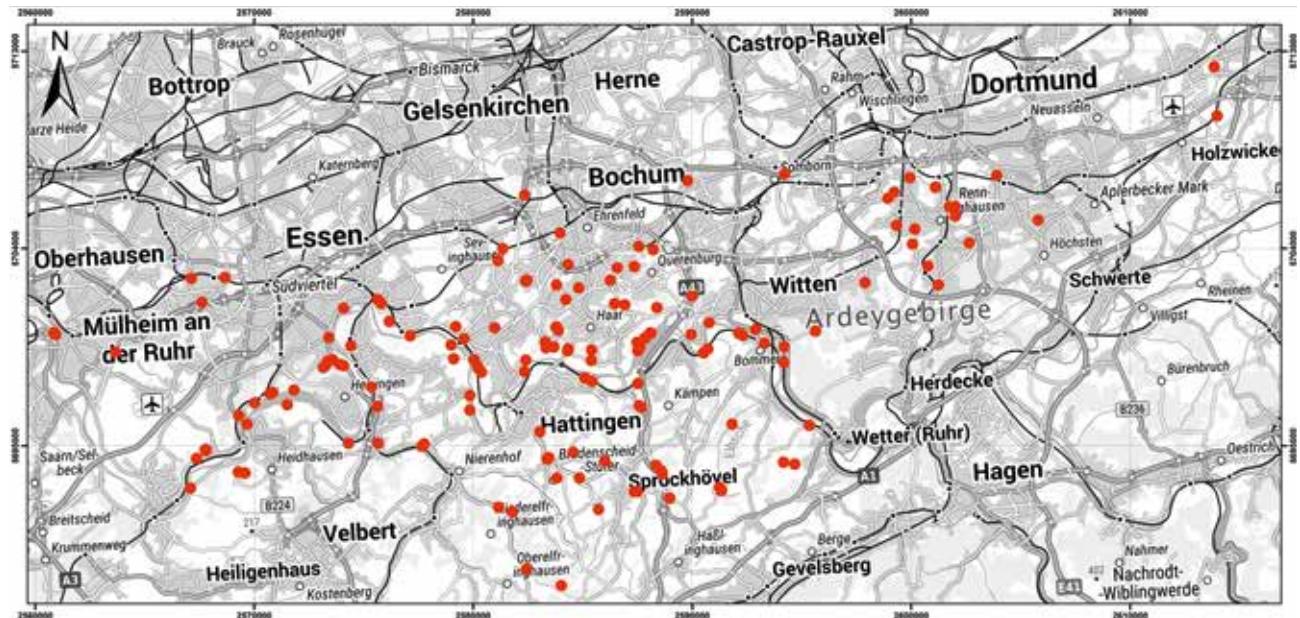


Abb. 27: Lage von Stollenmundlöchern im südlichen Ruhr-Revier.

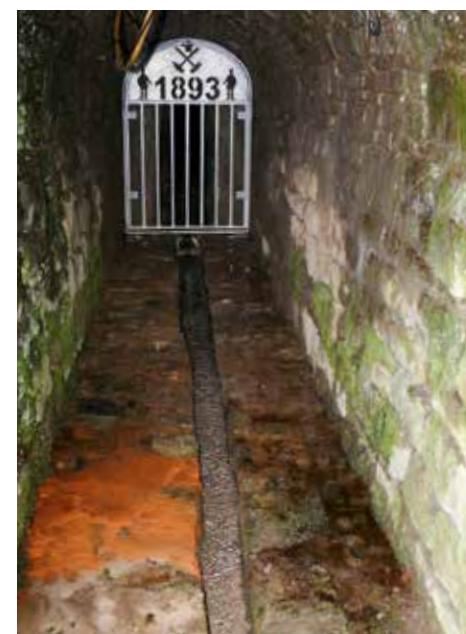


Abb. 28: Stollenmundlöcher im Ruhr-Revier (links: Franziska-Erbstollen [Witten]; rechts: Vereinigte Pfingstblume [Bochum]; Fotos: Forschungszentrum Nachbergbau).

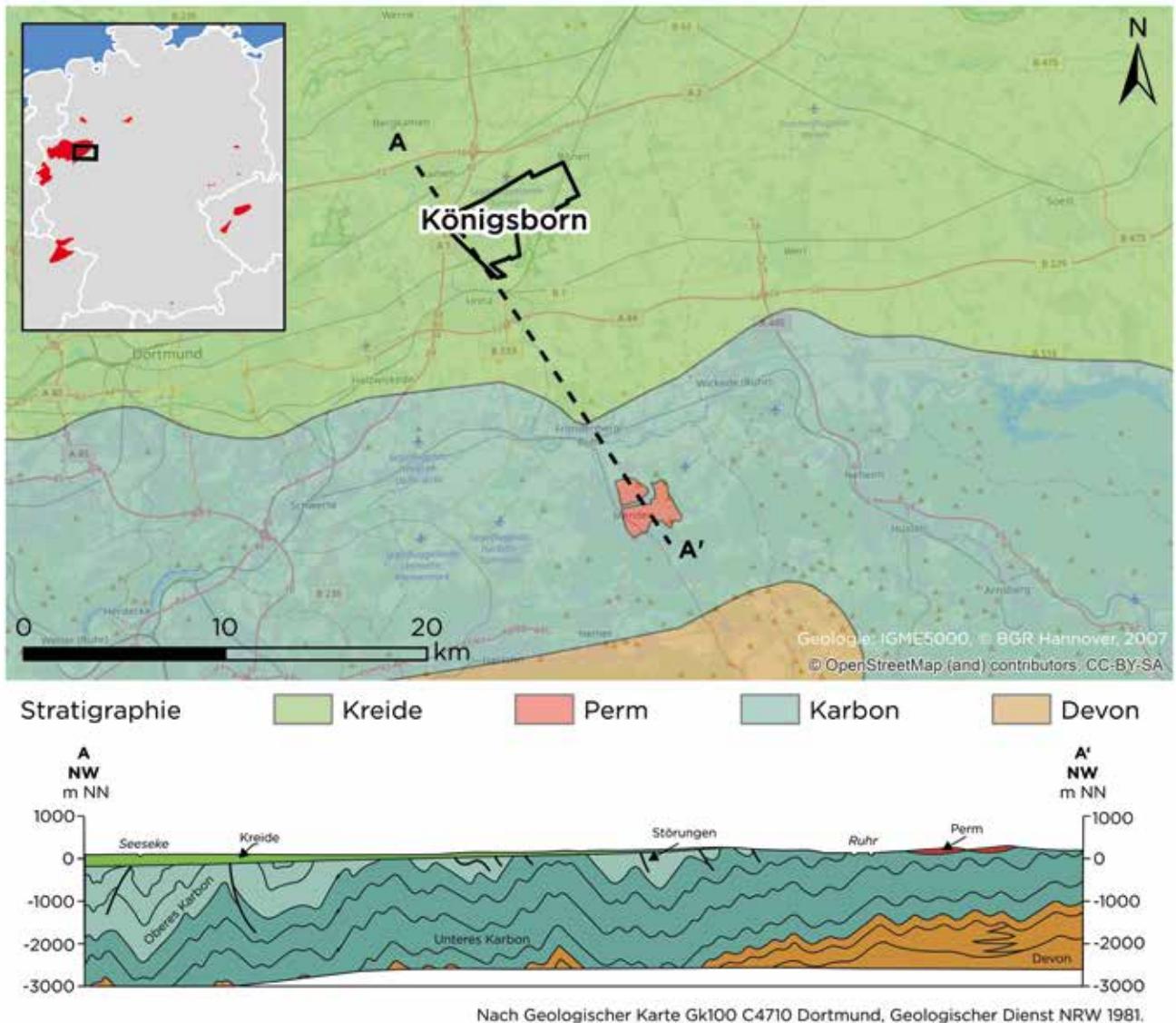


Abb. 29: Geographische und geologische Übersicht über das Bergwerk Königsborn. Geologie nach GEOLOGISCHER DIENST NRW (1981).

Das Steinkohlengebirge entstand während des Oberkarbons (323 Mio. bis 299 Mio. Jahre vor heute; DROZDZEWSKI et al. 1995; siehe Infobox „Stratigraphie der Steinkohlevorkommen“). Es stellt eine zyklische Wechselfolge aus überwiegend klastischen Gesteinen (Sand-, Tonsteine und Konglomerate) mit über 200 eingeschalteten Steinkohleflözen dar. Die Schichten des Oberkarbons werden vom Deckgebirge durch eine *Diskordanz* getrennt. Im Süden des Ruhrgebiets – etwa auf der Linie von Mülheim, Essen, Bochum und Dortmund – treten die Schichten des Oberkarbons zu Tage. Die Oberfläche des Steinkohlengebirges taucht unter den Schichten des Deckgebirges nach Norden bis Nordwesten hin mit 2° bis 3° ab. Am

nördlichen Rand des Ruhrgebiets ist die Karbonoberfläche erst in einer Teufe von rd. 1.000 m anzutreffen. Entsprechend der Einfallrichtung nimmt die Mächtigkeit des überlagernden Deckgebirges zu (Abb. 26).

Bergbau und bergmännische Wasserwirtschaft

Der Steinkohlenabbau im Ruhrgebiet begann im 12. Jahrhundert im Ruhtal, der Gegend, wo die Schichten des Oberkarbons an der Oberfläche zu Tage treten (Abb. 26). Dort wurde Steinkohle durch das Aufgraben von *Pingen* und durch die Auffahrung von Stollen abgebaut (KOETTER 2001; BLUMA et al. 2017). Die Wasserhaltung erfolgte über Wasserlösestollen, die oftmals Erbstollengerechtigkeit besaßen. Eine Vielzahl der Stollen

entwässert noch heute (Abb. 27 und Abb. 28; MELCHERS et al. 2016).

Ende des 19. Jahrhunderts wanderte der Bergbau (der Lagerstätte folgend) weiter nach Norden, wo die zunehmende Teufe der Flöze den Übergang in den Tiefbau erforderte (Abb. 26). Der Abbau erfolgte vor allem in den breiten Mulden, in denen die Flöze flach bis nur schwach geneigt abgelagert wurden. Die Personen- und Materialförderung erfolgte nun über Schächte. Diese Schächte sind heute Bestandteil der Grubenwasserhaltung und dienen teilweise der Wasserhebung. Das Steinkohlenrevier wurde dazu in Wasserhaltungsprovinzen eingeteilt. Wenige verbleibende Schächte übernehmen in Zukunft die Aufgabe, den Gruben-

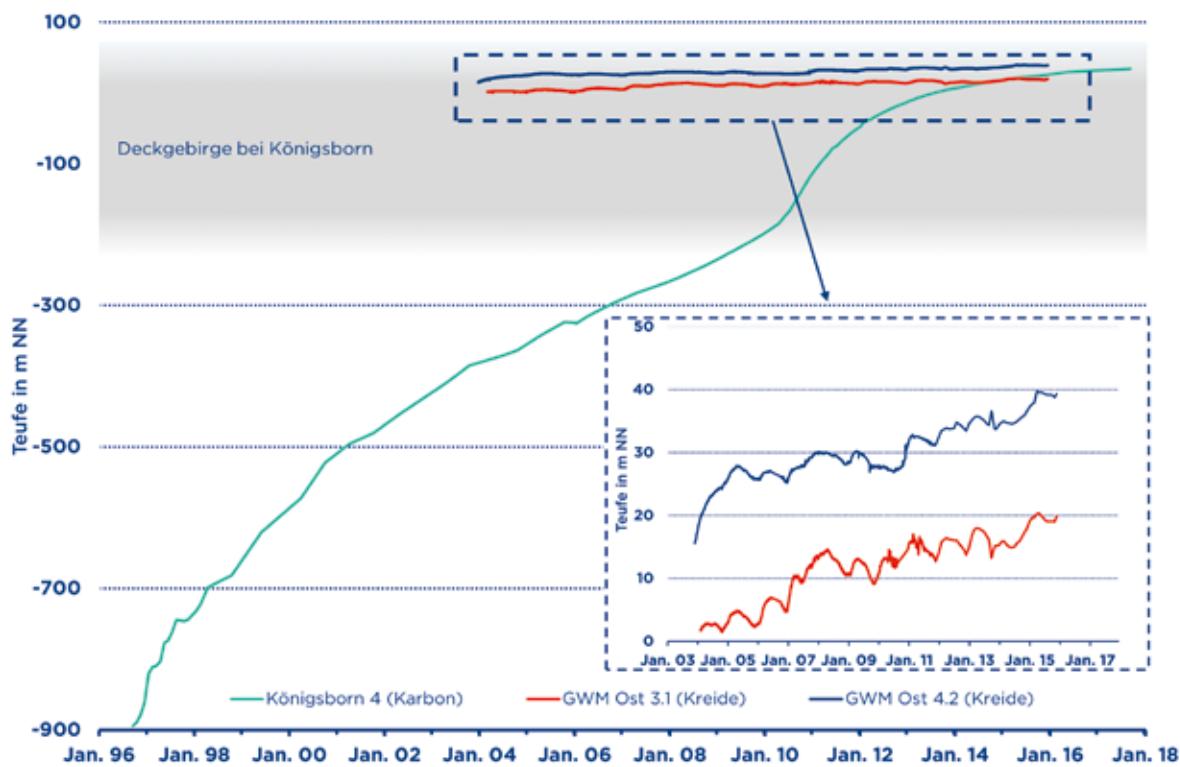


Abb. 30: Grubenwasseranstieg im Schacht Königsborn 4 und Grundwasserstände im Kluftgrundwasserleiter der Kreide. Die Grundwassermessstellen (GWM) Ost 3.1 und Ost 4.2 liegen nördlich des Bergwerks Königsborn (Daten: RAG AG).

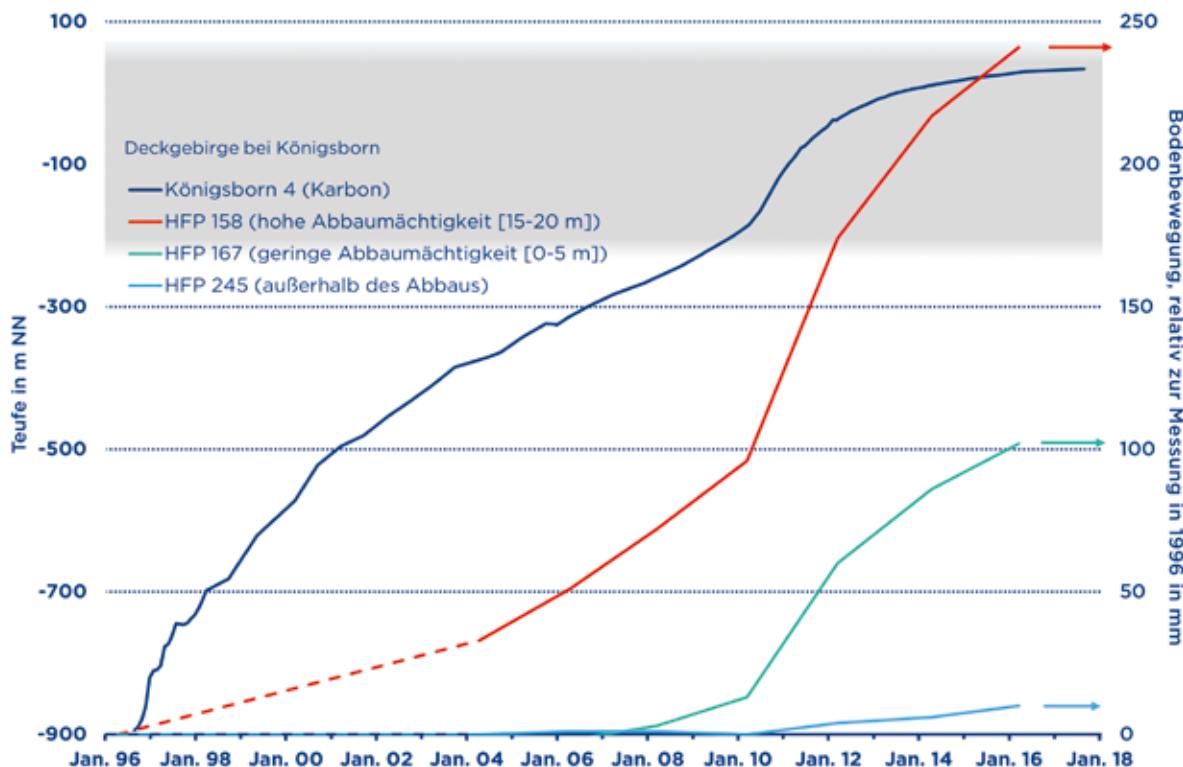


Abb. 31: Grubenwasseranstieg im Schacht Königsborn 4 und Entwicklung der Bodenhebungen an den Höhenfestpunkten HFP 158, HFP 167 und HFP 245 (Nennung in Abhängigkeit der Entfernung zum Grubengebäude des Bergwerks Königsborn; Daten: RAG AG).

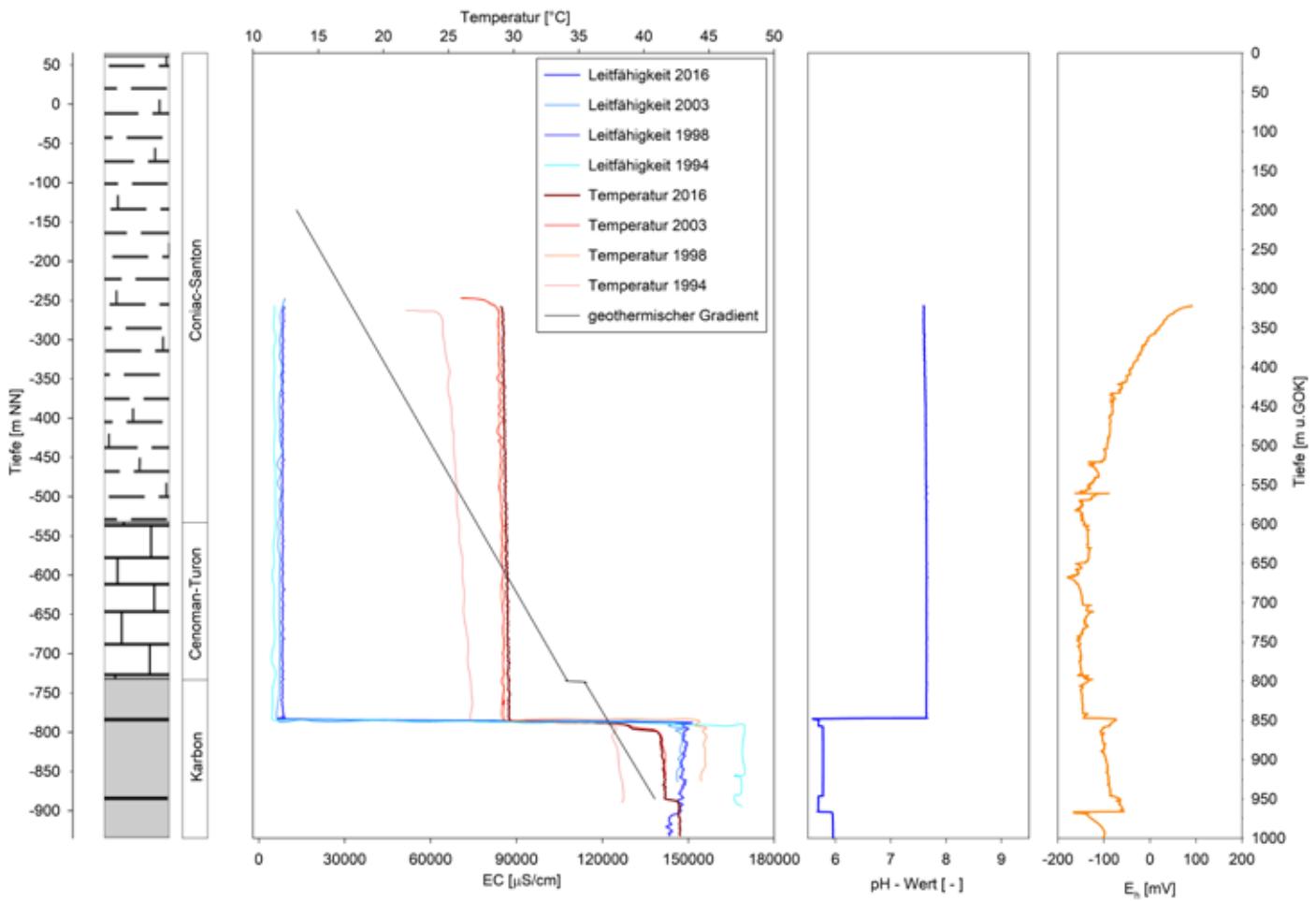


Abb. 32: Tiefenprofilmessung im Schacht Hermann 1 (MELCHERS et al. 2019).

wasserstand dauerhaft auf einem ökonomisch und ökologisch akzeptablen Niveau zu regulieren.

In Teilbereichen – vor allem im südlichen und östlichen Revier – hat der Grubenwasseranstieg in verschiedenen Bergwerken bereits stattgefunden, darunter die Bergwerke Königsborn (Unna; Abb. 29) und Westfalen (Ahlen; Abb. 35; WESTERMANN et al. 2018). Diese Bergwerke sind gegenüber der Wasserhaltung des zentralen Ruhr-Reviers hydraulisch isoliert. In anderen nahegelegenen Bergwerken, beispielsweise Massener Tiefbau (Unna) oder Bergwerk Maximilian (Hamm), ist der zeitliche Verlauf des Grubenwasseranstiegs nicht dokumentiert (DMT GMBH 1994). Ökologische Beeinträchtigungen oder Schäden an der Infrastruktur sind bislang nicht belegt.

Grubenwasseranstieg

Als ein Beispiel für einen weit vorangeschrittenen Grubenwasseranstieg

im östlichen Ruhr-Revier wird nachfolgend jener im Bergwerk Königsborn beschrieben (Abb. 29 und Abb. 30). Das Bergwerk Königsborn schloss im Jahre 1981. Die Wasserhaltung wurde bis zum Jahre 1996 aufrechterhalten. Mit Außerbetriebnahme der Wasserhaltung auf der tiefsten Sohle begann der Grubenwasseranstieg. Regulierungsmöglichkeiten, beispielsweise durch Pumpen, um den Grubenwasseranstieg zu steuern, waren und sind nicht vorgesehen. Prognosen, die auf Erfahrungen aus zurückliegenden Grubenwasseranstiegen nahegelegener Bergwerken beruhen, gehen davon aus, dass sich der Grubenwasserstand wenig unterhalb der Tagesoberfläche einstellen wird (zwischen +15 m NN und +65 m NN bei einer Geländehöhe von rd. +69 m NN; DMT GMBH 1994).

Der Grubenwasseranstieg wird im Schacht Königsborn 4 gemessen und dokumentiert (Abb. 30). Flache und

tiefe Grundwassermessstellen registrieren die Grundwasserdruckverhältnisse im Umfeld des Bergwerks Königsborn. Nach einem schnellen Anstieg in der initialen Phase und dem Überstau der Bereiche mit den größten Wasserzuläufen, nahm die Anstiegsgeschwindigkeit des Grubenwassers ab und stabilisierte sich auf Werte zwischen 30 m/a bis 40 m/a (intermediäre Phase). Zwischen den Jahren 2007 und 2009 begann das Grubenwasser die Schichten des Deckgebirges einzustauen. Dieser Einstau im Deckgebirge war verbunden mit einer Zunahme der Grubenwasseranstiegs geschwindigkeit auf zeitweise bis zu 100 m/a. Die Zunahme der Anstiegs geschwindigkeit ist auf die Abnahme des flutbaren Hohlraumvolumens zurückzuführen. Seit 2014 nähert sich der Grubenwasseranstieg statio nären Verhältnissen an (finale Phase), wobei der Grubenwasserstand innerhalb des prognostizierten Bereiches liegt (+31 m NN; DMT GMBH 1994).

Der Einstau des Deckgebirges führt zu einer Erhöhung der Druckwasserstände im hangenden Kluftgrundwasserleiter (Erhöhung des hydraulischen Potenzials), da sich die Infiltration von Wasser in das Grubengebäude verringert (Abb. 30; DMT GmbH 2011). Im Hangenden der Emscher-Formation ist der Einfluss nicht ersichtlich; es sind hingegen lediglich jahreszeitliche (niederschlagsabhängige) Schwankungen feststellbar.

Flutungsbedingte Bodenbewegungen

Bodenbewegungen im Umfeld des Bergwerks Königsborn werden seit dem Jahre 2004 flächenhaft gemessen und dokumentiert und somit erst nach dem Beginn des Grubenwasseranstiegs im Jahr 1996 (Abb. 31). Die Auswertung ergab, dass eine Bodenhebung etwa ab dem Jahr 2000, also rd. vier Jahre nach Beendigung der Wasserhaltung, einsetzte. Das zeitverzögerte Einsetzen der Bodenhebung wird damit begründet, dass in der Anfangsphase eines Grubenwasseranstiegs zunächst noch abbaubedingte Restsenkungen die flutungsbedingten Bodenhebungen überlagern (SCHÄFER 2016). Das durch die bergbaulichen Aktivitäten aufgelockerte Gebirge wird durch den infolge des Grubenwasseranstiegs aufgebauten Druck komprimiert. Das nicht aufgelockerte Gebirge erfährt einen Auftrieb. Erst nach erfolgter Verdichtung können sich die Dehnungsvorgänge bis an die Tagesoberfläche auswirken (ROSNER et al. 2014).

Der Verlauf der Bodenhebungen erfolgt in Abhängigkeit vom Grubenwasseranstiegsverlauf. Erreicht der Grubenwasseranstieg die Basis des

Deckgebirges, zeigen die bisherigen Erfahrungen, dass sich die Bodenhebungen erhöhen. Die dadurch hervorgerufenen Dehnungsvorgänge im Steinkohlengebirge und im Deckgebirge überlagern sich, wodurch auch die Hebungsbewegungen zunehmen (BEKENDAM 2017). Die bislang am Standort Königsborn dokumentierte Bodenhebung beträgt maximal 0,25 m und zeigt keine unregelmäßigen Hebungsunterschiede. Gebäudeschäden sind bislang nicht bekannt geworden. Vergleichbare Beobachtungen hinsichtlich des Verlaufs und der Höhe der Bodenbewegung sind auch in anderen Revieren gemacht worden (z. B. Aachener [Deutschland] und Südlimburger Revier [Niederlande] in ROSNER 2011; Saar-Revier [Deutschland] in SCHÄFER 2016; Belgien in VERVOORT & DECLERCQ 2018).

Dichteschichtung in gefluteten Schächten

In einer Vielzahl an Schächten stillgelegter und gefluteter Bergwerke bilden sich Schichtungen zwischen geringer und höher mineralisierten Wässern aus (Kap. 2.5.). Ein Standort, an dem die Dichteschichtung nachgewiesen wurde, sind die Hermann-Schächte in Selm (Ruhrgebiet). Die Hermann-Schächte befinden sich am nordwestlichen Rand des Ruhrgebiets und außerhalb des Einflussbereichs der zentralen Wasserhaltung. Nach Auswertung der Unterlagen sind diese Schächte seit 1929 geflutet (MELCHERS et al. 2019). In einer Messkampagne von COLEWEY et al. (1999) ist erstmals eine Dichteschichtung im Wasserkörper der Hermann-Schächte erfasst worden. Die aktuellen Messkampagnen in MELCHERS et al. (2019) bestätigen diese Beobachtungen (Abb. 32). Vergleichbare Ergebnisse wurden

ebenfalls im Schacht Königsborn 4 in Unna sowie erstmalig auch im Saarland gemessen. Die Untersuchungen belegen, dass die untersuchten Dichteschichtungen nach jetzigem Kenntnisstand räumlich sowie zeitlich stabil sind.

Fazit

Der Grubenwasseranstieg ist in einigen, hydraulisch isolierten Bergwerken im östlichen Ruhr-Revier (Bergwerk Königsborn [Unna], Bergwerk Westfalen [Ahlen]) bereits weit vorangeschritten. Das Deckgebirge ist eingestaut.

Aus den Verläufen des Grubenwasseranstiegs und den Bodenhebungen ergeben sich ursächliche Zusammenhänge. Dabei korrespondieren die Grubenwasseranstiegs geschwindigkeiten und die Bodenhebungsbeträge.

Die Bodenhebungen infolge eines Grubenwasseranstiegs können Werte im Dezimeterbereich erreichen. Solange die Bodenhebungen flächenhaft erfolgen, rufen diese jedoch keine wesentlichen Schieflagen, Zerrungen und Pressungen hervor (HEYDENREICH 1970).

In der Wassersäule zugänglicher Schächte hat sich eine Dichteschichtung eingestellt, die nachweislich über einen langen Zeitraum sowie in ihrer räumlichen Position stabil ist (MELCHERS et al. 2019). Die Dichteschichtung trennt das obere gerin gere mineralisierte von dem unteren höher mineralisierten Wasser.

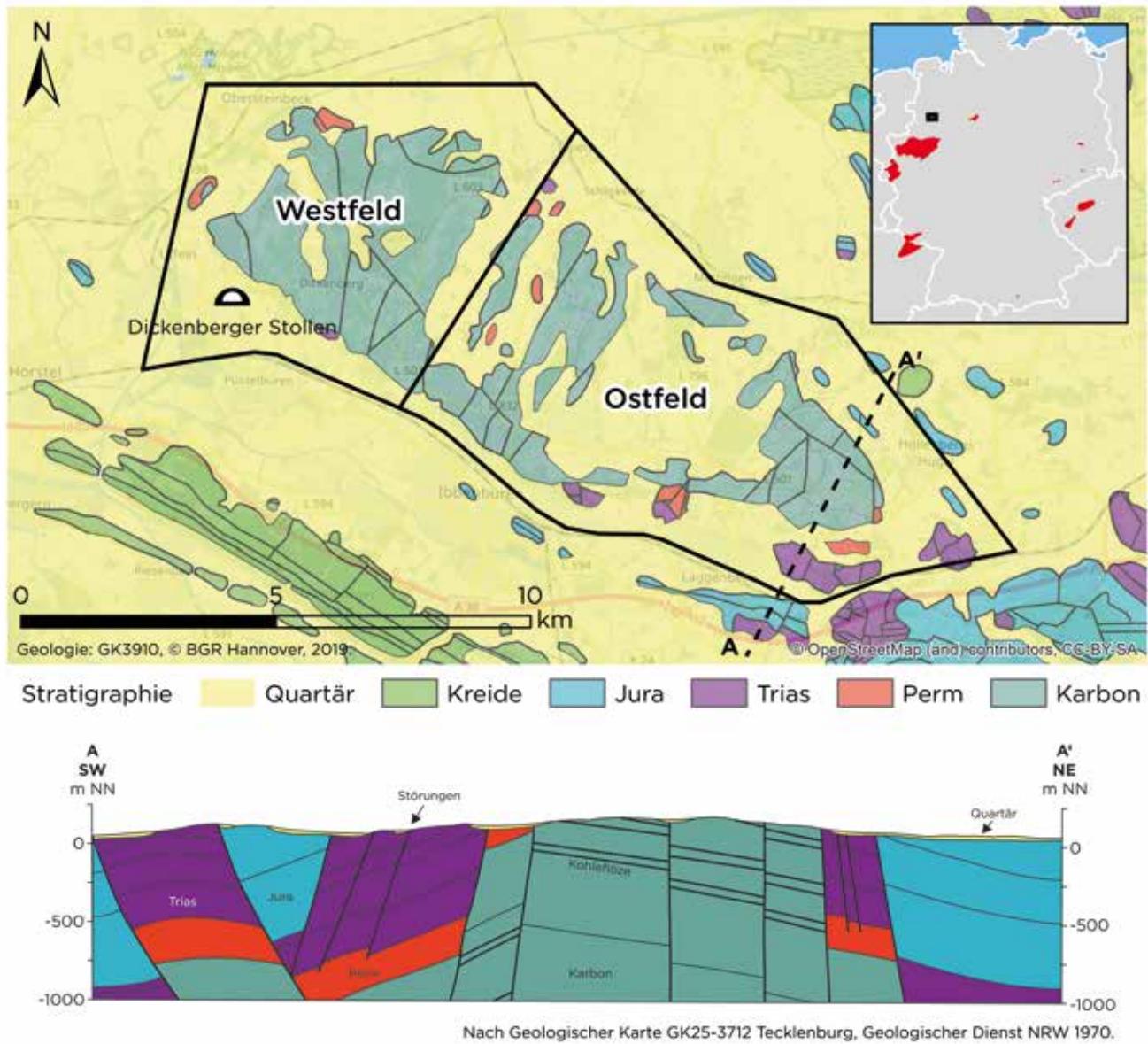


Abb. 33: Geographische und geologische Übersicht über das Bergwerk Ibbenbüren. Geologie nach GEOLOGISCHER DIENST NRW (1970).

3.1.2. Ibbenbüren

Der Steinkohlenbergbau im Osnabrücker Land blickt auf eine über 500 Jahre währende Geschichte zurück (RÖHRS 1998). Das Bergwerk Ibbenbüren war das nördlichste Steinkohlenbergwerk Deutschlands und gehörte zu den letzten Bergwerken, in denen die Steinkohlenförderung 2018 beendet wurde (Abb. 25). An drei Stellen treten die Schichten des Oberkarbons an der Oberfläche zu Tage: am Schafberg, am Piesberg sowie am Hüggel. Die Karbonhorste überragen das flache Umland um mehr als 100 m.

Geologie und Hydrogeologie

Die Karbonhorste werden seitlich durch Störungen vom mesozoischen Umland begrenzt (LOTZE et al. 1962; KELLER 1968; BÄSSLER 1970; siehe Infobox „Stratigraphie der Steinkohlenvorkommen“). Die Hebung der Schollen erfolgte zum Ende der Kreidezeit. Das Steinkohlenvorkommen weist kein Deckgebirge auf. Dadurch kann der überwiegende Anteil des Niederschlagswassers weitgehend unverzögert in das Grubengebäude versickern.

Ein (oberer) Grundwasserleiter des Quartärs mit einer Mächtigkeit von nur wenigen Metern ist nicht flächen-

haft ausgebildet (LOTZE et al. 1962). In den Schichten des Oberkarbons sind vor allem die bergbaulich beeinflussten Sandsteinbänke wasserführend.

Bergbau und bergmännische Wasserwirtschaft

Querverwerfungen führen zu einer Dreiteilung des Bergwerks Ibbenbüren in die Abbaufelder Westfeld („Dickenberg“), Bockradener Graben und Ostfeld („Schafberg“) (Abb. 33; LOTZE et al. 1962). Während der Steinkohlenabbau im Westfeld bereits Ende der 1970er Jahre eingestellt wurde, hielt der Abbau von Steinkohle im Ostfeld noch bis



Abb. 34: Dickenberger Stollen (rechts: Rösche; links: Blick in den Stollen, Fotos: Bastian Reker).



Ende 2018 an. Das Grubenwasser des Westfelds wird über den Dickenberger Stollen abgeleitet (Abb. 34; GOERKE-MALLET 2000). Derzeitige Pläne sehen vor, künftig auch das Grubenwasser des Ostfelds dauerhaft über einen noch aufzufahrenen „Grubenwasserkanal“ und über die vorhandenen Stollen abzuleiten (Kap. 1.2.).

Die Wasserhaltung im Westfeld des Bergwerks Ibbenbüren wurde im Jahre 1979 eingestellt. Prognosen gaben eine voraussichtliche Dauer des Grubenwasseranstiegs von rd. 150 Tagen an (GOERKE-MALLET 2000). Allerdings dauerte es drei Jahre, bis das Grubenwasser das Niveau des Dickenberger Stollens erreicht hatte. Im Vergleich zu anderen Grubenwasseranstiegen zeichnet sich der Grubenwasseranstieg im Bergwerk Ibbenbüren dennoch durch eine kurze Dauer aus (Abb. 35). Aufgrund hoher Zuflüsse in das Grubengebäude stieg das Grubenwasser dort im ersten Jahr nach Außerbetriebnahme der Wasserhaltung sehr schnell an (> 400 m/a).

Hydrochemische Entwicklung

Das in den Dickenberger Stollen übertretende Grubenwasser wies

anfangs hohe Konzentrationen an Eisen (bis zu 1.000 mg/l) und Sulfat (bis zu 4.400 mg/l) auf (Abb. 36; DMT GmbH 2017). Im Laufe der Zeit verringerten sich die Eisen- und Sulfatkonzentrationen durch zunehmende Auswaschung der Produkte aus der Pyritoxidation (siehe Infobox zur „Auswaschung eines Bergwerks [First Flush Effekt]“). Die nach wie vor erhöhten Eisen- und Sulfatkonzentrationen machen aufgrund der Überschreitung von Einleitengrenzwerten eine Aufbereitung des Grubenwassers vor Einleitung in die Vorfluter erforderlich.

Fazit

Die möglichst exakte Kenntnis über den räumlichen und zeitlichen Verlauf des Grubenwasseranstiegs ist erforderlich, um u. a. den Zeitpunkt des Übertritts von Grubenwasser in andere Grubenbereiche oder an der Tagesoberfläche abschätzen zu können. Ebenfalls kann der Zeitpunkt der erforderlichen Fertigstellung von Aufbereitungs- oder Drainageanlagen bestimmt werden. Progno-

sen zu der voraussichtlichen Dauer vergangener Grubenwasseranstiege gaben vielfach jedoch zu kurze Zeiträume an. Oftmals beruhen diese Abweichungen auf vereinfachten Annahmen oder auf unzureichenden Eingangsdaten, auf denen die Prognosen basieren. Zudem sind die Prognosen sehr häufig zum Schutz von untertägigen Arbeiten und Beschäftigten eher auf Basis einer „worst-case“-Betrachtung ausgelegt, um notwendige Steuerungs- und/oder Sicherungsmaßnahmen und -bauwerke frühzeitig realisieren bzw. umsetzen zu können.

Im Falle des Bergwerks Ibbenbüren wurden mehrere Faktoren in Betracht gezogen, die die zu kurz prognostizierte Dauer des Grubenwasseranstiegs im stillgelegten Abbaubereich „Westfeld“ erklären können. Vor allem das nur unzureichend erfassbare flutbare Hohlraumvolumen dürfte dafür verantwortlich sein (GOERKE-MALLET 2000). Beispielsweise wurde bei der Prognose das flutbare geogene Hohlraumvolumen

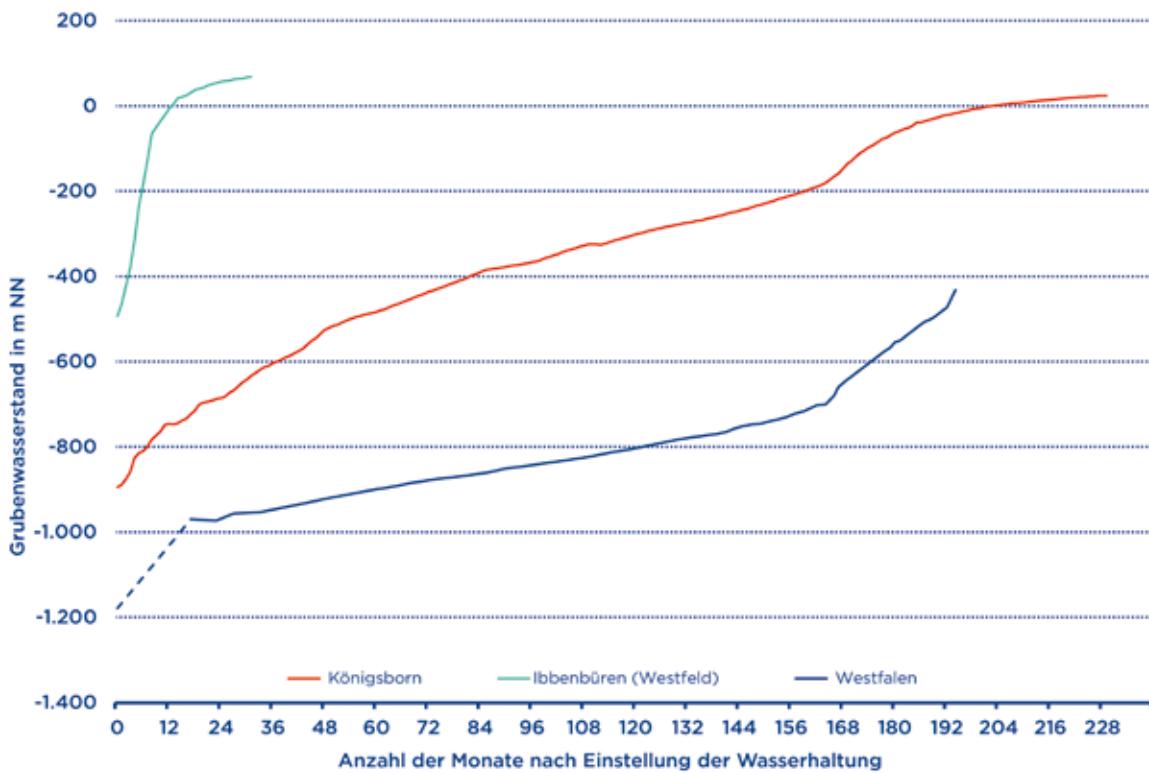


Abb. 35: Grubenwasseranstiege in den Bergwerken Westfalen und Königsborn sowie im Westfeld des Bergwerks Ibbenbüren (WESTERMANN et al. 2018).

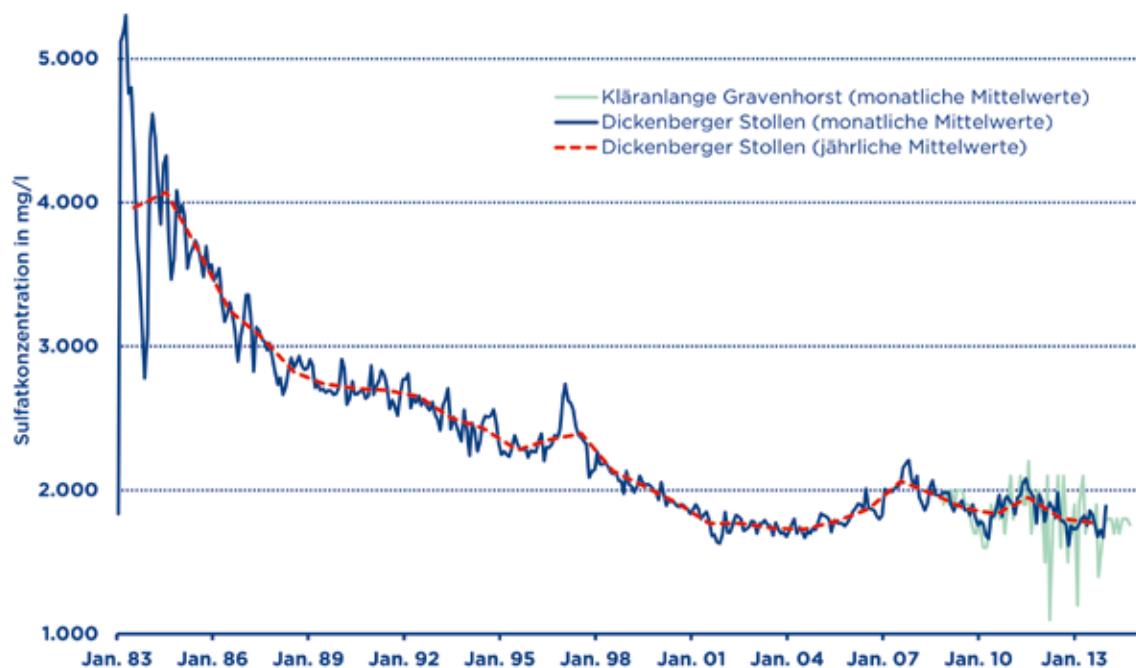


Abb. 36: Sulfatkonzentrationen im Grubenwasser des Bergwerks Ibbenbüren (Westfeld) (Daten: RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH).

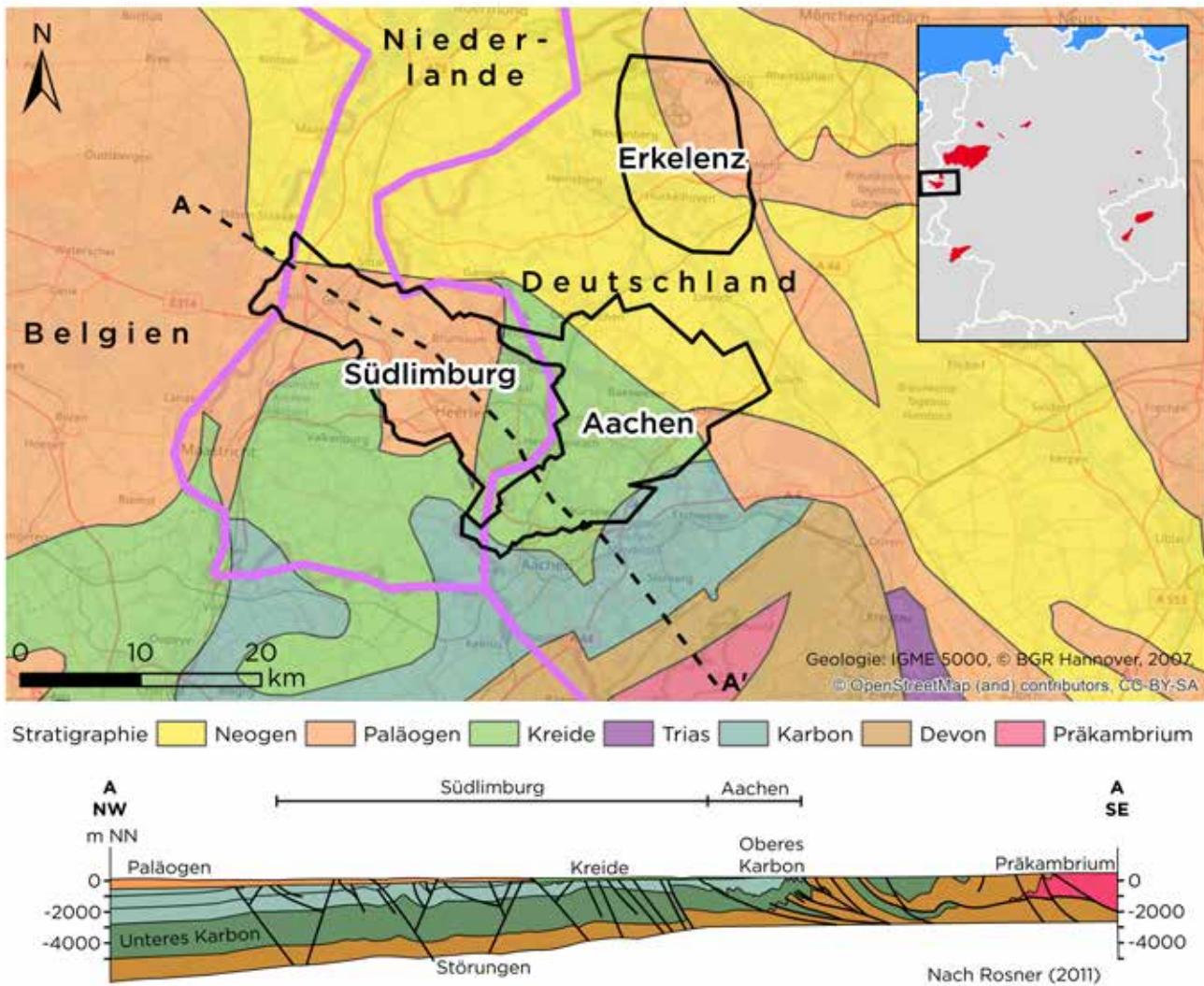


Abb. 37: Geographische und geologische Übersicht über die Steinkohlenreviere Aachen, Erkelenz (jeweils in Deutschland) und Südlimburg (Niederlande). Geologie nach Asch (2005). Geologischer Schnitt und Abbaugebiete nach ROSNER (2011).

der Poren und Trennflächen nicht berücksichtigt. Aber auch andere Faktoren, wie die unzureichend bestimmbarer zeitliche und räumliche Bilanzierung der Zu- und Abflussraten, führen dazu, dass Prognosen oftmals nur annäherungsweise den tatsächlichen Verlauf vorhersagen.

3.1.3. Aachen, Erkelenz und Südlimburg

Das Aachener und Südlimburger Steinkohlenrevier bilden ein ländерübergreifendes Vorkommen zwischen Deutschland und den Niederlanden, das untertätig ein weiträumig zusammenhängendes hydraulisches System ist (Abb. 25).

Das Erkelenzer Revier liegt nur rd. 10 km nordöstlich des Aachener Reviers. Mit einer rd. 800-jährigen Geschichte ist das Aachener Revier (BÜTTGENBACH 1898), das in den 1990er Jahren stillgelegt wurde, das älteste deutsche Steinkohlenrevier.

Geologie und Hydrogeologie

Das Aachener und Südlimburger Revier sind Teil der westlichen Fortsetzung des europäischen Steinkohlengürtels (Abb. 37). Die flözführenden Schichten des Oberkarbons treten im Aachener Raum im Wurm- und Inde-Tal zu Tage (WALTER 2010; ROSNER 2011). In Richtung Nordwesten tauchen die flözführenden Schichten sukzessive ab und werden durch ein immer mächtiger werdendes Deckgebirge überlagert. Das Deckgebirge besteht aus einer Wechselfolge

marin gebildeter grundwasserleitender und -nichtleitender Sedimente des Tertiärs, in denen Braunkohle im hangenden Teil abgelagert ist (siehe Infobox „Stratigraphie der Steinkohlenvorkommen“). Südwestlich des Heerlerheider Sprungs setzt sich das Deckgebirge aus Ablagerungen der Kreide zusammen (Abb. 37).

Die Rurrandstörung trennt das Erkelenzer Revier von dem im Süden gelegenen Aachener Revier. Aus geologischer Sicht kann daher das Erkelenzer Revier als ein eigenständiges Revier angesehen werden. Das flözführende Oberkarbon wird von einem Deckgebirge mit einer Mächtigkeit zwischen 150 m bis 350 m überdeckt.



Abb. 38: Gebäudeschäden infolge des Grubenwasseranstiegs im Erkelenzer Steinkohlenrevier
(Fotos: Volker Baglikow).

Bergbau und bergmännische Wasserwirtschaft

Der Steinkohlenbergbau um Aachen nahm vor über 800 Jahren im Wurmtal, in dem das flözführende Oberkarbon zutage tritt, seinen Anfang und entwickelte sich von dort in nordwestlicher Richtung (BÜTTGENBACH 1898). Zahlreiche untertägige Strecken verbinden das Aachener Revier mit den Bergwerken jenseits der Landesgrenze.

Der Steinkohlenbergbau im Südlimburger Revier begann wie im Aachener Raum bereits im 12. Jahrhundert und endete in den 1970er Jahren (WALTER 2010; HEITFELD et al. 2017). Zum Schutz der deutschen Steinkohlenbergwerke musste die Wasserhaltung auf Südlimburger Seite jedoch bis Anfang der 1990er Jahre aufrechterhalten werden. Weiterhin schützten Wasserdämme vor ungewollten Wasserübertritten. Erst mit der Beendigung des Steinkohlenbergbaus im Aachener Revier durch Stilllegung des Bergwerks Emil Mayrisch im Jahre 1992 konnte die Wasserhaltung vollständig eingestellt werden. Die Stilllegungen setzten sich im Erkelenzer Revier fort,

als dort im Jahre 1997 das Bergwerk Sophia-Jacoba geschlossen und die Wasserhaltung außer Betrieb genommen wurde.

Eine umfassende Beschreibung und Analyse des Grubenwasseranstiegsprozesses im Aachener und Südlimburger Revier gibt ROSNER (2011). Demzufolge fand der Grubenwasseranstieg in zwei voneinander getrennten Wasserprovinzen sowie in zeitlichen Phasen statt. In der westlichen (niederländischen) Wasserprovinz erfolgten nach der Stilllegung Teilanstiege bis zum Niveau von Wasserübertrittsstellen in die östliche deutsche Wasserprovinz. Die Wasserhaltung wurde bis zum Jahre 1994 zum Schutz der im Osten gelegenen aktiven Bergwerke betrieben („Schutzwasserhaltung“). Nachdem das letzte Bergwerk in Südlimburg geschlossen wurde, stieg das Grubenwasser kontrolliert und stufenweise (im Mittel in 20 m-Schritten) an. Mehrere Pumpversuche erlaubten, ein vertieftes Verständnis über das hydraulische System zu gewinnen. In der deutschen Wasserprovinz waren im Zuge des Grubenwasseranstiegs – anders als in der niederlän-

dischen Wasserprovinz – keine Regulierungsmöglichkeiten (Pumpen) vorgesehen. Der Abschlussbetriebsplan sieht für das Aachener Revier einen Anstieg des Grubenwassers bis zum natürlichen Vorflutniveau der Wurm (+110 m NN bis +140 m NN) vor (ROSNER 2011; HEITFELD et al. 2017). Dieses Niveau wird voraussichtlich erst in den 2030er Jahren endgültig erreicht. Nachteilige Auswirkungen auf die Vorfluter oder auf die Grundwasserverhältnisse im Deckgebirge sind bislang nicht belegt.

Flutungsbedingte Bodenbewegungen

Im Erkelenzer Revier wurde die Wasserhaltung im Jahre 1997 außer Betrieb genommen. Ab dem Jahr 1998 wurde der Grubenwasserstand messtechnisch erfasst, so dass der Grubenwasseranstieg in den unteren *Tiefbausohlen* nicht dokumentiert wurde. Im weiteren Verlauf zeichnet sich ein kontinuierlicher, gleichmäßiger Grubenwasseranstieg ab. Vor allem BAGLIKOW (2003; 2010) beschäftigte sich mit dem Grubenwasseranstieg im Erkelenzer Revier und richtete den Fokus seiner Be- trachtung auf die flutungsbedingten

Bodenhebungen. Im Zuge seiner Bearbeitung erkannte er, dass diese Bodenhebungen entlang einer 9 km langen Linie in den Städten Wassenberg und Hückelhoven zu einer Vielzahl an Gebäudeschäden führten (Abb. 38). Grund dafür sind Hebungsunterschiede an der Rurrandstörung und somit an einem großtektonischen Störungselement, das durch den Grubenwasseranstieg teilweise reaktiviert wurde. Somit kam es zu Hebungsunterschieden auf beiden Seiten der Störung mit einhergehenden Gebäudeschäden. Als Indiz für die flutungsbedingten Schäden an der Infrastruktur zog BAGLIKOW kontinuierlich sich entwickelnde linienhafte Schadensverläufe heran. Nach vorliegendem Kenntnisstand dauern die Bodenhebungen gegenwärtig (3 mm/a) noch an (BAGLIKOW 2019).

Durch Bearbeitung konkreter Schadensfälle stellte BAGLIKOW (2003; 2010) fest, dass erste Gebäudeschäden bereits im Zuge des Grubenwasseranstiegs innerhalb der Schichten des Oberkarbons aufgetreten sein müssen und nicht, wie zuvor vermutet, erst mit dem Einstau des Deckgebirges. Wenngleich entsprechende Höhenmessungen aus diesem Zeitraum fehlen, war eine zeitliche Zuordnung über konkrete Schadensaufnahmen möglich. BAGLIKOW (2010) konnte außerdem nachweisen, dass die Schäden nicht nur in den Bereichen auftreten, in denen bergbaulich bedingte Bruchlinien an der Tagesoberfläche vorhanden sind, sondern auch abseits dokumentierter Unstetigkeiten sowie außerhalb des abbaubedingten Einwirkungsbereiches liegen. Auch diese Erkenntnis war für die Bergschadenkunde neu und führte zu einer Ausdehnung der zu untersuchenden Flächen.

Aus dem Südlimburger Steinkohlenrevier (Niederlande) beschrieben DE VENT und ROEST im Jahr 2012 verschiedene Bergschadensfälle an Wohnhäusern und an einem Einkaufszentrum. Die Schadensbilder ließen sich ebenfalls auf unterschiedlich gerichtete Bodenbewegungen zurückführen. Außerdem lagen die Gebäudeschäden im Bereich dokumentierter Erdstufen, die mit früheren kumulierenden Abbaukanten korrespondieren. DE VENT und ROEST vermuten, dass diese differenziellen Bodenbewegungen an den Erdstufen durch den regionalen Grubenwasseranstieg wieder aktiviert wurden (DE VENT & ROEST 2012). Entgegen der ursprünglichen Annahme, dass im Erkelenzer Revier (siehe oben) die Lage des Bergschadenfalls an tektonischen Elementen maßgebend sei, führen daher offenbar auch abbau-technische Bedingungen zu hydraulischen Druckunterschieden, die schadensrelevante Bodenhebungsunterschiede bewirken können. Der in DE VENT & ROEST (2012) beschriebene Schaden am Einkaufzentrum wird hingegen damit erklärt, dass der Grubenwasseranstieg möglicherweise eine Mobilisierung von Lockermaterial aus dem Deckgebirge durch Klüfte und Spalten in Karsthohlräume oder ins Grubengebäude bewirkte. Diese Materialumlagerung führte vermutlich zu einer trogförmigen Senkungsscheinung an der Tagesoberfläche und folglich zu einem Tagesbruch. Dieser vermutete Kausalzusammenhang zeigt auf, dass ein Grubenwasseranstieg nicht nur (und in seltenen Fällen) direkt schadensrelevante Bodenhebungen bewirken kann, sondern auch als Auslöser komplexer Wirkungszusammenhänge aus hydrogeologischen und abbau-technischen Standortgegeben-

heiten fungieren kann, die wiederum zu Bergschäden führen.

In jüngster Vergangenheit zeigen sich an einer Lokalität im Aachener Revier (Deutschland) Indizien dafür, dass eine rein abbaubedingt verursachte Erdstufe im Zuge des regionalen Grubenwasseranstiegs reaktiviert wurde (BAGLIKOW 2019).

Fazit

Die Schäden waren in den geschilderten Fällen an tektonische Großstrukturen oder Abbaukanten gebunden, an denen es im Zuge des Grubenwasseranstiegs zu Bodenhebungsunterschieden gekommen ist. Grundsätzlich ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens unstilliger Bodenbewegungen als eher gering einzuschätzen. Im Falle eines tatsächlichen Auftretens ist jedoch von einem erhöhten Risiko für Gebäude- und Schadensauszugehen.

Messtechnische Überwachungen bei zukünftigen Grubenwasseranstiegen sind auf kritische Bereiche zu fokussieren. Diese sind im Hinblick auf die Nutzung der Tagesoberfläche und auf die Schadensempfindlichkeit der vorhandenen Objekte (Gebäude, Infrastruktur) festzulegen. Die kritischen Bereiche sind durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet (SCHETELIG et al. 2007; ROSNER et al. 2014; HEITFELD et al. 2017):

- Der Abbau wird durch eine tektonische Hauptstörung begrenzt.
- Die tektonische Störungszone muss hydraulisch abdichtend sein.
- Die Störung des Gefüges entlang der tektonischen Störung reicht bis in das Deckgebirge.
- Der Abbau erfolgte nur auf einer Seite der tektonischen Störung.

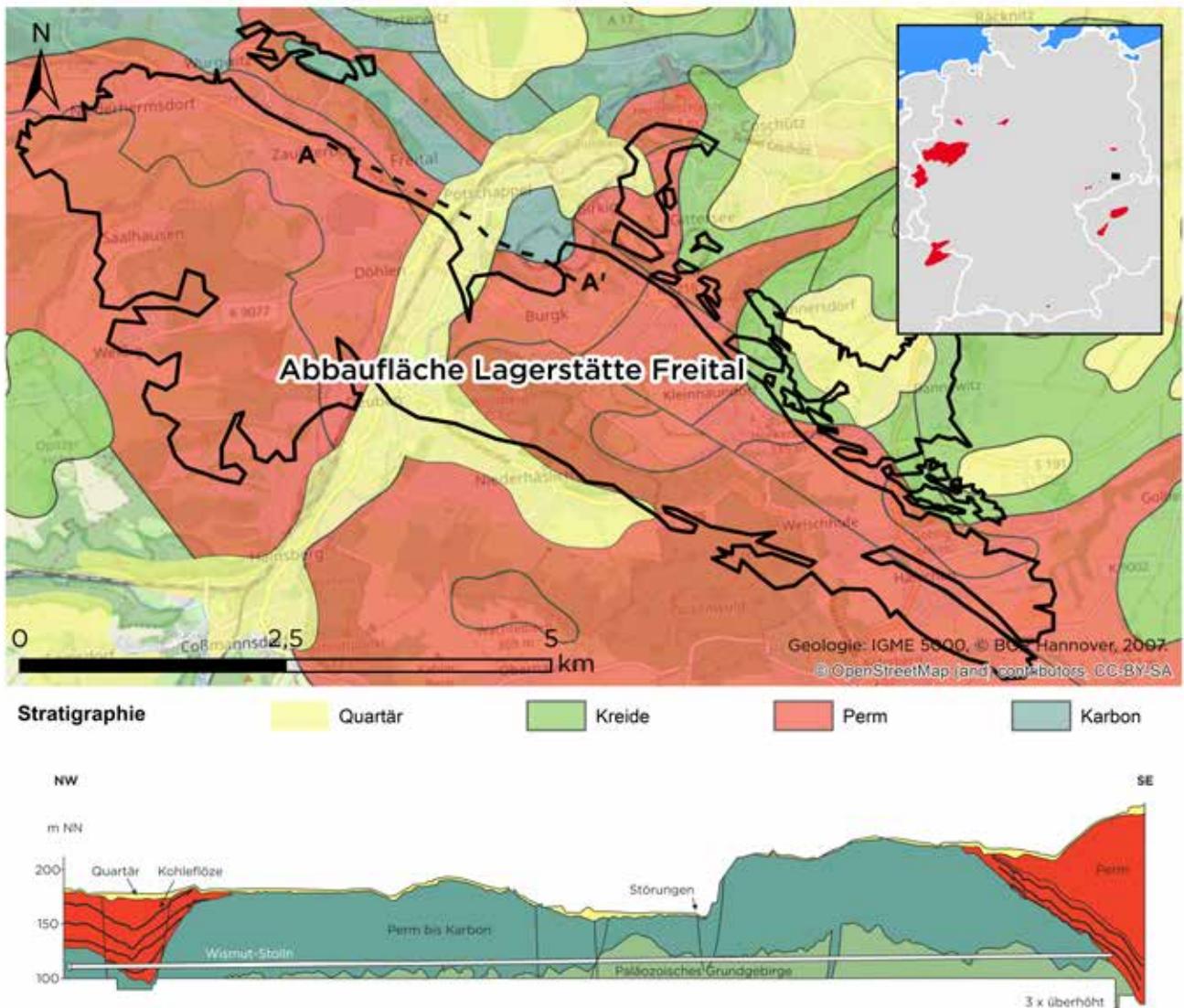


Abb. 39: Geographische und geologische Übersicht über das Döhlen-Becken. Geologie nach Asch (2005). Abbaugebiete nach Wismut GmbH.

- Der Grubenwasseranstieg führt zu einer einseitigen Erhöhung oder auch gegenläufigen Entwicklung der Grundwasserdruckhöhen im hangenden Grundwasserleiter des Deckgebirges.
- Das überlagernde Deckgebirge muss ein ausreichend hohes Dehnungspotenzial besitzen.

Daraus abgeleitet lässt sich das Schadensrisiko in den besonders kritischen Bereichen vor einem Grubenwasseranstieg abschätzen und das Gebiet abgrenzen. Die Untersuchungen von BAGLIKOW (2003; 2010) zeigen die zeitliche Entwicklung und die räumliche Ausdehnung schadensrelevanter Bodenhebungen auf. Demnach sind die Bodenbewegungen bereits zu Beginn des Gruben-

wasseranstiegs (d. h. unverzüglich nach Außerbetriebnahme der Wasserhaltung oder besser noch davor) lückenlos messtechnisch zu erfassen und räumlich über den abbaubedingten Auswirkungsbereich hinaus zu erstrecken. Die Überwachung durch die Hinzunahme satelliten-gestützter Bodenbewegungsdaten kann diesen Prozess sinnvoll begleiten (BUSCH 2019).

3.1.4. Döhlen-Becken

Die bundeseigene Wismut GmbH saniert seit dem Jahre 1991 die Hinterlassenschaften des Uranbergbaus der ehemaligen Sowjetisch-Deutschen-Aktiengesellschaft (SDAG)

Wismut in den Bundesländern Thüringen und Sachsen. Vor den Toren der Stadt Dresden wurde im Döhlen-Becken seit dem 16. Jahrhundert ohne Unterbrechung bis zum Jahr 1989 Steinkohle im Tiefbau gewonnen (Abb. 25). In den Jahren von 1949 bis 1954 sowie von 1963 bis 1989 wurde mit Unterbrechungen auch uranhaltige Steinkohle abbaut (REICHEL & SCHAUER 2007).

Mit Beendigung des Abbaus im Jahre 1989 wurden Konzepte zur Verwahrung der Grube erarbeitet. Ein zentrales Element der Sanierung des Standorts Dresden-Gittersee war die Außerbetriebnahme der Wasserhaltung und die dauerhafte Ableitung des Grubenwassers über den Tiefen Elbstollen in die Elbe.

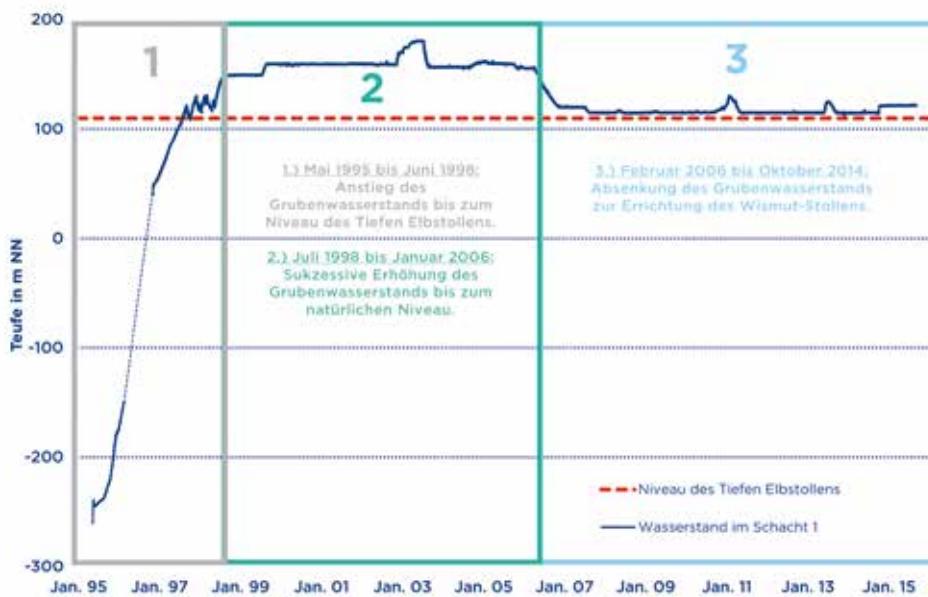


Abb. 40: Entwicklung des Grubenwasseranstiegs im Bergker Revier, Abbaufeld Gittersee Döhlen-Becken; Daten: Wismut GmbH).

Der Grubenwasseranstieg erfolgte in verschiedenen Etappen und ist mit dem Übertritt in den neu errichteten Wismut-Stollen im Oktober 2014 erfolgreich abgeschlossen. Im Verlauf des Grubenwasseranstiegs wurde festgestellt, dass das tatsächliche Aufnahme- und Wasserleitvermögen der bergmännischen Hohlräume geringer war als ursprünglich angenommen.

Geologie und Hydrogeologie

Das Döhlen-Becken ist ein jungpaläozoisches Sedimentationsbecken (Molasse) im Bereich der Elbtalzone (REICHEL & SCHAUER 2007). Das Rohstoffvorkommen entstand im Permo-karbon *vulkanotektonisch* innerhalb einer Grabenstruktur (siehe Infobox „Stratigraphie der Steinkohlevorkommen“). Im Wesentlichen setzt sich die Beckenfüllung des Döhlen-Beckens aus *terrestrischen Sedimenten* mit einem hohen Anteil an *Pyroklastika* zusammen (PÄLCHEN & WALTER 2011; FRANKE 2019). Das sich innerhalb des Döhlen-Beckens abgelagerte Schichtpaket erreicht eine maximale Mächtigkeit von bis zu 800 m.

Bergbau und bergmännische Wasserhaltung

Im Döhlen-Becken wurde in den Revieren Zaukerode und Burgk Bergbau betrieben. Beide Reviere sind durch die Weißeitz voneinander getrennt (Abb. 39). In dem westlich der Weißeitz gelegenen Revier Zauke-

rode wurde der Abbau im Jahre 1959 endgültig eingestellt und der Grubenwasseranstieg eingeleitet. Das Grubenwasser wird seitdem über den Tiefen Elbstollen abgeleitet.

Das Revier Burgk liegt östlich der Weißeitz und umfasst die Grubenfelder Gittersee, Bannewitz und Heidenschanze. Uranhaltige Steinkohle wurde dort bis 1989 abgebaut. Bergmännisch aufgefahrene Strecken, die die Reviere Zaukerode und Burgk miteinander verbinden, sind zwar risswerklich dokumentiert, ihr Zustand ist allerdings nicht bekannt.

Grubenwasseranstieg

Zwischen 1991 und 2014 verwahrte die Wismut GmbH umweltverträglich und nachhaltig die Grubengebäude im Döhlen-Becken (MANN & WEDEKIND 2015; GOERKE-MALLET et al. 2016). Das Konzept zum Grubenwasseranstieg wurde zu Beginn der 1990er Jahre erarbeitet. Das Konzept sah vor, das Grubenwasser aus den Bereichen westlich und östlich der Weißeitz gemeinsam über das vorhandene Grubengebäude und dem gestörten Bereich des Gebirges zum vorhandenen Tiefen Elbstollen natürlich abfließen zu lassen. Während das westliche Zaukeroder Revier seit Einstellung der Wasserhaltung in den 1960er Jahren über den Tiefen Elbstollen und seinen angeschlossenen Flügelrtern in Richtung Elbe entwässert wurde, sollte das Grubenwasser in den östlich gelegenen Gru-

benfeldern auf einem Niveau oberhalb des Tiefen Elbstollens, nahe der Tagesoberfläche, gehalten werden.

Der Grubenwasseranstieg in den Bergwerken des Döhlen-Beckens begann im Jahre 1995 (Abb. 40). Der Prozess wurde von einem umfangreichen Monitoringprogramm begleitet, welches eine fortlaufende Überwachung des Grubenwasserspiegels beinhaltete. Im Sommer 1997 erreichte der Grubenwasserspiegel das Niveau des Tiefen Elbstollens (+110 m NN). Zur Stimulation von Fließwegen im Grubengebäude wurde der Wasserspiegel in der Folgezeit durch *Pulsation* mehrfach leicht angehoben und durch Pumpmaßnahmen wieder abgesenkt.

Im Sommer 1998 erfolgte der weitere Einstau bis +150 m NN (Abb. 40). Auf diesem Niveau wurde der Grubenwasserspiegel durch Pumpen über ein Jahr stabilisiert. Trotz des ansteigenden Grubenwasserspiegels blieb die Abflussmenge am Tiefen Elbstollen gleich. Der Grubenwasserspiegel erreichte im Sommer 1999 das Niveau von +160 m NN und wurde bis Ende 2002 dort gehalten. Es wurde zunehmend deutlich, dass der Tiefe Elbstollen nur einen Teil der zusätzlich anfallenden Grubenwässer ableitete und die vollständige Ableitung der Grubenwässer des gesamten Reviers über den Tiefen Elbstollen nicht möglich war.

Gemeinsam mit den zuständigen Behörden erarbeitete die Wismut GmbH ein Konzept zum weiteren Einstau im Döhlen-Becken. Dies sah die weitgehende Wiederherstellung der ursprünglichen hydrogeologischen Verhältnisse im Döhlen-Becken vor, indem der Grubenwasserspiegel bis in das oberste Grundwasserstockwerk im Niveau von rd. +180 m NN ansteigen sollte.

Im Sommer 2003 wurden Wasseraustritte und Vernässungen an der Tagesoberfläche festgestellt, die auf Grubenwasser, welches seinerzeit bei +180,5 m NN stand, zurückzuführen waren. Die Wismut GmbH senkte daraufhin den Wasserspiegel durch Pumpen auf +160 m NN ab, woraufhin die Wasseraustritte versiegten. Folglich ließ sich der natürliche Einstau bis +180 m NN nicht durchführen.

Die Wismut GmbH griff daraufhin auf eine frühere Planungsvariante zurück, bei der die Auffahrung eines Verbindungsgrubenbaues (Wismut-Stollen) auf rd. +120 m NN vorgesehen war. Der Wismut-Stollen verbindet das Grubengebäude im Bereich Gittersee mit dem Tiefen Elbstollen und schafft eine ausreichende Wasserwegsamkeit zur sicheren und nachhaltigen Ableitung der Grubenwässer in die Elbe. Die Auffahrung des rd. 3 km langen Wismut-Stollens erfolgte im Zeitraum von April 2007 bis Juni 2014. Nach Abschluss der Auffahrung und Abschalten der Pumpen stieg das Grubenwasser auf +121 m NN an. Das Grubenwasser der östlichen Grubenfelder wird ordnungsgemäß über den Wismut-Stollen und den Tiefen Elbstollen der Elbe zugeleitet. Die untertägigen Bergbaubereiche im

Döhlen-Becken werden seitdem als ordnungsgemäß und umweltverträglich verwahrt angesehen.

Im Zuge des Grubenwasseranstiegs wurden nur geringe vertikale Bodenhebungen von rd. 6 cm dokumentiert (TUNGER 2009; MANN & WEDEKIND 2010; MANN & WEDEKIND 2015). Im Jahr 2009 berichtete TUNGER, dass flutungsbedingte Bergschäden nicht an Neubauten, sondern nur an durch frühere Abbautätigkeit vorgeschnittenen Bausubstanz auftraten.

Fazit

Konzepte für die Verwahrung der Bergwerke im Döhlen-Becken wurden seit Anfang der 1990er Jahre unter Einbeziehung von externen Experten erarbeitet und umgesetzt (USAKO 1991; 1993). Das abschließende Konzept sah bereits auf Wirtschaftlichkeit und technische Umsetzbarkeit geprüfte Planungsvarianten („Rückfallvarianten“) vor, die ergriffen werden könnten, wenn die ursprüngliche Planung zu keinem Erfolg führte.

Das Ziel, ein nachhaltiges Grubenwasserstandsniveau zu erreichen, wird aus fachlicher Sicht befürwortet. Der Grubenwasseranstieg wurde mit behördlicher Genehmigung etappenweise bis zum natürlichen Vorflutniveau vollzogen. Aufgrund des Vorhaltens verschiedener Rückfallvarianten, der Durchführung eines umfangreichen Monitorings sowie dem jederzeit möglichen Zugriff auf den Grubenwasserstand handelt es sich um einen gesteuerten Prozess. Nach dem vorliegenden Kenntnisstand wurde dies bei einem Grubenwasseranstieg in einem deutschen Steinkohlenbergwerk erstmals umgesetzt.

Im Hinblick auf die untertägigen Wasserwegsamkeiten ist festzuhalten, dass das Aufnahme- und Wasserleitvermögen alter Grubenbaue besonders intensiv betrachtet werden muss. Ausweislich gemachter Erfahrungen sind Wasserauffüllversuche dazu eher ungeeignet. Für die Beurteilung der im Altbergbau ableitbaren Wassermengen sollten alle verfügbaren Informationen eingeholt werden. Neben der Analyse des *Risswerks* sind u. a. die Ergebnisse von Befahrungen der offenen Grubenbaue von besonderer Bedeutung. Auch die historische Recherche kann relevante Informationen liefern. Im vorliegenden Fall ist zu vermuten, dass Schlammeinbrüche im Zuge von Weißeritz-Hochwässern im Jahre 1897 die hydraulischen Verhältnisse in Teilen des Grubengebäudes stark verändert haben. Wie WOLKERSDORFER & BOWELL (2004) am Beispiel des Grubenwasserausbruches in Nassereith (Tirol, Österreich) zeigen konnten, führt das Vernachlässigen der vorgenannten Informationen mitunter zu katastrophalen Grubenwassereinbrüchen in aufgelassenen Bergwerken. Gleichermaßen gilt für den Grubenwasserausbruch beim Grubenwasseranstieg im Zinnbergwerk Wheal Jane (Devonshire, Großbritannien), der 1992 zum Ausbruch von 50.000 m³ verunreinigten Grubenwassers führte (YOUNGER et al. 2002), und zeigt, wie wichtig die Kenntnis der hydraulischen Situation und aller Grubenbaue ist (HAMILTON et al. 1994).



Abb. 41: Steinkohlen-vorkommen in Großbritannien.
Räumliche Abgrenzung der
Abaugebiete nach NMRS
(2019).

3.2.

Großbritannien

Dank seiner großräumigen und reichhaltigen Vorkommen weist Großbritannien eine sehr lange Tradition im Abbau von Steinkohlen auf (Abb. 41). Seit dem Mittelalter – Hinweisen zufolge sogar bereits seit der Antike – wurde Steinkohle über- und untertage abgebaut (HILL 2001). Die Ausdehnung der Reviere reichte vom äußersten Südosten in Kent, über South Wales und die bedeutenden Abaugebiete Yorkshire und Lancashire an den Flanken des Pennines-Mittelgebirges bis hin zu den Vorkommen in Schottland zwischen Ayrshire und Fife (Abb. 41). Seine Blütezeit erreichte die britische Steinkohlenindustrie zu Beginn des 20. Jahrhunderts, als bis zu 1,2 Mio. Beschäftigte in rund 3.000 Bergwerken bis zu 290 Mio. t Steinkohle pro Jahr förderten (HILL 2012).

Nach dem zweiten Weltkrieg kam es zu verschiedenen Umstrukturierungen des britischen Steinkohlensektors. 1947 wurden die Bergwerke im National Coal Board (ab 1987 British Coal) verstaatlicht und zusammengeführt. Erst 1994 kam es zu einer erneuten Privatisierung der noch existierenden Bergwerke, wobei die administrativen Aufgaben an die neu gegründete Coal Authority übergingen und die wirtschaftlichen Bereiche zusammen mit der Firma RJB Mining in die UK Coal übergingen. Erst seit dem Jahr 1999 sind Bergbaubetriebe für die Folgen des Abbaus verantwortlich. Da nur wenige Bergwerke nach 1999 noch in Betrieb waren, ist die öffentliche Hand für diese Aufgaben zuständig. Viele dieser nachbergbaulichen Herausforderungen hat heute die Coal Authority übernommen. Detailliertere Informationen zur Entwicklung des Bergbaus in Großbritannien

wurden in GOERKE-MALLETT et al. (2017) und REKER et al. (2018) veröffentlicht.

3.2.1. Yorkshire

Geologie und Hydrogeologie

Yorkshire war eines der bedeutendsten Steinkohlenreviere Großbritanniens. Dieses Revier liegt an der Ostflanke des Pennines-Mittelgebirges. Hier fallen die Kohleflöze infolge der Hebungsvorgänge während der Gebirgsbildung nach Osten hin ein (Abb. 42). In Großbritannien wird das flözführende Karbon in die unteren, mittleren und oberen Kohleschichten (lower, middle und upper coal measures) unterteilt. Im westlichen Bereich beißen die Kohleflöze über Tage aus, während weiter östlich die Lagerstätte zunehmend durch ein Deckgebirge jüngeren Alters (Perm und Trias) überlagert wird (siehe Infobox „Stratigraphie der Steinkohlenvorkommen“). Die älteren Gesteine des Deckgebirges sind vor allem als grundwasserhemmende Kalkmergelsteine ausgebildet. Darüber lagern Kalksteine, die lokal bedeutende Grundwasserleiter bilden können. Aus nachbergbaulicher Sicht ist vor allem der überlagernde Sandstein-Grundwasserleiter des Perms bis Trias in den östlichen Bereichen des Reviers von Bedeutung.

Dieser Sandsteinhorizont stellt ein wichtiges Trinkwasservorkommen in Großbritannien dar. Der Grundwasserleiter ist von den Kohleflözen durch mergelige Schichten hydraulisch getrennt. Diese Abdichtung kann jedoch durch den untertägigen Steinkohlenabbau gestört sein. Somit kann bei entsprechenden Druckniveaus das aufsteigende Grubewasser eine latente Gefahr für die hydrochemische Beschaffenheit dieses Grundwasserleiters darstellen.

Bergbau

Das Bergwerk Kellingley war das letzte Bergwerk Großbritanniens, das im Jahre 2015 stillgelegt wurde. In einigen Teilbereichen des Reviers fing der Grubenwasseranstieg jedoch schon deutlich früher an und wurde erstmals in den 1990er Jahren wissenschaftlich untersucht und mit Hilfe des Programms GRAM (Groundwater Rebound in Abandoned Mineworkings) modelliert (BURKE & YOUNGER 2000; BURKE & BARBER 2004; BURKE et al. 2005).

Detailliertere Ausführungen zum Bergbau im Yorkshire-Revier wurden in GOERKE-MALLETT et al. (2017) und REKER et al. (2018) veröffentlicht.

Modellierung des Grubenwasseranstiegs

Das Ziel der Modellierungen war es, den Zeitpunkt abzuschätzen, ab wann mit Grubenwasseraustritten an der Tagesoberfläche gerechnet werden muss. Dabei musste berücksichtigt werden, dass das stillgelegte Teilgebiet, bestehend aus den hydraulisch miteinander verbundenen Bergwerken Treeton, Thurcroft und Silverwood, mit ansteigendem Grubenwasser hydraulisch mit dem damals noch aktiven Bergwerk Maltby verbunden war (Abb. 42). Es war jedoch nicht bekannt, ob und in welchem Umfang diese Verbindung noch hydraulisch wirksam war. Deswegen mussten verschiedene Varianten mit verschiedenen hydraulischen Wirksamkeiten (Varianten 1 bis 3; Abb. 43) modelliert werden. Das Ergebnis war, dass je nach hydraulischer Wirksamkeit der

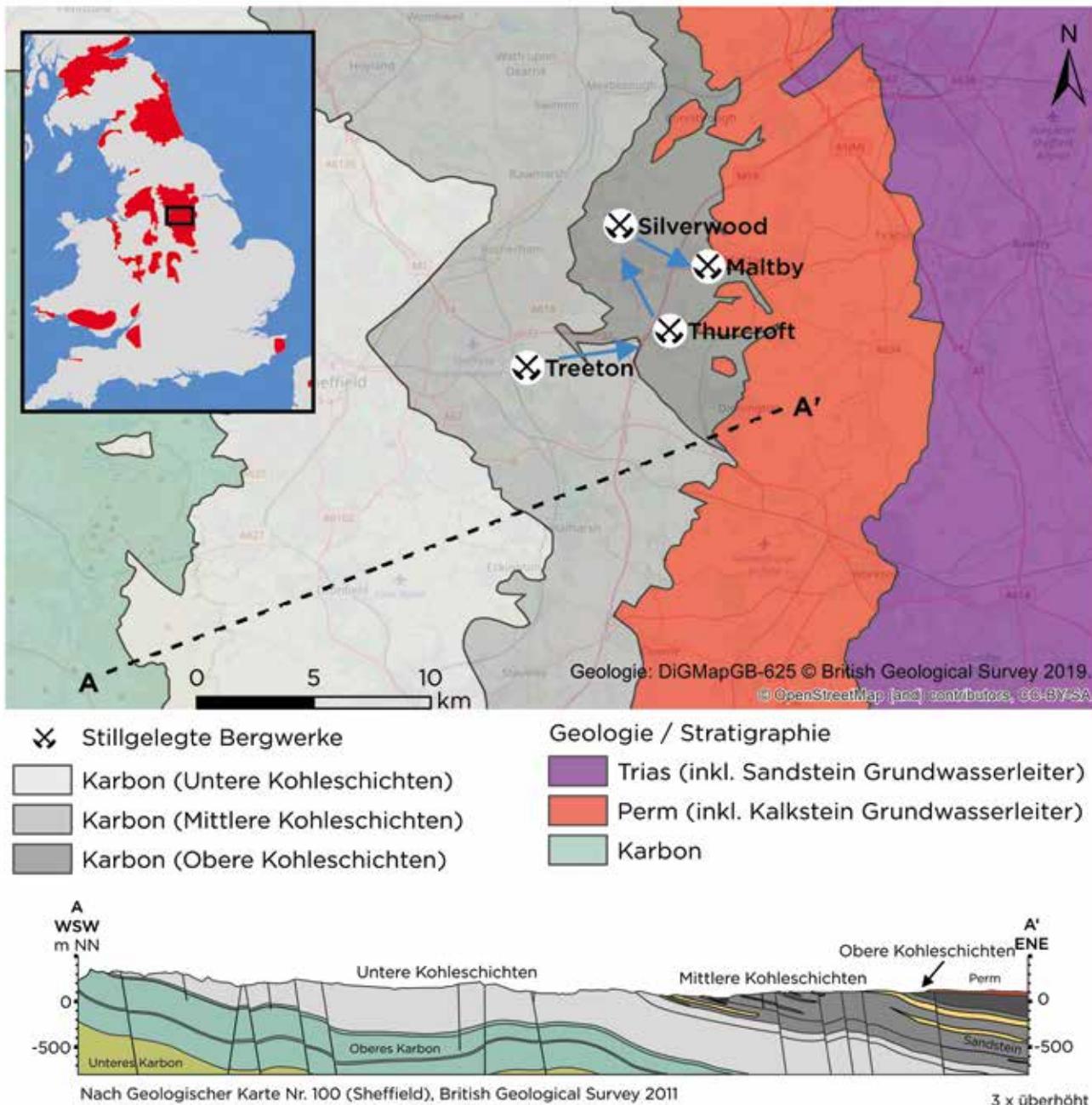


Abb. 42: Geographische und geologische Übersicht über ausgewählte Bergwerke im Yorkshire-Revier (Großbritannien). Geologie nach BRITISH GEOLOGICAL SURVEY (2011). Die Fließrichtung des Grubenwassers ist mit blauen Pfeilen hervorgehoben, nach GANDY & YOUNGER (2007).

Verbindungsstrecke zwischen den Bergwerken Silverwood und Maltby das Auftreten erster Grubenwasseraustritte zwischen dem Jahr 2004 und weit nach 2030 liegt. Die Abbildung zeigt den modellierten Verlauf des Grubenwasseranstiegs der drei Varianten auf dem Bergwerk Thurcroft, bevor der Grubenwasserstand regelmäßig überwacht und gemessen wurde.

Ab dem Jahr 2001 wurden regelmäßig Grubenwasserstände gemessen. Nach persönlicher Mitteilung (BURKE

2017) geschah dies, weil im Bergwerk Thurcroft der Grubenwasserstand zufällig gemessen wurde und dieser deutlich höher lag als erwartet. Spätere Untersuchungen (BURKE & BARBER 2004; BURKE et al. 2005; GANDY & YOUNGER 2007) berücksichtigten die gemessenen Grubenwasserstände, sodass die Modellierungen aktualisiert und konkretisiert werden konnten. Nun konnte eine hydraulische Leitfähigkeit zwischen den Annahmen der Varianten 2 und 3 berücksichtigt werden. Mit dieser Kenntnis waren GANDY & YOUNGER

(2007) in der Lage, den Einfluss wechselnder Niederschlagsraten zu berücksichtigen und das Modell auf diese Weise zu verfeinern. Auch in dieser Modellierung blieb jedoch der Unsicherheitsfaktor, wann das Bergwerk Maltby letztendlich stillgelegt und die Wasserhaltungsmaßnahmen eingestellt würden. Eine Ausschreibung der COAL AUTHORITY (2015) für eine Modellierung des gesamten Yorkshire-Reviers zeigt, dass das Thema nach wie vor im Fokus der Coal Authority liegt, damit adäquate Vorgehensweisen samt Infrastruktur

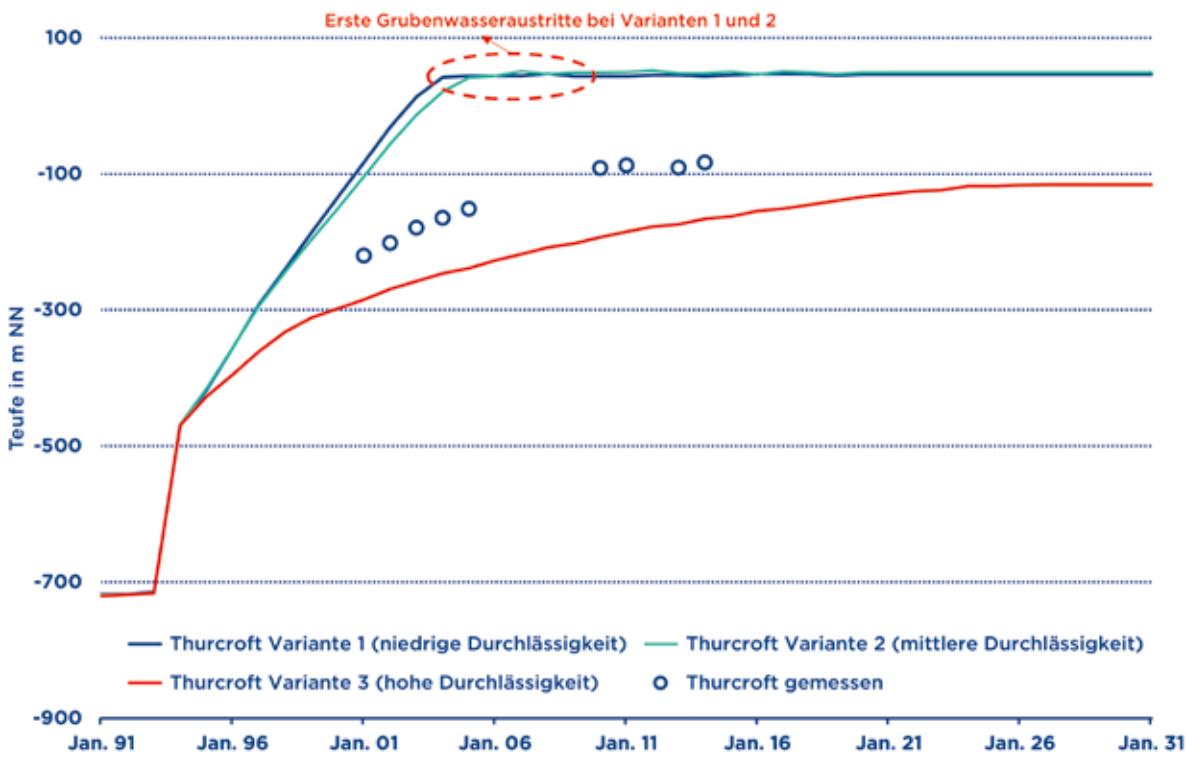


Abb. 43: Modellierte Grubenwasseranstiegsverläufe im Bergwerks Thurcroft für drei verschiedene Varianten sowie die gemessenen Grubenwasserstände. Daten reproduziert nach BURKE & YOUNGER (2000); BURKE & BARBER (2004); BURKE et al. (2005); BURKE (2017); GANDY & YOUNGER (2007).

für die zukünftige Handhabung des Grubenwassers bereitgestellt werden können.

Fazit

Die Ergebnisse der Modellierung des Grubenwasseranstiegs im Bergwerk Thurcroft und benachbarter Bergwerke zeigen, dass ein unbekannter Faktor zu einer großen Unsicherheit im Ergebnis der Modellierung führen kann. Abhängig von der hydraulischen Wirksamkeit der hydraulischen Verbindungsstrecken der Bergwerke ergibt sich für das erste Auftreten von Grubenwasseraustritten an der Tagesoberfläche ein Zeitfenster von 2004 bis weit nach 2030, also von mehr als 25 Jahren.

Wie bei der Modellierung durch BURKE & YOUNGER (2000) erfolgt, ist es daher ratsam, verschiedene Varianten im Sinne eines „worst case“, „base case“ und „best case“ zu berücksichtigen. Im Falle des Grubenwasseranstiegs bedeutet dies, dass geeignete Handlungsmaßnahmen schon im Vorfeld unter Berücksichtigung der „worst-case“-Variante, also den Zeitpunkt des am frühesten

möglichen Ereignisses, feststehen und einsatzbereit sein müssen. Um weitere Unsicherheiten der Modellierung zu minimieren, ist zudem ein kontinuierliches Monitoringssystem einzurichten, mit Hilfe dessen die Modellierung fortwährend an die tatsächlichen Gegebenheiten angepasst werden kann.

3.2.2. Durham

Geologie und Hydrogeologie

Ähnlich wie im Yorkshire-Revier ist der westliche Teil des Durham-Reviers deckgebirgsfrei, während der östliche Teil von jüngerem Deckgebirge überlagert ist (Abb. 44; BEARCOCK & SMEDLEY 2009). In diesem Deckgebirge sind Kalksteine eingeschaltet, die einen bedeutenden Grundwasserleiter im Nordosten Englands bilden (YOUNGER 1995).

Bergbau

Durch die nach Osten hin einfallenden Flöze wurde der Abbau bis unter die Nordsee vorangetrieben. Die

letzten Bergwerke wurden im South Butterknowle-Abaugebiet bereits Ende der 1960er Jahre, im East of Wear-Abaugebiet in den frühen 1990er Jahren geschlossen. Mit der damit verbundenen Einstellung der Wasserhaltungen kommt es seitdem zu einem großflächigen Anstieg des Grubenwassers. Eine ausführlichere Darstellung des Bergbaus im Durham-Revier wurde in REKER et al. (2019a) veröffentlicht.

Grubenwasseranstieg im South Butterknowle

Das südliche Abaugebiet des Durham-Reviers ist auch als South Butterknowle-Abaugebiet bekannt. Es ist von dem nördlichen East of Wear-Abaugebiet durch die Butterknowle-Störung abgegrenzt. Dort kam es zu einem der europaweit wenigen bekannten Fällen, in denen ansteigendes Grubenwasser in das Grundwasser migrierten und dieses beeinträchtigen konnte. Als in diesem Abaugebiet das letzte Bergwerk schloss, begann seit Anfang der 1970er Jahre das Grubenwasser zu steigen. Obwohl die Gefahr einer Grundwasserverunreinigung bekannt

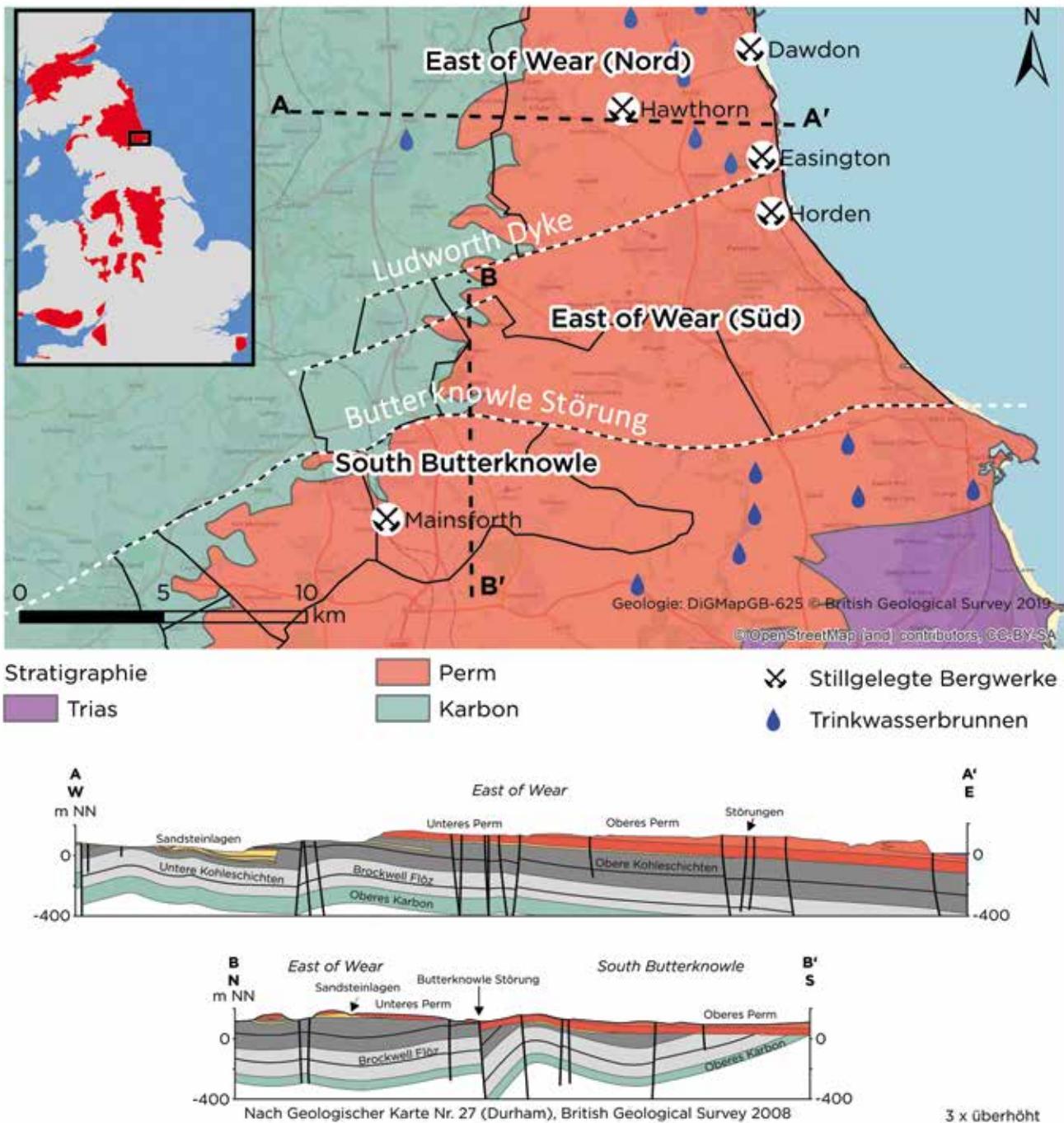


Abb. 44: Geographische und geologische Übersicht über ausgewählte Bergwerke im Durham-Revier (Großbritannien). Geologie nach BRITISH GEOLOGICAL SURVEY (2008). Abaugebiete nach PASTOR et al. (2008).

war und der Grubenwasseranstieg zunächst überwacht wurde (CAIRNEY & FROST 1975), wurde die gesamte Wasserhaltung Mitte der 1970er Jahre eingestellt, sodass das Grubenwasser unkontrolliert anstieg. Da das Grubenwasser aus Niederschlägen in das bei ca. +125 m NN ausstreichende Kohleflöz Brockwell gespeist wird, hat es eine deutlich höhere Druckhöhe als das Grundwasser, dessen Druckhöhe bei rund +90 m NN liegt (YOUNGER & ADAMS 1999; Abb. 45). Bedingt durch diese Druckdifferenz konnte das Grubenwasser bereits 1974/75 im Bergwerk Mainsforth in das Deckgebirge einstauen (Abb. 46). Die Beeinträchtigung des Grundwassers ließ sich ab Mitte bis Ende der 1970er Jahre durch eine sprunghafte Erhöhung der Sulfatkonzentrationen nachweisen. Erste Überschreitungen der Sulfatgrenzwerte für einzelne Trinkwasserbrunnen der öffentlichen Versorgung werden für 1999 bis 2024

erwartet (NEYMEYER et al. 2007). Interessant ist der Umstand, dass keine erhöhten Eisenkonzentrationen im Grundwasser nachgewiesen werden konnten. Dies ist dadurch zu erklären, dass das nettoacidische Grubenwasser (siehe Infobox zu „Chemische Begriffe“) durch den Kalkstein im Grundwasserleiter neutralisiert und das Eisen als Hydroxidbelag auf dem Kalkstein ausgefallen ist (YOUNGER & ADAMS 1999).

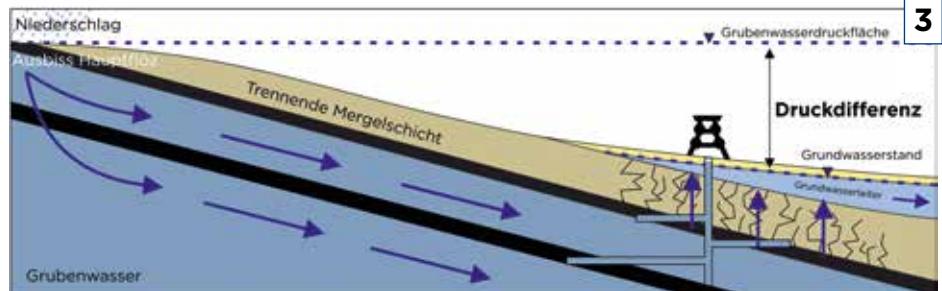
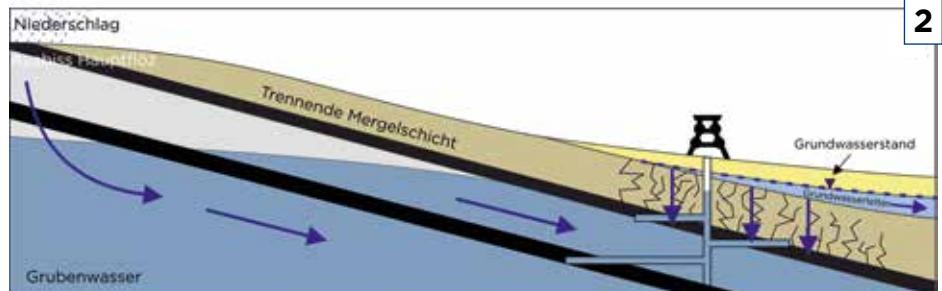
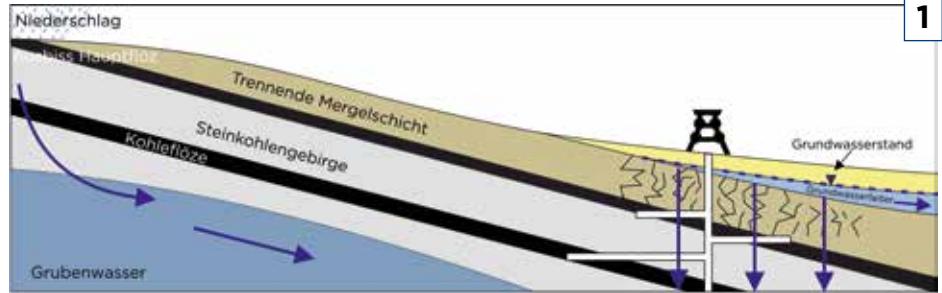


Abb. 45: (1) Abfluss des Grundwassers in die Lagerstätte (Druckwasserstand des Grubenwassers liegt deutlich unterhalb des Grundwasserstands), (2) verringelter Abfluss des Grundwassers in die Lagerstätte (Druckwasserstand des Grubenwassers liegt unterhalb des Grundwasserstands), (3) Infiltration des Grubenwassers in das Grundwasser (Druckwasserstand des Grubenwassers liegt deutlich oberhalb des Grundwasserstands). Stark schematisiert und nicht maßstabsgerecht. Man beachte den gestiegenen Grundwasserstand in der unteren Abbildung.

Fazit

Die Beeinträchtigung des Grundwasserleiters durch ansteigendes Grubenwasser im South Butterknowle-Abaugebiet in Durham (Großbritannien) ist auf eine fehlerhafte Einschätzung der potentiellen Druckhöhe des Grubenwassers zurückzuführen. Dies zeigt, dass die Kenntnis des Zusammenspiels der geologischen, hydrogeologischen und insbesondere topographischen Charakteristika des Reviers von entscheidender Bedeutung ist, um Gefährdungen von Grundwasserleitern zu beurteilen und zu verhindern. Außerdem wird deutlich, dass sowohl ein adäquates Monitoring-System als auch das Vorhalten geeigneter Handlungsmöglichkeiten im Vorfeld gefehlt haben.

Optimierung des Grubenwassermanagements im East of Wear-Abaugebiet

Nördlich von South Butterknowle liegt das East of Wear-Abaugebiet. Dieses Abaugebiet wird großflächig von einem 140 m bis 180 m mächtigen Deckgebirge überlagert, in das ein Kluftgrundwasserleiter eingeschaltet ist (Abb. 44). Der Grundwasserleiter dient ebenfalls der öffentlichen Trinkwasserversorgung.

Aufgrund der Erfahrungen aus dem South Butterknowle-Abaugebiet wurde nach dem Ende der Wasserhaltung in diesem Abaugebiet Mitte der 1990er Jahre der Grubenwasseranstieg überwacht. Durch Interpolation der gemessenen Wasserstände konnte der Zeitpunkt abgeschätzt werden, ab dem mit Auswirkungen auf den Kluftgrundwasserleiter gerechnet werden musste (Abb. 47; WATSON 2011). Ab diesem Zeit-

punkt (Mitte 2004) wurde wieder eine Wasserhaltung aktiviert, um die Druckhöhe des Grubenwassers wenige Meter unter der Druckhöhe des Grundwassers zu halten. Das geförderte Wasser wurde mit Hilfe einer aktiven Aufbereitungsanlage (siehe Infobox zu „Grubenwasser-aufbereitung“) gereinigt. Dabei wurden verschiedene Förderraten eingestellt, um den Einfluss der gepumpten Wassermenge auf den Wasserchemismus zu untersuchen. Dabei zeigte sich, dass eine geringere Förderrate einen positiven Einfluss auf die Eisen- und Chloridkonzentrationen des Grubenwassers hat (PASTOR et al. 2008). Dies wurde dadurch erklärt, dass eine hohe Förderrate das Nachströmen von hoch

mineralisierten Wässern bewirkt und somit die Gesamtqualität des geförderten Wassers sowie die Ausbildung einer stabilen Dichteschichtung (Kap. 2.5.) beeinträchtigt. Aus diesem Grund wurde die Förderrate soweit reduziert, dass die Druckhöhe des Grubenwassers knapp unter der Druckhöhe des Grundwassers lag. Auf diese Weise konnte die Qualität des geförderten Grubenwassers verbessert, die Pumpkosten minimiert und das Grundwasser vor einer Vermischung mit dem Grubenwasser geschützt werden.

In diesem Zusammenhang ist die Chloridkonzentration des Grubenwassers ein wichtiger Parameter, da Chlorid nicht über passive Was-

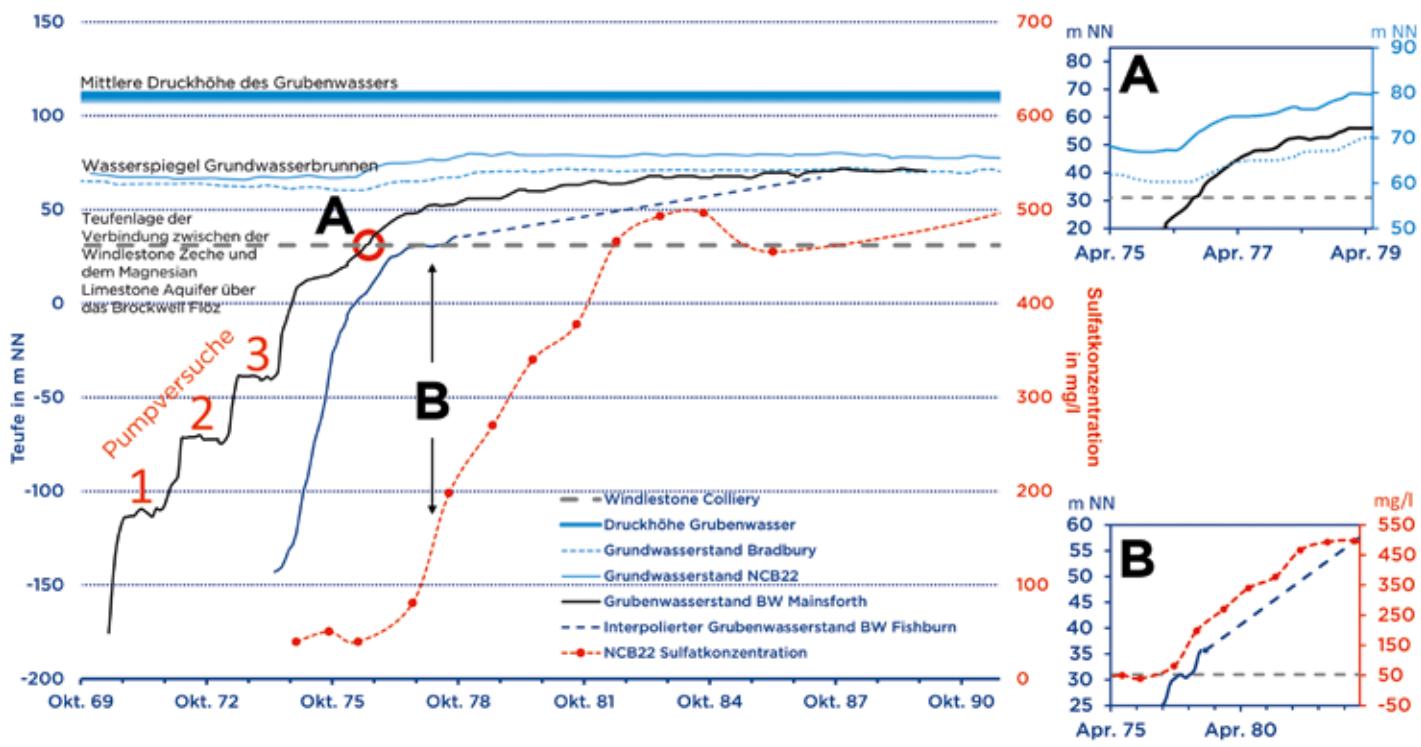


Abb. 46: Grubenwasseranstiegsverläufe in ausgewählten Bergwerken und Beobachtungspunkten im Durham-Revier für die Abbaugebiete südlich der Butterknowle Störung von 1969 bis 1991. Die Kontamination des hangenden Grundwasserleiters ab Sommer 1976 spiegelt sich in der steigenden Sulfatkonzentration wider (grüne Linie). Daten reproduziert nach CAIRNEY & FROST (1975); KORTAS & YOUNGER (2007); PASTOR et al. (2008).

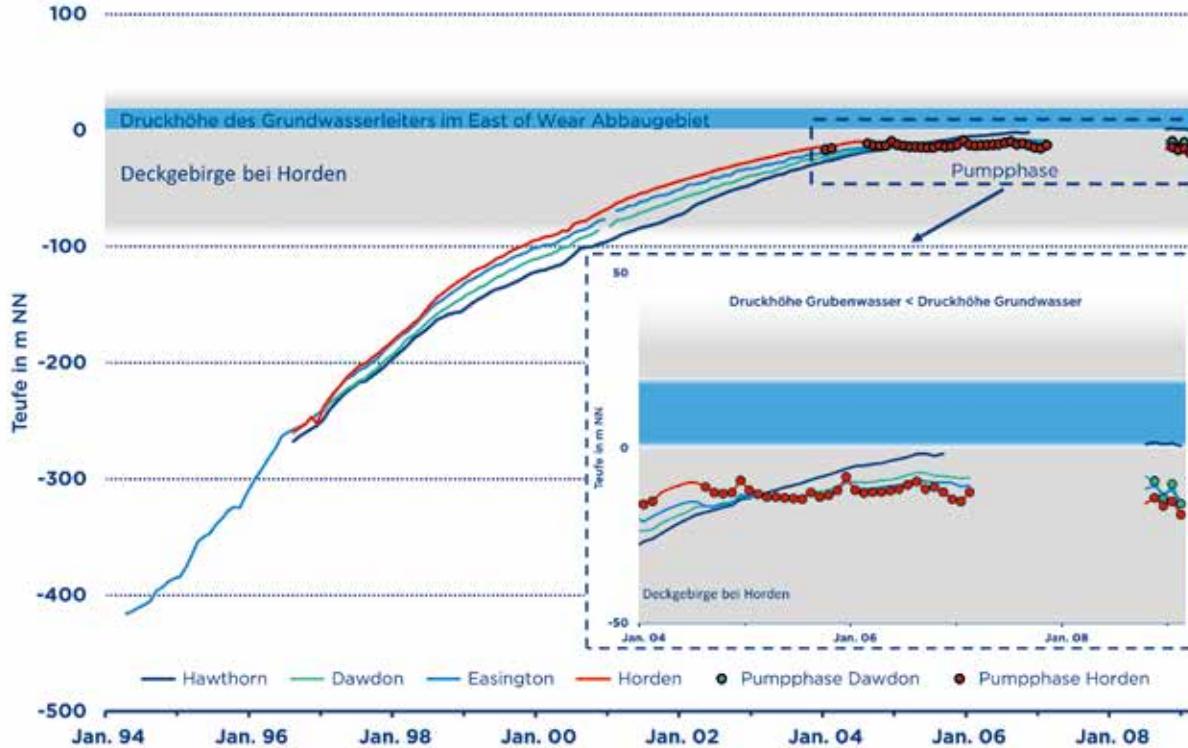


Abb. 47: Grubenwasseranstiegsverläufe der Bergwerke Dawdon, Easington und Horden im East of Wear-Abbaugebiet. Die Teufenlage des Deckgebirges im East of Wear-Abbaugebiet ist in grau abgesetzt. Das Inlet verdeutlicht, dass die mittlere Druckhöhe des Grundwassers nur wenige Meter oberhalb des durch Wasserhaltungsmaßnahmen reduzierten Grubenwasserstands liegt. Daten reproduziert nach WHITWORTH (2002); PASTOR et al. (2008); WATSON (2011). Für die Jahre 2007 und teilweise 2008 liegen keine öffentlich zugänglichen Daten vor.

seraufbereitungsanlagen entfernt werden kann und den Einsatz von Pflanzenkläranlagen verhindert. Ursprünglich war das Abbaugebiet rund um das Bergwerk Horden durch den Ludworth Dyke hydraulisch von den Bergwerken Easington und Dawdon getrennt. Eine hydraulische Verbindung herrscht nur durch eine aufgefahrene Strecke, die anhand risswerklicher Aufzeichnungen abgedämmt sein sollte. Die gemessenen Grubenwasseranstiegsverläufe zeigen jedoch alle einen nahezu identischen Verlauf. Dies deutet darauf hin, dass es keine Abdämmung zwischen den Abbaugebieten gibt, sondern vielmehr von einer offenen, hydraulisch wirksamen Verbindungsstrecke ausgegangen werden kann. Unklar ist, wie lange diese Verbindung offen bleibt (WATSON 2011). Da das hydraulische Druckgefälle in diesem Abbaugebiet sowohl für die Grubenwasser- als auch für die Grundwasserströmung von West nach Ost, also in Richtung Küste mit den dortigen Bergwerken gerichtet ist, würden bei einem hydraulischen Versagen der Strecken die Aufbereitungskapazitäten auf dem Bergwerk Horden überschritten. Es käme zu einer unkontrollierten Beeinträchtigung des Grundwassers.

Um dies zu verhindern, wurde zeitnah auch auf dem Bergwerk Dawdon eine aktive Aufbereitungsanlage mit einer identischen Kapazität errichtet. Da der Schacht des Bergwerks Dawdon tiefer als der des Bergwerks Horden ist, wurde dort von einer schlechteren Wasserqualität mit höheren Konzentrationen u. a. an Chlorid und Eisen ausgegangen. Als die Aufbereitungsanlage auf dem Bergwerk Dawdon Ende 2008 fertig gestellt war, konnte die Entnahmera-

te auf dem Bergwerk Horden von $6 \text{ m}^3/\text{min}$ bis $9 \text{ m}^3/\text{min}$ auf rund $3 \text{ m}^3/\text{min}$ reduziert werden (WATSON 2011). Mit der Reduzierung der Entnahmerate trat auch der erwartete Rückgang der Chloridkonzentrationen ein, womit die aktive Aufbereitungsanlage auf dem Bergwerk Horden abgebaut und stattdessen bis 2011 ein passives Aufbereitungssystem von 1,7 ha Größe mitsamt Belüftungsanlage, Absetzbecken und Pflanzenkläranlage aufgebaut werden konnte (WATSON 2011). Das aufbereitete Wasser wird dann in die anliegende Nordsee geleitet. Dort spielen die erhöhten Chloridkonzentrationen aufgrund von Verdünnungseffekten keine bedeutende Rolle mehr.

Fazit

Durch die Erfahrungen aus der Beeinträchtigung des Grundwasserleiters im South Butterknowle-Abbaugebiet konnte im nördlich angrenzenden East of Wear-Abbaugebiet das Grundwasser durch das Vorhalten von Wasserhaltungsstandorten und entsprechenden Pumpmaßnahmen geschützt werden. Dazu wurde der Grubenwasseranstieg in mehreren Bergwerken kontinuierlich überwacht, sodass der Zeitpunkt abgeschätzt werden konnte, wann das Grubenwasser die Basis des Grundwasserleiters erreicht. Durch die Aufrechterhaltung einer vergleichsweise geringen Potenzialdifferenz von wenigen Metern zwischen dem Grund- und Grubenwasser, konnte eine Infiltration des Grubenwassers in den Grundwasserleiter hinein verhindert werden. Außerdem konnten auf diese Weise die Pumpkosten und der Energieverbrauch gesenkt und die Umwelt auf diese Weise entlastet werden. Ein weiterer Vorteil dieses

nachhaltigen Wasserhaltungskonzepts im East of Wear-Abbaugebiet besteht auch darin, dass die Beschaffenheit des Grubenwassers so weit beeinflusst werden konnte, dass ein Wechsel von aktiver zu passiver Grubenwasseraufbereitung möglich war. Dies ist mit großer Sicherheit auch darauf zurückzuführen, dass die geringeren Pumpraten die Ausbildung einer Dichteschichtung im Grubenwasser begünstigen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass ein höheres hydraulisches Potenzial des Grund- gegenüber dem des Grubenwassers eine Infiltration in den Grundwasserleiter verhindert. Dies gilt auch, wenn die Druckhöhe des Grubenwassers bereits im wassererfüllten Bereich des Grundwasserleiters steht. Die Aufrechterhaltung dieser Potenzialdifferenz muss fortwährend gewährleistet werden.

3.2.3. East Fife

Geologie und Hydrogeologie

Das East Fife-Revier liegt an dem gegenüberliegenden Küstenstreifen von Edinburgh in der Grafschaft Fife. Die Steinkohlenlagerstätte tritt ohne Deckgebirge zutage. Viele der Bergwerke befinden sich in unmittelbarer Nähe zur Küste. Da die Kohleflöze in Richtung Nordsee abtauchen, wurde der Abbau bis weit unter das Meer vorangetrieben (Abb. 49).

Gezeiteneinfluss

Die Grubenwasserstände in diesen Bergwerken zeigen typischerweise einen annähernd zyklischen Verlauf mit periodisch wechselnden An-

Grubenwasseraufbereitung



Abb. 48: Belüftungssystem der Grubenwasseraufbereitungsanlage am Bergwerk Caphouse in Yorkshire (Großbritannien; Foto: Bastian Reker).



Erfüllt ein Wasser nicht die gewünschten Anforderungen für einen Verwendungszweck oder entsprechende Normen, kann es mittels verschiedener Methoden und Systeme aufbereitet und behandelt werden. Im Zusammenhang von Grubenwasser spricht man dabei von einer Grubenwasseraufbereitung (oder auch Grubenwasserbehandlung), die sowohl aktiv als auch passiv ausgelegt sein kann (WOLKERSDORFER 2013).

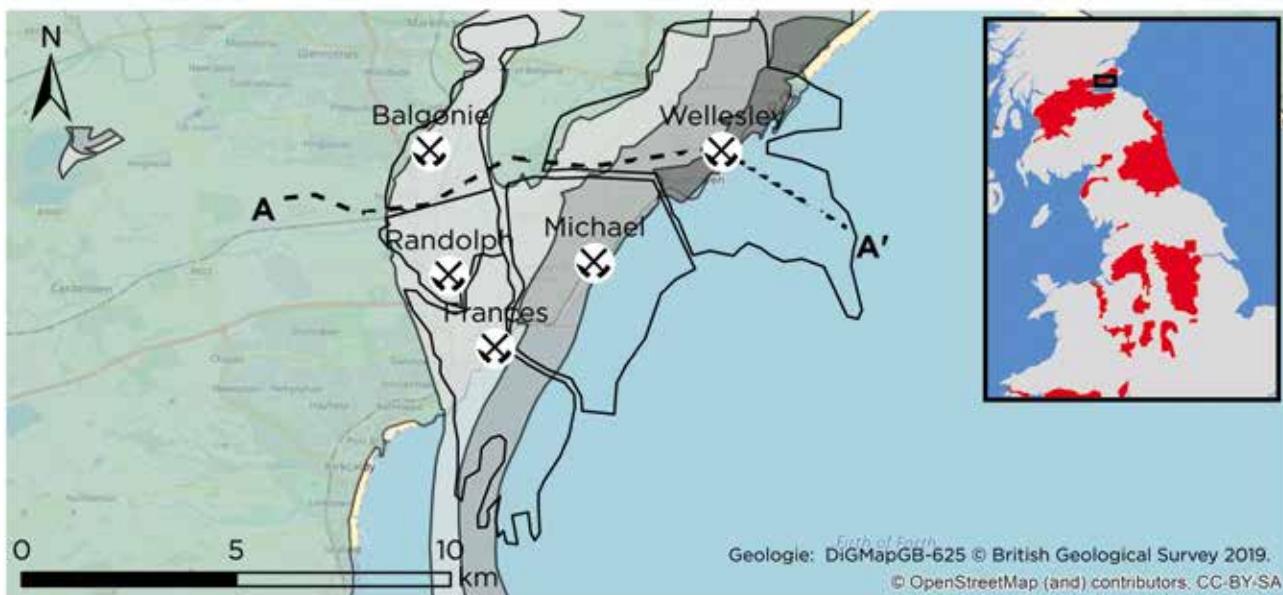
Eine aktive Grubenwasseraufbereitungsanlage zeichnet sich dadurch aus, dass Energie und/oder Chemikalien für den Reinigungsprozess fortwährend aufgewendet werden müssen, um das Wasser in seiner chemischen und physikalischen Beschaffenheit zu verändern. Beispiele für aktive Systeme sind die weit ver-

breiteten Dünn- und Dickschlammverfahren, Filtrationsverfahren oder elektrochemische Verfahren wie Elektrokoagulation.

Die Definition von passiven Grubenwasseraufbereitungssystemen ist deutlich weniger klar. Nach WOLKERSDORFER (2013) sind damit Systeme gemeint, die ausschließlich „natürliche“ Energie wie potentielle Energie (Höhenunterschied in Kaskaden o. Ä.), Sonnenenergie (Wärme, Photosynthese, UV-Strahlung) oder biologische Energie in Form von Bakterien aufwenden. Es werden also natürlich ablaufende Prozesse genutzt, um das Grubenwasser zu reinigen. Beispiele für passive Systeme sind die besonders im angelsächsischen Raum häufig angelegten aeroben und anaeroben Feuchtgebiete, der oxische oder anoxische Karbonatkanal oder auch die reduzierenden Alkalinitätssysteme (RAPS – „Reducing and Alkalinity Producing Systems“).

Mischformen zwischen aktiven und passiven Systemen kommen häufig vor, da auch in passiven Systemen oftmals (aktive) Belüftungsanlagen (Abb. 48) betrieben oder Nährstoffe für Bakterien und Pflanzen eingebracht werden müssen. Außerdem müssen auch passive Systeme regelmäßig gereinigt und gewartet werden, damit sie lange Zeit stabil bleiben und die erforderliche Reinigungsleistung erreichen.

Für detailliertere Informationen zum Thema aktive und passive Grubenwasserreinigung wird auf die Literatur von HEDIN et al. (1994), WOLKERSDORFER (2013) und den Global Acid Rock Drainage Guide (INAP 2014) verwiesen.



[Light Gray Box]	Karbon (Untere Kohleschichten)	Stratigraphie	[X]	Stillgelegte Bergwerke
[Medium Gray Box]	Karbon (Mittlere Kohleschichten)	[Light Green Box]	[X]	Karbon
[Dark Gray Box]	Karbon (Obere Kohleschichten)			

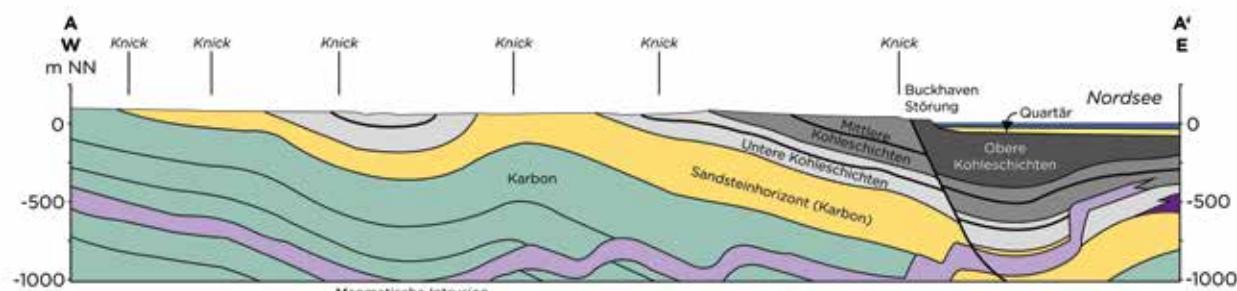


Abb. 49: Geographische und geologische Übersicht über ausgewählte Bergwerke im East Fife-Revier (Schottland).

Geologie nach BRITISH GEOLOGICAL SURVEY (1999). Abbaugebiete nach SHERWOOD (1997).

stiegen und Abfallen. Die Größenordnung dieser Schwankungen liegt bei bis zu mehreren Dezimetern. Laut YOUNGER et al. (2002) sind die Gezeitenkräfte für den periodischen Verlauf verantwortlich. Bei Meerwasserhochständen (bei Flut) steigt der Druck der Wassersäule auf das unterlagernde Gebirge. Durch die Auflast der zusätzlichen Wassersäule werden die Hohlräume im Untergrund zusammengepresst (Abb. 50-1), womit auch das Wasser aus diesen Hohlräumen herausgepresst wird und es zu einem Anstieg des im Schacht gemessenen Wasserstandes kommt (Abb. 50-2). Bei Meerwasserniedrigständen (bei Ebbe) hingegen erfolgt eine Druckentlastung des unterlagernden Ge-

birges. Das Meerwasser läuft ab, so dass sich die Hohlräume wieder weiten und das Wasser in diese zurückfließt. Folglich sinkt der Wasserstand in der Beobachtungsmessstelle wieder (Abb. 50-3). Dieses Phänomen wurde vor allem im küstennahen East Fife-Revier in Schottland beobachtet (WHITWORTH 2002; NUTTALL et al. 2002; YOUNGER et al. 2002; WYATT et al. 2014). Die Grubenwasserstände reagierten mit einer zeitlichen Verzögerung von ca. 2 h auf die Meerwasserhochstände.

YOUNGER et al. (2002) geht in seinen Untersuchungen davon aus, dass der Grubenwasseranstieg und die Wasserstandsschwankungen nicht auf eine direkte Intrusion des Meerwas-

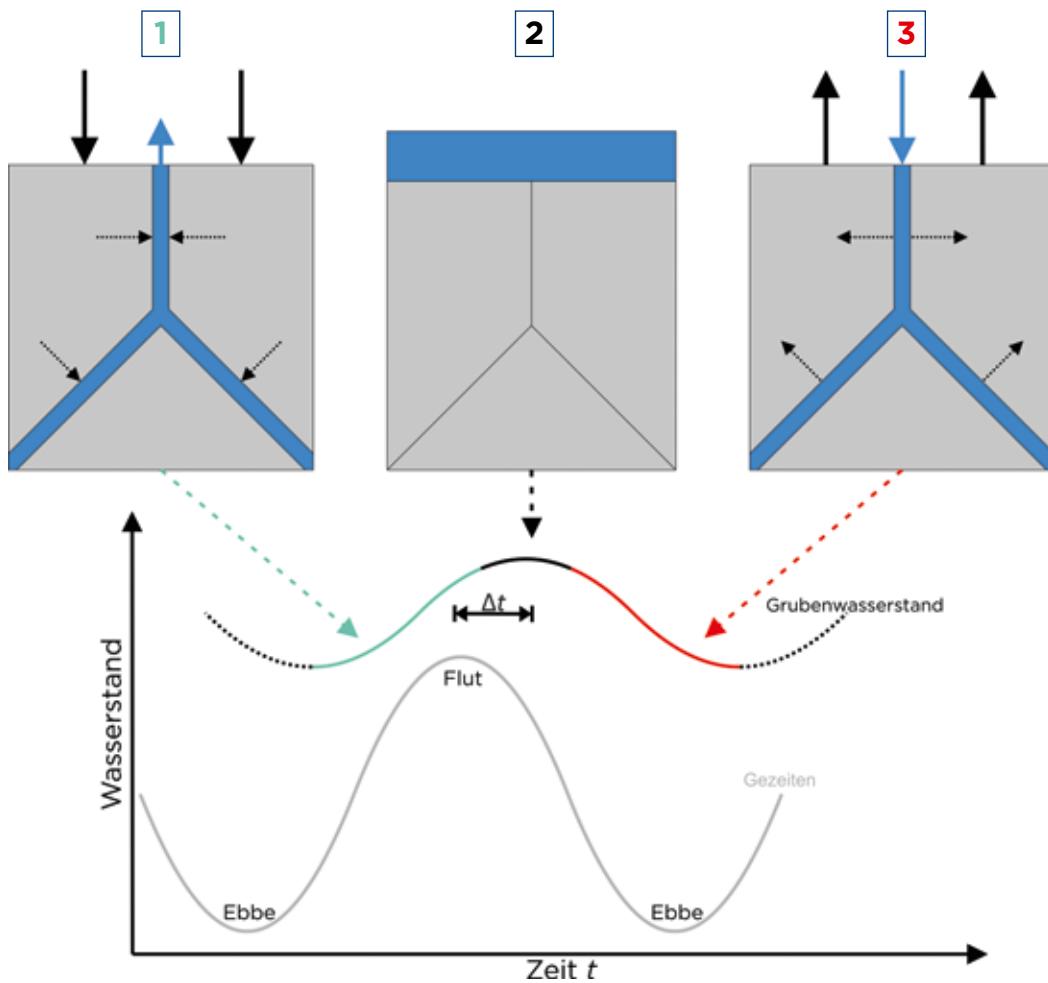


Abb. 50: Einfluss der Gezeiten auf die Porenräume im unterlagernden Gebirge und den Grubenwasserstand.

sers in die Grubenbaue zurückzuführen seien. NUTTALL et al. (2002) und NUTTALL & YOUNGER (2004) wiesen anhand von Isotopenuntersuchungen jedoch nach, dass der Anteil des Meerwassers im Grubenwasser bis zu 30 % beträgt. Allerdings weisen auch sie darauf hin, dass die Grubenbaue, die lokal kilometerweit unter die See getrieben wurden, als weitestgehend trocken galten und keine Meerwasserzuflüsse festgestellt wurden.

Neben dem Einfluss der Gezeiten auf die Grubenwasserstände wird außerdem auch von einer zumindest indirekten Abhängigkeit der Wasserchemie des geförderten Grubenwassers von den Gezeiten berichtet (WYATT et al. 2014). So kommt es im Bergwerk Frances während der Tiden zu ma-

ximalen Werten für die elektrische Leitfähigkeit im Grubenwasser. Die elektrische Leitfähigkeit korrespondiert mit den gemessenen Eisenkonzentrationen (von ca. 30 mg/l bis zu 247 mg/l während eines Zyklus) und ist damit für eine anschließende Wasseraufbereitung von entscheidendem Interesse. Die Erklärung für diese Abhängigkeit ist, dass es in diesem Bereich zu einer ausgeprägten Dichteschichtung des Wassers gekommen ist: Während in den tieferen Bereichen der Wassersäule die hoch mineralisierten Wässer sind, besteht die obere Schicht aus geringer mineralisierten Wässern. Während der Gezeiten kommt es zu einer Schwankung der Grenze zwischen diesen beiden Schichten mit einer Amplitude von rund 10 m. Im Falle des Beobachtungspunktes bei

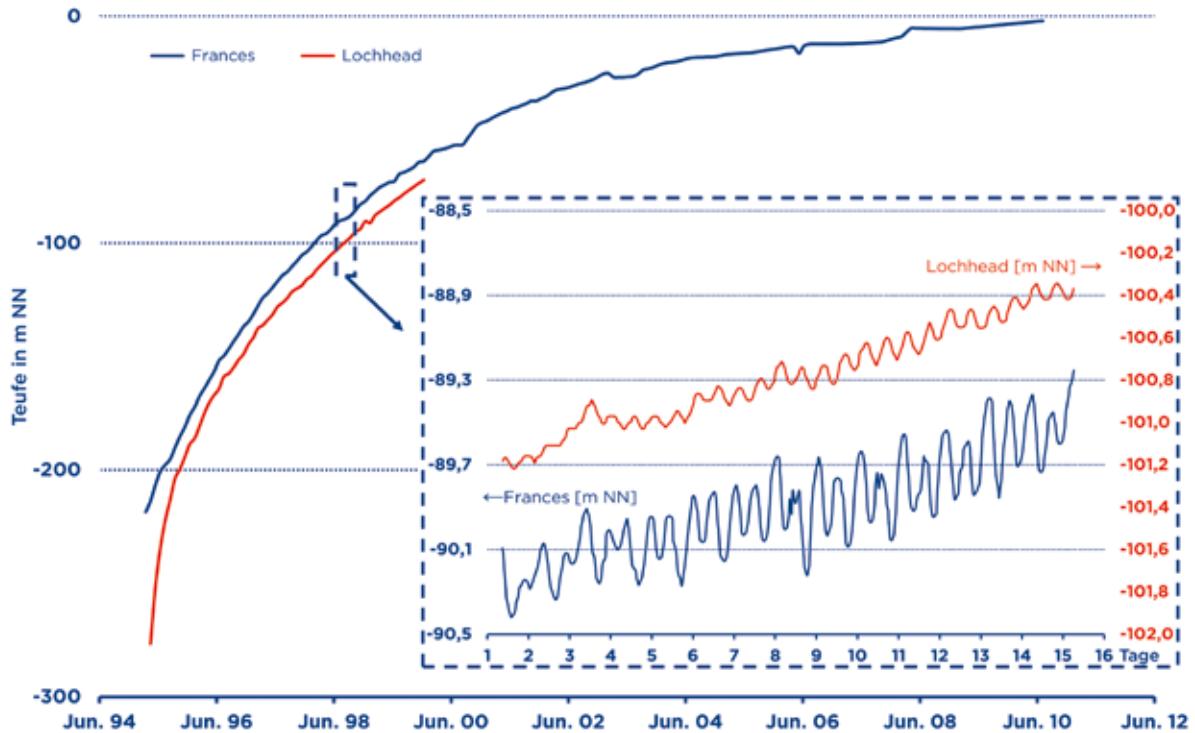


Abb. 51: Grubenwasseranstiegsverläufe in den Bergwerken Frances und Lochhead im East Fife-Revier (Schottland). Das Inlet zeigt den Einfluss der Gezeiten auf den Anstiegsverlauf. Daten reproduziert nach WHITWORTH (2002) und WYATT et al. (2013).

dem Bergwerk Frances fördert eine der beiden Pumpen aus dem oberen Teil dieses Schwankungsbereichs, sodass bei Flut höher mineralisierte Wässer mit einer Eisenkonzentration von bis zu 247 mg/l und bei Ebbe geringer mineralisierte Wässer mit Eisenkonzentrationen von rund 30 mg/l gefördert werden. Das geförderte Grubenwasser der Pumpe, die über diesem Schwankungsbereich in dem Schacht eingehängt ist, weist keine bedeutenden Variationen der Eisenkonzentration auf. Die Verschiebung der Grenzschicht von über 10 m im Wechsel der Gezeiten ist deutlich größer als die Schwankung des Grubenwasserstands von ca. 0,4 m und auch deutlich größer als der Tidenhub von ca. 4 m (Abb. 51). Die genauen Gründe dafür sind noch unbekannt. Vermutlich

sind sie jedoch auf eine Kombination aus Dichteunterschieden der beiden Wässer, Pumpraten und Gezeitenkräften zurückzuführen (WYATT et al. 2014). Insgesamt ist dabei jedoch zu betonen, dass die Gezeiten keinen direkten Einfluss auf die Chemie des Grubenwassers haben, sondern dass die Schwankungen der Wasserqualität auf die Schwankung der Höhe der Dichteschichtungsgrenzschicht zurückzuführen sind.

Fazit

Gezeitenkräfte können bei Bergwerken in Küstennähe einen großen Einfluss auf die Dichteschichtung und indirekt auf die Qualität des gepumpten Grubenwassers haben. Es wird von einer Schwankung der Grenzschicht von bis zu 10 m berichtet, obwohl die zyklischen

Grubenwasserstandsänderungen nur im Dezimeterbereich liegen. Aus wissenschaftlicher Sicht sind die Gründe dafür noch nicht ganz klar, es werden mehrere Einflussfaktoren wie Dichteunterschiede, Pumpraten und Gezeitenkräfte diskutiert. Bei dem Bergwerk Frances kam es durch die Höhenänderung der Grenzschicht der Dichteschichtung dazu, dass eine der Pumpen zeitweise in hochsalinarem Wasser und zeitweise in geringer salinem Wasser hing und somit die Wasserqualität deutlich schwankte. Bei der Planung von Wasserhaltungs- und Grubenwasseraufbereitungsanlagen in entsprechenden Abaugebieten sollte die Tiefe der Pumpen dement sprechend angepasst werden.



Abb. 52: Steinkohlevorkommen in Frankreich. Räumliche Abgrenzung der Abaugebiete nach DIRECTION DES MINES (1963) und DANIEL & JAMIESON (1992).

3.3.

Frankreich: Lothringen und Warndt

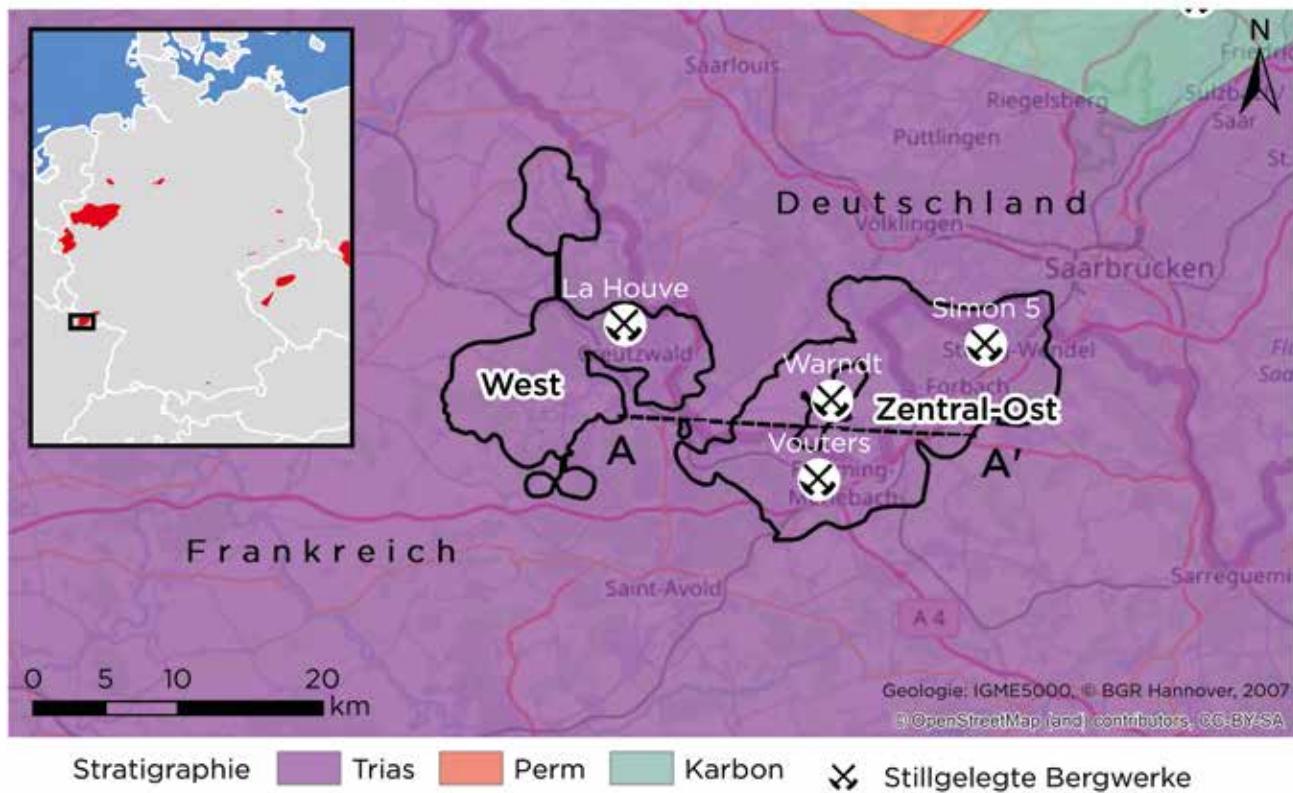


Abb. 53: Geographische und geologische Übersicht über das Lothringer Steinkohlenrevier (Frankreich; Bergwerk Warndt [Deutschland] ist eingeschlossen). Geologie nach ASCH (2005). Abbaugebiete nach CORBEL et al. (2017).

Geologie und Hydrogeologie

Im Lothringer Revier auf französischer Seite und im Warndt als Teil des Saar-Reviers auf deutscher Seite bilden die Sandsteine der unteren Trias (Buntsandstein) den regionalen Kluft- und Porengrundwasserleiter (siehe Infobox „Stratigraphie der Steinkohlevorkommen“) sowohl für die industrielle Nutzung als auch für die öffentliche Versorgung mit

Trinkwasser (Abb. 52 und Abb. 53). Obwohl die zwischen dem Grundwasserleiter und den Schichten des Karbons lagernden Tonschichten (*Grenzletten*) als wasserundurchlässig gelten, können sie durch die bergbaulichen Aktivitäten zerklüftet sein und so ihre Funktion als geo-hydraulische Barriere zwischen den Schichten des Karbons und der Trias verlieren. Vor allem der Abbau, der

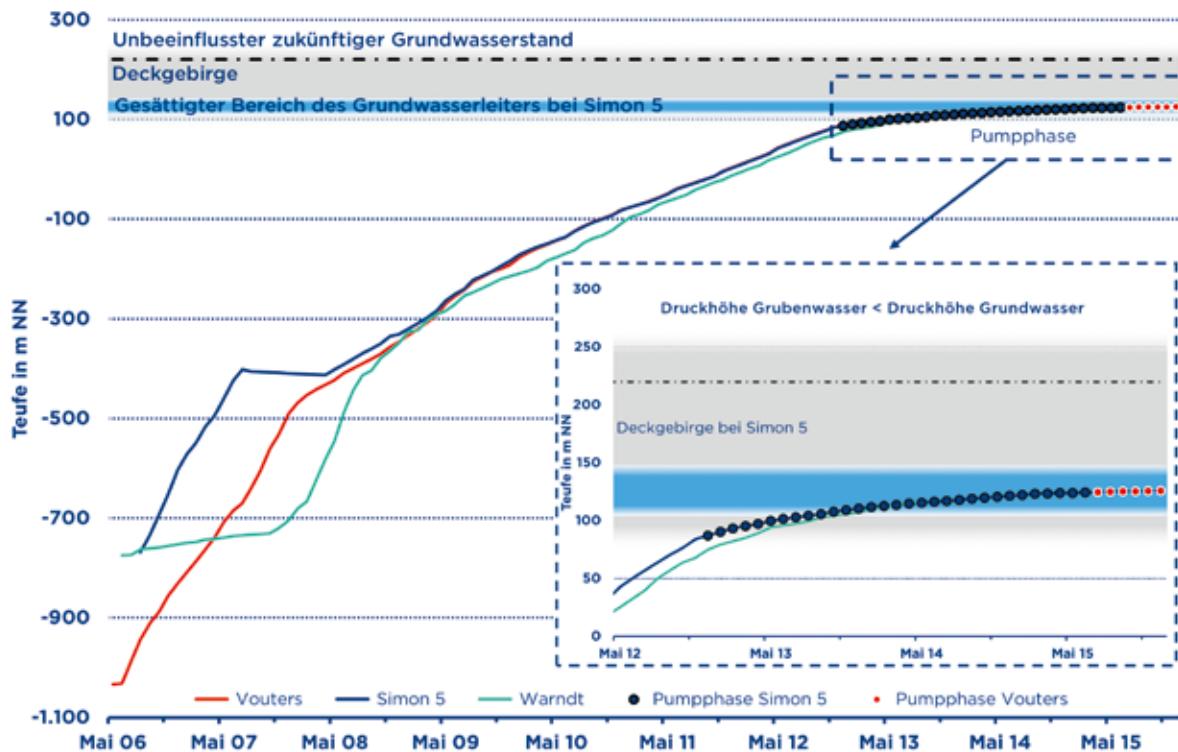


Abb. 54: Grubenwasseranstiegsverläufe in den Bergwerken Vouters und Simon in Lothringen (Frankreich) von 2006 bis 2016 (Daten nach COSQUER [2016]) sowie Warndt (Deutschland; Daten nach SCHÄFER [2016]). Das Deckgebirge ist in grau abgesetzt. Der derzeitige sowie zukünftige, natürliche Grundwasserstand im Bergwerk Simon ist als blauer Bereich bzw. als weiße gestrichelte Linie darüber hervorgehoben (Daten nach BRGM [2016]). Das Inlet verdeutlicht, wie während der Pumpphase (gepunkteter Bereich) die Druckhöhe des Grubenwassers knapp unterhalb des Grundwasserstands gehalten wird, um eine Infiltration des Grubenwassers in den Grundwasserleiter zu verhindern.

von französischer Seite erfolgt ist, hat die abdichtende Funktion der Grenzletten in großen Teilen zerstört (WAGNER 2010).

Bergbau und bergmännische Wasserwirtschaft

Der Abbau der Steinkohle fand in Lothringen in Teufen von -150 m NN bis -1.250 m NN statt. Durch die Zerrüttung und Zerklüftung der Deckgebirgsschichten konnten erhebliche Wassermengen aus dem Grundwasserleiter in das Steinkohlengebirge und die darin befindlichen Grubenbaue abfließen. Als Folge entstanden große Absenkungstrichter im Grundwasserleiter (KOEBERLÉ et al. 2013). Teilweise sind Absenkungsbezüge der Grundwasserstandshöhen von bis zu 160 m gemessen worden (WAGNER 2010).

Die sich insgesamt ergebende Pro-

blematik im Hinblick auf das ansteigende Grubenwasser ist der des Durham-Reviers in Großbritannien sehr ähnlich:

- weiträumiger, untertägiger Abbau von Steinkohle,
- Abbau bis nah unter das Deckgebirge,
- Zerrüttungszonen über den Abbaubereichen als Wasserwegsamkeiten zwischen Lagerstätte und Deckgebirge,
- wasserwirtschaftlich wichtige Grundwasserleiter im Deckgebirge,
- Infiltration des Grundwassers in die Lagerstätte,
- Gefährdung des Grundwasserleiters durch ansteigendes Grubenwasser.

Während der Betriebsphasen der Bergwerke wurde das aus dem Grundwasserleiter in die Lagerstätte fließende Wasser zeitnah

abgepumpt, wodurch diese Wässer nur eine kurze Verweilzeit in der Lagerstätte hatten. Daher waren sie nicht an gelösten Inhaltsstoffen angereichert, konnten für industrielle Zwecke genutzt und das überschüssige Wasser bedenkenlos der Umwelt zugeführt werden (KOEBERLÉ et al. 2013). Nach der Beendigung der Wasserhaltungen ist ein solches Vorgehen nicht mehr möglich. Die deutlich erhöhten Verweilzeiten nach Ende der Wasserhaltungsmaßnahmen bewirken eine erhöhte Mineralisation der Wässer. Bei einem unkontrollierten Anstieg des Grubenwassers können diese den Grundwasserleiter belasten, während sie bei einem Abpumpen vor der Einleitung in einen Vorfluter aufbereitet werden müssen. Eine weitere Problematik in diesem Abaugebiet ist außerdem, dass seitens des ehemaligen Bergwerksbetreibers in Lothringen, Charbon-

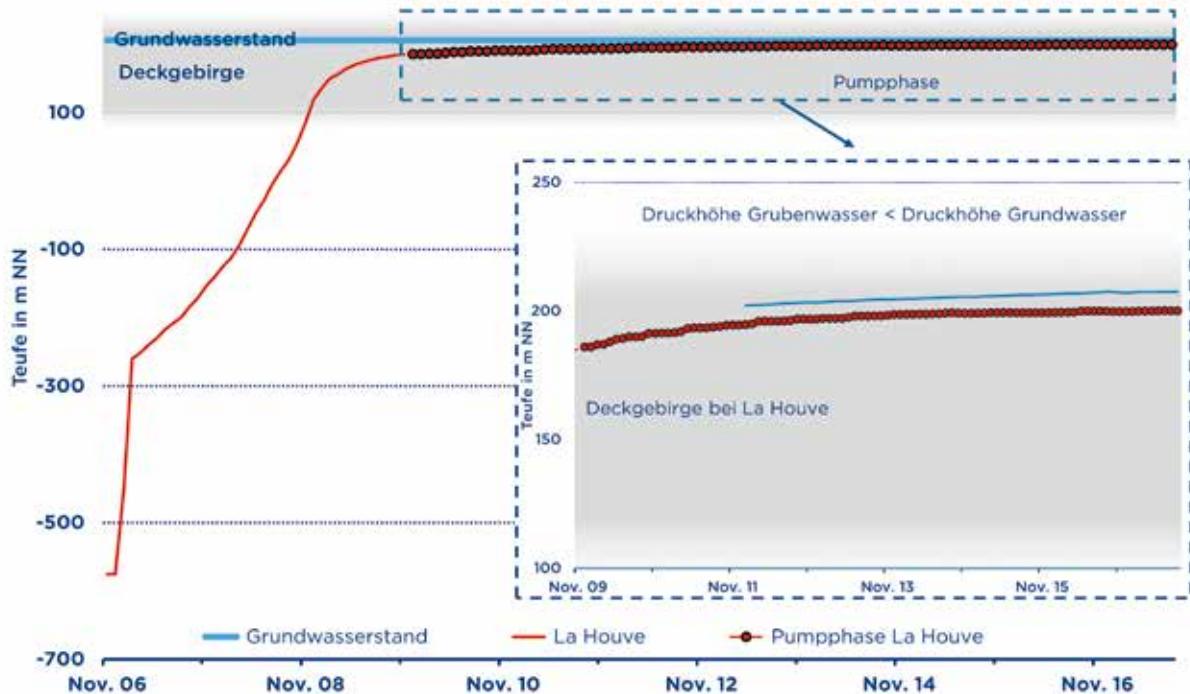


Abb. 55: Grubenwasseranstiegsverlauf im Bergwerk La Houve in Lothringen (Frankreich) von 2006 bis 2017 (Daten nach CORBEL et al. [2017] und BRGM [2017]). Das Deckgebirge ist in grau, der Grundwasserstand in hellblau abgesetzt. Das Inlet verdeutlicht, wie der Grubenwasserstand durch Pumpmaßnahmen nahezu konstant 7,5 m unterhalb des langsam ansteigenden Grundwasserstands gehalten wird.

nages de France (CdF), sämtliche Einrichtungen (Maschinen, Elektrik, hydraulische Installationen) untergeblieben sind und insbesondere die entsprechenden Betriebsstoffe einen Risikofaktor darstellen (CORBEL et al. 2017).

Zum Schutz des Grundwassers und auch der Gebäude, die in den Bergsenkungsbereichen und dadurch teilweise unterhalb des natürlichen Grundwasserstands liegen, wurde der seit 2006 (Bergwerke Vouters, Simon und Warndt: Juni bis August 2006; Bergwerk La Houve: Dezember 2006) stattfindende Anstieg des Grubenwassers zunächst kontinuierlich überwacht. Die Lage dieser Beobachtungspunkte sowie die Einteilung des Reviers in ein westliches und ein zentral-östliches Abbaugebiet sind in Abb. 53 ersichtlich. Das Bergwerk Warndt ist durch einen Hochdruckdamm in einer Tiefe von

rd. -840 m NN (rd. 1.000 m u. GOK) von den nordöstlich gelegenen saarländischen Bergwerken hydraulisch getrennt (WAGNER 2010; RAG AG 2015).

Grubenwasseranstieg im zentral-östlichen Abbaubereich

Die Einstellung der Wasserhaltungsmaßnahmen fand auf den Bergwerken Vouters, Simon und Warndt zwischen Juni und August 2006 statt (WAGNER 2010; SCHÄFER 2016; CORBEL et al. 2017). Der seitdem laufende Grubenwasseranstiegsprozess ist für alle drei Bergwerke in Abb. 54 dargestellt. Der Anstieg kann in allen Bergwerken in drei Phasen eingeteilt werden. Die erste Phase ist von sehr hohen initialen Anstiegsgeschwindigkeiten von bis zu nahezu 50 m pro Monat geprägt (initiale Phase), gehen dann aber rasch auf Werte bis 30 m pro Monat im Verlauf des ersten Jahres zurück. Im Juli 2007 stagniert dann der Grubenwasser-

stand auf dem Bergwerk Simon und ist sogar leicht rückläufig, während die Anstiegsgeschwindigkeiten auf dem Bergwerk Vouters wieder Werte von 42 m pro Monat erreichen. Dies ist auf eine hydraulische Verbindung zwischen den drei Standorten zurückzuführen. Das Wasser fließt auf dem Bergwerk Simon über in die tiefer gelegenen, noch nicht eingestaute Bereiche der Bergwerke Vouters und Warndt. Bei zunehmender Annäherung der Wasserstände untereinander beginnt die zweite Phase des Grubenwasseranstiegs (intermediäre Phase). Das Grubenwasser auf Simon 5 beginnt wieder mit Werten im Bereich um 10 m pro Monat zu steigen und die Anstiegsgeschwindigkeiten auf Vouters und Warndt fallen auf nahezu identische Werte zurück. Der Unterschied bei den Wasserständen hat sich von ehemals bis zu 270 m im Juli 2007 (Simon 5: -402 m NN; Vouters:

-670 m NN) auf rund 20 m im April 2008 (Simon 5: -413 m NN; Vouters: -433 m NN) verringert und gleicht sich im weiteren Verlauf von 2008 bis 2009 immer weiter an, bis sich die Grundwasserstände an allen drei Standorten Mitte 2009 auf nahezu identische Werte eingestellt haben. Die Anstiegsgeschwindigkeiten bewegen sich nunmehr im Bereich von zumeist 6 m bis 11 m pro Monat, bis das karbonische Steinkohlengebirge vollständig überstaut ist und es Ende des Jahres 2012 zu einem Einstau in die Schichten des Perms und der Trias des Deckgebirges kommt. Ab diesem Zeitpunkt beginnt die dritte Phase des Grubenwasseranstiegs (finale Phase), die davon geprägt ist, dass die Anstiegsgeschwindigkeit durch Wasserhaltungsmaßnahmen auf 1 m bis 2 m pro Monat verringert wird und sich somit quasi-stationäre Verhältnisse einstellen. Weiterführende Beschreibungen des Grubenwasseranstiegs und -konzepts im Lothringer Revier wurden in REKER et al. (2019b) veröffentlicht.

Grubenwasseranstieg im westlichen Abbaubereich

Die Wasserhaltungsmaßnahmen auf dem Bergwerk La Houve wurden im Dezember 2006 eingestellt. Dieses Bergwerk hat keinerlei Verbindung zu den Bergwerken Vouters und Simon. Der Anstieg kann in drei Phasen eingeteilt werden (Abb. 55). Die erste Phase dauert von Dezember 2006 bis Februar 2007 und ist gekennzeichnet durch hohe Anstiegsgeschwindigkeiten von bis zu 190 m pro Monat. Innerhalb dieser Zeit steigt das Wasser von ca. -580 m NN auf -250 m NN an. Dies ist vermutlich dadurch zu erklären, dass in diesem Teufenbereich der Anteil der Hohlraumvolumina gemessen

zum Reservoirvolumen sehr klein ist (KOE伯LÉ et al. 2013). Mit dem Übergang zur zweiten Phase kommt es zu einem Abfall der Anstiegsgeschwindigkeiten auf Werte von 10 m pro Monat. In diesem Teufenbereich fand der größte Abbau an Steinkohle statt, dementsprechend sind dort auch die größten flutbaren Hohlraumvolumina gelegen. Zum Ende der zweiten Phase kommt es zu einer erneuten Erhöhung der Anstiegsgeschwindigkeiten von 20 m bis maximal knapp 35 m pro Monat. Dies wird als Grubenwasseranstieg innerhalb der bergbaubedingten Zerrüttung des Gebirges über dem höchsten Abbauhorizont gedeutet. Kurz nach dem lokalen Anstiegsmaximum von 35 m pro Monat beginnt der Einstau in das Deckgebirge. Die Anstiegsgeschwindigkeiten fallen auf zunächst unter 10 m pro Monat, dann sukzessive auf Werte von um die 1 m pro Monat ab. Dies ist zum einen mit der Verringerung der Zuflüsse durch die abnehmende Druckdifferenz zu erklären. Zum anderen befindet sich der Grundwasserleiter in den Sandsteinen des Deckgebirges (Trias), das im grundwassergefüllten Bereich per se keinen flutbaren Hohlraumanteil aufweist. Seit November 2009 wird der Grubenwasserstand mittels erneuter Wasserhaltung konstant auf einem Niveau von 7,5 m unterhalb des Grundwasserstands gehalten.

Vergleich mit dem Grubenwassermanagement des Durham-Reviers (Großbritannien)

Im Lothringer Steinkohlenrevier wurde zum Schutz des Grundwasserleiters ein ähnliches Konzept wie im britischen Durham-Revier verfolgt (Kap. 3.2.2.). Die Wasserhaltungsmaßnahmen wurden auf dem Bergwerk La Houve im November

Geothermie: offene und geschlossene Systeme

Bei Geothermie-Systemen gibt es zwei grundsätzliche Arten, Wärme aus dem Untergrund zu gewinnen.

2009, auf dem Bergwerk Simon im November 2013 und auf dem Bergwerk Vouters im Juli 2015 wieder aktiviert und der Grubenwasserstand einige Meter unterhalb der Druckhöhe des Grundwassers gehalten (Abb. 54 und Abb. 55). Durch diese aufrecht erhaltene Potenzialdifferenz zwischen 5 m und 10 m (WAGNER 2010) sowie der Ausbildung einer Dichteschichtung kann es zu keiner Durchmischung der beiden Wässer kommen (KOEBERLÉ et al. 2013). Das Grundwasser in den Schichten der Trias mit dem höheren Druckniveau kann dabei ins Grubenwasser abfließen, aber das Grubenwasser mit geringerem Druckniveau nicht in das Grundwasser hinein. Dadurch, dass die Druckdifferenz zwischen beiden Wässern gering ist, verringert sich auch die Menge an Wasser, die aus dem Grundwasserleiter in das Grubenwasser abfließen kann (ähnlich wie im Durham-Revier). Als Folge davon steigt mit dem Grubenwasser auch der Grundwasserstand sukzessive an. Wird das Grubenwasser dabei jedoch auf einem konstanten Niveau gehalten, wird auch gleichzeitig der Grundwasserstand kontrolliert und Überschwemmungen in von Bergsenkungen betroffenen Abaugebieten verhindert. In der Regel soll ein Flurabstand von 3 m eingehalten werden. Im westlichen Abbaubereich (Bergwerk La Houve) ist es dennoch in einigen Ortschaften in Frankreich zu Vernässungen und der Bildung freier Wasserflächen sowie zu Wasserzutritten in Kellern gekommen (ERNST & MAILLASSON 2018). Es muss jedoch auch berücksichtigt werden, dass sich in diesem Bereich vor Aufnahme der bergbaulichen Wasserhaltungsmaßnahmen ein Sumpfgebiet befand, das nun in den natürlichen Zustand zurückgesetzt

wurde. Auch in einigen Bereichen auf deutscher Seite kann mit Vernässungen gerechnet werden (WAGNER 2010).

Im östlichen Revier sind keine unkontrollierten Gasaustritte sowie Schäden an Infrastruktur oder Umwelt einschließlich des Grundwassers bekannt (SCHLEUNING 2018). Es wurden großflächige Hebungsbeträge von bis zu 20 cm registriert, die jedoch gleichmäßig und somit ohne Beeinträchtigungen der Infrastruktur abgelaufen sind.

Fazit

Wie im East of Wear-Abaugebiet des Durham-Reviers stieg das Grubenwasser bis in den wassererfüllten Bereich des Grundwasserleiters an. Durch die Aufrechterhaltung einer Druckdifferenz von 5 m bis 10 m konnte aber auch in Lothringen das Grundwasser vor einer Durchmischung mit dem Grubenwasser geschützt werden. Da es bei einem hydraulischen Kontakt zwischen Grund- und Grubenwasser jedoch auch zu einem verringerten Abfluss des Grundwassers ins Grubenwasser kommt, muss berücksichtigt werden, dass es zu einem größeren Dargebot an Grundwasser kommt und sich der Grundwasserstand folglich erhöhen kann. Entsprechende Poldermaßnahmen zum Schutz von Umwelt, Natur und Infrastruktur müssen entsprechend geprüft und geplant werden. Außerdem müssen zusätzlich Reservepumpen vorgehalten werden, damit es bei einem Ausfall einer Pumpe nicht zu einer Infiltration des Grubenwassers in das Grundwasser kommt.

Beim offenen Kreislaufsystem (engl. open loop) wird das Wasser an die Tagesoberfläche gepumpt und dort durch einen Wärmetauscher geführt, der die Wärme an ein anderes Medium überträgt. Das nun kältere (Gruben-)Wasser kann dann entweder oberflächlich abgeleitet oder in einen Schluckbrunnen reinjiziert werden. Bei hohen Mineralisationsfrachten (vor allem bei hohen Eisenkonzentrationen) im Grubenwasser können in dem Wärmetauscher Verockerungen auftreten (Abb. 56), was zu hohen Wartungskosten führt.

Bei einem geschlossenen Kreislaufsystem (engl. closed loop) werden Leitungen in einem Bohrloch oder Schacht verlegt, in denen der Wärmetausch stattfinden kann. Der Wärmetauscher befindet sich also innerhalb der warmen Wassersäule. Vorteil dieses Systems ist, dass in dem System keine Verockerungen auftreten können, da kein Grubenwasser gepumpt werden muss. Für detailliertere Informationen und eine Gegenüberstellung beider Systeme wird auf BANKS et al. (2019) verwiesen.

Abb. 56: Nachteil des Systems mit offenem Kreislauf: Verockerungen an den Wärmetauschern (ockerfarbende Bereiche auf der Metallplatte; Foto: Bastian Reker).



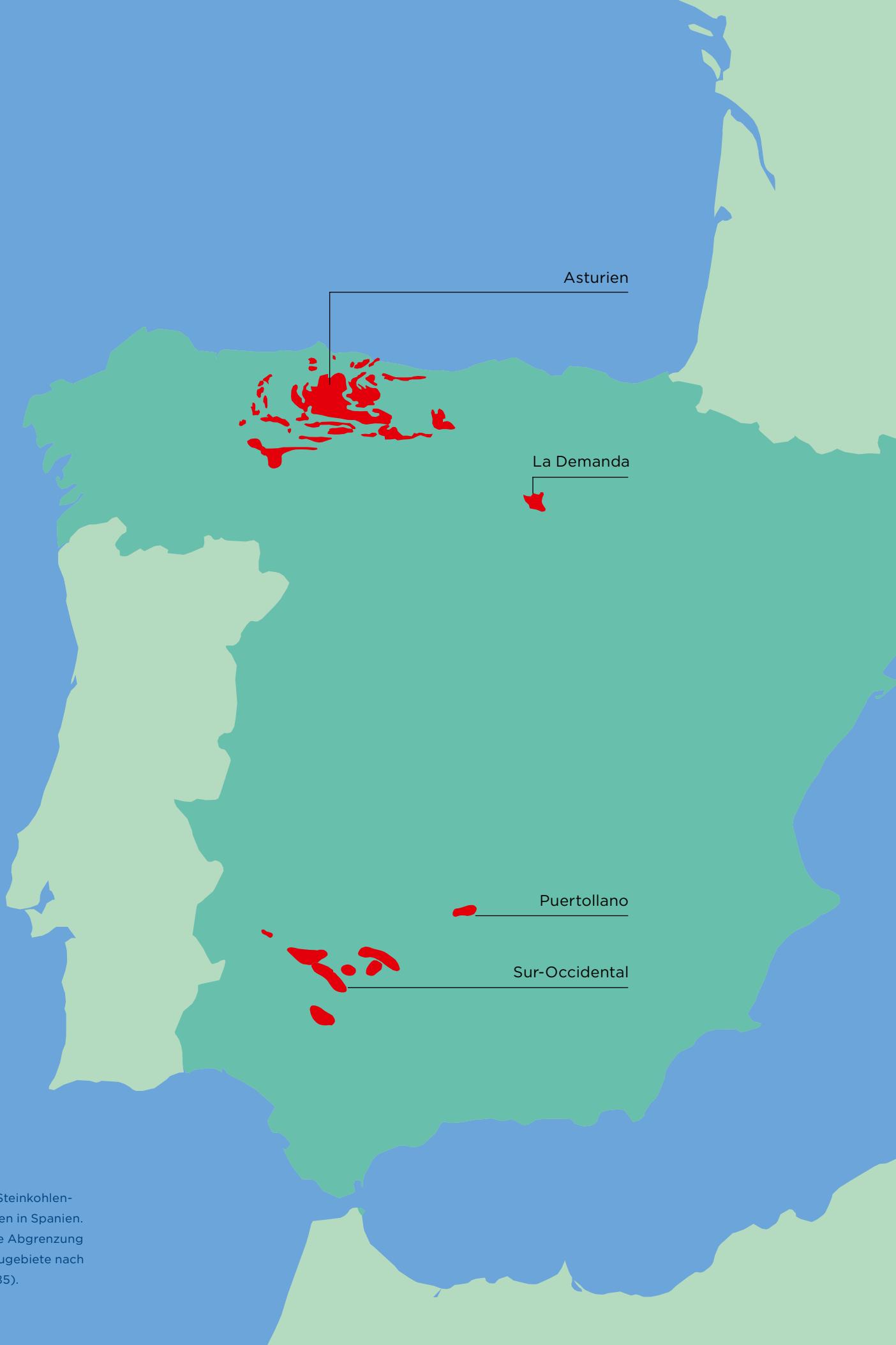


Abb. 57: Steinkohlen-
vorkommen in Spanien.
Räumliche Abgrenzung
der Abbaugebiete nach
IGME (1985).

3.4.

Spanien: Asturien

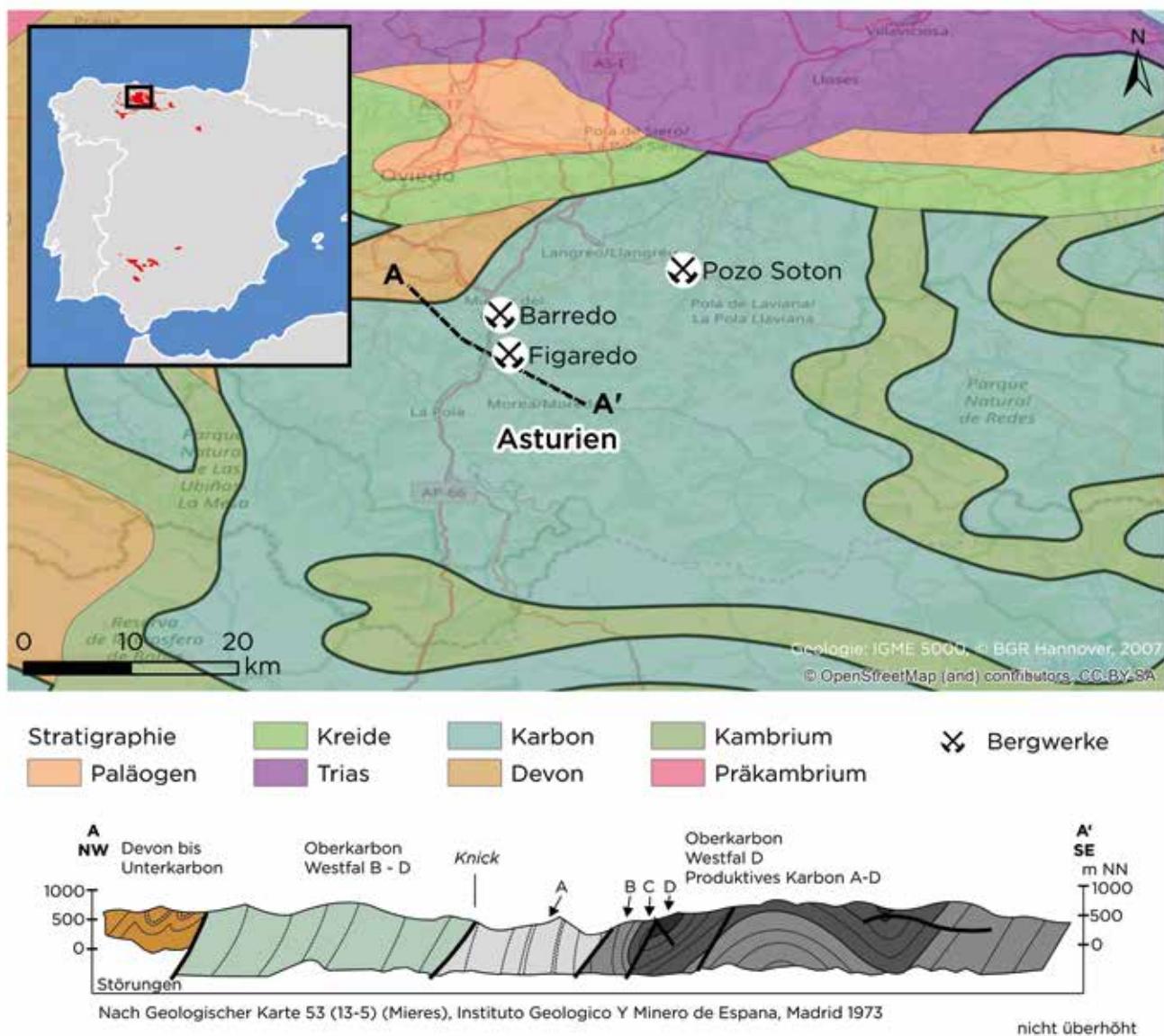


Abb. 58: Geographische und geologische Übersicht über ausgewählte Bergwerke im Steinkohlenrevier Asturien (Spanien). Geologie nach IGME (1973).

Spanien weist mehrere Steinkohlenreviere auf (Abb. 57). Im Südwesten liegt das Sur-Occidental-Revier mit dem östlichen Abbaugebiet Puertollano; im Nordosten befindet sich das Sierra de la Demanda-Revier. Asturien ist das bedeutendste Steinkohlenrevier Spaniens. Zwischen 50 % und 70 % der gesamten spanischen Steinkohle wurden dort seit Mitte des 19. Jahrhunderts gefördert (ORDÓÑEZ et al. 2012). In Asturien im Norden werden weitere Reviere zum Central Coal Basin zusammengefasst.

Bis 1967 wurde Steinkohle vor allem von kleineren Bergwerken gewonnen. Insgesamt gab es rund 131 Betriebe. Die 15 bedeutendsten Bergwerke wurden im Jahr 1967 zu der Organisation HUNOSA zusammengefasst, die rund 50 % der gesamten spanischen Steinkohlenproduktion erbrachte (BUSCH 1974). Im internationalen Vergleich, besonders mit Großbritannien und Deutschland, war die maximale Förderrate Spaniens in den 1980er Jahren mit 16 Mio. t. vergleichsweise gering.

Auch in Spanien endete im Jahr 2018 der subventionierte Steinkohlenbergbau. Im Gegensatz zu Deutschland gibt es in Spanien jedoch noch wenige kleinere, privat geführte Betriebe, die keine Subventionen erhalten und auch nach 2018 noch in Betrieb sind.

Geologie und Hydrogeologie

In der asturischen Lagerstätte streichen die Schichten des Karbons direkt an der Tagesoberfläche aus. Die Schichten sind aufgrund mehrerer tektonischer Vorgänge stark ver-



Abb. 59: Fördergerüst des Bergwerks Barredo in der Nähe des neu gebauten Forschungszentrums der HUNOSA und Universität Oviedo (Foto: Bastian Reker)

formt und stehen teilweise nahezu senkrecht, was den mechanisierten Abbau stark erschwerte. Insgesamt beginnt die Sedimentsequenz mit Kalksteinen aus dem Namur (Karbon). Darüber lagert eine Serie von Kalk-, Sand- und Tonsteinen des *unproduktiven Karbons*, die bis zu 3.500 m mächtig ist (CIENTFUEGOS & LOREDO 2010). Im Hangenden lagern die flözführenden Sedimente, die bis zu 3.000 m mächtig sind.

Ein besonderes Merkmal der Hydrogeologie Asturiens ist das weitgehende Fehlen bedeutender Grundwasserleiter. Die Gesteine des Karbons bestehen vor allem aus Ton- und Siltsteinen, die nur ein sehr geringes Porenvolumen und geringe Durchlässigkeit für Wasser besitzen. Zwischengeschaltete Lagen mit höheren Durchlässigkeiten und Porenvolumen (insbesondere Sandsteine) können einzelne, voneinander isolierte Grundwasserleiter ausbilden. Durch den Bergbau kann das Gebirge jedoch soweit beeinflusst sein, dass die abdichtende Eigenschaft der Tonsteinlagen gestört sein kann und so ein vertikaler Wasserfluss ermöglicht wird.

Bergbau

Die beiden Bergwerke Barredo und Figaredo liegen im Steinkohlerevier Asturien, nur wenige Kilometer süd-

lich der Stadt Oviedo (Abb. 58). Der Abbau im Bergwerk Barredo fand bis 1993 statt (Abb. 59), im Bergwerk Figaredo bis 2007. Beide Bergwerke sind durch mehrere Strecken hydraulisch miteinander verbunden. Eine ausführlichere Darstellung des Bergbaus im Asturien-Revier wurde in REKER et al. (2019b) veröffentlicht.

Modellierung des Grubenwasseranstiegs

Die Modellierung des Grubenwasseranstiegs wurde von ORDÓÑEZ et al. (2012) beschrieben. Zunächst wurde die Zuflussmenge ermittelt, die nicht nur durch die geförderten Wassermengen der Bergwerke während der Wasserhaltungsmaßnahmen, sondern auch unter Berücksichtigung des hydrogeologischen Einzugsgebiets, der monatlichen Niederschläge und des infiltrierenden Wassers durch den Fluss Turon ermittelt und abgeglichen wurde. Hervorzuheben ist an dieser Stelle, dass die den Bergwerken zufließenden Wässer allesamt vertikal infiltrieren, es also keine seitlich zufließenden Wässer gibt, wie es in den meisten anderen Revieren der Fall ist. Dementsprechend kann die Zuflussrate unabhängig vom Grubenwasserstand als konstant angesehen werden, da keine seitlich zufließenden Wässer mit steigendem Wasserstand hydraulisch überstaut und somit „abgedrückt“

werden. In einem nächsten Schritt wurden die Resthohlraumvolumina teufengerecht anhand von *Risswerken*, den geförderten Tonnagen und den jeweiligen Abbaumethoden ermittelt. Aus der Kombination von Zuflussrate und teufenabhängigem Resthohlraumvolumen konnte dann eine computergestützte Modellierung mit dem Programm GRAM erfolgen, die dem tatsächlichen Grubenwasseranstiegsverlauf abbilden konnte (Abb. 60).

Folgenutzungen

In weiten Teilen Asturiens sind keine bedeutenden Grundwasserleiter für die öffentliche Trinkwasserversorgung vorhanden. Große Teile der öffentlichen Wasserversorgung Asturiens werden durch den Stausee Rioseco übernommen. Daher ist es denkbar, die vorhandenen Abbauhöhlräume als künstlichen Grundwasserleiter zu nutzen. Vor allem im Hinblick auf den Klimawandel wäre es für Gebiete mit erschwerter Trinkwasserversorgung weltweit eine große Chance, ihren Trinkwasserhaushalt auf diese Art zu sichern und zu regulieren. Aus diesem Grund schlagen ORDÓÑEZ et al. (2012) sowie JARDÓN et al. (2013) die Nutzung der beiden Bergwerke als künstliches Trinkwasserreservoir vor. Mit einem durchschnittlichen Zustrom von rund 4 Mio. m³/a in die Bergwerke Barredo und Figaredo könnten bei einer Regulierung der täglichen Entnahmemenge rechnerisch weitere 60.000 Menschen jedes Jahr mit Wasser versorgt werden (bei einem durchschnittlichen Verbrauch von ca. 185 l pro Tag und Person). Eine Regulierung ist notwendig, damit die jahreszeitlich schwankende Grundwasserneubildung und die Wasserentnahme über das Jahr gesehen im Gleichgewicht stehen.

Abgesehen von der Sicherung der öffentlichen Wasserversorgung könnte ein weiterer Mehrwert darin liegen, Fließgewässern in Trockenperioden genügend Wasser zuzuführen, damit eine ökologisch erforderliche Mindestabflussrate bewahrt

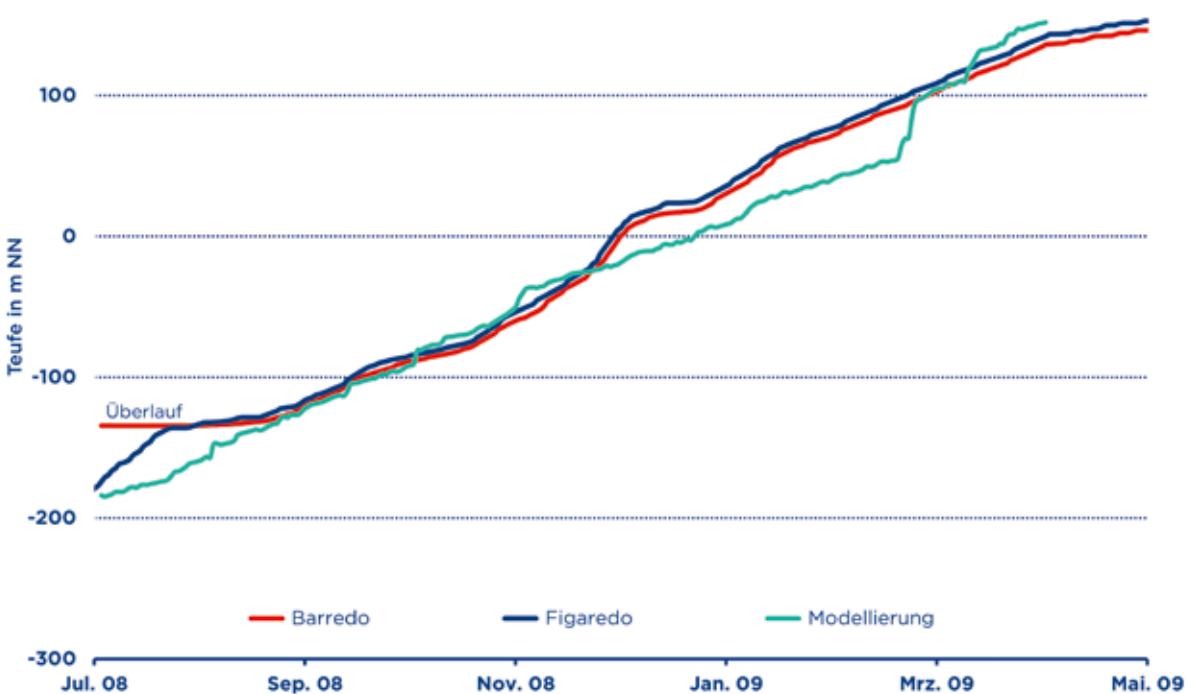


Abb. 60: Gemessene Grubenwasseranstiegsverläufe der Bergwerke Barredo (rote Kurve) und Figaredo (blaue Kurve) sowie der modellierte Verlauf (schwarze Kurve). Die Teufenlage der abgebauten Hauptsohlen sind als rote Linien (Bergwerk Barredo) und blaue Linien (Bergwerk Figaredo) gekennzeichnet.

bleibt. Gerade vor dem Hintergrund der langen Dürreperiode im Sommer 2018 böte dies für kleinere Vorfluter eine interessante Option.

Für das Bergwerk Barredo wurden insbesondere Anfang der 2010er Jahre umfangreiche Studien durchgeführt, um das geothermische Potenzial dieser Lagerstätte abzuschätzen (LOREDO et al. 2011; ORDÓÑEZ et al. 2012; JARDÓN et al. 2013). Mittlerweile sind erste Pilotanlagen im dreistelligen kW- bis unteren MW-Bereich sowohl in dem Gebäude des Mieres Campus (gehört zur Universität Oviedo und beinhaltet ein Forschungszentrum der HUNOSA sowie ein Studentenwohnheim) sowie dem anliegenden Krankenhaus „Álvarez Buylla“ installiert. Gehoben wird das Wasser für beide Anlagen direkt in dem Barredo-Schacht unter dem noch vorhandenen Fördergerüst. Für die Klimatisierung des Mieres Campus hat man dabei ein System mit offenem Kreislauf (engl. open loop; siehe Infobox zu „Geothermie: offene und geschlossene Systeme“) mit einer Leistung von 2 x 362 kW eingesetzt, während für das Krankenhaus

eine Konfiguration mit geschlossenem Kreislauf („closed loop“) und einer Leistung von 3,5 MW gewählt wurde und damit eines der größten Geothermie-Klimatisierungssysteme in Europa darstellt (GUTÍERREZ COLINAS et al. 2018).

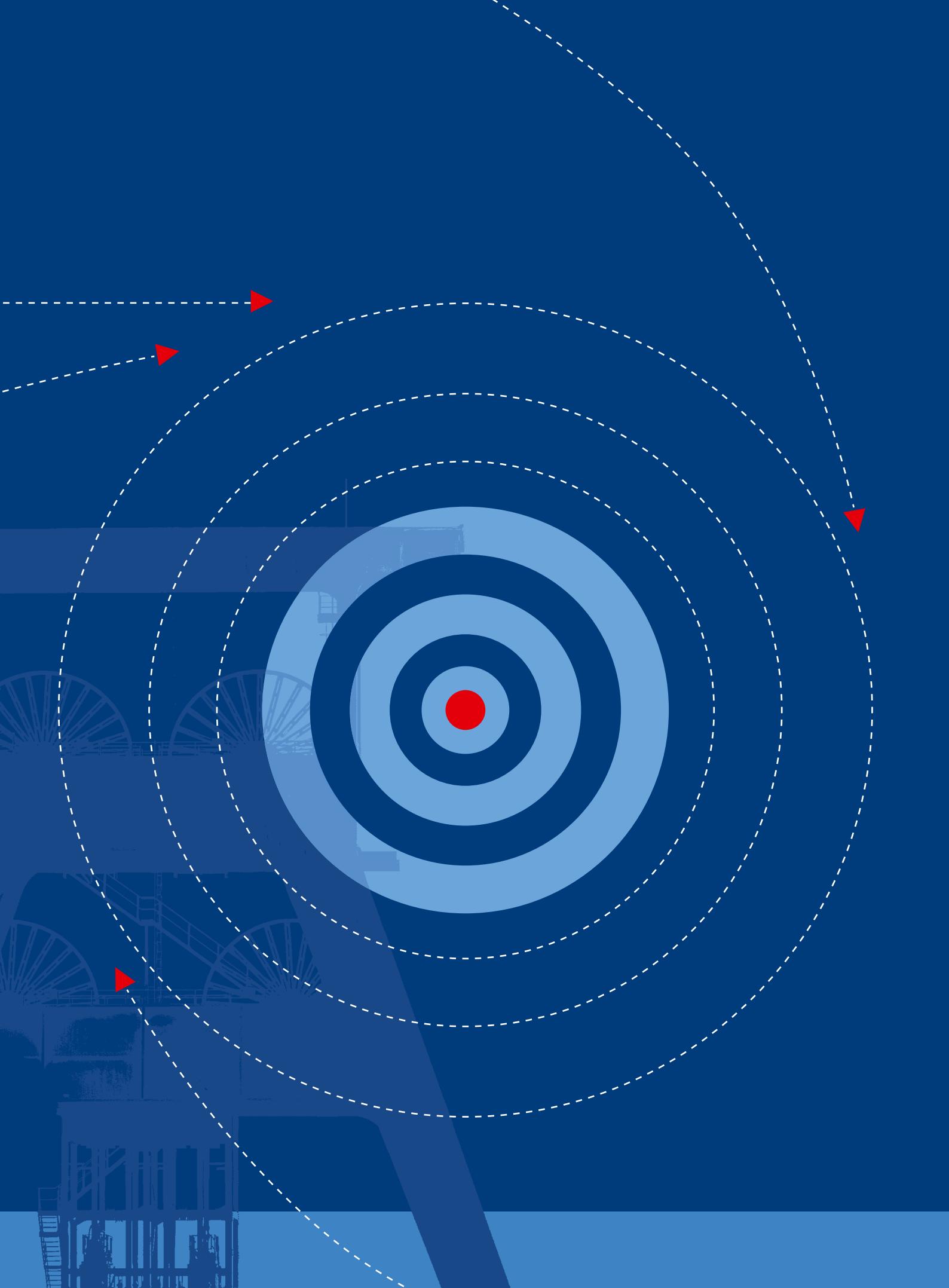
Fazit

Die Forschungsergebnisse aus Spanien zeigen, dass für eine adäquate Modellierung die Bestimmung der Zuflussraten und Hohlraumvolumina elementarer Bestandteil ist. Besonders die auf hydrogeologischen Untersuchungen basierten Erkenntnisse stellen den Grundstein einer genauen Erfassung der Bergwerkszuflüsse dar. Die Auswertung sämtlicher, auch historischer Risswerke, für die Berechnung der Resthohlraumvolumina, die für die Wasseraufnahme im Zuge eines Grubenwasseranstiegs zur Verfügung stehen, ist ein ebenso wichtiger Faktor. Beide Faktoren stellen das Grundgerüst einer Modellierung dar, die den tatsächlichen Grubenwasseranstiegsverlauf plausibel abbilden kann.

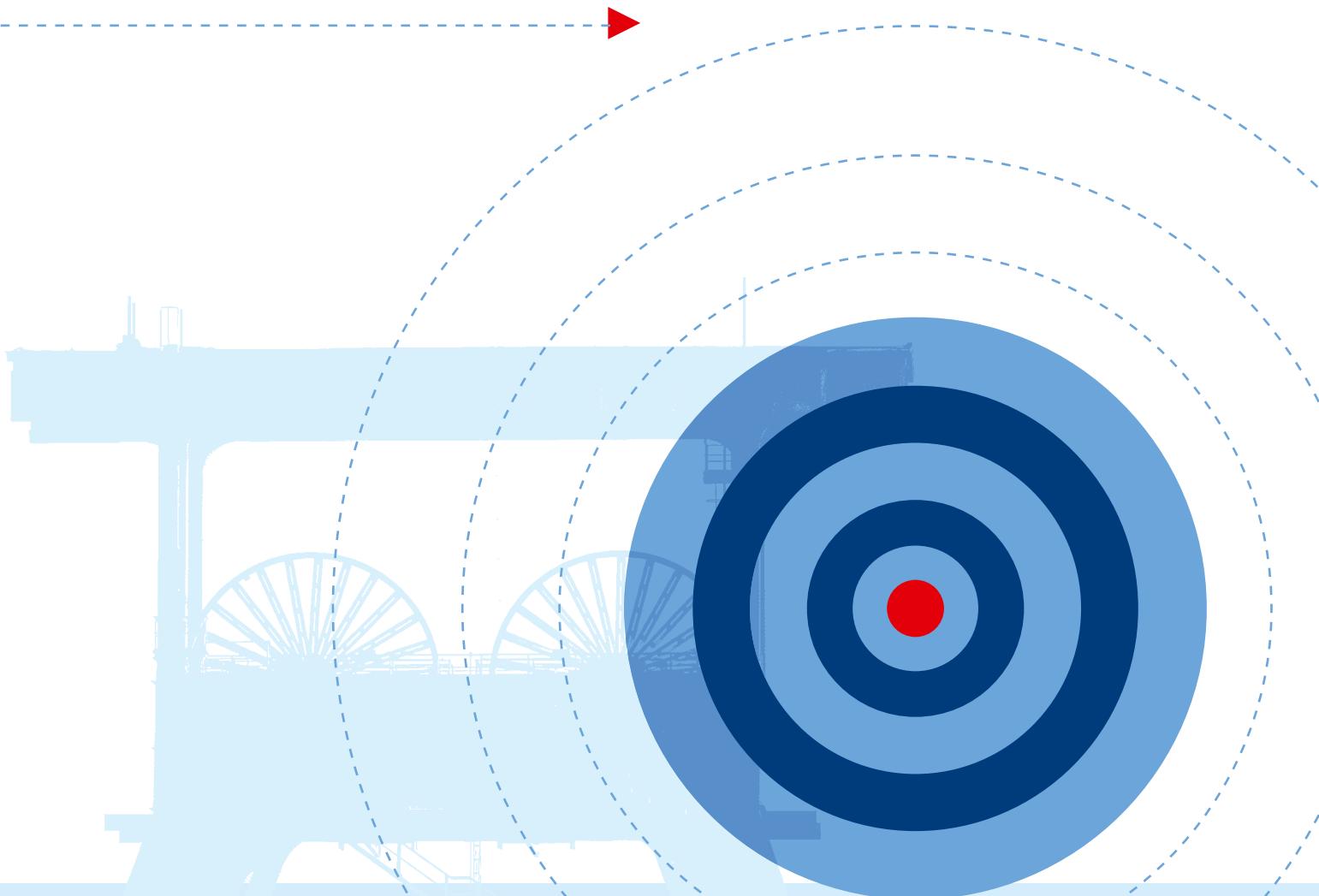
Für die Phase des Nachbergbaus gibt es mit Hinblick auf das Grubenwasser mehrere Nutzungskonzepte. Zum einen gibt es die Überlegung, die Bergwerke als künstliches Trinkwasserreservoir zu nutzen, was besonders für trockene Regionen mit problematischer Trinkwasserversorgung eine denkbare Option wäre. Zum anderen können in Trockenperioden kleinere Vorfluter mit einem Mindestmaß an Wasser gespeist werden, damit das ökologische Gleichgewicht aufrecht gehalten werden kann. Vor allem mit Hinblick auf die europäische Wasserrahmenrichtlinie böte dies einen interessanten Mehrwert. Außerdem wird auch die nachhaltige Nutzung der Wärme des Grubenwassers mit Hilfe von großen Geothermieanlagen, die derzeit zu den größten Europas zählen, wissenschaftlich begleitet und untersucht. Es sind also viele verschiedene Denkansätze für die nachbergbauliche Nutzung des Grubenwassers vorhanden, die allesamt unterstreichen, dass ein Grubenwasseranstieg nicht nur als Risiko, sondern auch als Chance wahrgenommen und genutzt werden sollte.

4. Erfahrungen und Erkenntnisse





Mit dem Projekt „Evaluierung von Grubenwasseranstiegsprozessen im Ruhrgebiet, Saarland, in Ibbenbüren sowie weiteren deutschen Steinkohlenrevieren und dem angrenzenden europäischen Ausland“ wurde eine systematische Auswertung von Grubenwasseranstiegen durchgeführt. Es wurden die Faktoren und Prozesse identifiziert, die den Grubenwasseranstiegsverlauf und die Beschaffenheit des Grubenwassers beeinflussen. Ferner wurden Strategien und Maßnahmen zu bereits praktizierten Wasserhaltungen in europäischen Steinkohlenrevieren evaluiert. Dadurch werden die wissenschaftlichen Grundlagen für ein vertieftes Prozessverständnis über den Grubenwasseranstieg in untertägigen Steinkohlenbergwerken gegeben. Die grundlegenden Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:



Grubenwasseranstieg

- Der Grubenwasseranstiegsverlauf wird durch eine Vielzahl an natürlichen und anthropogenen Faktoren beeinflusst. Diese sind im Wesentlichen:

Natürliche Faktoren

- Gesteins- und Gebirgsdurchlässigkeit,
- Volumina der Poren und Trennflächen,
- Wasserzuflussraten,
- Höhe der Grundwasserneubildungsrate,
- Mächtigkeit und Lithologie des Deckgebirges,
- nachberbauliches Wasserstandsniveau (anthropogene Beeinflussung möglich),
- Grundwasserstände im Einflussbereich des Grubenwasseranstiegs.

Anthropogene Faktoren

- bergbaulich geschaffene Hohlräumvolumina,
- Durchlässigkeit des Grubengebäudes,
- gezielte Steuerungsmaßnahmen,
- wasserhaltungsbedingter Absenkungstrichter.
- Für einen kontrollierten Grubenwasseranstieg sind daher diese Faktoren möglichst genau zu erfassen. Die Erfassung hat im Idealfall bereits während der Exploration, in jedem Fall während und nach der Abbauphase zu erfolgen. Nach Stilllegung ist die Erfassung oftmals nur schwierig möglich.
- Jeder Grubenwasseranstiegsverlauf ist aufgrund der stand-

ortspezifischen Gegebenheiten individuell. Jedoch sind die grundlegenden Prozessabläufe und Wirkungszusammenhänge sehr wohl vergleichbar. Dementsprechend lassen sich Grubenwasseranstiegsverläufe grundsätzlich in eine initiale, intermediäre und finale Phase einteilen.

- Die Grubenwasseranstiegsgeschwindigkeiten schwanken zwischen wenigen Metern (z. B. Revier Lugau-Oelsnitz [etwa 10 m/a, Deutschland]) und mehreren hundert Metern im Jahr (z. B. Bergwerk Ibbenbüren [Westfeld; etwa 400 m/a; Deutschland], Lothringer Revier [etwa 200 m/a, Frankreich]).
- In einer Vielzahl deutscher Steinkohlenbergwerke (z. B. südöstliches Ruhr-Revier, Erkelenzer Revier, südbayrisches Pechkohlen-Revier) ist das Grubenwasser bereits bis zum natürlichen Einstauniveau angestiegen.
- Die evaluierten Grubenwasseranstiege führten nur in Ausnahmefällen zu nachteiligen Auswirkungen auf die Umwelt. Konkrete Beispiele sind das Durham-Revier (Großbritannien), in dem es zu einer Vermischung von Gruben- und Grundwasser kam und somit zu einer Beeinträchtigung der Grundwasserqualität, sowie das Erkelenzer Revier (Deutschland), in dem der Grubenwasseranstieg schadenrelevante Bodenhebungsunterschiede an großtektonischen Störungsbahnen bewirkte. Weitere Auswirkungen in dieser Größenordnung sind in keinem anderen Revier belegt.

- Prognosen zu der voraussichtlichen Dauer vergangener Grubenwasseranstiege gingen vielfach von zu kurzen Zeiträumen aus. Der tatsächliche Anstiegsverlauf dauerte zumeist länger. Oftmals beruhen diese Abweichungen auf vereinfachten Annahmen oder auf unzureichenden Informationen über bestimmte Parameter, auf denen die Prognosen basieren. Für die Modellierung sollten insbesondere die beiden Faktoren Hohlraumvolumina und Wasserzuflussrate umfassend und teufenbezogen erfasst werden.
- Unsicherheiten bei den Eingangsdaten einer Prognose können im Sinne einer „best case“-, „base case“- und „worst case“-Variante berücksichtigt werden. Die Prognose kann durch ein den Grubenwasseranstieg begleitendes Monitoringprogramm fortwährend aktualisiert und angepasst werden. Handlungs- und Planungsmaßnahmen sollten immer auf die kürzeste Zeitdauer der Prognose ausgelegt sein.
- Im Zuge des Grubenwasseranstiegs kommt es in vielen Fällen zunächst zu einem initialen Anstieg der Mineralisation des Grubenwassers. Dieser Sachverhalt ist als „First Flush“ bekannt und dauert nach empirischer Datengrundlage häufig in etwa viermal so lange wie der Anstiegsprozess. Bei einem schnellen Anstieg können die initialen Stoffmengenkonzentrationen deutlich höher sein als bei einem langsamen Anstieg, jedoch sinkt die Zeitdauer des First Flush. Die über die Zeit transportierte absolute Stoffmenge bleibt indes ungefähr gleich.
- Bei einem Überstau der alten Abbaubereiche wird die weitere (Di-)Sulfidverwitterung (Pyrit, Markasit, Pyrrhotin, etc.) und die Acidität aus den Verwitterungsprodukten reduziert bis hin zu einer weitgehenden Beendigung.
- Bei einem schnell abklingenden First Flush kann bei Erfordernis einer Wasseraufbereitung in kürzerer Zeit von aufwändigen Systemen (aktive Systeme) zu technisch weniger aufwändigen und damit zumeist sowohl ökonomisch als auch ökologisch vorteilhafteren Systemen (passive Systeme) gewechselt werden.
- In vielen Steinkohlenrevieren Großbritanniens und Frankreichs (Lothringer Revier) sowie in Deutschland (Ibbenbüren) wird derzeit eine Grubenwasseraufbereitung zur Reduzierung von potenziellen Kontaminationen, vor allem der Eisenkonzentrationen, eingesetzt. Dabei handelt es sich überwiegend um passive Grubenwasserreinigungsanlagen, die zumeist aus einer Belüftung mit Sedimentationsbecken und einem angelegten aeroben und anaeroben Feuchtgebiet bestehen (engl. aerobic or anaerobic constructed wetland). Diese Feuchtgebiete bieten neben einem ökonomischen auch einen ökologischen Vorteil, da der Natur wertvolle Lebensräume für die Entwicklung einer hohen Biodiversität zur Verfügung gestellt werden. Von der Bevölkerung werden diese Anlagen oftmals als Naherholungsgebiete genutzt und wahrgenommen, benötigen jedoch einen verhältnismäßig großen Platzbedarf.
- Im oberschlesischen Revier (Polen) wird im Rahmen eines Pilotprojekts Chlorid aus dem Grubenwasser entfernt. Dazu wird das Grubenwasser über mehrere Stufen mit Vorbehandlung, anschließender Umkehrosmose und abschließender Konzentrierung der Sole aufbereitet.
- In Deutschland laufen derzeit Machbarkeitsstudien zur Aufbereitung von sulfathaltigen Grubenwässern im Ibbenbürener Revier.
- Gegenwärtig werden Grubenwässer im Ruhr-Revier (Bergwerke Robert Müser und Haus Aden [Deutschland]) sowie im Saar-Revier (Camphausen [Deutschland]) aufbereitet. Dazu wird das Grubenwasser mit Wasserstoffperoxid versetzt, um Schwefelwasserstoff chemisch zu reduzieren und die *organoleptischen* Auffälligkeiten (H_2S -Geruch) weitgehend zu eliminieren.

- Während des Abbaubetriebs wurde bariumhaltigem Grubenwasser auf dem Bergwerk Auguste Victoria (Ruhr-Revier [Deutschland]) untertege Natriumsulfat zugegeben, um Barium als Baryt (Bariumsulfat, BaSO_4) auszufällen.
- Der Überstau von tieferen Grubenbereichen führt zu einer deutlichen Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeiten. Dies führt dazu, dass weniger Schwebstoffe transportiert werden können, die zu einer Mobilisierung von potenziellen Schadstoffen beitragen könnten.
- In vielen Bergwerken, in denen die Grubenwasseranstiege länger zurückliegen, auch weltweit, sind Dichteschichtungen im Grubenwasserkörper nachzuweisen. Die durch Konvektionsströme verursachte Dichteschichtung verhindert eine Vermischung, trennt somit das oftmals höher mineralisierte Tiefenwasser von dem oberflächennahen, weniger mineralisierten Grundwasser und stellt somit eine natürliche hydrogeochemische Barriere dar.
- Eine Potenzialdifferenz zwischen Gruben- und Grundwasserstand kann eine Durchmischung beider Wasserkörper verhindern. In Großbritannien (Durham-Revier) und in Frankreich (Lothringer Revier) wird seit Jahren die Druckhöhe des Grubenwassers nur wenige Meter unterhalb der Druckhöhe des Grundwassers gehalten, ohne dass es zu einer Beeinträchtigung der Grundwasserqualität gekommen ist.

Bodenbewegungen

- Der Grubenwasseranstieg bewirkt Hebungen der Tagesoberfläche.
- Gründe dafür sind die Auftriebskraft des ansteigenden Wassers sowie die Wasseraufnahme und der damit einhergehende Quellprozess bindiger Bodenbestandteile.
- Die Bodenhebungen setzen erst mit einer zeitlichen Verzögerung nach Außerbetriebnahme der Wasserhaltung ein. Die zeitliche Verzögerung ist revierspezifisch und hängt im Wesentlichen von den geologischen Verhältnissen der Lagerstätte sowie dem absolut erreichten Grubenwasseranstiegsbetrag ab.
- Die Bodenhebungen liegen im Bereich von Zentimetern bis wenigen Dezimetern und sind daher wesentlich geringer als die abbaubedingten Bodensenkungen. Nach gegenwärtigem Kenntnisstand können die flutungsbedingten Bodenhebungen je nach Durchbauungsgrad bis zu 0,5 m betragen.
- Die Bodenhebungen erfolgen in den meisten Fällen flächenhaft und gleichmäßig und rufen keine wesentlichen Schieflagen, Zerrungen und Pressungen hervor. Gebäudeschäden sind dann nicht zu erwarten.
- Gebäudeschäden treten nur auf, wenn sie an geologische, hydraulisch abdichtende und an der Tagesoberfläche ausstreichende Großstrukturen sowie an abbaubedingte Erdstufen gebunden sind, an

denen beiderseits unterschiedliche Grubenwasserpotenziale herrschen und es folglich zu Bodenhebungsdifferenzen kommt. Belege und Hinweise auf schadensrelevante Bodenhebungsdifferenzen sind bislang im Erkelenzer Revier, Döhlen-Becken sowie im Aachener (alle Deutschland) und Südlimburger Steinkohlenrevier (Niederlande) dokumentiert.

- Aus den Verläufen des Grubenwasseranstiegs und den Bodenhebungen ergeben sich ursächliche Zusammenhänge. Dabei korrespondieren die Grubenwasseranstiegsgeschwindigkeiten und die Bodenhebungsbeträge.
- Die flutungsbedingten Bodenhebungen können sich mit dem Erreichen des Deckgebirges verstärken (z. B. Südlimburger Revier [Niederlande]).
- Der Einwirkungsbereich des Grubenwasseranstiegs kann über den abbaubedingten Einwirkungsbereich hinausgehen.
- Ein Indiz für Gebäudebeschäden durch flutungsbedingte Bodenhebungen ist in der Regel ein sich kontinuierlich entwickelnder linienhafter Schadensverlauf (Erkelenzer Revier [Deutschland]).

Ausgasung

- Das ansteigende Grubenwasser führt zu einer Mobilisierung freier Gase im Grubengebäude und in Gesteinshohlräumen. Dies bedingt grundsätzlich eine Gasmigration.

- Das dadurch mobilisierte Gas entspricht in seiner Quantität dem Volumen des Grubenwasserzuflusses.
- Der Grubenwasserzufluss ist in der initialen Anstiegsphase im Verhältnis zum gesamten offenen Grubengebäude vergleichsweise gering.
- Der Anteil des durch den Grubenwasseranstieg verdrängten Gases ist aufgrund des offenen Volumens des Grubengebäudes in der initialen Anstiegsphase gegenüber dem Anteil des barometrischen Ausgasungspotenzials gering.
- Das barometrische Ausgasungspotenzial des Grubengebäudes wird im Zuge des Grubenwasseranstiegs sukzessive reduziert.
- Nach Überstauung des Grubengebäudes sowie des Steinkohlengebirges ist zu erwarten, dass die Gasfreisetzungsraten ein Minimum erreicht und der grubenwasserinduzierte Ausgasungsprozess als abgeschlossen angesehen werden kann.
- Wie Versuche in Lothringen (Frankreich) gezeigt haben, werden auch nach Ende des Grubenwasseranstiegs langfristig geringe Mengen an Methan im Grubenwasser gelöst und freigesetzt. Dabei handelt es sich aller Voraussicht nach jedoch auch um bakterielle Methanogenese.

- In keinem der evaluierten Steinkohlenreviere sind kritische Ausgasungen infolge des Grubenwasseranstiegs dokumentiert.

Konzeption

- Die Verwahrung eines Bergwerks, und dabei insbesondere der Grubenwasseranstieg, bedarf einer sorgfältigen Vorausplanung. Im Zuge der Konzeptionsplanung sollten sämtliche Informationsquellen (historische Akten, Gutachten, Risswerke, Zeitzeugen) ausgewertet werden.
- Sofern es möglich ist, sollte das noch zugängliche Grubengebäude vor Beginn des Grubenwasseranstiegs zur Erfassung möglicher hydraulischer Wasserwegsamkeiten intensiv in Augenschein genommen werden.
- Alternativkonzepte, die bei Abweichungen von der Prognose zu ergreifen sind, sollten stets vorgehalten werden.
- Im Verlauf des Grubenwasseranstiegs sollten ursprünglich erarbeitete Konzepte und Planungen fortlaufend optimiert und an den jeweils aktuellen Stand von Wissen und Technik angepasst werden.

Monitoring

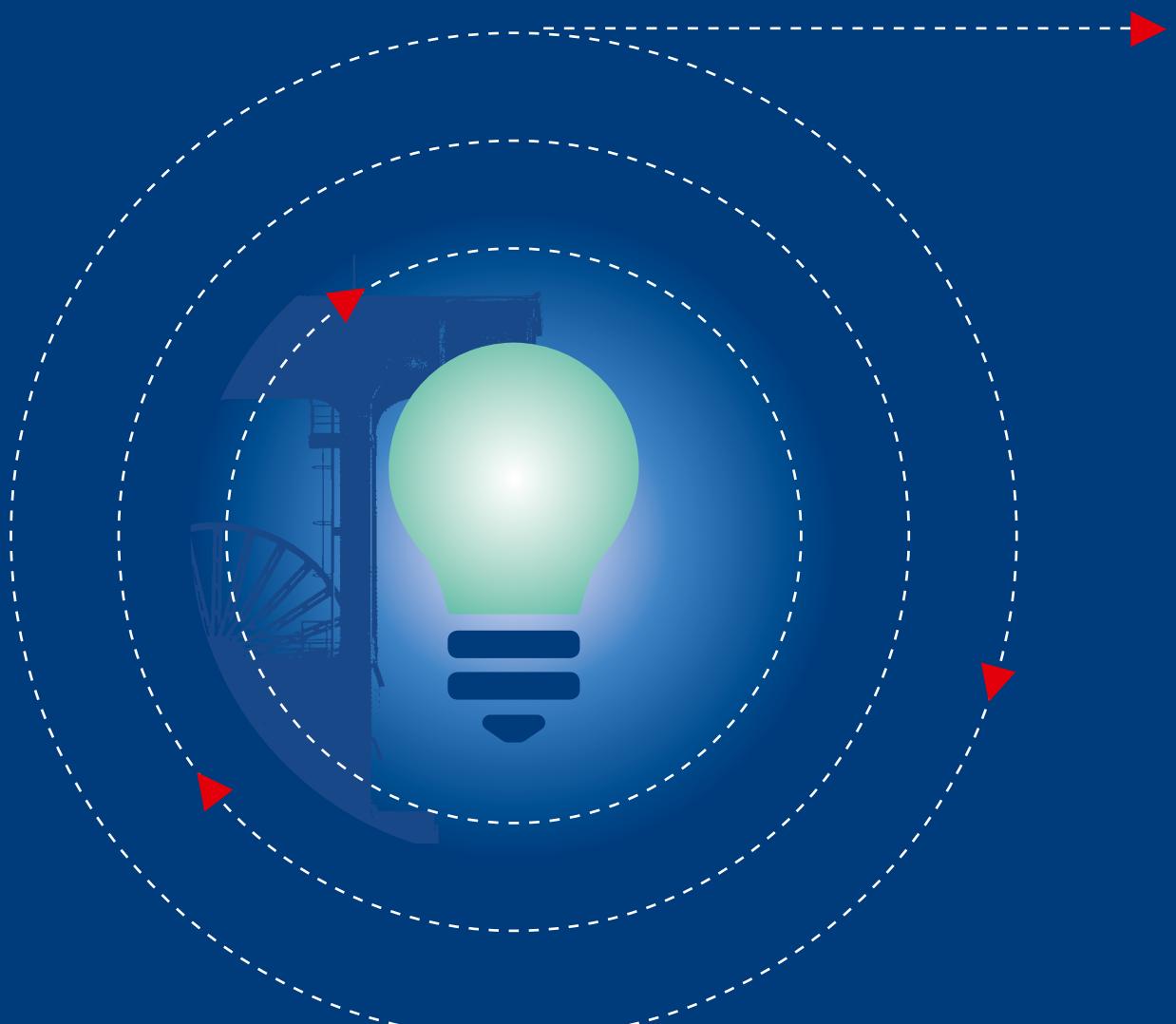
- Monitoring ist das systematische Programm zur raum- und zeitbezogenen Beobachtung, Kontrolle und Bewertung systembestimmender Prozesse. Die Aufgabe des Monitorings ist die Kontrolle des tatsächlichen Verlaufs von Prozessen und Vorgängen und der Abgleich mit den Prognosen.

- Das Monitoring gewährleistet somit ein verlässliches Frühwarnsystem sowie die Möglichkeit zum steuern den Eingriff in Prozesse.
- Ein Grubenwasseranstieg ist durch ein Monitoringprogramm zu begleiten, welches jederzeit eine zweifelsfreie Aussage über den Grubenwasserstand und die Beschaffenheit des Grubenwassers erlaubt.
- Dazu sind die Monitoring-Ziele zu definieren, geeignete Methoden auszuwählen, Beobachtungsroutinen und -systeme festzulegen sowie Ziel-, Warn- und Alarmwerte zu definieren und mit entsprechenden Handlungs- und Maßnahmepaketen zu versehen.
- Das Monitoring sollte im Idealfall den gesamten bergbaulichen Lebenszyklus begleiten und ist den jeweiligen spezifischen Anforderungen anzupassen.
- Das Monitoring bewirkt dabei auch eine Verbesserung des Prozessverständnisses und der Erkenntnisse über die Wirkungszusammenhänge.

Fazit

Das nachhaltige Grubenwassermanagement gehört zu den wichtigsten Aufgaben des Nachbergbaus. Neben den mit dem Grubenwasseranstieg immanenten Risiken gibt es jedoch auch eine ganze Bandbreite möglicher Chancen. Die zentrale Herausforderung für die Zukunft ist es, diese Chancen zu erkennen, zu bewerten und Möglichkeiten der Umsetzung zu finden. Dieses betrifft sowohl die Bergbau- gesellschaften selbst als auch die Politik, Wirtschaft und Öffentlichkeit und im Besonderen die Wissenschaft.

5. Zusammenfassende Bewertung





Grubenwasseranstieg

Der Grubenwasseranstieg ist der natürliche Vorgang nach Beendigung der Bergbautätigkeit.

Grundsätzlich ist der Grubenwasseranstieg im Grubengebäude sowie in der Lagerstätte langfristig von deutlichem Vorteil hinsichtlich der Grubenwasserqualität und -quantität.

Grubenwasserchemie

Die Grubenwasserqualität wird im Besonderen bestimmt durch die Lagerstätte, die geogenen Zuflüsse sowie die Reaktionsprodukte der entwässerten Lagerstätten- und Grubenbereiche.

Zudem können eingesetzte Betriebsstoffe sowie Versatzmaterialien die Grubenwasserqualität beeinträchtigen.

Bodenbewegungen

Durch den Grubenwasseranstieg kommt es insbesondere infolge der Auftriebskraft des Wassers zu Bodenbewegungen.

Das Schadensausmaß durch Bodenbewegungen infolge des Grubenwasseranstiegs ist im Verhältnis zu den abbaubedingten Bodenbewegungen vergleichsweise gering.

Für die Wirkungszusammenhänge zwischen Grubenwasseranstieg und Ablauf der Bodenbewegungen besteht weitergehender Forschungsbedarf.

Ausgasungen

Schadensrelevante Ausgasungen infolge des Grubenwasseranstiegs sind in keinem der betrachteten Steinkohlenreviere dokumentiert. Folglich ist die durch den Grubenwasseranstieg mobilisierte Gasquantität im Verhältnis zur abbaubedingten Gasfreisetzung vergleichsweise gering.

Konzeption

Für einen kontrollierten Grubenwasseranstieg ist eine sorgfältige Planung erforderlich. Dazu ist es sinnvoll, den Grubenwasseranstieg in Phasen zu planen und durchzuführen.

Für jede Phase sind entsprechende Ziel-, Warn- und Alarmwerte zu definieren und mit Handlungsoptionen sowie Kommunikationsmaßnahmen zu versehen.

Monitoring

Monitoring ist das zentrale Element zur Überwachung und Steuerung des Grubenwasseranstiegs und führt zu einem besseren Verständnis der Prozesse.

Fazit

Die Risiken des Grubenwasseranstiegs, d. h. die Wahrscheinlichkeit des tatsächlichen Eintritts eines Schadens und das zu erwartende Ausmaß, sind in Relation zur Gefahr, d.h. der möglichen, negativen Auswirkung, vergleichsweise gering.

Auf Grundlage der dokumentierten und evaluierten Erfahrungen in den deutschen und europäischen Steinkohlenrevieren ist der Grubenwasseranstiegsprozess technisch beherrschbar.

6. Schlagwortverzeichnis

DEFINITIONEN



Bergbau, Geologie,
Wasserwirtschaft
und mehr

Die Definitionen sind den naturwissenschaftlichen und bergbaulichen Standardwerken entnommen worden. Dabei handelt es sich im Einzelnen um BISCHOFF (1998), FELLNER (1999) und KRATZSCH (2013) für bergbauliche Fachbegriffe, COLDEWEY et al. (2017) für Begriffe aus der bergmännischen Wasserwirtschaft, RAMDOHR & STRUNZ (1980), GOSSAUER (2006) und MURAWSKI & MEYER (2010) für Begriffe aus der Geologie, Geotechnik und Mineralogie, ADAM & HENKE (1979) und ADAM et al. (2000) für hydrogeologische Begriffe, MORTIMER & MÜLLER (2003) und SCHMIDT (2006) für chemische Fachbegriffe sowie BROCKHAUS (1980) und MARTIN et al. (2002) für diverse andere Begriffe. Auf eine Einzelzitation wird verzichtet.

Absenkungstrichter

Eingetiefte Grundwasserdruckfläche im Absenkungsbereich einer Grundwasserentnahme.

adhäsiv

Aneinanderhaften von verschiedenen artigen Stoffen und Körpern aufgrund der Zwischenmolekularkräfte.

Acidität

Säuregehalt.

Adsorptionswasser

Bodenwasser, das an der Oberfläche der Bodenteilchen angelagert ist, ohne Menisken zu bilden.

Alter Mann

Verlassener, abgesperrter, versetzter oder zu Bruch geworfener Grubenbau oder -raum.

Anion

Negativ geladenes Ion, entstanden durch Aufnahme eines oder mehrerer Elektronen durch ein Atom oder eine Gruppe von kovalent miteinander verbundenen Atomen.

Aufbereitungsanlage

Anlage zur physikalisch oder physikochemischen Verarbeitung von Rohstoffen zu verkaufsfähigen oder technisch verwertbaren Produkten.

Bergschaden

Beeinträchtigung der Tagesoberfläche mit dort befindlichen baulichen Anlagen durch Absenkung, Schiefstellung, Zerrung und Pressung infolge bergbaulicher Tätigkeit.

Bergsenkung

Durch Abbaueinwirkung eintretende Senkung des Gebirgskörpers und damit der Tagesoberfläche.

Betriebswasser

Wasser, das im bergmännischen Betrieb für Kühlung, Reinigung, Staubbindung, Explosionschutz und als Bohrspülung eingesetzt wird.

Bewetterung

Planmäßige Versorgung des Bergwerkes und seiner Grubenbaue mit frischer Luft von der Oberfläche.

Bodenbewegung

Im Allgemeinen eine Verformung (Deformation) oder eine Verschiebung (Bewegung, Translation) der Tagesoberfläche.

Deckgebirge

Gesamtheit aller Schichten über wirtschaftlich nutzbaren Schichten, z. B. über einem Grundgebirge (geologisch) oder einer Lagerstätte (lagerstättenkundlich).

Diskordanz

Winkeliges Abstoßen, z. B. von Sedimentgesteinen gegenüber hängenden Schichten, bzw. unregelmäßiges Durchsetzen der Nebengesteine.

Disulfid

Chemische Verbindung, die zwei aneinander gebundene Schwefelatome der Wertigkeit 2 enthalten (z. B. FeS₂).

Dyke

Englische Bezeichnung für Gang, Ausfüllung von Spalten in der Erdkruste durch Mineralabsätze oder Gesteine.

Einfallen

Neigungswinkel der zu messenden Fläche gegenüber der Horizontalen.

Einstau

1. Vorgang des Grubenwasseranstiegs.

2. Infolge eines Grubenwasseranstiegs gefluteter Bereich eines Bergwerks.

elektrische Leitfähigkeit

Summenparameter, der sich aus der Konzentration von Ionen, deren Ladung und der Temperatur des Wassers ergibt.

Elektrokoagulation

Elektrochemisches Verfahren, um Metalle oder Trübstoffe aus dem Wasser zu entfernen.

Entwässerung

1. Entziehung von Wasser aus Poren und Trennflächen mittels Bohrungen, (Bohr-)Brunnen, Strecken und Schächten im Tagebau und Tiefbau zur Gewährleistung der Sicherheit.
2. Entfernung des Wassers aus einem Aufbereitungsprodukt mittels Schwer-, Flieh-, Saug- oder Druckkraft.

First Flush

Englische Bezeichnung für die „Durchspülung“ eines Grubengebäudes zu Beginn des Grubenwasseranstiegs, in dem ein Anstieg gelöster Stoffe verzeichnet wird, bis zur Beobachtung einer Gleichgewichtseinstellung.

Flözgas

Untergruppe des Kohlegases; ist am natürlichen Entstehungsraum gebunden und wird durch beispielsweise Bohrungen aus den Kohleflözen im ungestörten Gebirge freigesetzt.

Flügelort

Seitenöffnungen aus dem Grubenbau, welche getrieben werden, um eine Teiluntersuchung des Gebirges durchzuführen.

Grenzletten

Unterschiedlich mächtige Ton-schicht, die eine hydraulische Trenn-schicht bildet, und den Übergang zu den Schichten des Karbons darstellt.

Grubengas

Untergruppe des Kohlegases; dringt durch bergbauliche Aktivitäten unmittelbar oder zeitverzögert in künstlich geschaffene Hohlräume wie dem Grubengebäude ein.

Grubengebäude

Gesamtheit aller anthropogen geschaffener Hohlräume eines Bergwerks.

Grubenwasser

Alles Wasser, das mit Tief- und Tage-bauen in Kontakt steht oder stand.

Grubenwasseranstieg

Anstieg des Wasserspiegels im Grubengebäude resultierend aus 1. der Reduzierung oder Einstellung der Wasserhaltung oder 2. der Zufüh-rung von Wasser.

Grundwasserdruckhöhe

Beschreibt flächenmäßig die End-punkte aller Potenzialhöhen (Stand-rohrspiegelhöhen) einer Grund-wasseroberfläche.

Grubenwassereinbruch

Plötzlicher, aus gefluteten Gruben-bauen oder wasserführender Klüfte stammender Austritt großer Mengen von Wasser in das Grubengebäude.

Grubenwasserhebung

Förderung des Grubenwassers.

Grundwasser

Unterirdisches Wasser, das Hohl-räume der Lithosphäre zusammen-hängend ausfüllt und dessen Be-wegungsmöglichkeit ausschließlich durch die Schwerkraft bestimmt. Es wird unterschieden in:

- freies Grundwasser, dessen Grundwasseroberfläche und Grundwas-serdruckfläche in dem betrachte-ten Bereich identisch sind.
- gespanntes Grundwasser, des-sen Grundwasseroberfläche und Grundwasserdruckfläche in dem betrachteten Bereich nicht iden-tisch sind.

• artesisch gespanntes Grundwasser, dessen Grundwasserdruckfläche in dem betrachteten Bereich oberhalb der Tagesoberfläche liegt.

Grundwasserleiter

Gesteinskörper, der geeignet ist, Grundwasser zu leiten.

Haftwasser

Wasser in der ungesättigten Zone, das gegen die Schwerkraft gehalten wird. Dazu gehören Adsorptions- und Kapillarwasser.

Hangendes

Obere Begrenzungsfläche einer Streckenauffahrung, eines Flözes oder einer geologischen Einheit (Schicht, Gesteinskörper).

Hauptabbausohle

Stockwerk eines Grubengebäudes, in dem der Hauptabbau stattfindet.

hydraulisch überstaut

Durch ansteigendes Grubenwasser zunehmender hydrostatischer Druck auf einen Zuflusspunkt.

Inkohlung

Umbildungsprozess pflanzlicher Stoffe vom Torf über die verschiede-nen Braunkohlen und Steinkohlen bis zu Anthrazit.

in situ

Synonym für „vor Ort“.

Kalkmergelstein

Sedimentgestein aus Kalk und Ton mit bis zu 65 % CaCO_3 (Calciumcarbonat) und 35 % Ton.

Kalkstein

Sedimentgestein aus bis zu 95 % CaCO_3 (Calciumcarbonat).

Kapillarwasser

Unterirdisches Wasser, das durch Überwiegen der Kapillarkräfte ge-hoben oder gehalten wird.

Karbonhorst

Teil einer Karbonschicht, der einseitig z. B. aus einer schräg gestellten Scholle oder beidseitig an Ab- oder Aufschiebungen gegen-über seiner Nachbarscholle herau-sgehoben ist.

Katalyse

Chemische Reaktion, deren Ge-schwindigkeit durch die Anwesen-heit eines Katalysators erhöht wird.

Kation

Positives geladenes Ion, entstan-den durch Abgabe von einem oder mehreren Elektronen aus einem Atom oder einer Gruppe von kovalent miteinander verbundenen Atomen.

Konvergenz

Im Allgemeinen die Verringerung einer Querschnittsfläche infolge er-höhten Gebirgsdrucks.

Lagerstätte

Natürliche Anhäufung nutzbarer Minerale, Gesteine, aber auch Erdöl, Erdgas und anderer Gase im Boden, die nach Größe und Inhalt für eine wirtschaftliche Gewinnung in Be-tracht kommen könnte oder bereits abgebaut wird.

Leckage

Großflächiger Übergang von Grund-wasser durch einen Grundwasser-hemmer von einem Grundwasser-stockwerk in ein anderes.

Liegendes

Untere Begrenzungsfläche einer Streckenauffahrung, eines Flözes oder einer geologischen Einheit (Schicht, Gesteinskörper).

limnisch

Bezeichnung für Vorgänge, Produkte und Ablagerungen in Süßwasser-seen.

Mesozoikum

Auch als Erdmittelalter bezeichnet, vor 251 bis 65 Millionen Jahren.

Nivellementslinie

Zusammenfassung von mehreren aufeinanderfolgenden Nivellement-punkten.

organoleptisch

Mit den Sinnen wahrnehmen.

Oszillation

Zeitlich periodische Änderung einer oder mehrerer physikalischer Grö-ßen um einen Mittelwert. Sie tritt

auf, wenn Störungen mechanischer, elektrischer oder auch thermischer Gleichgewichte zu Kräften führen, die der Störung entgegenwirken.

Oxidation

Teil einer Reaktion chemischer Elemente oder Verbindungen mit Sauerstoff, bei der es zur Abgabe von Elektronen, d. h. zur Erhöhung der Oxidationszahl, kommt.

Pinge

1. Oberirdischer Abbau oder Abgrabung.
2. Mulden- oder trichterförmige Vertiefung an der Tagesoberfläche, entstanden durch Verbruch oberflächennaher untertägiger Grubenbaue („Tagesbruch“).

Polder

Fläche in Bergaugebieten, die infolge von Bergsenkungen ihre Vorflut verloren hat und künstlich entwässert werden muss.

Pyritoxidation

Oxidation von Eisendisulfiden (FeS_2) unter Anwesenheit eines Oxidationsmittels (O_2 , Fe^{3+} , NO_3^-).

Pyroklast

Sammelbezeichnung für sämtliche klastischen vulkanischen Produkte (Aschen, vulkanische Brekzien usw.).

Radarinterferometrie

Methode zur Abbildung eines Testgebiets von zwei oder mehr unterschiedlichen Sensorpositionen. Die so gewonnenen Informationen können u. a. zur Erstellung von digitalen Höhenmodellen, zur Detektion von Lageveränderungen im Zentimeterbereich, zur multitemporalen Klassifikation oder zur Detektion beweglicher Streuer verwendet werden.

Reduktion

Teil einer Reaktion, bei der aus chemischen Verbindungen Sauerstoff entfernt wird, indem der zu reduzierende Stoff Elektronen aufnimmt.

Revier

Gebiet, in dem Bergbau und Verhüttung in nennenswertem Umfang betrieben wird bzw. wurde.

Risswerk

Enthält alle Risse, Karten und Pläne, die zur Planung, für den Betrieb sowie die technische, wirtschaftliche und sicherheitliche Überwachung eines Bergwerkes erforderlich sind.

Sackung

Vertikalverschiebung der Oberfläche durch Zusammenbrechen des Korngerüstes durch Eigengewicht oder erstmalige Sättigung in einem Teilbereich des Bodens, dessen Struktur gegenüber Änderungen des Spannungszustands oder der Grundwassersättigung instabil ist.

Salinität

Maß für die Konzentration an gelösten Salzen in Salzwasser und Meerwasser, hauptsächlich Natriumchlorid.

Salzfracht

In einem Abwasser oder Fließgewässer durch einen definierten Abflussquerschnitt transportierte Masse an gelösten Salzen oder bestimmten einzelnen Ionen.

Sandstein

Klastisches Sedimentgestein mit einer Korngröße von 0,02 mm bis 2 mm.

Schacht

Meist seigerer, seltener auch schräger (tonnlägiger) Grubenbau, der das übrige Grubengebäude mit der Tagesoberfläche bzw. zwei oder mehrere Sohlen miteinander verbindet.

Schluffstein (Siltstein)

Klastisches Sedimentgestein mit einer Korngröße von 0,002 mm bis 0,02 mm.

Schrumpfung

Volumenverminderung durch Kapillarspannungen, die in bindigen Böden durch Abnahme des Wassergehaltes, bei zunehmender Feinporengröße auftreten. Das Ausmaß der Senkungen durch Schrumpfungen ist abhängig von der Wassergehaltsabnahme sowie der Mächtigkeit und Feinporengröße des Bodens.

Senkung

Vertikale Verschiebung von Punkten an der Tagesoberfläche oder im Gebirge infolge bergbaulicher Tätigkeiten.

Senkungsnullrand

Linie aller Punkte, die an der Tagesoberfläche den abbaubedingten Einwirkungsbereich vom Ruhebereich trennt.

Setzung

Lotrechte Verformung des Baugrunds infolge aufgebrachter äußerer Lasten, bzw. durch Erschütterungen. Setzungen entstehen bei ausreichender Grundbruchsicherheit überwiegend durch Kompression des Korngerüstes.

Sicherheitsabstand

Schutzbereich im Bergbau, in dem aus Sicherheitsgründen kein Abbau stattfindet.

Sickerwasser

Unterirdisches Wasser, das sich durch Überwiegen der Schwerkraft im Sickerraum abwärts bewegt.

Sohle

Stockwerk eines Grubengebäudes.

Sorptionsprozess

Selektiver Prozess, bei dem ein Stoff einen anderen, mit ihm in Berührung stehenden Stoff, aufnimmt.

Standwasser

1. Ansammlung von Wasser in natürlichen oder künstlichen Hohlräumen, die zu unkontrollierten und daher gefährlichen Wassereinbrüchen führen können.
2. Stehendes Wasser in alten, verlassenen Grubenbauen.

Steinkohlengebirge

Gesamtheit aller Schichten, in denen Steinkohleflöze eingelagert sind.

Stollen

Streckenartiger, von der Tagesoberfläche aus meist leicht ansteigend aufgefahrener untertägiger Grubenbau zur Sicherung eines freien Wasserabflusses, zur Bewetterung und Erz- oder Kohlenförderung.

Störung

Trennfuge im Gebirge, an der sich durch tektonische Vorgänge eine Verstellung der beiden angrenzenden Schollen stattgefunden hat.

Stratigraphie

Geologischer Wissenschaftszweig, der die Gesteine unter Betrachtung aller ihrer anorganischen und organischen Merkmale und Inhalte nach ihrer zeitlichen Bildungsfolge ordnet und eine Zeitskala zur Datierung der geologischen Vorgänge und Ereignisse aufstellt.

Strecke

Horizontaler Grubenbau, der annähernd söhlig oder mit geringer Neigung verläuft und einen regelmäßigen, überwiegend gleichbleibenden Querschnitt besitzt. Verfügt im Gegensatz zum Stollen über keine eigene Tagesöffnung, sondern mündet in einen Schacht oder geht von einem anderen Grubenbau aus. Nach Lage und Verwendungszweck unterscheidet man Richtstrecken, Grundstrecken, First- (Firste) oder Kopfstrecken, Abbaustrecken, Wetterstrecken sowie Wasser- oder Sumpfstrecken.

Sulfate

Salze der Schwefelsäure.

Tagesbruch

Durch das Verbrechen von Grubenbauen entstandener Einsturztrichter an der Tagesoberfläche.

tektonischer Vorgang

Bewegungsvorgänge der Erdkruste und aus deren Kräften verursachte Überschiebungen, Faltungen, Brüche, Störungen.

terrestrisches Sediment

Auf dem Festland entstandenes Sediment.

Teufe

Bergmännischer Ausdruck für Tiefe, z. B. die Tiefe eines Schachts von der Tagesoberfläche.

Thermodynamik

Teil der Wärmelehre, der sich mit der Umwandlung der Wärme in eine andere Energieform oder umgekehrt beschäftigt.

Tiefbausohle

Im Allgemeinen das tiefste Abbaustockwerk eines Bergwerks.

Tiefenwasser

Synonym für tiefes Grundwasser.

Tonstein

Klastisches Sedimentgestein aus Ton oder Begriff für dünne Lagen feinkörnigen Tonmaterials im Steinkohlengebirge.

Trinkwasser

Für menschlichen Genuss und Gebrauch geeignetes Wasser mit Güte-eigenschaften nach den geltenden gesetzlichen Bestimmungen sowie nach DIN 2000 (2017), DIN 2001-1 (2019), DIN 2001-2 (2018) und DIN 2001-3 (2015).

unproduktives Karbon

Schichten des Karbon, in denen keine Flöze eingelagert sind.

Unstetigkeit

Im Allgemeinen eine Bezeichnung für eine Erdstufe an der Tagesoberfläche, die durch ungleichmäßige Absenkung entstanden ist.

Unterwerksbau

Durchführung von Abbauarbeiten unterhalb der Hauptabbausohle.

(un-)verritz

Synonym für (nicht) in Arbeit genommen, z. B. in einem Gebirge, in dem bereits Grubenbaue angelegt sind. Synonym für (un-)gestört.

Verockerung

Ausfällung und Anlagerung von Eisen- und Manganverbindungen durch Oxidation zweiseitiger Eisen- und Manganverbindungen, meist unter Mitwirkung von Mikroorganismen (z. B. Eisenbakterien).

Vorflut

Möglichkeit des Wassers, mit natürlichem Gefälle oder künstlicher Hebung abzufließen.

Vorfluter

Das als Vorflut dienende Gewässer.

Vorkommen

Natürliche Ansammlung nutzbarer

Minerale, Gesteine, aber auch Erdöl, Erdgas und anderer Gase im Boden.

vulkanotektonisch

Bezeichnung für Lagerungsstörungen, die durch Bewegungen magmatischer Schmelzen verursacht werden.

Wasserhaltung

Alle Vorkehrungen, die getroffen werden können, um Wasser vom Grubengebäude fern zu halten oder abzuleiten bzw. alle technischen Anlagen, die diesem Zwecke dienen.

Wasserhaltungsstandort

Standort, von dem aus Grubenwasser nach übertage gepumpt wird.

Wetterführung

Gesamtheit der Einrichtungen und Vorkehrungen zum Zuführen atmosphärischer Luft in die Grubenbaue.

Zerrüttungszone

Gesteinsverbände, die intensiv gefaltet oder durch krummflächige Quetsch- und Gleitflächen zerlegt sind.

7. Literaturverzeichnis





- ADAM, C., GLASSER, W. & HÖLTING, B. (2000): Hydrogeologisches Wörterbuch. – 311 S.; Stuttgart (Thieme).
- ADAM, C. & HENKE, J. (1979): Hydrogeologische Untersuchungen. – 1. Aufl.: 69 S.; Leipzig (VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie).
- ASCH, K. (2005): IGME 5000. 1 : 5 Million International geological map of Europe and adjacent areas; Hannover (BGR).
- BÄSSLER, R. (1970): Hydrogeologische, chemische und Isotopen-Untersuchungen der Grubenwässer des Ibbenbürener Steinkohlenreviers. – Z. dt. geol. Ges., Sonderheft Hydrogeologie und Hydrogeochemie: 209–286.
- BAGLIKOW, V. (2003): Bergschäden nach Beendigung der Grubenwasserhaltung im tiefen Bergbau. – Markscheidewesen, **110**(2): 45–49.
- BAGLIKOW, V. (2010): Schadensrelevante Auswirkungen des Grubenwasseranstiegs im Erkelenzer Steinkohlenrevier. – Dissertation, RWTH Aachen: 121 S.; Herne (Blömeke). – [Schriftenreihe / Institut für Markscheidewesen, Bergschadenkunde und Geophysik im Bergbau an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, **2010**,1].
- BAGLIKOW, V. (2019): Belange von Grundstückseigentümern im Rahmen eines Grubenwasseranstiegs. – [Vortrag auf der Tagung NACHBergbauzeit in NRW an der THGA Bochum am 7.3.2019]. – 9 S. – Online verfügbar unter: https://www.vbhg.de/images/downloads/Dr_Baglikow/Baglikow_-_Belange_von_Grundeigentümern.pdf (zuletzt aufgerufen am 17.04.2019).
- BALTES, B. (Hrsg.) (1998): Entwicklung und Anwendung analytischer Methoden zur Eignungsuntersuchung der Verbringung bergbaufremder Rückstände in dauerhaft offene Grubenhäume im Festgestein – Abschlussbericht (Hauptband). – VI + 126 S.; Köln (Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH). – [GRS / Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, **140**]. – Online verfügbar unter: <https://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-140.pdf> (zuletzt aufgerufen am 17.04.2019).
- BAMLER, R., ADAM, N., HINZ, S. & EINEDER, M. (2008): SAR-Interferometrie für geodätische Anwendungen. – Allg. Vermess.-Nachr., **115**(7): 243–252.
- BANKS, D. (2001): A variable-volume, head dependent mine water filling model. – Ground Water, **39**(3): 362–365.
- BANKS, D., ATHRESH, A., AL-HABAIBEH, A. & BURNSIDE, N. (2019): Water from abandoned mines as a heat source: practical experiences of open- and closed-loop strategies, United Kingdom. – Sustainable Water Resources Management, **5**(1): 29–50. – DOI: 10.1007/s40899-017-0094-7.
- BEARCOCK, J. & SMEDLEY, P.L. (2009): Baseline groundwater chemistry: the Magnesian Limestone of County Durham and north Yorkshire. – 63 S. – [British Geological Survey Open Report, **OR/09/030**]. – Online verfügbar unter: <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/8147/> (zuletzt aufgerufen am 01.05.2019).
- BEKENDAM, R. (2017): Abschätzung der Bodenhebungen in Folge des Grubenwasseranstiegs über stillgelegten Kohlegruben im Südlimburger Revier. – In: MEIER, G., BENNDORF, J., LÖBEL, K.-H., BUTSCHER, C., TONDERA, D. & BUSCH, W. (Hrsg.): 17. Altbergbau-Kolloquium vom 16. bis 18. November 2017 in Freiberg: 118–130; Nossen (Wagner).
- BENSON, S. (1999): Coal in Hungary. – 37 S.; London (IEA Coal Research). – [CS, **07**].
- BERNARD, B., BROOKS, J.M. & SACKETT, W.M. (1977): A geochemical model for characterization of hydrocarbon sources in marine sediments. – 9th Annual Offshore Technology Conference, Preprints, **3**: 435–438.

BERTHOLD, S. (2009): Geophysikalischer Nachweis freier Konvektion in Grundwassermessstellen und Bohrungen. – Dissertation, TU Dresden: XVI + 230 S.; Dresden (DGFZ). – [Proceedings des DGFZ e. V., **39**, Dissertation].

BINNEWIES, M., FINZE, M., JÄCKEL, M., SCHMIDT, P., WILLNER, H. & RAYNER-CANHAM, G. (2016): Allgemeine und Anorganische Chemie. – 3., vollst. überarb. Aufl.: XXIII + 965 S.; Berlin (Springer Spektrum).

BISCHOFF, W. (1998): Das kleine Bergbaulexikon. – 8., unveränd. Aufl.: 404 S.; Essen (Verlag Glückauf).

BLUMA, L., FARRENKOPF, M. & PRZIGODA, S. (2017): Geschichte des Bergbaus. – 1. Aufl.: 272 S.; Berlin (L & H Verlag). – [Veröffentlichung aus dem Deutschen Bergbau Museum Bochum, **225**].

BLUME, H.-P., BRÜMMER, G. W., HORN, R., KANDELER, E., KÖGEL-KNABER, I., KRETZSCHMAR, R., STAHR, K. & WILKE, B.-M. (2010): SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL – Lehrbuch der Bodenkunde. – 16. Aufl.: XIV + 569 S.; Heidelberg (Spektrum, Akademischer Verlag).

BRANCHET, M. & KAISER, R. (2001): Die Einwirkungen der Grubenwasserflutung des Bergwerkes Faulquemont auf die Stabilität der Erdoberfläche. – In: DEUTSCHER MARKSCHEIDERVEREIN / BEZIRKSGRUPPE SAAR/ARBEITSGRUPPE FACHVORTRÄGE, SCHRAMM, H.-G., KLOY, G., OBERBERGAMT SAARLAND, OBERBERGAMT RHEINLAND-PFALZ, UHL, O. & DSK AG (BERGWERK ENSDORF) (Hrsg.): Markscheidewesen, quo vadis? – Mensores fodinarum Augustae Treverorum (in urbe opulentissima) – 43. Wissenschaftliche Tagung des Deutschen Markscheider-Vereins e. V., 26.-29. September 2001 in Trier: 141-154; Dillingen (Krüger). – [Das Markscheidewesen in der Rohstoff-, Energie- und Entsorgungswirtschaft, **43** = Wissenschaftliche Schriftenreihe im Markscheidewesen, **20**].

BROCKHAUS (1980): Brockhaus ABC Naturwissenschaft und Technik. – 13., überarb. und erw. Aufl.: 1441 S.; Leipzig (F.A. Brockhaus).

BÜTTGENBACH, F. (1898): Geschichtliches über die Entwicklung des 800 jährigen Steinkohlenbergbaues an der Worm (1113 - 1898) – Nebst Situationskarte des Wormreviers. – 29 S.; Aachen (Schweitzer).

BÜTTNER, R., BREDE, M., LÜBKEN, F.-J. & LEDER, A. (2012): Experimentelle Untersuchung zur Ausbreitung und Transition interner Wellen. – In: LEDER, A., BREDE, M., RUCK, B. & DOPHEIDE, D. (Hrsg.): Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik. – 20. Fachtagung, 4.-6. September 2012, Rostock. Tagungsband: 39/1-39/11; Karlsruhe (Dt. Gesellschaft für Laser-Anemometrie GALA e. V.).

BUNTZEL, A. (1911): Über die in Oberschlesien beim Abbau mit Spülversatz beobachteten Erdseinkünften. – Berg-, Hütten- und Salinenwesen, **59**: 293-334.

BURKE, S. & BARBER, J. (2004): An overview of mine water rebound in the South Yorkshire Coalfield. – In: JARVIS, A. P., DUDGEON, B.A. & YOUNGER, P.L. (Hrsg.): International Mine Water Association Symposium – proceedings of the symposium: Mine Water 2004 – process, policy and progress. Newcastle upon Tyne, United Kingdom, 20-25 September 2004, 1: 1. Aufl.: 61-66; Newcastle-on-Tyne (University of Newcastle upon Tyne).

BURKE, S.P. (2017): Informationen aus persönlichen Gesprächen und Mitteilungen während der Befahrung des Steinkohlenreviers Yorkshire (Großbritannien) im April 2017.

BURKE, S.P., POTTER, H.A.B. & JARVIS, A. (2005): Groundwater rebound in the South Yorkshire Coalfield: a review of initial modelling. – In: LOREDO, J. & PENDAS, F. (Hrsg.): 9th International Mine Water Association Congress – proceedings of the Congress - Mining Closure; 5-7 September 2005: 223-227; Oviedo (Dep. de Explotación y Prospección de Minas, Univ. de Oviedo).

- BURKE, S.P. & YOUNGER, P.L. (2000): Groundwater rebound in the South Yorkshire Coalfield: a first approximation using the GRAM model. – Quarterly journal of engineering geology and hydrogeology, **33**(2): 149–160.
- BUSCH, K. (Bearb.) (1974): Spanien. – IX + 160 S.; Stuttgart (Schweizerbart). – [Rohstoffwirtschaftliche Länderberichte, **4**].
- BUSCH, W., COLDEWEY, W. G., WALTER, D., WESCHE, D. & TIELMANN, I. (2012): Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche des Bergwerks Prosper-Haniel. – Gutachten der TU Clausthal und der WWU Münster vom 31.8.2012 im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg (Abt. 6), 140 S.; Clausthal-Zellerfeld. – Online verfügbar unter: https://www.bezreg-arnsberg.nrw.de/presse/2012/09/160_12/gutachten.pdf (zuletzt aufgerufen am 03.05.2019).
- CAIRNEY, T. & FROST, R.C. (1975): A case study of mine water quality deterioration, Mainsorth Colliery, County Durham. – Journal of Hydrology, **25**(3/4): 275–293.
- CHRISTENSEN, J. (2007): Explosionsfähigkeit von Methan in Luft nach Coward (1938). – Prüfstelle für Grubenbewetterung der DMT, Essen. – [Unveröff. Gutachten].
- CIENFUEGOS, P. & LOREDO, J. (2010): Coalbed methane resources assessment in Asturias (Spain). – International Journal of Coal Geology, **83**(4): 366–376.
- CLARKE, L.B. & McCONVILLE, A. (1998): Coal in the Czech Republic. – 36 S.; London (IEA Coal Research). – [CS, **03**].
- COAL AUTHORITY (2014): Outline for scope of works Yorkshire Coalfield – Rising Mine Water Assessment. – [Ausschreibung CA18/2311 Instr. 121 und CA08/20/3/239/3 der Coal Authority im Juni 2014].
- COHEN, K.M., FINNEY, S.C., GIBBARD, P.L. & FAN, J.-X. (2013): The ICS International Chronostratigraphic Chart. Episodes 36: 199–204. – Online verfügbar unter: <http://www.stratigraphy.org/ICScart/ChronostratChart2017-02.pdf> (zuletzt aufgerufen am 31.05.2019).
- COLDEWEY, W.G., BURGHARDT, D., MELCHERS, C., MESSER, J., PAUL, M., WALTER, T., WESCHE, D., WESTERMANN, S., WIEBER, G., WISOTZKY, F. & WOLKERSDORFER, C. (2017): Glossar Bergmännische Wasserwirtschaft. – 1. Aufl.: 78 S.; Neustadt/Wstr. (Arbeitskreis Grubenwasser der Fachsektion Hydrogeologie e.V. in der DGGV e.V. (FH-DGGV)).
- COLDEWEY, W.G., HEWIG, R., RICHTER, R., RÜTERKAMP, P. & WEDEWARDT, M. (1999): Abschlussbericht zum Untersuchungs- und Entwicklungsvorhaben: Mittelfristige Entwicklung des Chemismus und der Dichte-Schichtungen von Grubenwassern in Bergwerken und ihre Auswirkungen auf nutzbares Grund- und Oberflächenwasser – Vorhaben, gefördert mit den Mitteln des Landes Nordrhein-Westfalen aus dem Technologieprogramm Bergbau. – 83 S. – [Unveröff. Gutachten].
- CORBEL, S., KAISER, J. & VICENTIN, S. (2017): Coal mine flooding in the Lorraine-Saar basin: experience from the French mines. – In: WOLKERSDORFER, C., SARTZ, L., SILLANPÄÄ, M. & HÄKKINEN, A. (Hrsg.): Proceedings 13th International Mine Water Association Congress - Mine water & circular economy – Lappeenranta, Finland, June 25 - 30, 2017, Vol. 1: 161–166; Lappeenranta (LUT Scientific and Expertise Publications). – [LUT Scientific and Expertise Publications: Research Reports, **63**].
- COSQUER, R. (2016): Compteur d'activités DPSM – Année 2015 / Lorraine – Rapport final. BRGM/RP-65651-FR, Mars 2016. – 143 S.; Orléans (BRGM). – Online verfügbar unter: <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-65651-FR.pdf> (zuletzt aufgerufen am 24.05.2019).

- COUCH, G., HESSLING, M., HJALMARSSON, A.-K., JAMIESON, E. & JONES, T. (1990): Coal prospects in Eastern Europe. - 117 S.; London (IEA Coal Research). - [IEACR, **31**].
- CRAVOTTA, C.A. (1993): Secondary iron sulfide minerals as sources of sulfate and acidity. - In: ALPERS, C.N. & BLOWES, D.W. (Hrsg.): Environmental geochemistry of sulfide oxidation – developed from a symposium sponsored by the Division of Geochemistry, Inc., at the 204th National Meeting of the American Chemical Society, Washington, DC, August 23 - 28, 1992: 345–346; Washington, DC (American Chemical Society). - [ACS Symposium Series, **550**].
- DANIEL, M. & JAMIESON, E. (1992): Coal production prospects in the European Community. - 78 S.; London (IEA Coal Research). - [IEACR, **48**].
- DARCY, H. (1856): Les fontaines publiques de la ville de Dijon – Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau; ouvrage terminé par un appendice relatif aux fournitures d'eau de plusieurs villes au filtrage des eaux et à la fabrication des tuyaux de fonte, de plomb, de toile et de bitume. - 627 S.; Paris (Dalmont).
- DENNEBORG, M., BERK, W. VAN, KÖNIG, C.M., SCHWARZBAUER, J., RÜDE, T.R. & PREUSSE, A. (2017): Gutachten zur Prüfung möglicher Umweltauswirkungen des Einsatzes von Abfall- und Reststoffen zur Bruch-Hohlraumverfüllung in Steinkohlenbergwerken in Nordrhein-Westfalen, Teil 1. Endbericht. - XVII + 217 S.; Aachen (ahu GmbH). - Online verfügbar unter: [http://www.umwaltauswirkungen-utv.de/gutachten_1_Apr_2017/Versatzgutachten_April_2017.pdf](http://www.umweltauswirkungen-utv.de/gutachten_1_Apr_2017/Versatzgutachten_April_2017.pdf) (zuletzt aufgerufen am 14.02.2019).
- DE VENT, I. & ROEST, H. (2012): Neue Indizien für nachträgliche Einwirkungen des Steinkohlenabbaus in Südlimburg (NL)?. - In: MEIER, G., SROKA, A., LÖBEL, K.-H., KLAPPERICH, H., TONDERRA, D., BUSCH, W., MOSER, P. & MAYER, G. (Hrsg.): 12. Altbergbau-Kolloquium, 04. bis 06. November 2010 in Goslar: 273–287; Essen (VGE Verlag).
- DIN 2000 (2017): Zentrale Trinkwasserversorgung-Leitsätze für Anforderungen an Trinkwasser, Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Versorgungsanlagen. - 9 S.; Berlin (Beuth).
- DIN 2001-1 (2019): Trinkwasserversorgung aus Kleinanlagen und nicht ortsfesten Anlagen – Teil 1: Kleinanlagen – Leitsätze für Anforderungen an Trinkwasser, Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Anlagen; Berlin (Beuth).
- DIN 2001-2 (2018): Trinkwasserversorgung aus Kleinanlagen und nicht ortsfesten Anlagen – Teil 2: Nicht ortsfeste Anlagen – Leitsätze für Anforderungen an Trinkwasser, Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Anlagen. - 40 S.; Berlin (Beuth).
- DIN 2001-3 (2015): Trinkwasserversorgung aus Kleinanlagen und nicht ortsfesten Anlagen – Teil 3: Nicht ortsfeste Anlagen zur Ersatz- und Notwasserversorgung – Leitsätze für Anforderungen an das abgegebene Wasser, Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Anlagen. - 43 S.; Berlin (Beuth).
- DIN 4049-1 (1992): Hydrologie – Teil 1: Grundbegriffe. - 12 S.; Berlin (Beuth).
- DIN 4049-3 (1994): Hydrologie – Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. - 80 S.; Berlin (Beuth).
- DIN 18130-1 (1998): Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasser-durchlässigkeit beiwerts – Teil 1: Laborversuche. - 20 S.; Berlin (Beuth).
- DIRECTION DES MINES (DM; BUREAU DE DOCUMENTATION MINIERE) (1963): Carte des ressources Minerale de la France. - 1 : 1.000.000.

- DMT GMBH (1994): Kurzstellungnahme zum Anstieg des Grubenwassers im Bereich der stillgelegten Schachtanlage Königsborn und zu möglichen Auswirkungen auf das oberflächennahe Grundwasser. – 5 S.; Bochum. – [Unveröff. Gutachten im Auftrag der Ruhrkohle Bergbau AG].
- DMT GMBH (2011): Ermittlung der Auswirkungen des Grubenwassereinstaus in den Deckgrundwasserleiter im Bereich Königsborn. – 46 S.; Essen. – [Unveröff. Gutachten im Auftrag der RAG AG].
- DMT GMBH (2017): Evaluierung von Grubenwasseranstiegsprozessen. Kurzdokumentation zum Bergwerk Ibbenbüren Westfeld. – 15 S.; Essen. – [Unveröff. Bericht im Auftrag der Technischen Hochschule Georg Agricola].
- DROZDZEWSKI, G., HISS, M., LEHMANN, F., MICHEL, G., SKUPIN, K., STAUDE, H., THIERMANN, A., DAHM-ARENS, H. & FINKE, W. (1995): Geologie im Münsterland. – 195 S.; Krefeld (GLA).
- ERNST, N. & MAILLASSON, H. (2018): In Lothringen sind die Gruben längst geflutet. – [Onlineartikel der Saarbrücker Zeitung vom 31. Juli 2018]. – Online verfügbar unter: https://www.saarbruecker-zeitung.de/saarland/blickzumnachbarn/frankreich/in-lothringen-sind-die-gruben-laengst-gefutet_aid-24159007 (zuletzt aufgerufen am 31.01.2019).
- EURACOAL (2010): Coal and lignite in Europe. – Thematische Karte der European Association for Coal and Lignite.
- EVANGELOU, V.P. (1995): Pyrite oxidation and its control – solution chemistry, surface chemistry, acid mine drainage (AMD), molecular oxidation mechanisms, microbial role, kinetics, control, ameliorates and limitations, microencapsulation. – 1. Aufl.: 293 S.; Boca Raton (CRC press).
- FELLNER, A. (1999): Bergmännisches Handwörterbuch. – 1. Aufl.: 697 S.; Wien (Fellner).
- FENK, J. (1997): Zeitreihenanalyse für Hebungsprozesse über stillgelegten Steinkohlenbergwerken. – In: DEUTSCHER MARKSCHEIDER-VEREIN (Hrsg.): Neue Technologien und Aufgaben in den Geowissenschaften – 41. Wissenschaftliche Tagung des Deutschen Markscheider-Vereins e. V., Bad Neuenahr-Ahrweiler, 10.-13. September 1997: 117-122; Aachen (Mainz). – [Das Markscheidewesen in der Rohstoff-, Energie- und Entsorgungswirtschaft, **41** = Wissenschaftliche Schriftenreihe im Markscheidewesen, **17**].
- FENK, J. (2000): Eine analytische Lösung zur Berechnung von Hebungen der Tagesoberfläche bei Flutung unterirdischer Bergwerksanlagen. – Markscheidewesen, **107**: 420-422.
- FERNANDEZ-RUBIO, R. (1979): Drainage of coal and lignite mines. – In: ARGALL, G.O. & BRAWNER, C.O. (Hrsg.): Mine drainage – Proceedings of the First International Mine Drainage Symposium, Denver, Colorado, May 1979: 492-506; San Francisco (Freeman).
- FRANKE, D. (2019): Regionale Geologie von Ostdeutschland – Ein Kompendium (Sachsen, Thüringen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern) – Wörterbuch stratigraphischer und regionalgeologischer Begriffe. – Stand: 21.05.2019: 2.346 S.; Glienicker Nordbahn (Franke). – Online verfügbar unter: [www.regionalegeologie-ost.de](http://www региональная геология восточной германии.de) (zuletzt geprüft am 29.05.2019).
- GANDY, C.J. & YOUNGER, P.L. (2007): Predicting groundwater rebound in the South Yorkshire Coalfield, UK. – Mine Water Env, **26**(2): 70-78.
- GARLING, F. & DITTRICH, G. (1979): Gesteinsbemusterung. – 1. Aufl.: 54 S.; Leipzig (VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie). – [Hydrogeologie].

GEINITZ, H.B., FLECK, H. & HARTIG, E. (1865): Die Steinkohlen Deutschlands und anderer Länder Europas – Ihre Natur, Lagerungs-Verhältnisse, Verbreitung, Geschichte, Statistik und technische Verwendung. – 2 Bde.: X + 420 S. mit einem Atlas von 28 Kt. und XIII + 423 S.; München (Oldenbourg).

GOERKE-MALLET, P. (2000): Untersuchungen zu raumbedeutsamen Entwicklungen im Steinkohlenrevier Ibbenbüren unter besonderer Berücksichtigung der Wechselwirkungen von Bergbau und Hydrologie. – Dissertation, RWTH Aachen: 226 S.; Aachen (Mainz).

GOERKE-MALLET, P., REKER, B., WESTERMANN, S. & MELCHERS, C. (2017): Nachbergbau in Großbritannien: das Steinkohlenrevier South Yorkshire. – Markscheidewesen, **124**(1): 13–21.

GOERKE-MALLET, P., WESTERMANN, S. & MELCHERS, C. (2016): Die Verwahrung der Bergwerke im Döhlener Becken durch die Wismut GmbH – Eine Evaluierung des Grubenwasseranstiegsprozesses. – In: SROKA, A. (Hrsg.): 17. Geokinematischer Tag des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie am 12. und 13. Mai 2016 in Freiberg: 123–130; Nossen (Wagner). – [Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, **2016,1**].

GOSSAUER, A. (2006): Struktur und Reaktivität der Biomoleküle – Eine Einführung in die organische Chemie. – 1. Aufl.: XIX + 650 S.; Zürich (Verlag Helvetica Chimica Acta).

GROSS, U. & WEDEKIND, C. (2006): Auswirkungen der Flutung auf die Tagesoberfläche im Bereich des Wismut-Bergbaus im Döhlener Becken. – In: NIEMEYER, I., SROKA, A. & WITTENBURG, R. (Hrsg.): 7. Geokinematischen Tag des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie am 11. und 12. Mai 2006 in Freiberg: 96–110; Essen (VGE, Verlag Glückauf). – [Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Clausthal, **2006,1**].

GUTÍERREZ COLINAS, I., LARA GÓMEZ, L.M., HERNÁNDEZ BATTEZ, A.E. & VIESCA RODRÍGUEZ J.L. (2018): La innovación geotérmica – nuevos usos del Agua de Mina. – 2. Aufl.: 48 S.; Oviedo (Universidad de Oviedo).

HAMILTON, R.M., BOWEN, G.G., POSTLETHWAITE, N.A. & DUSSEK, C.J. (1994): The abandonment of Wheal Jane, a tin mine in South West England. – In: REDDISH, D.J. (Hrsg.): 5th International Mine Water Congress, Nottingham, U.K., 18–23 September 1994 – Proceedings, 2: 543–551; Nottingham (University of Nottingham; IMWA).

HAMMARSTROM, J.M., SEAL, R.R., MEIER, A.L. & KORNFELD, J.M. (2005): Secondary sulfate minerals associated with acid drainage in the eastern US: recycling of metals and acidity in surficial environments. – Chemical Geology, **215** (1–4): 407–431.

HEDIN, R.S., NAIRN, R.W. & KLEINMANN, R.L.P. (1994): Passive treatment of coal mine drainage. – 35 S.; Pittsburgh, PA. (US Department of the Interior, Bureau of Mines). – [Information Circular, **9389**].

HEITFELD, M., DENYS, F., SCHOUWSTRA, M., KLÜNKER, J., ROSNER, P. & SPAANS, J. (2017): Spätfolgen des Steinkohlenbergbaus in Südlimburg/Niederlande – Bestandsaufnahme und Prognosen. – In: SROKA, A. (Hrsg.): 18. Geokinematischer Tag des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie am 11. und 12. Mai 2017 in Freiberg: 146–165; Nossen (Wagner). – [Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, **2017,1**].

HEITFELD, M., ROSNER, P. & MÜHLENKAMP, M. (2012): Untersuchungen zu den Ursachen von Geländehebungen bei der Flutung von Steinkohlenbergwerken sowie Bearbeitung von Prognosen für das Ruhrrevier. 3. Bericht. Detailbericht Bergwerk Königsborn. – II + 52 S.; Aachen. – [Unveröff. Gutachten im Auftrag der RAG AG].

- HENSCHIED, S. (2012): Methanausgasung an der Oberfläche. Behördliche Datengrundlagen und Darstellung in www.gdu.nrw.de. – Präsentation des AK Methan auf einer Veranstaltung der EnergieAgentur.NRW am 29.11.2012, 27 S.
- HEYDENREICH, H. (1970): Über großflächige Entlastungs- und Hebungsvorgänge bei Grundwasserstandsänderungen. – Bergbautechnik, **20**(4): 180–185.
- HILL, A. (2001): The South Yorkshire Coalfield – A history and development. – 251 S.; Charleston (Tempus Verlag).
- HILL, A. (2012): Coal – A chronology for Britain. – 272 S.; Northern Mine Research Society. – [British Mining, **94**].
- HILLEGAART, A. (1910): Untersuchungen über den Einfluss des Bergbaus auf die Erdoberfläche im Zwickauer Steinkohlenrevier. – Zeitschrift für Vermessungswesen, **39**: 229–334.
- HÖLTING, B. & COLDEWEY, W.G. (2013): Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. – 8. Aufl.: XXXVII + 438 S.; Heidelberg (Springer Spektrum).
- HÜLSMANN, K.H. (1997): Probleme bei der Aufgabe von Steinkohlenbergwerken in Verbindung mit dem Grundwasseranstieg. – In: COLDEWEY, W. G. & LÖHNERT, E. P. (Hrsg.): Grundwasser im Ruhrgebiet – Probleme, Aufgaben, Lösungen. Vortrags- und Posterzusammenfassungen der Tagung der Deutschen MontanTechnologie – Bochum, Oktober 1997: 115–125; Köln (von Loga). – [GeoCongress, **3**].
- HYUSSSEN, A. (1855): Die Soolquellen des Westfälischen Kreidegebirges, ihr Vorkommen und muthmaasslicher Ursprung. – Z. dt. geol. Ges., **7**: 17–252.
- INTERNATIONAL NETWORK FOR ACID PREVENTION (INAP) (2014): Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide). – Version Rev. 1 vom 21.10.2014. – 473 S. – Online verfügbar unter: <http://www.gardguide.com/images/5/5f/TheGlobalAcidRockDrainageGuide.pdf> (zuletzt aufgerufen am 14.03.2019).
- INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO ESPAÑA (IGME) (1985): Actualización del inventario de recursos nacionales de carbon. – 217 S.; Madrid (Servicio de Publicaciones, Ministerio de Industria y Energía).
- JARDÓN, S., ORDÓÑEZ, A., ÁLVAREZ, R., CIENFUEGOS, P. & LOREDO, J. (2013): Mine water for energy and water supply in the central coal basin of Asturias (Spain). – Mine Water Env, **32**(2): 19–151.
- JOB, B. (1987a): Inrushes at British collieries: 1851 to 1970 (Part 1). – Colliery Guardian, **235**(5): 192–199.
- JOB, B. (1987b): Inrushes at British collieries: 1851 to 1970 (Part 2). – Colliery Guardian, **235**(6): 232–235.
- JOHNSON, D.B. & HALLBERG, K. B. (2003): The microbiology of acidic mine waters. – Research in Microbiology, **154**(7): 466–473.
- KARRENBERG, H. (1981): Hydrogeologie der nicht verkarstungsfähigen Festgesteine. – XIII + 284 S.; Wien (Springer).
- KELLER, G. (1968): Zur Geologie des Piesberges bei Osnabrück. – Z. dt. geol. Ges., **117**: 743–748.
- KERKIS, E.-E. (1955): Opredelenie radiusa vlijanija pri rasčete vodopritokov. – 1. Aufl.: 99 S.; Moskva (Ugletekhizdat).

KLINGER, C., ECKART, M., CHARMOILLE, A., LE GAL, N., BUENO, J., GZYL, G., KURA, K. & GARZON, B. (2013): Flooding management for underground coal mines considering regional mining networks (Flominet) – Final report. – 72 S.; Luxembourg (Publications Office of the European Union). - [EUR, **25905**] - DOI: 10.2777/94695.

KOEBERLÉ, N., LEVICKI, R., KAISER, J. & HEITZ, S. (2013): Treating mine waters in the Lorraine coal field – Feedback from the La Houve treatment plant. – Mine Closure 2013, Sep 2013, Cornwall, United Kingdom: 11 S.; Australien Centre for Geomechanics: 11 S. – <hal-00849990>. – Online verfügbar unter: <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-00849990> (zuletzt aufgerufen am 01.05.2019).

KOETTER, G. (2001): Bergbau im Muttental – Geologie und Geschichte des Wittener Bergbauwanderwegs. – 198 S.; Witten (Koetter).

KORTAS, L. & YOUNGER, P.L. (2007): Using the GRAM model to reconstruct the important factors in historic groundwater rebound in part of the Durham Coalfield, UK. – Mine Water Env, **26**(2): 60–69.

KOTARBA, M.J., CLAYTON, J.L., RICE, D.D. & WAGNER, M. (2002): Assessment of hydrocarbon source rock potential of Polish bituminous coals and carbonaceous shales. – Chem. Geo., **184**, 11–35.

KRATZSCH, H. (2013): Bergschadenkunde. – 6. Aufl.: XII + 950 S.; Bochum (Deutscher Markscheider-Verein e.V.). – [Markscheidewesen, **5**].

KUSAKIN, I.P. (1935): Iskusstwennoje ponischenije urownja gruntowych wod. – 2. Aufl.: 248 S.; Moskva, Leningrad (Onti, Glawnaja redakcija stroiteljnoi literatury).

LAHNER, L., WELLMER, F.-W., PASTERNAK, M., THIELEMANN, T., WAGNER, H., DILL, H., SCHÜTTE, H. & WEINMANN, W. (2004): Geowissenschaftliche Karte der Bundesrepublik Deutschland 1 : 2.000.000 – Wichtige Lagerstätten (ohne Massenrohstoffe). – Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe).

LÖBEL, K.-H. & DÖHNER, S. (2010): Bergbaubedingte Senkungen und Hebungen in Oelsnitz/E. – In: SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (Hrsg.): Geologie und Bergbaufolgen im Steinkohlenrevier Lugau/Oelsnitz: 55–69; Dresden (Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie). – [Geoprofil, **3**].

LOREDO, J., ORDÓÑEZ, A., JARDÓN, S. & ÁLVAREZ, R. (2011): Mine water as geothermal resource in Asturian coal mining basins (NW Spain). – In: RÜDE, T.R., FREUND, A. & WOLKERSDORFER, C. (Hrsg.): Mine water - managing the challenges – Proceedings of the 11th International Mine Water Association Congress, RWTH Aachen, Aachen, Germany, 4–11 September 2011: 177–182; Aachen (RWTH).

LOTTERMOSER, B.G. (2010): Mine wastes – Characterization, treatment and environmental impacts. – XIV + 400 S.; Berlin (Springer).

LOTZE, F., SEMMLER, W., KÖTTER, K. & MAUSOLF, F. (1962): Hydrogeologie des Westteils der Ibbenbürener Karbonscholle. – 113 S.; Köln (Westdeutscher Verlag). – [Forschungsber. Landes Nordr.-Westfalen, **999**].

MANN, S. & WEDEKIND, C. (2010): Die Flutung des Wismut-Bergbaus am Standort Dresden-Gittersee unter Berücksichtigung des historischen Steinkohlenbergbaus sowie vorhandenen Altlasten – ein Rückblick. – In: MEIER, G., SROKA, A., LÖBEL, K.-H., KLAPPERICH, H., TONDERA, D., BUSCH, W., MOSER, P. & MAYER, G. (Hrsg.): 10. Altbergbau-Kolloquium, 04. bis 06. November 2010 in Freiberg: 177–188; Essen (VGE Verlag).

- MANN, S. & WEDEKIND, C. (2015): Der Wismut-Standort Dresden-Gittersee nach Sanierungsabschluss. Ein Review mit Blick auf die Nachsorgephase. – In: INSTITUT FÜR MARKSCHEIDE-WESEN UND GEODÄSIE, INSTITUT FÜR BERGBAU UND SPEZIALTIEFBAU, RING DEUTSCHER BERGINGENIEURE E. V. & DEUTSCHER MARSCHIEDER-VEREIN E.V. (Hrsg.): Tagungsband Bergbau, Energie und Rohstoffe 2015 – Gemeinsame Tagung Energie und Rohstoffe 2015, 7. Bergbaukolloquium, 07.-09. Oktober 2015, Freiberg: 30-43; Nossen (Wagner). – [Wissenschaftliche Schriftenreihe im Markscheidewesen].
- MARTIN, C., BISCHOF, N., & EIBLMAIER, M. (2000–2002): Lexikon der Geowissenschaften – In sechs Bänden. – 2711 S.; Heidelberg (Spektrum, Akademischer Verlag).
- McCONVILLE, L., BROADBENT, J. & ROUSAKI, K. (1999): Coal in Bulgaria. – 38 S.; London (IEA Coal research). – [CS, **04**].
- MELCHERS, C. (2008): Methan im südlichen Münsterland. Genese, Migration und Gefahrenpotenzial. – Dissertation, Westfälischen-Wilhelms Universität Münster: XVI + 153 S.; Münster.
- MELCHERS, C., BENDRAT, M., VOM BERG, B., KRUSE, S. & WITTHAUS, H. (2017): Entwicklung eines Grubenwassermonitoring-Systems für das Bergwerk Auguste Victoria in Marl. – In: MEIER, G., BENNDORF, J., LÖBEL, K.-H., BUTSCHER, C., TONDERA, D. & BUSCH, W. (Hrsg.): 17. Altbergbau-Kolloquium. 16. bis 18. November 2017, Freiberg: 303–309; Nossen (Wagner).
- MELCHERS, C., CEBULA, L., JASNOWSKI-PETERS, H. & WIEGELMANN, H. (2019): Ermittlung der Kinematik der Dichteschichtungen im Grubenwasser des Ruhrgebietes. – Abschlussbericht. – 83 S.; Bochum. – [Unveröff. Gutachten im Auftrag der RAG AG].
- MELCHERS, C., MICHEL, I., HOPPE, U., ISAAC, M. & GOERKE-MALLET, P. (2016): Methoden zur Ermittlung eines Einzugsgebietes wasserführender Stollen am Beispiel des Franziska Erbstollens in Witten. – In: MEIER, G., BENNDORF, J., LÖBEL, K.-H., TONDERA, D. & BUSCH, W. (Hrsg.): 16. Altbergbau-Kolloquium im Hotel- und Tagungszentrum „Der Achtermann“ in Goslar vom 10. bis 12. November 2016: 107–117; Nossen (Wagner).
- MORTIMER, C.E. & MÜLLER, U. (2003): Chemie – Das Basiswissen der Chemie. – 8., komplett überarb. und erw. Aufl.: XVIII + 766 S.; Stuttgart (Thieme).
- MÜHLENBECK, H. (2015): Hebungen nach Einstellung von Wasserhaltungen im Ruhrgebiet. – Bergbau, **8**: 346–349.
- MURAWSKI, H. & MEYER, W. (2010): Geologisches Wörterbuch. – 12., überarb. und erw. Aufl.: 220 S.; Heidelberg (Spektrum, Akademischer Verlag).
- NEYMEYER, A., WILLIAMS, R.T. & YOUNGER, P.L. (2007): Migration of polluted mine water in a public supply aquifer. – Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, **40**(1): 75–84.
- NODDACK, I. (1936): Über die Allgegenwart der chemischen Elemente. – Angewandte Chemie, **49**(47): 835–841.
- NORTHERN MINE RESEARCH SOCIETY (NMRS) (2019): Coal mining in British Isles. – Onlinekarte verfügbar unter: <https://www.nmrs.org.uk/mines-map/coal-mining-in-the-british-isles/> (zuletzt geprüft am 03.06.2019)
- NUTTALL, C.A., ADAMS, R. & YOUNGER, P.L. (2002): Integrated-hydraulic hydrogeochemical assessment of flooded deep mine voids by test pumping at the Deerplay (Lancashire) and Frances (Fife) Collieries. – In: YOUNGER, P.L. & ROBINS, N.S. (Hrsg.): Mine water hydrogeology and geochemistry: 315–326; London (Geological Society London). – [Geological Society London, Special Publication, **198**].
- NUTTALL, C.A. & YOUNGER, P.L. (2004): Hydrochemical stratification in flooded underground mines: an overlooked pitfall. – J Contam Hydrol, **69**(1–3): 101–114.

OBERSTE-BRINK, K. (1940): Die Frage der Hebungen bei Bodenbewegungen infolge Bergbaues. – Glückauf, **76**(18): 249–256.

ORDÓÑEZ, A., JARDÓN, S., ÁLVAREZ, R., ANDRÉS, C. & PENDÁS, F. (2012): Hydrogeological definition and applicability of abandoned coal mines as water reservoirs. – J. Environ. Monit., **14**(8): 2127–2136.

PAAS, N. (1997): Untersuchungen zur Ermittlung der geochemischen Barriere von Gesteinen aus dem Umfeld untertägiger Versatzräume im Steinkohlenbergbau des Ruhrkarbons. – 234 S.; Bochum (DMT) – [DMT-Berichte aus Forschung und Entwicklung, **54**].

PÄLCHEN, W. & WALTER, H. (2011): Geologie von Sachsen I – Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte. – 2., korr. Aufl.: XVI + 537 S.; Stuttgart (Schweizerbart).

PASTOR, J., KLINGER, C., TALBOT, C., WHITWORTH, K. & SUSO LLAMAS, J.M. (2008): Optimisation of mine water discharge by monitoring and modelling of geochemical processes and development of measures to protect aquifers and active mining areas from mine water contamination – Final report. – 130 S.; Luxembourg (Office for Official Publications of the European Communities.) – [EUR, **23456**].

PLOTNIKOV, N.I. & ROGINETS, I.V. (1989): Hydrogeology of ore deposits. – VIII + 290 S.; Rotterdam (Balkema) – [Russian translation series, **72**].

PÖTTGENS, J. J. E. (1985): Bodenhebungen durch ansteigendes Grubenwasser. – In: The developing science and art of minerals surveying – Proceedings – 6th International Congress, International Society for Mine Surveying, Harrogate, 9–13 September 1985, Vol. **2**: 928–938; Rotterdam (Balkema).

RAG AG (2014a): Konzept zur langfristigen Optimierung der Grubenwasserhaltung der RAG Aktiengesellschaft für Nordrhein-Westfalen gemäß § 4 Erblastenvertrag zur Bewältigung der Ewigkeitslasten des Steinkohlenbergbaus der RAG AG im Rahmen der sozialverträglichen Beendigung des subventionierten Steinkohlenbergbaus in Deutschland vom 14.08.2007. – 29 S.; Herne.

RAG AG (2014b): Konzept zur langfristigen Optimierung der Grubenwasserhaltung der RAG Aktiengesellschaft für das Saarland gemäß § 4 Erblastenvertrag zur Bewältigung der Ewigkeitslasten des Steinkohlenbergbaus der RAG AG im Rahmen der sozialverträglichen Beendigung des subventionierten Steinkohlenbergbaus in Deutschland vom 14.08.2007. – 17 S.; Herne.

RAG AG (2015): Grubenwasser in der Diskussion. – Herne (Krüger). – Online verfügbar unter: https://www.bergbau-unser-erbe.de/fileadmin/user_upload/Grubenwasser_in_der_Diskussion.pdf (zuletzt aufgerufen am 31.01.2019).

RAG AG (2016): Aufgaben für die Ewigkeit. Grubenwasserhaltung, Poldermaßnahmen und Grundwassermanagement im Ruhrgebiet. – 34 S.; Herne.

RAG AG (2017): Logistik schafft Wasserwegigkeit. – Steinkohle, **2017**(11): 24.

RAG-STIFTUNG (2018): Geschäftsbericht 2017. – 88 S.; Essen (RAG-Stiftung). – Online verfügbar unter: https://www.rag-stiftung.de/fileadmin/user_upload/RAG-Stiftung/Dokumente/geschaeftsberichte/RAG-Stiftung_GB2017_D.pdf (zuletzt aufgerufen am 28.05.2019).

RAMDOHR, P. & STRUNZ, H. (1980): Klockmanns Lehrbuch der Mineralogie. – 16. Aufl.: XI + 876 S.; Stuttgart (Enke).

RANDALL, B.E. & OLYPHANT, G.A. (1993): Acid-generating salts and their relationship to the chemistry of groundwater and storm runoff at an abandoned mine site in southwestern Indiana, USA. – J Contam Hydrol, **12**(4): 313–328.

- REICHEL, W. & SCHAUER, M. (2007): Das Döhlener Becken bei Dresden - Geologie und Bergbau. – 343 + XXVII S.; Dresden (Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie) – [Bergbau in Sachsen, **12**]. – Online verfügbar unter: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-79315> (zuletzt aufgerufen am 06.05.2019).
- REKER, B., GOERKE-MALLET, P., WESTERMANN, S. & MELCHERS, C. (2018): Die britische Steinkohle und der Nachbergbau: Eindrücke aus dem Revier South Yorkshire und aktuelle Entwicklungen in Großbritannien. – Bergbau, **69**(6): 269–275.
- REKER, B., GOERKE-MALLET, P., WESTERMANN, S. & MELCHERS, C. (2019a): Der Schutz von Grundwasserleitern beim Grubenwasseranstieg: Grubenwassermanagement im Durham Revier (Großbritannien) und ein Vergleich mit dem Konzept in Lothringen (Frankreich). – Mining report, **155**(4). [Im Druck].
- REKER, B., GOERKE-MALLET, P., WESTERMANN, S. & MELCHERS, C. (2019b): Die spanische Steinkohle und der Nachbergbau: Eindrücke aus Asturien. – Bergbau, **70**(4): 160–166.
- RÖHRS, H. (1998): Der Ibbenbürener Bergbau des 20. Jahrhunderts in Bildern. – 2. überarb. und erw. Aufl.: 232 S.; Ibbenbüren (Ibbenbürener Vereinsdruckerei).
- RÖM, H. (1939): Grundwasserabsenkungen und Bewegungsvorgänge im Deckgebirge bei der Grundwasserentziehung. – Mitt. Markscheidewes., **50**(2): 113–148.
- ROSNER, P. (2011): Der Grubenwasseranstieg im Aachener und Südlimburger Steinkohlenrevier – eine hydrogeologisch-bergbauliche Analyse der Wirkungszusammenhänge. – Dissertation, RWTH Aachen: 194 S.; Aachen.
- ROSNER, P., HEITFELD, M., SPRECKELS, V. & VOSEN, P. (2014): Auswirkungen von Geländehebungen im Zuge des Grubenwasseranstiegs im Ruhrrevier. – In: SCHANZ, T. (Hrsg.): Ende des Steinkohlenbergbaus im Ruhrrevier – Realität und Perspektiven für die Geotechnik. Beiträge zum RuhrGeo-Tag 2014, Bochum, 27. März 2014: 153–177; Bochum (Ruhr-Universität). – [Schriftenreihe des Lehrstuhls für Grundbau, Boden- und Felsmechanik, **50**].
- SAMMARCO, O. (1995): Storage of water in the voids of abandoned mines and fractured rocks. – In: HOTCHKISS, W.R., DOWNEY, J.S., GUTENTAG, E.D. & MOORE, J.E. (Hrsg.): Water resources at risk. – A selection of the papers presented at the conference held in Denver, Colorado, May 14–18, 1995: IMWA-102-114; Minneapolis (American Institute of Hydrology).
- SCHÄFER, A. (2016): Zur Verteilung der Bewegungen an der Tagesoberfläche nach Grubenwasseranstieg in einer Steinkohlenlagerstätte. – Markscheidewesen, **123**(1): 21–28.
- SCHLEUNING, J. (2018): Welche Auswirkungen die aktuelle Grubenflutung im Saarland hat. – [Onlineartikel der Saarbrücker Zeitung vom 28. Januar 2019]. – Online verfügbar unter: https://www.saarbruecker-zeitung.de/saarland/saarland/welche-auswirkungen-die-aktuelle-grubenflutung-im-warndt-hat_aid-35960693 (zuletzt aufgerufen am 31.01.2019).
- SCHMIDT, H.-H. (2006): Grundlagen der Geotechnik. – 3. vollst. überarb., erw. und aktualisierte Aufl.: 720 S.; Wiesbaden (Teubner).
- SCHOELL, M. (1984): Wasserstoff- und Kohlenstoffisotope in organischen Substanzen, Erdölen und Erdgasen. – 164 S.; Hannover (Schweizerbart). – [Geol. Jahrb., Reihe D, **67**].
- SEMMLER, W. (1937): Untersuchungen, Wassermessungen und Färbungsversuche zur Ermittlung der Herkunft der Wasserzuflüsse im Felde der Grube Victoria. Püttlingen-Saar. – Der Bergbau, **50**(6): 87–93.
- SEMMLER, W. (1955): Die Grubenwasserzuflüsse im Ruhrbergbau und ihre Abhängigkeit von den Niederschlägen. – Bergbau, **6**(8): 205–214.

SICHARDT, W. (1928): Das Fassungsvermögen von Rohrbrunnen und seine Bedeutung für die Grundwasserabsenkung, insbesondere für größere Absenkungstiefen. – V + 89 S.; Berlin (Springer).

SINGER, P.C. & STUMM, W. (1970): Acidic mine drainage: the rate-determining step. – Science, **167** (3921): 1121-1123.

SHERWOOD, J.M. (1997): Modelling mine water flow and quality changes after coalfield closure. – Dissertation, University of Newcastle upon Tyne: XIII + 241 S.; Newcastle (Newcastle University). – Online verfügbar unter: <http://theses.ncl.ac.uk/jspui/handle/10443/314> (zuletzt geprüft am 24.05.2019).

SPICKERNAGEL, H. (1975): Hebungen des Gebirges als Folgen des Bergbaus unter Tage. – Glückauf-Forschungshefte, **36**: 170-176.

THIELEMANN, T. (2000): Der Methanhaushalt über kohleführenden Sedimentbecken: Das Ruhrbecken und die Niederrheinische Bucht. – Methanbildung, -migration und Austausch mit der Atmosphäre. – Dissertation, RWTH Aachen: X + 350 S.; Jülich (Forschungszentrum, Zentralbibliothek). – [JÜL-Bericht, **3792**].

THIELEMANN, T. (2002): Kohleflözgas in Deutschland. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Commodity Top News, **17**: 4 S.; Hannover. – Online verfügbar unter: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Energie/17_kohlefloegas.html (zuletzt aufgerufen am 03.05.2019).

THIELEMANN, T., KROSS, B.M. & LITTKE, R. (2001): Induziert der Steinkohlenbergbau im Ruhrbecken Methanemissionen? – Z. dt. geol. Ges., **152**(1): 61-76.

TUNGER, K. (2009): Bodenbewegungen durch Flutung im Steinkohlenrevier Freital/Sachsen. – Markscheidewesen, **116**(1): 3-10.

USAKO (1991): Flutungskonzeption der Lagerstätte Freital/Gittersee. – 35 S.; Chemnitz (Büro für Umweltsanierungskonzepte. SDAG Wismut - Geschäftsbereich Umweltengineering). – [Unveröff.].

USAKO (1993): Lagerstätte Freital/Gittersee. Flutungskonzeption mit Umweltbewertung des Wasserpades. – 66 S.; Chemnitz (Büro für Umweltsanierungskonzepte. SDAG Wismut - Geschäftsbereich Umweltengineering). – [Unveröff.].

VERVOORT, A. & DECLERCQ, P.-Y. (2018): Upward surface movement above deep coal mines after closure and flooding of underground workings. – International Journal of Mining Science and Technology, **28**(1): 53-59.

VUTUKURI, V.S. & SINGH, R.N. (1995): Recent developments in pumping systems in underground metalliferous mining. – Mine Water Env, **12**(1): 71-94.

WAGNER, J. (2010): Zukunft Warndt Wasser – Handlungsstudie zu den Chancen nach dem Anstieg des Grundwassers im Warndt. – 102 S. – [Unveröff. Studie der Fa. Grundwasser- und Geo-Forschung, Neunkirchen].

WALKER, S. (2000): Experience from coal industry restructuring. – 73 S.; London (IEA Coal Research). – [CCC, **48**].

WALTER, R. (2010). Aachen und nördliche Umgebung – Mechernicher Voreifel, Aachen-Südlimburger Hügelland und westliche Niederrheinische Bucht. – X + 214 S.; Stuttgart (Borntraeger). – [Sammlung geologischer Führer, **101**].

- WATSON, I. (2011): Managing rising mine water to prevent aquifer pollution. – Online verfügbar unter: <http://www.groundwateruk.org/Contaminated-Land-Contaminated-Groundwater.aspx> (zuletzt aufgerufen am 02.05.2019). – [Präsentation im Rahmen der Konferenz “Contaminated Ground, Contaminated Groundwater?” des UK Groundwater Forum am 24.05.2011 in London].
- WESTERMANN, S., RUDAKOV, D.V., REKER, B. & MELCHERS, C. (2018): Ein neuer Blick auf Grubenwasseranstiegsprozesse – ausgewählte Beispiele aus dem deutschen Steinkohlenbergbau. – In: MEIER, G., BENNDORF, J., LÖBEL, K.-H., BUTSCHER, C., TONDERA, D., BUSCH, W., DZIURZYNSKI, W. & SROKA, A. (Hrsg.): 18. Altbergbau-Kolloquium vom 8. bis 10. November 2018, IMG PAN, Bergwerk Wieliczka: 61-75; Nossen (Wagner).
- WHITWORTH, K.R. (2002): The monitoring and modelling of mine water recovery in UK coalfields. – In: YOUNGER, P.L. & ROBINS, N.S. (Hrsg.): Mine water hydrogeology and geochemistry: 61-73; London (Geological Society London). – [Geological Society London, Special Publication, **198**].
- WISOTZKY, F., CREMER, N. & LENK, S. (2018): Angewandte Grundwasserchemie, Hydrogeologie und hydrogeochemische Modellierung – Grundlagen, Anwendungen und Problemlösungen. – 2. Aufl.: LII + 677 S.; Berlin (Springer Spektrum).
- WOLKERSDORFER, C. (1996): Hydrogeochemische Verhältnisse im Flutungswasser eines Uranbergwerks - die Lagerstätte Niederschlema, Alberoda. – Dissertation, TU Clausthal: 244 S.; Clausthal-Zellerfeld.
- WOLKERSDORFER, C. (2001): Tracer tests in flooded underground mines. – In: SEILER, K.-P. & WOHNlich, S. (Hrsg.): New approaches characterizing groundwater flow – Proceedings of the XXXI International Association of Hydrogeologists Congress, Munich, Germany, 10-14 September 2001, Vol. 1: 229-233; Lisse (Balkema).
- WOLKERSDORFER, C. (2008): Water management at abandoned flooded underground mines. – Fundamentals, tracer tests, modelling, water treatment. – XX + 465 S.; Berlin (Springer).
- WOLKERSDORFER, C. (2013): Grubenwasserreinigung – Verfahren und Vorgehensweisen. – 194 S.; Pretoria (Tshwane University of Technology).
- WOLKERSDORFER, C. & BOWELL, R. (2004): Contemporary reviews of mine water studies in Europe, Part 1. – Mine Water Env, **23**(4): 162-182.
- WYATT, L.M., MOORHOUSE, A.M.L., KERSHAW, S., & IWANSKYJ, B. (2013): Mine water: management post-closure and lessons learned, risks from poor closure and mine water management. – In: TIBBETT, M., FOURIE, A.B. & DIGBY, C. (Hrsg.): Mine Closure 2013 - Proceedings of the 8th International Conference on Mine Closure, 18-20 September 2013, Eden Project, Cornwall, UK: 279-292; Nedlands (ACG Australien Centre for Geomechanics).
- WYATT, L.M., MOORHOUSE, A.M.L. & WATSON, I.A. (2014): Evolution in tidal related hydrogeochemistry at a long-term coal mine water pumping and treatment scheme, former Frances Colliery, Scotland. – In: SUI, W., SUN, Y. & WANG, C. (Hrsg.): An interdisciplinary response to mine water challenges – 12th International Mine Water Association Congress (IMWA 2014), Xuzhou, China 18-22 August 2014: 9-13; Xuzhou (China, University of Mining and Technology Press).
- YOUNGER, P.L. (1993): Possible environmental impact of the closure of two collieries in County Durham. – Water and Environmental Management, **7**(5): 521-531.
- YOUNGER, P.L. (1995): Hydrogeology. – In: JOHNSON, G.A.L. (Hrsg.): Robson's geology of North East England = The geology of North East England, 2nd. ed.: 353-359; Newcastle upon Tyne (Natural History Society of Northumbria). – [Transactions of the Natural History Society of Northumbria].

YOUNGER, P.L. (1997): The longevity of minewater pollution: a basis for decision-making. – Science of the Total Environment, **194/195**: 457-466.

YOUNGER, P.L. (2000): Predicting temporal changes in total iron concentrations in groundwaters flowing from abandoned deep mines: a first approximation. – J Contam Hydrol, **44**(1): 47-69.

YOUNGER, P.L. (2002): Mine water pollution from Kernow to Kwazulu-Natal: geochemical remedial options and their selection in practice. – Geoscience in South-West England, **10**(3): 255-266.

YOUNGER, P.L. & ADAMS, R. (1999): Predicting mine water rebound. – 109 S.; Bristol (Environment Agency). – [R&D Technical Report, **W179**].

YOUNGER, P.L., BANWART, S.A. & HEDIN, R.S. (2002): Mine water – Hydrology, pollution, remediation. – XVI + 442 S.; Kluwer (Dordrecht). – [Environmental pollution, **5**].

ZUNKER, F. (1930): Das Verhalten des Bodens zum Wasser. – In: BLANCK, E. (Hrsg.): Handbuch der Bodenlehre, **6**, Die physikalische Beschaffenheit des Bodens: 66-220; Berlin (Springer).

8. Publikationen



Im Verlauf des Projekts wurden
folgende Publikationen veröffentlicht:

2019

REKER, B., GOERKE-MALLET, P., WESTERMANN, S. & MELCHERS, C. (2019a): Der Schutz von Grundwasserleitern beim Grubenwasseranstieg: Grubenwassermanagement im Durham Revier (Großbritannien) und ein Vergleich mit dem Konzept in Lothringen (Frankreich). – Mining Report, **155**(4) (im Druck).

REKER, B., GOERKE-MALLET, P., WESTERMANN, S. & MELCHERS, C. (2019b): Die spanische Steinkohle und der Nachbergbau: Eindrücke aus Asturien. – Bergbau, **70**(4): 160–166.

WESTERMANN, S., RUDAKOV, D. V., REKER, B. & MELCHERS, C. (2019): Ein neuer Blick auf Grubenwasseranstiegsprozesse – ausgewählte Beispiele aus dem deutschen Steinkohlenbergbau. – Markscheidewesen, **126** (im Druck).

2018

REKER, B., GOERKE-MALLET, P., WESTERMANN, S. & MELCHERS, C. (2018): Die britische Steinkohle und der Nachbergbau: Eindrücke aus dem Revier South Yorkshire und aktuelle Entwicklungen in Großbritannien. – Bergbau, **69**(6): 269–274.

WESTERMANN, S. (2018): Analyse und Bewertung der hydraulischen, hydrochemischen und geomechanischen Grundlagen eines Grubenwasseranstiegs in untertägigen Steinkohlenbergwerken. – In: BANNING, A., FRANK, S., KAUFMANN-KNOKE, R., NIEDERMAYR, A., WISOTZKY, F. & WOHNLICH, S. (Hrsg.): Grundwasser im Umfeld von Bergbau, Energie und urbanen Räumen – 26. Fachtagung der Fachsektion Hydrologie e. V. in der DGGV e. V. Bochum, 21.–24. März 2018. Tagungsband: 233; Bochum (Selbstverlag Institut für Geologie, Mineralogie und Geophysik der Ruhr-Universität Bochum). – [Bochumer geowissenschaftliche Arbeiten, **24**].

WESTERMANN, S. & MELCHERS, C. (2018): Scientific basics of mine water rebound. – In: SANKT-PETERBURGSKIJ GORNYJ UNIVERSITET (Hrsg.): Problemy nedropol'zovanija – Meždunarodnyj Forum-Konkurs Molodych Učenych, 18-20 aprel'ja 2018 g, Sbornik naučnykh trudov, Čast' II: 84–86; Sankt-Peterburg (Sankt-Peterburgskij Gornyj Universitet). – Online verfügbar unter: https://spmi.ru/sites/default/files/imci_images/sciens/nirs/vkladka_2_%D1%87%D0%BO%D1%81%D1%82%D1%8C%20II_%202018.pdf (zuletzt aufgerufen am 24.01.2019).

WESTERMANN, S., REKER, B., GOERKE-MALLET, P., WOLKERSDORFER, C. & MELCHERS, C. (2018): Hydraulics of underground mine flooding – Optimization of prediction and monitoring procedures. – In: DREBENSTEDT, C., VON BISMARCK, F., FOURIE, A. & TIBBETT, M. (Hrsg.): Mine Closure 2018 – Proceedings of the 12th International Conference on Mine Closure, 3.–7. September 2018, Leipzig, Germany: 512–523; Freiberg (Technical University Bergakademie Freiberg, Institute of Mining and Special Civil Engineering). – Online verfügbar unter: http://mineclosure2018.com/wp-content/uploads/2017/08/Book_prev_index_complete_online.pdf (zuletzt aufgerufen am 24.01.2019).

WESTERMANN, S., RUDAKOV, D. & MELCHERS, C. (2018): Analytical assessment of mine water rebound – Case study Ruhr coal basin. – In: MINISTERSTWO OSWITY I NAUKY UKRAJNY, NAZIONALJNYJ TECHNITSCHNYJ UNIVERSITET, "DNIPROWSKA POLITECHNIKA" (Hrsg.): Forum Girnykiw - 2018 – Materialy mischnarodnoj konferenzi, 10.-13. schowtnja 2018 r [Tagungsband des Forum of Mining Engineers an der National Technical University Dnipro Polytechnic vom 10.-13. Oktober 2018 in Dnipro]: 204–212; Dnirpo (Serednjak T.K.).

WESTERMANN, S., RUDAKOV, D. V., REKER, B. & MELCHERS, C. (2018): Ein neuer Blick auf Grubenwasseranstiegsprozesse – ausgewählte Beispiele aus dem deutschen Steinkohlenbergbau. – In: MEIER, G., BENNDORF, J., LÖBEL, K.-H., BUTSCHER, C., TONDERA, D., BUSCH, W., DZIURZYNSKI, W. & SROKA, A. (Hrsg.): 18. Altbergbau-Kolloquium. 8. bis 10. November 2018, IMG PAN, Bergwerk Wieliczka: 61–75; Nossen (Wagner).

2017

GOERKE-MALLET, P., REKER, B., WESTERMANN, S. & MELCHERS, C. (2017): Nachbergbau in Großbritannien: das Steinkohlenrevier South Yorkshire. – Markscheidewesen, **124**(1): 13–21.

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.): Proceedings 13th International Mine Water Association Congress - Mine water & circular economy – Lappeenranta, Finland, June 25-30, 2017, Vol. 1: 147-153; Lappeenranta (LUT Scientific and Expertise Publications). – [LUT Scientific and Expertise Publications: Research Reports, **63**]. – Online verfügbar unter: http://imwa.info/docs/imwa_2017/IMWA2017_Westermann_147.pdf (zuletzt aufgerufen am 24.01.2019).

WESTERMANN, S., DOGAN, T., REKER, B., GOERKE-MALLET, P. & MELCHERS, C. (2017): Mine water rebound and its environmental impacts. – In: SANKT-PETERBURGSKIJ GORNYJ UNIVERSITET (Hrsg.): Problemy nedropol'zovanija – Meždunarodnyj Forum-Konkurs Molodych Učenych, 19-21 aprēļja 2017 g, Sbornik naučnych trudov, Čast' II: 75-77; Sankt-Peterburg (Sankt-Peterburgskij Gornij Universitet).

WESTERMANN, S., GOERKE-MALLET, P., REKER, B., DOGAN, T., WOLKERSDORFER, C. & MELCHERS, C. (2017): Aus Erfahrungen lernen: Evaluierung von Grubenwasseranstiegsprozessen zur Verbesserung zukünftiger Prognosen. – In: MEIER, G., BENNDORF, J., LÖBEL, K.-H., BUTSCHER, C., TONDERA, D. & BUSCH, W. (Hrsg.): 17. Altbergbau-Kolloquium vom 16. bis 18. November 2017, Freiberg: 259–273; Nossen (Wagner).

2016

GOERKE-MALLET, P., WESTERMANN, S. & MELCHERS, C. (2016): Die Verwahrung der Bergwerke im Döhlener Becken durch die Wismut GmbH – Eine Evaluierung des Grubenwasseranstiegsprozesses. – In: SROKA, A. (Hrsg.): 17. Geokinematischer Tag des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie am 12. und 13. Mai 2016 in Freiberg: 123-130; Nossen (Wagner). – [Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, **2016**,1]. – Online verfügbar unter: http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/20541/Textbeitrag_9.pdf (zuletzt aufgerufen am 24.01.2019).

MELCHERS, C. (2016): Ausgasung und Grubenwasseranstieg. – In: BEZIRKSREGIERUNG ARNSBERG; TECHNISCHE HOCHSCHULE GEORG AGRICOLA (Hrsg.): Nachbergbauzeit in NRW – Beiträge 2011, 2013, 2015: 158–161; Bochum (Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums Bochum). – [Veröffentlichungen aus dem Deutschen Bergbau-Museum Bochum, **217**].

Für die Durchsicht des vorliegenden Berichts und die bereichernden Diskussionen gilt den folgenden Kolleginnen und Kollegen des Forschungszentrums Nachbergbau der Technischen Hochschule Georg Agricola Bochum ein ausdrücklicher Dank:

Frau B. Sc. Britta Engbring
Herr A. d. M. Prof. Dr.-Ing. Peter Goerke-Mallet
Herr Dipl.-Geol. Henning Jasnowski-Peters
Frau Laura Klein
Herr M. A. (LIS) Peter Lohnert
Herr Dr.-Ing. Stefan Möllerherm
Herr Prof. Dr.-Ing. Ulrich Paschedag
Herr Prof. Dr. rer. nat. Tobias Rudolph
Frau Dipl.-Geol. Melanie Schwermann
Herr Hendrik Wiegelmann

Für die Erstellung und die grafische Bearbeitung der Abbildungen gilt Herrn Dr. rer. nat. Bastian Reker und Frau B. Sc. Miriam Börger ein besonderer Dank.



