
Energetische Nutzung von Grubenwasser aus gefluteten Bergwerken

17

Thomas Grab, Thomas Storch und Ulrich Groß

Inhaltsverzeichnis

17.1	Einleitung und geschichtliche Entwicklung	524
17.2	Aufbau und Funktionsweise einer Grubenwasseranlage	525
17.2.1	Nutzungsarten	526
17.2.2	Vor- und Nachteile im Vergleich zu alternativen Heiz- und Kühlkonzepten	530
17.3	Planung, Umsetzung und Betrieb einer Grubenwasseranlage	532
17.3.1	Planung	533
17.3.2	Umsetzung und Betrieb einer Grubenwasseranlage	539
17.3.3	Bergrecht	540
17.3.4	Wasserchemie	542
17.3.5	Öffentlichkeitswirksame Darstellung	547
17.4	Übersicht zur weltweiten geothermischen Grubenwassernutzung	548
17.4.1	Entwicklung und aktueller Stand von Grubenwasseranlagen	548
17.4.2	Ausgewählte Beispiele	561
17.5	Fazit	575
	Literatur	576

Zusammenfassung

Für die Erdwärmegewinnung aus Grubenwasser im oberflächennahen Bereich stellen nicht verschlossene und geflutete Bergwerke (z. B. Erz- und Kohlebergwerke) auch nach ihrer ursprünglichen Nutzung z. T. sehr geeignete Standorte für eine alternative und regenerative Energieversorgung dar. Geflutete Grubengebäude weisen aufgrund der großen künstlich geschaffenen wärmeübertragenden Flächen mit hohen

Thomas Grab (✉) · Thomas Storch · Ulrich Groß

Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik, Lehrstuhl Technische Thermodynamik, TU Bergakademie Freiberg, Gustav-Zeuner-Str. 7, 09599 Freiberg, Deutschland
e-mail: thomas.grab@ttd.tu-freiberg.de; thomas.storch@ttd.tu-freiberg.de;
gross@iwtt.tu-freiberg.de

Wasserdurchlässigkeiten zwischen Kavernen, Schächten und Stollensystemen sehr große Wärmepotentiale auf. Dieses kann durch unterschiedlichste Nutzungsarten z. B. zur Beheizung und Kühlung von Gebäuden sowie Klimatisierung mit Grubenluft angewendet werden. Die ersten technischen Anwendungen von Grubenwasser im Bergwerk wurden zur Wasserhaltung und ab dem 19. Jahrhundert zur Elektroenergiegewinnung in sogenannten Kavernenkraftwerken realisiert. Getrieben durch steigende Energiepreise begann die thermische Nachnutzung der Wässer aus gefluteten Bergwerken gegen Ende der 1980er Jahre mit dem Einsatz von Wärmepumpen zur Anhebung des Temperaturniveaus.

Da jedes Bergwerk in Geologie, Aufbau und Infrastruktur einzigartig ist, gibt es viele wichtige Kriterien, welche für eine erfolgreiche Realisierung einer Grubenwasseranlage betrachtet werden müssen. In diesem Beitrag werden daher neben den möglichen Nutzungsarten auch deren Vor- und Nachteile im Vergleich zu alternativen Heiz- und Kühlkonzepten vorgestellt. Hierzu werden wichtige Punkte von der Planung mithilfe von Potentialstudien bis hin zur Umsetzung aufgelistet und beschrieben. Dabei werden auch das aktuelle Bergrecht und der prinzipielle Einfluss der Wasserchemie diskutiert.

Eine äußerst umfangreiche Übersicht zur weltweiten Situation der geothermischen Grubenwassernutzung zeigt die internationale Bedeutung dieser Energiequelle. Darin finden sich detaillierte Angaben zu über 70 betriebenen, geplanten oder vereinzelt wieder stillgelegten Anlagen. Erweiternd werden am Beispiel von zwei betriebenen Grubenwasseranlagen im Erzgebirge (Deutschland) wichtige Ergebnisse und Betriebserfahrungen aus dem realen Anlagenbetrieb präsentiert.

Schlüsselwörter

Geothermische Grubenwassernutzung · Grubenwasseranlagen · geflutete Bergwerke · Nachnutzung Bergwerke · regenerative Energiequelle · Wärmepumpen · Heizung · Kühlung · Grubenluft · Bergrecht · Wasserchemie · Arbeitszahl

17.1 Einleitung und geschichtliche Entwicklung

Die Nutzung von zutage tretenden Thermalwässern (hydrothermale Quelle) als eine Form gespeicherter geothermischer Energie reicht bis weit ins Altertum (Römisches Reich, Mexico etc.) zurück und ist dabei größtenteils auf geothermische Anomalien (z.B. vulkanische Aktivität) mit entsprechenden natürlichen Wasserdurchlässigkeiten (Störungszonen) zurückzuführen (Ernst und Hieblinger 1979; Oelsner 1982).

Die in diesem Kapitel behandelte geothermische Nutzung von Grubenwasser (auch Stollenwasser und Schachtwasser genannt) beruht auf einer künstlichen Schaffung von wärmeübertragenden Flächen und hoher Wasserdurchlässigkeit in Form von Kavernen, Schächten und Stollensystemen durch den Bergbau.

Geschichtlich ist der Bergbau eng mit der Gewinnung von Metallerzen durch obertägigen Abbau verknüpft und wird z. B. für die Harz-Region in Deutschland mit ca. 1000 v.

Chr. angegeben (Ramos und Falcone 2013). Ab dem 10. bis 12. Jh. entstehen vorrangig bei Silber- und Kupferlagerstätten sowohl im mitteldeutschen Raum (Harz, Mansfelder Land, Erzgebirge) als auch in anderen Gebieten des europäischen Kontinentes (Schweden, Slowakei etc.) weitreichende Bergbaureviere (Bernhard 1992; Ramos und Falcone 2013; Symmangk 2008).

Die Erschließung von tiefen Lagerstätten durch offene tiefe Tagebaue und unterirdischen Bergbau ist historisch eng mit neuen Entwicklungen zu ausgeklügelten Wasserhaltungstechnologien und -systemen (Wasserhebung, Wasserableitung etc.) verknüpft. Dabei wird das ständig in das Bergwerk zufließende Grubenwasser (Summe aus Oberflächen-/Niederschlagswasser, Sicker- und Grund-/Bergwasser) über ein umfangreiches Wasserhaltungssystem aus tiefen Bereichen nach oben befördert und anschließend über Wasserlösungsstollen zu Mundlöchern abgeführt (Bernhard 1992; Dillenardt und Kranz 2010; Huber 1990; Roschlau und Heintze 1975).

Teilweise wurde die notwendige Wasserhaltung ab dem 19. Jh. gleichzeitig zur Elektroenergiegewinnung z. B. als Kavernenkraftwerk (ältestes Revierelektrizitätswerk: „Drei-Brüder-Schacht“ im Freiberger Revier) genutzt (Galinsky et al. 2001).

Mit der Stilllegung der Bergwerke wurde meist auch die energieintensive umfangreiche Wasserhaltung durch Pumpen eingestellt, wodurch es zur Flutung der Bergwerke bis auf das Niveau der noch aktiven Lösstollen kam. Das große geflutete Volumen mit näherungsweise konstanter Temperaturschichtung stellt hierbei u. a. aufgrund der riesigen wärmeübertragenden Flächen (Gestein/Wasser) ein enormes geothermisches Reservoir und Potential dar. Erste thermische Nutzungen des Grubenwassers wurden nach Stilllegung der Bergwerke und mit steigenden Energiepreisen ab Ende der 1980er Jahre (z. B. 1989 in Springhill/Kanada), größtenteils in Kombination mit Wärmepumpen zur Beheizung und Kühlung von Gebäuden und Industrieprozessen, umgesetzt. Die derzeit bestehenden Geothermieanlagen mit entsprechender Grubenwassernutzung sind mit Ausnahmen vorwiegend auf Kanada, Deutschland, USA und Großbritannien beschränkt (Jessop et al. 1995; Loredo et al. 2016; Ramos und Falcone 2013).

In diesem Kapitel wird, ausgehend vom prinzipiellen Aufbau einer Grubenwasseranlage, eine umfangreiche Zusammenstellung von weltweit geplanten, betrieben und stillgelegten geothermischen Grubenwasseranlagen gegeben. Weiterführend werden ausgewählte Geothermieanlagen mit Grubenwassernutzung, die allgemeinen Schritte einer Grubenwasseranlagenplanung, die wichtigsten Parameter wie Wasserchemismus beispielhaft vorgestellt. Zudem werden die Vor- und Nachteile, die Herausforderungen, Planungsschritte und mögliche Hemmnisse für eine Grubenwasseranlage diskutiert.

17.2 Aufbau und Funktionsweise einer Grubenwasseranlage

Zu Zeiten des aktiven Bergbaus wird das ständig in das Bergwerk zufließende Grubenwasser (Summe aus Oberflächen-, Sicker-, Grundwasser), über ein umfangreiches Wasserhaltungssystem aus tiefen Bereichen nach oben befördert. Dazu wird das Grubenwasser

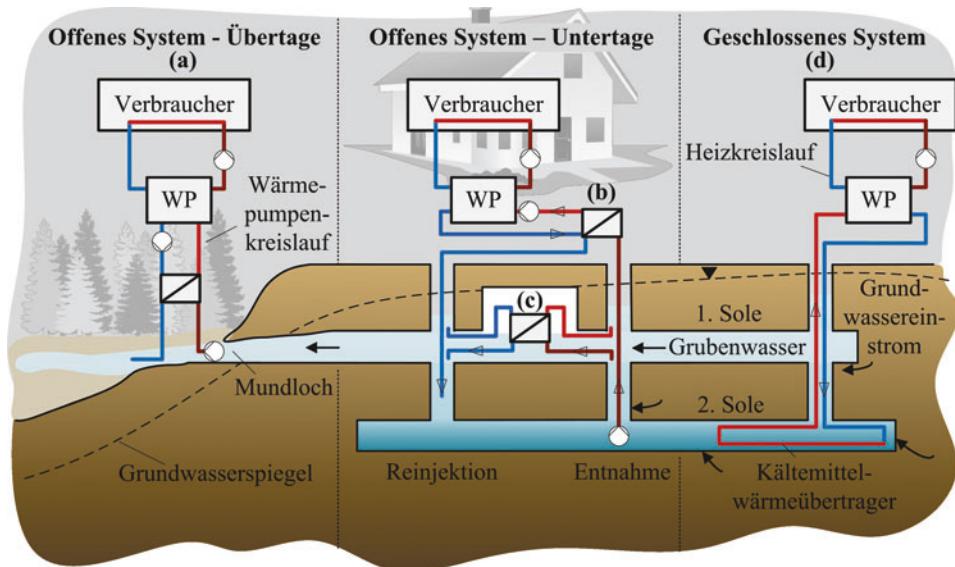


Abb. 17.1 Schematischer Aufbau einer Grubenwasseranlage mit unterschiedlichen Nutzungsmöglichkeiten (offene und geschlossene Systeme)

auf ein Vorfluterniveau gehoben, von welchem es anschließend über sogenannte Wasserlösungsstollen zu Mundlöchern abgeführt wird. (Huber 1990) Austrittsstellen, in welchen das Grubenwasser zutage kommt, können somit unter Umständen bereits während des aktiven Bergbaubetriebes und vor einer Flutung vielfältig genutzt werden, siehe dazu (a) in Abb. 17.1. Eine Nutzung von künstlichen Bergbauseen als Wärmequelle ist ebenfalls möglich (Jessop et al. 1995; la Touche und Preene 2011; Preene und Younger 2014). Auch Wasser aus großen Tunnelbauwerken, welches meist entsprechend dem Gefälle zu den Portalen fließt, kann als Wärmequelle genutzt werden (Kaltschmitt 2009). Nachfolgend werden die unterschiedlichen Nutzungskonzepte unterteilt in vor und nach einer Flutung sowie die wichtigsten Vor- und Nachteile einer Grubenwassernutzung aufgeführt.

17.2.1 Nutzungsarten

Mögliche Nutzungsarten vor einer Flutung:

- Stromerzeugung z. B. im Kavernenkraftwerk (Ausnutzung von Höhendifferenzen bei der Wasserhaltung) (Galinsky et al. 2001; Ramos und Falcone 2013).
- Heizen und Kühlen von Bergaugebäuden, -anlagen (Huber 1990), Wohnhäusern, Prozessen oder Bergbauschächten (durch Luftvorheizung, Jensen 1983) unter Ausnutzung von stehenden/fließenden Wässern oder über eine thermische Zusatznutzung des geförderten Wassers aus Wasserhaltungsanlagen (Preene und Younger 2014).

- Ausnutzung von Hohlräumen unterschiedlicher Höhenlage für den Betrieb eines Pumpspeicherkraftwerks zur Nutzung und Speicherung von Überkapazitäten aus z. B. Wind- oder PV-Strom (Beck und Schmidt 2011; Niemann 2012; Ramos und Falcone 2013).
- Nutzung der Strömungsenergie von Luftbewegungen in Schächten durch Aufwindkraftwerke in einem Bergwerk unter Ausnutzung von Druckunterschieden zur Oberfläche (Gahlen 2009).
- Nutzung der Grubenluft, welche durch die Verweildauer im Bergwerk ganzjährig eine konstante Temperatur und Luftfeuchte aufweist, sowie nahezu keim-, schadstoff- und staubfrei ist (MSG 25.05.2011).

Wird ein Bergwerk stillgelegt, so entsteht ein weitverzweigtes Netzwerk aus teilweise oder vollständig gefluteten Gängen. Aufgrund der fehlenden Wassererhebung steigt der Grundwasserspiegel kontinuierlich, meist bis zu den Wasserlösungsstollen, an. Das gesamte Grubengebäude stellt somit eine überdimensionale Drainage dar, die durch die Stollen und Schächte einen intensiven Wärmeaustausch zwischen Gestein und Grubenwasser ermöglicht. Der natürliche Grundwasserspiegel wird jedoch gegenüber der vorbergbaulichen hydrogeologischen Situation meist nicht wieder erreicht. Dieses Grubenwasser kann zur geothermischen Nutzung herangezogen werden, da es die Eigenschaften eines riesigen Wärmespeichers besitzt.

Mögliche Nutzungsarten nach einer Flutung:

- Geothermisches Heizen und Kühlen von Gebäuden, Bergwerksanlagen und Industrieprozessen (Jessop et al. 1995; Preene und Younger 2014; Ramos und Falcone 2013), mit/ohne Wiedereinleitung in den Grubenbau (mit/ohne Nutzung potentieller Energie in Turbine) (Huber 1990).
- Speicherung von Energie, die aus erneuerbaren Quellen gewonnen wurde (z. B. thermische Solarenergie) (Bracke und Bussmann 2015; Eikmeier und Wagner 2001; Schaberg 1998).

Beim Wärme- und Stofftransport in gefluteten Grubengebäuden kann zwischen Stagnations- und Zirkulationswässern unterschieden werden. Temperaturverteilungsanalysen an Gruben im Siegerland (Südwestfalen/Deutschland) haben gezeigt, dass im Gegensatz zu oberflächennahen Grubenbauten die tiefen gefluteten Tunnelsysteme über mehrere hundert Meter keine nennenswerten Schwankungen der Temperaturverteilung und der hydrochemischen Zusammensetzung zeigen. Es wird vermutet, dass die Grubenbauten als ein System kommunizierender Röhren mit ausgebildeten Konvektionskreisläufen und mit Gasaustausch zusammenwirken. Dagegen zeigen Grubensysteme in 200–300 m Teufe, aufgrund einer oftmals schlechteren Anbindung an tieferen Schächte, eine Stagnation und eine damit verbundene Temperaturschichtung. Insbesondere durch oberirdische Zuflüsse kann es im Vergleich zu tieferen Grubenbauten zu starken Schwankungen und Störungen des vertikalen Temperaturfeldes kommen (Wieber und Ofner 2008).

Dieser Beitrag ist vorwiegend auf die thermische Nutzung vor bzw. nach der Flutung von Bergwerken fokussiert. Für die Nutzung von Grubenwässern sind somit im Wesentlichen nach Hall et al. (2011), Huber (1990), Preene und Younger (2014) und Ramos und Falcone (2013) folgende Standortparameter relevant:

- Tiefe der möglichen Entnahmestelle (Wasserspiegel) bzw. Höhendifferenz bis über Tage bzw. zum Nutzer (entscheidend für den Energieaufwand der Pumpen),
- Entfernung der Entnahmestelle (über Tage) und Länge des Verteilsystems zum potentiellen Nutzer,
- Menge des potentiell entnehmbaren Wasserabflusses (fließend),
- maximales Temperaturniveau des Grubenwasser bei Entnahme und minimal erlaubtes Temperaturniveau bei der Rückführung in die Grubenbaue,
- Tiefe der Schächte und räumliche Ausdehnung der gefluteten Grubenbaue (Potential),
- Zugänglichkeit des Reservoirs und Anbindung an den restlichen Grubenbau,
- Chemismus des Wassers wie hydrochemische Zusammensetzung und Mineralisation,
- Stabilität der Grubenausbau (Stollen, Schächte und Tunnel),
- vorhandene Ausrüstung des Bergwerks wie z. B. Schachtförder- oder Wasserhebeanlage etc.

Neben ausgewählten Standort- und Betriebsparametern werden in Abschn. 17.3 weitere wichtige Parameter für die Planung und den Betrieb einer Grubenwasseranlage vertiefend erläutert.

Transport und thermische Nutzung des Grubenwassers

Zur Nutzung der thermischen Energie des Grubenwassers gibt es im Wesentlichen die Möglichkeit der offenen und der geschlossenen Wasserführung, siehe Abb. 17.1. Nachfolgend wird auf die wichtigsten Systemunterschiede und auf beispielhafte Varianten dazu eingegangen. Dabei können zur Erschließung der Wasserreservoirs in den Grubenbauen entweder vorhandene Schachtssysteme genutzt oder neue Bohrungen niedergebracht werden. Letzteres empfiehlt sich, sofern möglich, schon vor der Flutung eines Bergwerkes zu planen und aufgrund der Zugänglichkeit zur Bohrüberwachung durchzuführen.

Da das Temperaturniveau der im Grubenwasser gespeicherten Wärme für eine direkte Beheizung meist zu gering ist, kommen üblicherweise Wärmepumpen (WP) zum Einsatz. Diese ermöglichen das Anheben der Temperatur auf das für die Wärmebereitstellung notwendige Niveau.

Für den Wärmetransport (z. T. auch als Energieförderung bezeichnet) zur Wärmepumpe sind nach Huber (1990) folgende Varianten mit entsprechend unterschiedlichen Anforderungen möglich:

- Betrieb der Wärmepumpe unter Tage:
 - Schaffung erforderlicher „flutungssicherer“ Maschinenräume ist notwendig,
 - Schacht und Schachtförderung müssen bis zum Aufstellungsort ausgebaut und unterhalten werden,

- Aufstellungsort bedarf einer umfangreichen Bewetterung,
- Elektroenergieversorgung, Regel- und Messtechnik muss bis vor Ort gelegt werden.
- Förderung des Grubenwassers über Tage, (b in [Abb. 17.1](#)):
 - Energieaufwand durch Pumpen ist hoch,
 - Zufuhr des Grubenwassers direkt in die WP kann zu Ablagerungen führen,
 - besteht die Möglichkeit der Wasserrückführung in die Grube, kann durch mechanische Koppelung von Turbine und Pumpen + Elektromotor (Turbine-Freilauf-Motor-Pumpe) oder Kopplung von Turbine und Generator (z. B. Asynchronmotor) zur Rückspeisung ins Netz elektrische Energie gewonnen werden → zurückgewonnene Energie liegt ca. zwischen 50 % (mechanisch gekoppelt) und 30 % (elektrisch gekoppelt);
 - Grubenwasser kann auch zur Kühlung genutzt werden.
- Installation eines Zwischenkreislaufs zwischen Grubenwasser und Wärmepumpe (c in [Abb. 17.1](#)):
 - am häufigsten eingesetzte Variante,
 - keine Korrosions- und Verschmutzungsscheinungen an WP bzw. Anbauteilen,
 - deutlich geringere Förderdrücke notwendig,
 - Wärmeübertrager im Bergwerk müssen für einen hohen Betriebsdruck (abhängig von Förderhöhe) ausgelegt sowie für Wartung und Reinigung zugänglich und zerlegbar sein,
 - Grubenwasser und Zwischenkreislauf kann auch zur Kühlung genutzt werden.
- Aufteilung der Wärmepumpe in Kältemittelverdampfer unter Tage und Kältemittelkondensator über Tage (Splitausführung) (d in [Abb. 17.1](#)):
 - Transport des Kältemittels über große Entfernung via Thermosiphon-Prinzip,
 - WP als Splitausführung, mit Verdichter über Tage (lange Saugleitung) oder unter Tage (lange Druckleitung) möglich,
 - bei ölgeschmierten Verdichtern ist die Ölzirkulation zu berücksichtigen,
 - Kältemittelmasse im WP-Kreislauf sehr groß, bei Leckage ist eine mögliche Umweltbeeinflussung zu beachten,
 - keine Nutzung des Grubenwassers zur Kühlung möglich.

In Abhängigkeit von der Höhendifferenz wurden von Huber ([1990](#)) die theoretischen Leistungszahlen der unterschiedlichen Transportvarianten für die Parameter Förderhöhe 100 m, Wärmequellentemperatur 20 °C, Kältemittelaustrittstemperatur 48 °C, Wärmeleistung 1 MW, WP mit Kältemittel R22 (seit 2015 verboten) bestimmt, siehe [Tab. 17.1](#). Allgemein gilt, dass die Leistungszahl mit abnehmender Kältemitteltemperatur (Temperatur Heizniveau) und zunehmender Grubenwassertemperatur steigt.

Der Großteil der recherchierten Anlagen (vgl. [Abschn. 17.4](#)) nutzt jedoch einen Primär- (Grubenwasser) und einen Sekundärkreislauf (Prozesswasser), welche mit einem Wärmeübertrager (meist geschraubter Plattenwärmeübertrager) aus korrosionsfestem Material (z. B. Edelstahl oder Titan) verbunden sind. Hierdurch wird verhindert, dass sich Bestandteile des Grubenwassers im gesamten Anlagensystem (Pumpen,

Tab. 17.1 Reihenfolge der Leistungszahl in Abhängigkeit unterschiedlicher Wärmetransportvarianten. (Nach Huber 1990)

Leistungszahl	WP-Splitausführung (lange Saugleitung)
hoch	WP-Splitausführung (lange Druckleitung)
	Pumpenförderung d. Grubenwassers mit Energierückgewinnung (mech. Kopplung)
↓	Pumpenförderung d. Grubenwassers mit Energierückgewinnung (elektr. Kopplung)
	Pumpenförderung mit Zwischenkreislauf
niedrig	Allg. Pumpenförderung des Grubenwassers zur Wärmepumpe über Tage

Wärmeübertrager-Wärmepumpe, Rohrleitungen, Absperreinrichtungen etc.) ablagern bzw. dieses durch Korrosion beschädigen (Wieber und Ofner 2008).

17.2.2 Vor- und Nachteile im Vergleich zu alternativen Heiz- und Kühlkonzepten

Im Vergleich zur Nutzung fossiler Energieträger oder anderer regenerativer Energiequellen hat die geothermische Nutzung von gefluteten Grubenbauen viele Vorteile. Nachfolgend sind die wesentlichen Vor- und Nachteile aus unterschiedlichen Literaturquellen (Flynn et al. 1986; Heitfeld et al. 2006; Jessop et al. 1995; Jessop et al. 1995; Kynoch 2010; Matthes und Schreyer 2007a, b; Preene und Younger 2014) zusammengetragen.

Energetische Vorteile

- Die meisten Grubengebäude weisen ein großes Raumvolumen auf und können somit große Mengen an Grubenwasser bzw. eine sehr große Wärmemenge speichern.
- Tiefe und mitteltiefe Grubenwässer unterliegen keinen saisonalen Schwankungen der Wassertemperatur, was für die Auslegung und langfristige Nutzung vorteilhaft ist.
- Grubenwasser kann in kalten, gemäßigten und heißen Klimazonen durch den potentiellen Heiz- und Kühleinsatz mit und ohne Wärmepumpe genutzt werden (Jessop et al. 1995; Preene und Younger 2014). Die bergtechnischen, geologischen und hydrogeologischen Bedingungen sind im Allgemeinen gut bekannt, was ein geringes Fündigkeitsrisiko der Ressource Geothermie z. B. im Vergleich zu Projekten der tiefen Geothermie bedeutet und eine wichtige Voraussetzung für deren technische Nutzung darstellt.

Ökologische Vorteile

- Grubenwasser gehört zu den regenerativen Energiequellen und ist in den Gruben ganzjährig und nahezu unerschöpflich vorhanden.

- Die Nutzung der Energiequelle Grubenwasser trägt bei der Wärmebereitstellung im Vergleich zu Verbrennungsprozessen zur Verringerung der Luftverschmutzung bei (Kynoch 2010; Preene und Younger 2014; Ramos und Falcone 2013).
- Reduzierung des CO₂-Ausstoßes (Bsp. Nova Scotia: Reduzierung um ca. 50 % bei Vergleich aller Energieströme – elektrisch/Öl/etc.) (Jessop et al. 1995).

Ökonomische Vorteile

- Die Nutzung von Grubenwasser weist geringere Kosten gegenüber üblichen Heiztechniken auf (dies ist stark abhängig von den volatilen Preisen der fossilen Konkurrenzenergieträger) (Jessop et al. 1995; Kynoch 2010; Preene und Younger 2014).
- Geringe Energiekosten können eine Ansiedlung neuer Industrie begünstigen (Kynoch 2010). Ehemalige obertägige Betriebsflächen bieten nach einer Stilllegung Potential für Wohnbebauung und Gewerbeansiedlung mit entsprechendem Abnehmerpotential und kurzen Versorgungswegen (Heitfeld et al. 2006).
- Die direkte Nutzung der Wärme aus den Grubenbauten zur Beschleunigung chemischer Prozesse ermöglicht z. B. die ganzjährige Förderung von Gold und Silber an entsprechenden Standorten (Flynn et al. 1986).
- Stabile und kalkulierbare Energiepreise erhöhen für die Industrie die Wettbewerbsfähigkeit und Unabhängigkeit von fossilen Rohstoffen (Kynoch 2010).
- Die Weiternutzung vorhandener „stillgelegter“ Infrastruktur bzw. die Nachnutzung der „Altlasten“ aus dem Bergbau ist für viele betroffene Städte und Gemeinden ein wichtiges Ziel (Heitfeld et al. 2006; Kynoch 2010; Preene und Younger 2014; Ramos und Falcone 2013).
- Bei frühzeitig bekannter und geplanter Folgenutzung bestehen erhebliche Synergien im Zuge der allgemeinen notwendigen Sanierung des Altbergbaus, z. B. Nutzung der Gelder zur Verwahrung des Schachtes für das Geothermieprojekt. Zusätzlich wird die Sicherung einer Kontrolle der Abflussverhältnisse aus dem Bergbaurevier im Rahmen der Grubenwassernutzung weiterhin ermöglicht (Matthes und Schreyer 2007a, 2007b).
- Unabhängigkeit von einem Primärenergieträger (Öl, Gas, Kohle), da elektrischer Strom sowohl aus erneuerbaren Energien als auch fossilen Energieträgern bereitgestellt werden kann (Curtis und Rijken 2011).
- Eventuell ist die Grubenwassernutzung auch für entlegene Standorte ohne Gas- bzw. Ölversorgung umsetzbar (Curtis und Rijken 2011).

Nachteile:

- Da jedes Bergwerk ein Unikat ist, erfordert auch jede Grubenwasseranlage eine eigene Machbarkeitsstudie inkl. geotechnischer Voruntersuchung (Matthes und Schreyer 2007b, Preene und Younger 2014).
- Es sind höhere Anfangsinvestitionen als bei vergleichbaren Heiz-/Kühlsystemen notwendig (Matthes und Schreyer 2007b), wobei die Amortisationszeit stark vom Energiepreis abhängig ist.

- Um das große Potential von Grubenwasser zu nutzen und die Amortisationszeit zu verkürzen, sind Anlagen mit einer großen Leistung günstiger, wodurch jedoch zusätzliche Kosten für ein notwendiges Wärme-/Kälteverteilnetz anfallen (Kynoch 2010).
- Sind zusätzlich bergbautechnische Arbeiten notwendig, so besteht ein erhöhtes Kostenrisiko (Matthes und Schreyer 2007a, b).
- Die hydrochemische Zusammensetzung der Grubenwässer kann z. B. durch Temperatur-, Druckänderungen oder den Eintrag von Sauerstoff verändert werden. Banks 2012 beschreibt die Ausfällungen (Oxidationen) von z. B. Eisenhydroxid und Manganoxid im Wärmeentzugssystem, nachdem das Wasser mit Luft in Kontakt gekommen ist. Dies kann zur Verockerung der Wärmeübertrager führen (vgl. Abschn. 17.3.4).
- Liegt das Vorfluterniveau durch alte bestehende Entwässerungsnetzwerke in großer Tiefe, müssen für eine Nutzung:
 - z. T. tiefe Wasserstände bzw. große Höhendifferenzen (> 100 m) überwunden werden, was sich negativ auf die Betriebskosten auswirkt (Banks 2012; Kynoch 2010) und
 - ein erhöhter Transportaufwand von Material, ein erhöhter Aufwand bei der Installation durch eine spezialisierte Bergbaufirma und die notwendige regelmäßige Wartung kostenseitig berücksichtigt werden.
- Wird das Grubenwasser nicht wieder in das Bergwerk zurückgeführt, kann es bei unsachgemäßer Einleitung zu Wasserverschmutzungen im Grundwasser oder Flüssen kommen.

17.3 Planung, Umsetzung und Betrieb einer Grubenwasseranlage

Wird für die Energieversorgung die Geothermie und im Speziellen Grubenwasser in Betracht gezogen, muss dem verantwortlichen Personenkreis bewusst sein, dass es sich um eine individuelle Energiequelle handelt. Da Geologie, Aufbau und Infrastruktur jedes Bergwerks unterschiedlich sind, muss auch für jedes geflutete Bergwerk eine eigene Potentialstudie durchgeführt werden (Jessop et al. 1995; Preene und Younger 2014). Nachfolgend sind Vorgehensweise und Hinweise für die Planung und Umsetzung eines Grubenwasserprojektes aus einer Vielzahl an Veröffentlichungen zusammengestellt.

Um potentielle Standorte aus einer großen Anzahl an Bergwerken zu erkennen, wurden u. a. in Studien in Kanada (Kynoch 2010) oder auch in Deutschland (Ramos und Falcone 2013) folgende spezielle Auswahlkriterien definiert:

- mind. 30 m Tiefe, um entsprechende Wassertemperaturen vorfinden zu können,
- einen möglichst großen Grubenkörper, um eine große Wärmemenge zu gewährleisten,
- als Anhaltspunkt für einen guten Zustand des Grubenbaues und einer evtl. Nachnutzung von vorhandenen (Mess-)Daten des Bergwerkes sind ausschließlich nach 1950

geschlossene Bergwerke zu berücksichtigen. Für die Harz-Region in Deutschland wurden Bergwerke, welche vor 1885 betrieben wurden, als zu alt und nicht nutzbar deklariert.

- Wasserqualität des Grubenwassers,
- möglichst geringe Entfernung zu möglichst vielen potentiellen Wärme- und Kältenutzern (Reduzierung Verteilernetzkosten),
- geringe Wahrscheinlichkeit einer Wiedereröffnung des Bergwerks für eine lange Nutzung und als Sicherheit für die hohen Investitionskosten.

Auf Grundlage von lokalen Datenbankinformationen berichten Kynoch (2010) für Kanada von 2500 bis 7500 stillgelegten Bergwerken, woraus mithilfe der Auswahlkriterien 25 potentielle Standorte für die Grubenwassernutzung extrahiert wurden.

Nach der Auswahl geeigneter Standorte muss anschließend eine Machbarkeitsstudie durchgeführt werden. Nachfolgend werden daher wichtige Faktoren zur Planung und Umsetzung vorgestellt, die aus einer Vielzahl an Veröffentlichungen zu Grubenwasseranlagen zusammengetragen wurden.

17.3.1 Planung

Identifizierung der Kenndaten des Wärmereservoirs

Ein wesentlicher Parameter für die Machbarkeitsstudien zur Nutzung geothermischer Niedrig-Enthalpie-Systeme (Grubenwasser) ist die Identifizierung der Kenndaten des Wärmereservoirs wie Größe, Ergiebigkeit und Grubenwassertemperatur. Wichtige Fragestellungen dazu sind nach Jessop et al. (1995), Kynoch (2010), Preene und Younger (2014) folgende:

- Welche Gesamtenergiemenge ist verfügbar? Bestimmung über das effektive Volumen und die Zuflüsse in das Reservoir sowie die Grubenwassertemperaturen. Diese Fragestellung kann durch evtl. vorhandene Aufzeichnungen zum Grubengebäude, durch hydrogeologische Bohrungen sowie Modellierungen quantifiziert werden. Analytische Lösungen (Rodríguez und Diaz 2009) und vereinfachte zweidimensionale (2D) numerische Modelle (Ghoreishi et al. 2012) wurden zur Bestimmung des Wärmetransportes in Teilen des Grubengebäudes bereits vielfältig eingesetzt (Ramos und Falcone 2013). Eine weiterführende Literaturübersicht dazu geben Loredo et al. (2016).
- Wie groß ist das Risiko bei der Zugänglichkeit der vorhandenen thermischen Energie? Gibt es eine ausreichende hydraulische Verbindung zwischen den einzelnen Sohlen durch Schächte oder Klüftigkeiten im Gestein? Liegt eine Zirkulation der Grubenwässer zwischen den einzelnen Sohlen und Stollen vor oder gibt es eine Temperaturschichtung wie in stehenden Wasserreservoirs? Durch die Zirkulation der Grubenwässer kann ein großer Teil des Grubengebäudes als wärmeübertragende Fläche ausgenutzt werden, was einer Nutzung deutliche Vorteile bringt. Hydrogeologische

Studien, Modellierungen sowie Pumptests können Grundlagen zur Ermittlung der Ergebzigkeit sein. Wird das Bergwerk bereits aktiv (Pumpen) oder passiv (Lösungsstollen) entwässert, sinkt das Risiko der Wärmezugänglichkeit deutlich. Standorte mit diesen Voraussetzungen können bevorzugt in Betracht gezogen werden.

- Welche maximale Temperatur kann bei der Wärmeentnahme dauerhaft sichergestellt werden? Daraus ergibt sich die indirekte (Wärmepumpe) oder die direkte Nutzung der Wärme (durch Wärmeübertrager bei $t > 35^{\circ}\text{C}$) zur Beheizung bzw. zur direkten Kühlung ($t < 18^{\circ}\text{C}$). Die Temperatur eines Grubenwassers hängt maßgeblich von der maximalen Tiefe des Bergwerkes, dem geothermischen Temperaturgradienten, der hydraulischen Zirkulation und der Größe des Reservoirs ab. Wird Wärme und/oder Grubenwasser entzogen, entsteht ein Ungleichgewicht (z. B. Temperaturabsenkung), was zur Verringerung der Nutzungsdauer führen kann.
 - Für die Auslegung ist die untere und obere Temperaturgrenze, ab welcher das Wärmepumpensystem bzw. die freie Kühlung ineffizient arbeitet, von großer Bedeutung.
 - Kann die Wärmenutzung zu nachteiligen Umweltauswirkungen, z. B. Ablauf chemischer Reaktionen (siehe [Abschn. 17.3.4](#)), führen?

Evaluierung möglicher Nutzer von Wärme und Kälte

Die Eigentumsverhältnisse, das Nutzungspotential und damit mögliche Anwender der Grubenwasserwärme und -kälte variieren bei annähernd jedem Bergwerk (Louie 2015). In vielen Fällen befinden sich Bergwerke weit entfernt von dicht besiedelten Gebieten. Es ist jedoch besonders in Europa wahrscheinlich, dass als Ergebnis der laufenden Entwicklung eine zunehmende Anzahl an Bergwerken bis in besiedelte Areale reicht. Dadurch entstehen evtl. Möglichkeiten, Fernwärmennetze oder auch die direkte Versorgung zu initialisieren (la Touche und Preene 2011).

Eine naheliegende Anwendung von Grubenwasserwärme ist die Versorgung aktiver Bergwerke selbst. Der Wärmebedarf für Beheizung der Verwaltungsgebäude, Mannschaftsräume, Werkstätten usw. liegt in kürzester Entfernung zur Wärmequelle und wird über den gesamten Lebenszyklus eines Bergwerkes benötigt. Grubenwasser kann auch zur Kühlung der Grubenluft oder Eisfreihaltung von Eingängen und Gerätschaften verwendet werden (Toth 2011). Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass Eigentümer und Nutzer identisch sind und somit Absprachen einfacher und Interessenslagen gleich sind.

Sind in der Umgebung des Bergwerkes Industrie-, Verwaltungs- oder Wohngebäude ansässig, so können evtl. zusätzlich Nutzer gewonnen werden. Weitere potentielle Nutzer sind in der Landwirtschaft z. B. zur Beheizung von Ställen, Gewächshäusern, Fischfarmen, zur Trocknung von Erzeugnissen oder anderen großen Niedertemperaturverbrauchern zu finden, siehe [Abb. 17.2](#).

Besonders nach der Schließung des Bergwerkes kann die Nutzung von Grubenwasser neue Einnahmequellen für die Bergbauunternehmen generieren und durch Ansiedlung neuer Industriezweige eine Nachnutzung des obertägigen Grubengeländes fördern. Dies kann auch die nachhaltige Entwicklung von Gemeinden mit geschlossenen Bergwerken unterstützen (Preene und Younger 2014).

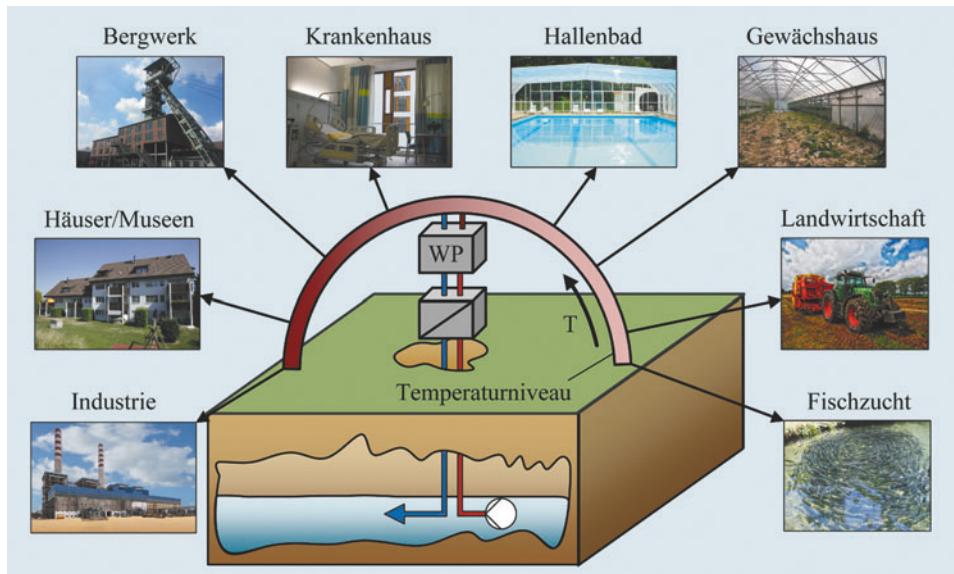


Abb. 17.2 Potentielle Nutzer von Wärme und Kälte aus einer Grubenwasseranlage mit unterschiedlichen Temperurniveaus

Neben dem Wärmeentzug gibt es auch die Möglichkeit der saisonalen Speicherung von Niedertemperaturwärme z. B. in Kombination mit Solaranlagen. Erste Untersuchungen zu geeigneten Standorten z. B. von ehemaligen Steinkohlebergwerken haben die Einspeicherung von Wärme in die oberen Bereiche von Tagesschächten als sehr geeignet identifiziert (Gahlen 2009).

Ist das Bergwerk nicht vollständig geflutet und besteht die Möglichkeit einer Bewetterung, so liegt ein bisher noch nahezu ungenutztes Potential in der Nutzung der Grubenluft vor. Bei ausreichender Verweilzeit im Grubengebäude stellt sich eine ganzjährig konstante Temperatur und Luftfeuchte sowie staub-, keim- und schadstofffreie Luft ein, siehe auch Abschn. 17.4.3.1 (MSG 2011). Kommt es aufgrund des Aufbaus des Bergwerkes zu einer natürlichen Bewetterung, so kann die selbstständig austretende Luft theoretisch u. U. auch in Aufwindkraftanlagen genutzt werden (Gahlen 2009).

Identifizierung des realen Wärme-/Kältebedarfes

Zur Auslegung einer Grubenwasseranlage sind genaue Kenntnisse des benötigten Wärme- und Kältebedarfs notwendig, was Planungs- und Ingenieurbüros anhand von Planungsunterlagen und Verbrauchswerten erstellen. Je genauer die Daten sind, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit einer Über- oder Unterdimensionierung der Anlage. Dazu ist eine Ist-Analyse des in Betracht gezogenen Gebäudebestandes durchzuführen. Um das Potential von Grubenwasser möglichst im großen Umfang zu nutzen, sind Anwendungen mit Wärme- und Kältebedarf zu bevorzugen.

Zur Prognostizierung des Wärmebedarfs ist prinzipiell zwischen Wohnbau (Wohngebäuden mit normalen Innenraumtemperaturen) und Nichtwohnbau wie Büro-/Gewerbegebäude und anderen Nutzungsarten (Lagergebäude etc.) zu unterscheiden. Hierzu werden in der Regel energetische Bilanzierungsverfahren z. B. nach der in der BRD gültigen Energieeinsparverordnung (aktuell EnEV 2014 mit erhöhten Anforderungen ab 2016) (Volland 2014) und den entsprechenden Richtlinien wie beispielsweise den DIN EN 832, DIN V 4108; DIN 4701; DIN V 18599 eingesetzt.

Diese Berechnungsverfahren bieten den großen Vorteil, dass sie die erweiterten Bilanzierungsgrenzen, wie beispielsweise den Primärenergiefaktor des eingesetzten Energieträgers und die Effizienz der Anlagentechnik in der Energiebilanzierung berücksichtigen. Als ausschlaggebende Bewertungsgröße wird der Primärenergiebedarf errechnet (Weller et al. 2008).

Es ist jedoch auch darauf zu achten, dass die gesetzlich eingeführten Energiebilanzierungsverfahren mitunter starke Abweichungen von experimentell bestimmten Verbrauchswerten aufweisen, was in Extremfällen bis zu 100 % betragen kann. Besonders die Anwendung bei ungewöhnlichen Bauweisen, wie sie beispielsweise im geschützten Altbaubestand häufig anzutreffen sind, ist nicht unproblematisch. Im Bereich der untersuchten denkmalgeschützten Gebäude liegt der tatsächliche Verbrauch nach Weller et al. (2008) tendenziell niedriger als der errechnete Endenergiebedarf. Diese Abweichungen setzen sich einerseits durch Ungenauigkeiten bei der Verbrauchsmessung und andererseits durch Abweichungen bei der Bedarfsermittlung zusammen.

Beachtung des Bergrechtes und Identifizierung wichtiger Umwelteinflüsse

- Um die Ressource Grubenwasser verwenden zu können, müssen klare Regularien und Gesetze des jeweiligen Landes bzw. Bundesstaates zur Nutzung von Niedertemperaturgeothermie aus gefluteten Bergwerken bestehen und beachtet werden (Jessop et al. 1995).
- Erdwärme ist nach dem Bundesberggesetz (BBergG, §3 Bergfreie und grundeigene Bodenschätze) ein bergfreier Bodenschatz, für dessen Aufsuchung und Nutzung eine Erlaubnis der Bergbehörde erforderlich ist. In [Abschn. 17.3.3](#) wird darauf näher eingegangen.
- Bereits in der Planungsphase müssen mögliche Umweltrisiken durch die Nutzung des Grubenwassers sowie Einschränkungen durch behördliche Auflagen mit in Betracht gezogen werden. Basierend auf den Erfahrungen in anderen Branchen kann dieses Risiko typischerweise quantitativ bestimmt und durch gutes Design und gute Planung verringert werden (Preene und Younger 2014). In [Tab. 17.2](#) sind mögliche Einflüsse durch die Grubenwassernutzung zusammengeführt.

Planung und Festlegung der notwendigen Infrastruktur

Wurde der benötigte Wärmebedarf ermittelt, kann eine erste grobe Planung der Anlage und der dafür notwendigen Infrastruktur vorgenommen werden. Dabei müssen u. a. folgende Punkte beachtet werden:

Tab. 17.2 Mögliche Umwelteinflüsse durch die Nutzung von Grubenwasser. (Nach Preene und Younger 2014)

Mögliche Umweltauswirkungen	Weitere Folgen
<i>Negative Einflüsse</i>	
Absenkung des Grundwasserspiegels	Die längerfristige Entnahme von Grubenwasser kann zur lokalen Absenkung des Grundwasserspiegels und zu Bodenabsenkungen führen.
Thermische und chemische Auswirkungen auf Oberflächenwässer	Durch die Einleitung von Grubenwasser in wärmere oder kältere Oberflächenwasser kann es aufgrund unterschiedlicher Zusammensetzung (z. B. Sauerstoffgehalt) zu Ausfällungen von gelösten Stoffen, Freisetzung von Gasen oder Temperaturänderungen durch chemische Reaktionen kommen.
Thermische und chemische Auswirkungen auf Grundwässer	Durch die Injizierung von Grubenwasser in wärmere oder kältere Grubenwässer oder Grundwasserleiter kann es aufgrund unterschiedlicher Temperaturen und Zusammensetzungen zu Langzeitveränderungen durch chemische Reaktionen kommen. Eine Veränderung der Fließeigenschaften (z. B. durch Ausfällungen in Klüftigkeiten) kann eine weitere Folge sein.
Beeinflussung der Stabilität des Untergrundes	Durch die Entnahme von Grubenwasser können sich die Druckverhältnisse im Untergrund ändern, was wiederum Einfluss auf die Strömungsrichtung und -geschwindigkeit ausüben kann. Weiterhin können Untergrundarbeiten (wie z. B. Bohrungen) destabilisierend wirken.
<i>Positive Einflüsse</i>	
Reduzierung von Treibhausgasen	Verringerung der Luftverschmutzung sowie des CO ₂ -Ausstosses.
Nutzung regenerativer Energie	Reduzierung der Nutzung fossiler Rohstoffe.
Vorteile für Gemeinschaften und Unternehmen aufgrund langfristig und zuverlässig verfügbarer Energie	In entlegenen Gebieten und in Entwicklungsländern ist die Verfügbarkeit von zuverlässigen Energiequellen beschränkt. Die Nutzung von Grubenwasser kann für die wirtschaftliche Entwicklung hilfreich sein.

- Auswahl der Nutzungsart (geschlossenes oder offenes System), vgl. [Abschn. 17.2](#).
- Auslegung der notwendigen Wasserförderung und -hebung (Pumpen, Rohrleitungen). Muss das Grubenwasser große Höhenunterschiede überwinden, so verringert der Pumpenaufwand den COP deutlich (Athresh et al. 2015). Eventuell können vorhandene Wasserhaltungsanlagen weiter- oder nachgenutzt werden.
- Auswahl geeigneter Wärmeübertrager zur Trennung von Grubenwasser, Prozess- und Heizwasser inkl. Planung des Wartungsaufwandes der Wärmepumpe und der Reinigung des grubenwasserdurchströmten Wärmeübertragers.

- Bei ansteigender Entfernung zwischen Nutzer/Wärmeverbraucher und Wärmequelle (Grubenwasser) wird evtl. ein Wärmenetz zur Wärmeversorgung notwendig.
- Abwasserentsorgung/Wiedereinleitung bzw. Reinfiltrationsanlagen bei offenen Systemen (evtl. sind Feldversuche notwendig).
- Einsatz von Wärmepumpentechnik und/oder direkter Nutzung der Wärme des Grubenwassers für z. B. Kühlung.
- Bauliche Maßnahmen, wie z. B. Montagekosten, Sicherungsmaßnamen an den Grubenbauern, Hausanschlüsse, Erneuerung des Heizungssystems für ein niedriges Temperaturniveau.
- Einbindung des Heizsystems in evtl. bestehende Versorgungssysteme wie z. B. BHKW, Gas-, Ölheizung, Fernwärme inkl. einer intelligenten Regelungstechnik.
- Gibt es gesetzliche Auflagen zur Kontrolle der Wasserzusammensetzung bzw. zum Langzeitmonitoring?

Ziel der Planungen ist die Ableitung der entsprechenden Investitionskosten, welche alle für den Bau erforderlichen Positionen (z. B. Maschinen- und Bautechnik, Material, Montage) einschließlich Planungsaufwendungen, Fördermittel (z. B. KfW (Kreditanstalt für Wiederaufbau, z. B. KfW-Programm Erneuerbare Energien), BAFA (Bundesanstalt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Energie – Heizen mit Erneuerbaren Energien)) und Rücklagen für Unvorhergesehenes beinhalten.

Bewertung der erhobenen Daten, Machbarkeitsstudie, Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zur Nutzung von Grubenwasser kann z. B. anhand einer Rentabilitätsrechnung in Anlehnung an die VDI 2067 durchgeführt werden (Wieber et al. 2008). Dabei werden Aufwendungen für den Bau und den Betrieb einer Grubenwasseranlage gegen den Einsatz anderer regenerativer bzw. konventioneller Heizungstechniken auf Basis verschiedener Energieträger – wie z. B. Gas, Strom, Fernwärme, Sonnenkollektoren, Erdwärme etc. – gegenübergestellt. In der Betrachtung werden Investitions-, Wärme-/Kältegestehungskosten, Fördermittel sowie Betriebskosten zusammengeführt. Es ist darauf zu achten, dass auch die Wartungskosten mit einbezogen werden.

Aufgrund der stark schwankenden Öl- und Gaspreise ist eine langfristige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zum Teil schwierig, wenn auch zwingend notwendig. Liegen die jährlichen Kosten bei der Versorgung mit Wärme aus Grubenwasser über den Kosten für herkömmliche Energieträger, so können zusätzlich weitere Effekte eine Umsetzung unterstützen. So haben erneuerbare Energieträger schon heute trotz z. T. höherer Kosten psychologisch deutlich Vorteile. Die Errichtung von Pilotanlagen an besonders geeigneten Standorten kann Signalcharakter haben (Heitfeld et al. 2006).

Prognosen zur Entwicklung der Grubenwasserqualität und -quantität für die Zeit nach der Bergwerksnutzung z. B. bei Steinkohlegewinnung sind zum Teil sehr schwierig (Werner 2009), was auch eine Risikoabschätzung erschwert. Bei der Betrachtung des Betriebsrisikos müssen Betriebsstörungen – wie z. B. Verschleiß durch Korrosion, Verstopfungen

und Verkrustungen aufgrund aggressiven Grubenwassers oder Änderungen der Reservoirtemperatur – berücksichtigt werden. Diese Risiken können durch hydrogeologische und geochemische Modellierungen quantifiziert werden (Preene und Younger 2014).

Erfolgreiche Erfahrungsberichte zeigen, dass Risiken nicht als Barrieren, sondern als Leitfaden für Vorstudien und Untersuchungen zu potentiellen Standorten dienen sollten (Preene und Younger 2014).

17.3.2 Umsetzung und Betrieb einer Grubenwasseranlage

Hat man sich für den Bau einer Grubenwasseranlage entschieden, so muss eine detaillierte Auslegung der Anlage erfolgen. Dabei sind einige Aspekte zu beachten. Anhand von Literaturangaben sowie Mitteilungen von Anlagenbetreibern sind nachfolgend beispielhaft zu beachtende Punkte bei der Umsetzung aufgeführt.

- Technik, welche unter Tage zum Einsatz kommt, muss sehr genau auf die Verwendbarkeit unter Bergwerksbedingungen überprüft werden. Die Grubenluft sowie das Grubenwasser sind häufig sehr korrosiv. Ausführende Gewerke sollten belegte Erfahrungen mit der Installation von Technik in Bergwerken haben.
- Alle beweglichen Teile (Pumpen, Klappen, Ventile etc.) müssen in regelmäßigen Intervallen bewegt werden, um die Betriebsfähigkeit zu gewährleisten. Aufgrund der meist korrosiven Eigenschaften bzw. aufgrund von Ablagerungen aus dem Grubenwasser kann es schnell zur „Blockade“ der beweglichen Bauteile kommen.
- Wird durch das Bergwerk Oberflächenwasser geleitet, so muss unter Umständen auch mit temporärem Hochwasser unter Tage gerechnet werden (z. B. in der Anlage „Reiche Zeche“ in Freiberg). Eine zeitweise Flutung der untertägigen Bauteile darf nicht zum Betriebsausfall führen.
- Das Grubenwasser sollte weitestgehend in einem abgeschlossenen Kreislauf geführt werden, um den Zutritt von Sauerstoff und die dadurch mögliche Ausfällung von z. B. Eisenhydroxid und anschließende Verockerung der Leitungen und Wärmeübertrager zu vermeiden (Konrad et al. 2010).
- Bei der Wahl der Materialien sollte darauf geachtet werden, die Adsorption und Ausfällung an der Wandung zu minimieren (Konrad et al. 2010). Für Wärmeübertrager und Pumpen wird teilweise Titan eingesetzt, um der Korrosion z. B. durch Salzanteile vorzubeugen (Ramos und Falcone 2013).
- Zum großen Teil werden Platten-Wärmeübertrager eingesetzt, um das Grubenwasser vom Prozesswasser zu trennen. Bei den Wärmeübertragern sollte darauf geachtet werden, dass keine gelöteten, geschweißten oder dauerhaft verbundenen Einheiten zum Einsatz kommen, um eine Reinigung und somit auch Öffnung dieser zu ermöglichen (geschraubte Plattenwärmeübertrager). Es empfiehlt sich daher, das Grubenwasser nicht direkt durch die Wärmeübertrager der Wärmepumpe zu leiten, da diese meist kompakt und schlecht zugänglich verbaut sind.

- Durch geeignete Messstellen sollte der Anlagenbetrieb über ein Monitoringsystem kontinuierlich überprüft werden. So kann z. B. durch die Messung des Druckverlustes über den Wärmeübertrager auf dessen Verschmutzungsgrad rückgeschlossen werden, was eine bedarfsgerechte Reinigung ermöglicht. Weiterhin kann mithilfe von wenigen Temperatursensoren eine mögliche Änderung des Temperaturniveaus des Reservoirs bzw. eine Fehlfunktion erkannt werden.
- Bei Inbetriebnahme sollten unbedingt die Druckverluste aller Leitungsteile bzw. einzelner relevanter Abschnitte (z. B. Wärmeübertrager) als Referenzwerte für evtl. zukünftige Fehlersuchen bestimmt werden. Insofern nicht dauerhaft die Anlagen- bzw. Differenzdrücke aufgezeichnet werden, sind zumindest Anschlussstutzen für Druckmesseinrichtungen vorzusehen (Müller und Rottluff 2001).
- Vor und nach strömungstechnischen Engstellen im System (u. a. Platten-Wärmeübertrager) sind Anschlussstutzen für evtl. zyklisch durchzuführende Reinigungsspülungen zum Lösen von Ablagerungen vorzusehen (Müller und Rottluff 2001).
- Die Wartungskosten sollten bei der Planung mit beachtet werden, um eine regelmäßige Reinigung der Wärmeübertrager (Kreislaufspülung mit chemischen Lösungsmitteln oder z. B. plattenweise durch Wasserstrahl) sowie Wartung der Wärmepumpe sicherzustellen. Wie bei jedem Heizsystem bedarf auch eine Grubenwasseranlage der Wartung durch Fachpersonal. Konrad et al. (2010) geben ein halbjährliches Wartungsintervall an, welches jedoch z. B. bzgl. möglichen Reinigungsintervallen anlagenspezifisch durch Anlagenmonitoring angepasst werden muss.
- Behörden können Auflagen für ein Monitoring erheben, weshalb bereits bei der Planung eine langfristige automatisierte Auswertung und Speicherung der Messdaten in Betracht gezogen werden sollte.
- Besonders in Kohlebergwerken kann das Grubenwasser auch Grubengas enthalten, was einer besonderen Beachtung bedarf (Heitfeld et al. 2006).
- Wird die Grubenwasseranlage im Verbund mit anderen Systemen wie z. B. BHKW oder Gasbrennwerttechnik betrieben, muss eine Mindestbetriebszeit der Grubenwasseranlage sichergestellt werden. Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass aufgrund der z. T. komplexeren Betriebsweise das Bedienpersonal z. B. bei Störungen eher auf konventionelle und einfachere Techniken zurückgreift und die notwendigen Betriebszeiten dadurch nicht erreicht werden können. Daraus können jedoch schwerwiegende Störungen entstehen, die bei erneutem Betrieb deutlich umfangreichere Reparaturen bedürfen.
- Die Nutzer und das Bedienpersonal sind frühzeitig in das Projekt mit einzubeziehen, um die Akzeptanz der geothermischen Grubenwassernutzung zu fördern.

17.3.3 Bergrecht

Natürlich vorkommende Erdwärme ist nach dem Bundesberggesetz (BBergG) § 3 *Bergfreie und grundeigene Bodenschätze* ein bergfreier Bodenschatz, für dessen Aufsuchung (BBergG § 7) und Gewinnung (BBergG § 8) eine Erlaubnis der Bergbehörde gemäß

Tab. 17.3 Auszüge aus dem aktuellen bundesdeutschen Bergrecht BBergG aus Kremer und Neuhaus (2001)

Bergrecht	Gesetz	Beschreibung
Erteilung und Verteilung	§§10–15	<ul style="list-style-type: none"> • Gebundener Verwaltungsakt • schriftlicher Antrag an Behörden (Informationspflicht), Absprache dieser Untereinander (geologisches Landesamt, Bezirksregierung, Bergbehörde) • bei mehreren Anträgen erhält der Antragsteller mit bereits erteilten Erlaubnissen Vorrang
Versagungs-gründe	§ 11	<ul style="list-style-type: none"> • Nichtbeachtung der formalen Vorschriften • wirtschaftliche Solidität des beantragenden Unternehmens • Kein Schutz des öffentlichen Interesses
Nutzungsdauer	§ 16 Abs. 4 und 5	<ul style="list-style-type: none"> • Erlaubnis für höchstens 5 Jahre, Verlängerung um 3 Jahre • höchstens für 50 Jahre
Beginn	50–51 § 70 Abs. 1	<ul style="list-style-type: none"> • Bergrechtlicher Betriebsplan für Aufsuchung und Gewinnung • Auskunfts-/Vorlagepflicht über die Tätigkeiten
Ende	69 Abs. 2	<ul style="list-style-type: none"> • Abschlussbetriebsplan ist zu erstellen • Betriebseinstellung ohne Abschlussbetriebsplan erfolgt nach Anordnung der zuständigen Behörde • Gefahrenprüfung ist erfolgt

BBergG eingeholt werden muss (Rosner et al. 2009; Wolf et al. 2007). Eine Bewilligung oder das Bergwerkseigentum wird für die Durchführung der Gewinnung im Einzelfall entsprechend befristet (BBergG § 16 (4 und 5)) und wird nur unter Vorlage eines Betriebsplanes erteilt (BBergG § 52 ff). Eine Übersicht aus dem aktuell gültigen deutschen Bergrecht ist in Tab. 17.3 dargestellt.

Wenn für die Bereiche der Erdwärmegewinnung bereits andere Zulassungen, wie z. B. die Gewinnung von Grubengas, erteilt sind, können Interessenkonflikte auftreten (Heitfeld et al. 2006).

Konzessionen zur Aufsuchung von Erdwärme bilden auch die genehmigungsrechtliche Grundlage für die Ausführung geplanter Pilotprojekte (Rosner et al. 2009).

Bei einer möglichen Nutzung von Grubenwasser/Erdwärme werden auch andere zu beachtende Rechtsgebiete berührt. Da Grundwasser häufig den Energieträger darstellt, muss diesem z. B. unter Einbeziehung des Wasserhaushaltsgesetzes und des Landeswassergesetztes Rechnung getragen werden. Je nach Anlagenart zur geothermischen Grubenwassernutzung (offen, geschlossen, bzw. Einleitung des Grubenwassers in Gewässer) sind eventuell noch weitere Genehmigungsverfahren wie Naturschutz- und Immissionsschutzrecht zu berücksichtigen (Wolf et al. 2007). Müssen Bohrungen abgeteuft werden und fallen diese unter das Bundesberggesetz, gelten dafür zusätzlich noch länderspezifische Verordnungen, wie z. B. im Land Nordrhein-Westfalen die *Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen* (Tiefbohrverordnung – BVOT) (Gahlen 2009).

Darüber hinaus existieren weitere standortspezifische rechtliche Bestimmungen, wie z. B. die Übertragung der erteilten Aufsuchungs- und Gewinnungserlaubnis auf andere Nutzer, eine evtl. Vererbung von Nutzererlaubnissen, die Gefahrenprüfung (z. T. bundeslandspezifisch). Diese werden hier nicht weiter aufgeführt.

17.3.4 Wasserchemie

Das natürlich vorkommende Wasser enthält stets organische und anorganische Stoffe, sowohl in gelöster als auch ungelöster Form. Die Qualität und der pH-Wert sind von vielen Parametern abhängig. Der Chemismus und die Belastung von Wässern mit Mineralien hängt dabei, neben der Entstehungsart (Oberflächen-, Sicker-, Quellwasser), auch von unzähligen weiteren Faktoren, wie dem Alter des Wassers, der Zusammensetzung und Reaktivität der umgebenden/durchflossenen Gesteine, deren Löslichkeit, der Kontaktzeit, der Fließgeschwindigkeit, dem Redox-Potential (Eh-Wert), der Temperatur und Druck etc. ab. Die Löslichkeit gibt dabei die maximale Menge eines Stoffes an, die in einem Lösungsmittel (hier Wasser) als ein homogenes Gemisch (gesättigte Lösung) aufgenommen werden kann. Hierbei besteht sowohl ein großer Einfluss der Temperatur, des Druckes als auch des pH-Wertes auf die Löslichkeit (Griebler und Mösslacher 2003; Hölling und Coldewey 2013; Ramos und Falcone 2013). Letzteres ist z. B. für ausgewählte Metallhydroxid-Mineralen in Grubenwässern in Younger et al. (2002) S. 76 ff. dargestellt.

Der Chemismus des Grubenwassers hängt maßgeblich von der Lagerstätte, deren Aufbau, der Historie des Grundwasserspiegels sowie dem Anteil an in die erzmineralreichen Gesteinsschichten eindringenden Wässer ab. Allgemein werden die zutage tretenden Erzkörper durch einsickerndes Wasser und Sauerstoff stetig oxidiert, wobei u. a. viele Metalle ausgelaugt werden (Oxidationszone). In dieser Zone verbleibt u. a. Fe^{3+} -Hydroxid, weshalb der Bereich im Bergbau auch als „Eiserner Hut“ (rotbraun bis schwarz gefärbt) bezeichnet wird. Die gelösten Stoffe werden mit dem Sickerwasser bis zum Grundwasser mitgeführt und dort ausgefällt (z. B. die sulfidischen Erze des Kupfers und Silbers), weshalb dieser Bereich auch als Zementationszone bezeichnet wird. Durch die im aktiven Bergbau durchgeführten Grundwasserspiegelabsenkungen erstrecken sich diese Verwitterungsprozesse sowohl flächig als auch in der Tiefe über ein deutlich vergrößertes Gesteinsvolumen. Verstärkt werden die Verwitterungsprozesse dabei durch die bei der Sulfid- und Arsenidverwitterung entstehende Schwefelsäure als auch durch Mikroorganismen. Dies führt zu einer erhöhten Anreicherung von gelösten Verbindungen im Gruben-/Grundwasser (Evans 1992).

Somit weist das in Bergwerke eingedrungene und abgeleitete Wasser eine hohe Mineralisation, viele gelöste Stoffe (z. T. giftige Metalle) sowie einen durch chemische Reaktionen hervorgerufenen sauren oder auch alkalischen pH-Wert auf. Letzterer wird u. a. durch die Flutung von Bergwerken geprägt, indem das Grubenwasser entweder aus Oxidationsprozessen vorhandene Sulfite und Abfallprodukte (niedriger pH-Wert) oder Karbonate (Calcit, Dolomit etc.) und Silikate (Feldspat, Glimmer etc.) bzw. andere

alkalisch reagierende Mineralien (hoher pH-Wert) von den Gesteinswänden aufnimmt bzw. herauslöst (Banks et al. 2004; Ramos und Falcone 2013; Tichomirowa et al. 2010; Wolkersdorfer 2008).

Die in Wisotzky (2011) S. 36ff. u. a. für Grundwasserleiter beschriebenen Säure-Base-Reaktionen treten ebenso in Bergbauwässern mit ihren hohen Mineralisationen auf und führen dabei z. T. zu einer pH-Wert-Stabilisierung (auch pH-Wert-Pufferung genannt). Der pH-Wert befindet sich dabei im sauren oder basischen Bereich, wobei aufgrund der Pufferwirkung eine weitere pH-Wert-Absenkung bzw. -Zunahme verhindert wird. Dies wirkt vor allem bei möglichen Wasseraufbereitungsmaßnahmen hinderlich und ist daher zu berücksichtigen. Als ein Beispiel kann die Pyritverwitterung als Oxidation des gebundenen Sulfitschwefels im Pyrit (FeS_2) durch das Vorhandensein von Sauerstoff zu Sulfat/Hydrogensulfat und Wasserstoffionen in sauren Braunkohletagebaurestseen ($0 < \text{pH-Wert} < 4$) genannt werden. In diesen sauren Wässern fällt das schwer wasserlösliche Eisen(III)-Hydroxid als gelber bis rotbrauner Niederschlag (dem Ocker) aus (Balkenhol 2000; Wisotzky 2011; Wolkersdorfer 2008).

Ein zu berücksichtigender Faktor ist der mikrobiologische Einfluss, wobei z. B. chemolithoautotroph lebende Bakterien bei der Entstehung von sauren Grubenwässern eine wesentliche Rolle spielen. Diese Bakterien beschleunigen u. a. bei der Pyritverwitterung die Oxidationsgeschwindigkeit von Fe^{2+} zu Fe^{3+} um den Faktor 10^5 bis 10^6 , was zu einer verstärkten Versauerung führt. Im Verbund mit weiteren Mikroorganismen kann es zu einem ständigen Kreislauf aus Reduktion, Oxidation mit Ablagerung und Lösung in sogenannten Eisen- und Mangankreisläufen kommen. Ebenso ist die biologische als auch chemische Verockerung durch Sauerstoffeintrag (Re-Oxidation von Fe^{2+}) von z. B. aus Bergwerken an die Oberfläche austretender eisenhaltiger Wässer bekannt (Balkenhol 2000; Banks et al. 2004; Griebler und Mösslacher 2003; Wolkersdorfer 2008).

Die durch die Bergwerksentwässerung abgeleiteten sauren Grubenwässer bewirken bei der Einleitung in Flüsse z. T. einen negativen Umwelteinfluss. Die Entwässerung aus dem Freiberger Bergbaurevier trägt z. B. zu 37 % der Zink- und 7 % der Cadmiumbelastung der Elbe bei (Tichomirowa et al. 2010; Wolkersdorfer 2008; Younger et al. 2002).

Einfluss der Wasserchemie auf die Reservoirtemperatur

Für eine ökonomische geothermische Grubenwassernutzung ist vor allem die vorherrschende Gesteins- bzw. Grubenwassertemperatur relevant.

Wie allgemein bekannt, wird das oberflächennahe Erdreich/Gestein bis in 15–25 m Tiefe saisonal durch Sonneneinstrahlung, Regen und die Außentemperatur beeinflusst. Mit steigender Tiefe dominiert der geothermische Temperaturgradient (aufgrund des Wärmefluxes aus tieferen Gesteinsschichten). Hierzu können zusätzlich noch radiogene sowie geochemische Prozesse einen großen Einfluss durch Wärmeproduktion besitzen. Geochemische Prozesse können vor allem in Bergwerken und Grubenwässern auftreten, welche Minerale enthalten, die unter Zufuhr von Feuchtigkeit oder Luft reagieren. Beispielhaft nennen Banks (2012) und Younger et al. (2002) Sulfidminerale wie Pyrit und Markasit (FeS_2), Sphalerit (ZnS) und Galenit (PbS), welche häufig in Metallerz- und

Kohlebergwerken vorkommen. Durch eine Oxidation entstehen hierbei gelöste Metalle, Sulfate und Säuren, was allgemein als saurer Bergwerksabfluss (*acid mine drainage*) bezeichnet wird und eine potentielle Umweltgefährdung an vielen Bergwerksstandorten darstellt.

Für die folgenden zwei möglichen exothermen Reaktionen:



gibt Banks (2012) S. 69 f. eine Wärmefreisetzung von >1400 kJ/mol (Pyrit) bzw. >1700 kJ/mol (Sphalerit) an, was zu einer deutlichen Temperaturerhöhung sowohl des Gesteins als auch des Grubenwassers führen kann. Dies kann für geflutete Bergwerke als eine nicht zeitlich konstante Wärmequelle angesehen werden, da z. B. der Sauerstoffeintrag nach der Flutung abnimmt. Dennoch kann die resultierende Temperaturerhöhung einen wesentlichen Einfluss auf die ökonomische Bewertung haben. Andere Wärmeeinträge durch exotherme organische Zersetzungsprozesse (*Fouling*) sind möglich, spielen jedoch eine untergeordnete Rolle (Banks 2012; Wisotzky 2011).

Weiterhin können ebenso endotherme Reaktionen, wie das Lösen von Kaliumchlorid oder Natriumchlorid, zu Temperaturabsenkungen des Wassers führen, was jedoch vornehmlich bei Salzlagerstätten auftritt (Wisotzky 2011).

Charakterisierung der chemischen Bestandteile im Grubenwasser

Durch standardisierte Wasserbeprobungen (siehe u. a. Griebler und Mösslacher 2003) und Analysen können die physikalischen Parameter und die chemische Zusammensetzung des Wassers, sprich die Ionenkombination (Anionen, Kationen), ermittelt werden und zur Auswertung der hydrochemischen Eigenschaften und des Wassertyps in verschiedenen Darstellungsformen, wie Einzel- und Sammeldiagrammen oder in flächenhaften Darstellungen erfolgen. Sammeldiagramme eignen sich hierbei zum Vergleich mehrerer Analysen, um einzelne Ionenbeziehungen ableiten zu können. Eine gebräuchliche Darstellungsform für Grundwässer und deren anorganische Hauptlösungskomponenten ist das sogenannte Piper-Diagramm, bestehend aus zwei Dreieckdiagrammen und einem Vier-eckdiagramm (Raute). Hierbei werden im linken Dreieck die Kationen (Alkalien: Na^+ und K^+ , Erdalkalien: Ca^{2+} , Mg^{2+}), im rechten Dreieck die Anionen (Cl^- , SO_4^{2-} und NO_3^- , HCO_3^- und CO_3^{2-}) sortiert und in der Raute als ein gemeinsamer Punkt dargestellt, siehe Abb. 17.3. (Hölting und Coldewey 2013 S. 210 ff.).

Die in Abb. 17.3 dargestellten Ergebnisse von chemischen Wasseranalysen verschiedener Bergbauwässer in Mitteldeutschland zeigen eine unterschiedliche Mineralisation und eine hohe Diversität zwischen z. B. sulfatischem oder karbonatischem Charakter. Diese z. T. großen Unterschiede der chemischen Zusammensetzung der Grubenwässer sind, wie schon beschrieben, sehr von der Gesteinszusammensetzung und dem Bergbaustandort (abgebauten Erzen, durchteufte Schichten) abhängig. Da die mögliche Zusammensetzung und daraus resultierende Reaktionen so vielfältig sein können, wird an dieser Stelle auf

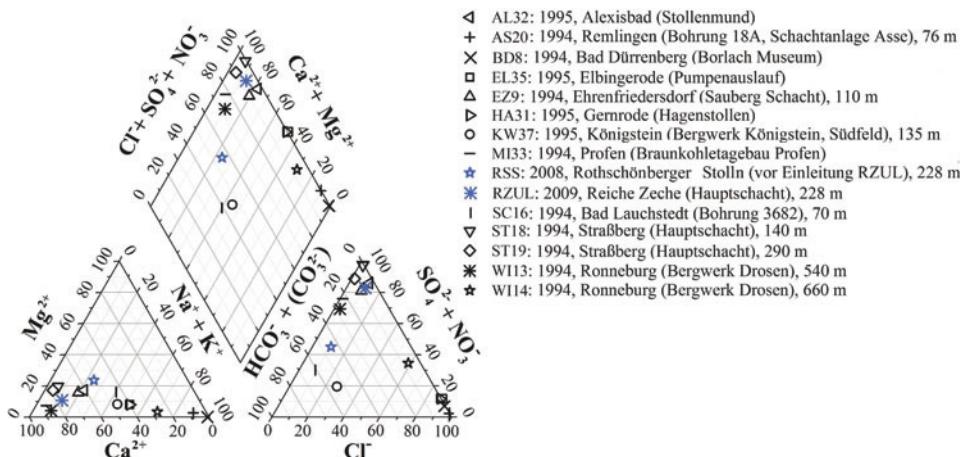


Abb. 17.3 Piper-Diagramm zu chemischen Analysen von Wasserproben aus Bergwerken in Mitteldeutschland (aus Mühlenweg et al. 1997) und für die Reiche Zeche (blaue Symbole), Freiberg (aus Konrad et al. 2010), mit Benennung: Kürzel Probenstandort, Probenjahr, Ort, Tiefe der Probennahme

weiterführende Fachliteratur z. B. von Wolkersdorfer (2008), Younger et al. (2002) und Wisotzky (2011) bzw. Analysen von Tiefenwässern in Schneider et al. (2014) verwiesen. Beispielhaft wird die chemische Wasserzusammensetzung für den Standort Freiberg in Abschn. 17.4.3.1 vorgestellt.

Zusätzlich zu dem dargestellten Piper-Diagramm, in dem nicht alle zu betrachtenden gelösten Inhaltsstoffe (z. B. $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, Al^{3+} etc.) aufgetragen sind, müssen auch weitere chemische Indikatoren wie pH-Wert und Redox-Potential für eine umfassende Bewertung betrachtet werden. Zur Darstellung der in Redox-Systemen vorherrschenden Spezies nennen Merkel und Planer-Friedrich (2008) u. a. Stabilitäts- oder Prädominanzdiagramme (auch Eh-pH- oder pE-pH-Diagramm) in denen üblicherweise das Redoxpotential (Eh) von meist in Lösung befindlichen Elementen über dem pH-Wert aufgetragen ist. Lösungsmittel ist hier wiederum häufig Wasser. Bei Unterschreitung einer vom Diagrammsteller definierten Konzentration oder Aktivität wird meist die dominierende, ausfallende Mineralseite dargestellt, was für die Bewertung und Vorhersage für Grubenwässern verwendet werden könnte. Für weitere Details hierzu wird auf Merkel und Planer-Friedrich (2008) S. 45ff verwiesen.

Einfluss der geothermischen Nutzung auf das Wasser

Für die Planung von Grubenwasseranlagen ist der Einfluss einer Temperaturänderung hinsichtlich Änderungen in der chemischen Zusammensetzung zu betrachten. Hierbei sind bei der geothermischen Grubenwassernutzung sowohl eine moderate Temperaturabsenkung bei Nutzung als Wärmequelle für Wärmepumpen bei Heizanwendungen als auch eine Temperaturerhöhung bei Kühlanwendungen möglich. In der Literatur genannte Auswirkungen bei mineralisierten Wässern sind in Tab. 17.4 zusammengestellt.

Tab. 17.4 Auswahl von Auswirkungen bei Temperaturänderung von mineralisierten Wässern. (Hellawell 1986; Konrad et al. 2010; PKG 2011)

Temperaturabsenkung	Temperaturerhöhung
Absinkende Löslichkeit der Ionen (Ausfällung – <i>scaling</i>) → sinkende Leitfähigkeit	Erhöhte Löslichkeit von Ionen → steigende elektrische Leitfähigkeit
⇒ Beeinflussung des pH-Wertes ⇔ Beeinflussung der Löslichkeit	
Zunahme von Oxidationen und Ausfällungen	→ CO ₂ -Ausgasung ⇒ z. B. Ausfallen von CaCO ₃ → Abnahme des gelösten Sauerstoffs
Absenkung der Reaktionsgeschwindigkeit chemischer Prozesse	Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit chemischer Prozesse
Verringerte Stoffwechselvorgänge der Organismen	Erhöhte Stoffwechselvorgänge von Organismen → Abbauprozesse nehmen zu → <i>fouling</i> möglich (Biofilmbildung)
Teilweise Zunahme der biologischen Verockerung (z. B. Bakteriengattung <i>Gallinella</i> 1–5 °C)	Vorteilhaft für viele biochemische Prozesse von z. B. Mikroorganismen
Untere Grenze: Eisbildung → Volumenänderung des Wassers	Abnahme der Dichte und Viskosität → Sedimentation partikulärer Substanzen

Aus vergleichbaren Untersuchungen zur Thermalwassernutzung ($t > 50^\circ\text{C}$) für Heizanwendungen ist u. a. bekannt, dass es bei der Umwälzung des warmen Wassers in offenen Kreisläufen an Feststoffoberflächen zu schwarzen schleimartigen Überzügen kommen kann. Diese ließen sich als Rückstände von sulfidreduzierenden Bakterien identifizieren. Weiterhin ist bekannt, dass Korrosion und Ablagerungen vor allem vermehrt bei Eintrag von Sauerstoff in das Wasser, z. B. bei Anlagenstillstand, stattfinden, was ebenso für Grubenwasseranlagen gilt. Bei Sauerstoffzutritt kommt es weiterhin zu Ausfällungsreaktionen wie z. B. von Eisenhydroxid, was u. a. zur Verockerung und somit zur Verstopfung von Anlagenteilen (Wärmeübertrager) führen kann und folglich zu vermeiden ist. Beispielhaft werden für Grundwässer Grenzwerte für Eisen (>0,5 mg/l) und Mangan (>0,2 mg/l) angegeben, oberhalb derer es zu unerwünschten Reaktionen kommen kann. Zur Vermeidung von Ausfällungen wird bei Thermalwasserkreisläufen hierzu meist eine Druckhaltung installiert. Zur Vermeidung von Luftzutritt sollte die Grubenwassernutzung in einem weitestgehend geschlossenen Kreislauf stattfinden (Banks et al. 2009; Konrad et al. 2010; Schneider et al. 2011; Wolkersdorfer 2008).

Für eine Simulation und Vorhersage zur Änderung des chemischen Gleichgewichts in Abhängigkeit der Temperatur verwenden verschiedene Literaturstellen u. a. die folgenden Programme: *PHREEQC*, *FactSage* und *Thermo-Calc*. (Banks et al. 2009; Höltig und Coldewey 2013; Merkel und Planer-Friedrich 2008; Wisotzky 2011; Wolkersdorfer 2008).

Banks et al. (2009) geben hierbei für die geothermische Grubenwassernutzung an, dass bei typischen geringen Temperaturänderungen von z. B. 6 K keine großen Änderungen in der maximalen Löslichkeit und folglich keine größeren Ausfällungen von z. B. Calcit

oder Eisenhydroxid zu erwarten sind. Dies ist aber unter anderem nach Ausführungen von Merkel und Planer-Friedrich (2008) zu Prädomianzdiagrammen stets zu prüfen.

17.3.5 Öffentlichkeitswirksame Darstellung

Die öffentlichkeitswirksame Außendarstellung eines Projektes ist für eine langfristige Etablierung und Akzeptanz von großer Bedeutung. Besonders die Nutzung von Grubenwässern, als nichtalltägliche Energiequelle, ist in der Bevölkerung nur wenig bekannt. Aufgrund der Zusammengehörigkeit von Grubenwasser und Bergwerk entstehen Fragen u. a. in Bezug auf Umwelteinflüsse, Schadstoffe oder Verfügbarkeit. Aus diesem Grund sollten mit Beginn der Planung das Interesse der Bevölkerung geweckt, sowie gleichzeitig geeignete Informationen bereitgestellt werden.

Zu einer öffentlichkeitswirksamen Darstellung gehören neben der Beratung und Information auch Messe- und Tagungsteilnahme sowie Vorträge, Workshops und Gespräche mit Behörden und der ansässigen Bevölkerung. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Einbeziehung lokaler Medien, die Erstellung einer Projekt-Webseite und die Präsenz in anderen sozialen Medien (Louie 2015).

Internationale Forschungsprojekte haben größtenteils einen Arbeitsschwerpunkt im Bereich Öffentlichkeitsarbeit. Im Rahmen von größeren Vorhaben z. B. zum Thema Bergbausanierung entstanden Webseiten, welche aber nur noch zum Teil aufgerufen werden können, wie z. B.:

- REVI (INTERREG II C): Revitalisierung von Städten in ehemaligen Kohlebergbauregionen
- READY (INTERREG III B) 2003–2006: Rehabilitation and Development of Mining Regions – Sanierung und Entwicklung von Bergbauregionen
- ReSOURCE 2009–2012: Exploring Post-mining Potentials in Central Europe
- VODAMIN (SAB Ziel 3) 2010–2013: Verbesserung der Wasserqualitäten bergbaubeeinflusster Gewässerkörper von Bergauffolgelandschaften in Sachsen und Tschechien (<http://www.vodamin.eu/de/>)

Ein großer Kritikpunkt liegt in der langfristigen Verfügbarkeit der Daten und der Zugänglichkeit zu Abschlussberichten. Auch werden eine Vielzahl von Webseiten nach dem Projektende nicht mehr betreut und sind folglich innerhalb kurzer Zeit nicht mehr erreichbar. Ein Ziel neuer Forschungsprojekte sollte sein, die Verfügbarkeit von Abschlussberichten und Webseiten langfristig zu gewährleisten.

Im Rahmen einer Recherche der Technischen Universität Michigan wurde z. B. für Kommunen eine Übersicht zur Nutzung von Grubenwasser zur Heizung und Kühlung am Beispiel Calumet in Michigan (USA) verfasst (Louie 2015). Jedoch wurde dieser Bericht nie international veröffentlicht und ist somit nur eingeschränkt zugänglich.

Eine der bekanntesten Grubenwasseranlagen befindet sich in der Gemeinde Heerlen in den Niederlanden. Durch eine Vielzahl von Veröffentlichungen (z. B. *minewater project 2011*; Ruijten et al. 2007; Verhoeven et al. 2014) und Presseartikeln, einer aktiv betriebenen Webseite (<http://www.mijnwater.com>) sowie Präsenz in den sozialen Medien wie Twitter, Facebook, LinkedIn oder YouTube wurde die öffentlichkeitswirksame Arbeit hier sehr gut umgesetzt. Es gibt kaum eine Anlage, welche so präsent in den digitalen Medien ist, wie die in Heerlen.

Eine interaktive Visualisierung der wichtigsten Betriebsdaten sowie die Darstellung der Anlageneffizienz mittels Arbeitszahlen konnte jedoch auf keiner Webseite von Grubenwasseranlagen recherchiert werden.

Eine solche öffentlichkeitswirksame Darstellung von Grubenwasseranlagen könnte die Vorbehalte gegenüber dieser Technologie weiter verringern. Der nachfolgende Abschnitt soll daher dazu dienen, die Informationen aus einer sehr umfangreichen Recherche zusammengefasst einer breiten Allgemeinheit zur Verfügung zu stellen.

17.4 Übersicht zur weltweiten geothermischen Grubenwassernutzung

Im Rahmen einer umfangreichen Literaturrecherche wurden sowohl Fachliteratur (z. B. Hall et al. 2011), frei verfügbare Präsentationen, Tagungsbände und Anfragen bei einzelnen aktuellen Anlagenbetreibern für die Datenzusammenstellung in diesem Abschnitt verwendet. Nachfolgend werden in Abschn. 17.4.1 zuerst aus den recherchierten Anlagen und Kenndaten die daraus abgeleiteten und zusammengefassten Ergebnisse als Übersicht vorgestellt. In Abschn. 17.4.2 werden die einzelnen Anlagendetails Tab. 17.5 und Tab. 17.6) und die zugeordneten geografischen Standorte gezeigt, bevor in Abschn. 17.4.3 auf ausgewählte Beispiele in Sachsen (Deutschland) – mit deren Historie, Details zur Anlagenkonzeption und Umsetzung sowie eventuell aufgetretenen Problemen – eingegangen wird. Aus dem recherchierten Datenbestand wurden, sofern möglich, z. T. einzelne Größen zusätzlich berechnet.

17.4.1 Entwicklung und aktueller Stand von Grubenwasseranlagen

Beginnend ist hierzu als Übersicht die weltweite Anzahl von in Betrieb genommen bzw. stillgelegten Anlagen pro Jahr in Abb. 17.4 dem historischen Rohölpreis gegenübergestellt. Aufgrund eines starken Rohöl- und folglich auch Energiepreisanstieges kam es auch zu vermehrten Planungen und zeitlich versetzten Anlageninstallationen. Hierbei ist jedoch mit dem Strompreis noch ein wesentlicher Faktor unberücksichtigt, da dieser einen großen Einfluss auf die Ökonomie der am häufigsten eingesetzten elektrisch betriebenen Wärmepumpen hat. Der Strompreis differiert wiederum zwischen den einzelnen Staaten (Bsp.: BRD 29,5 ct/kWh, Tschechische Republik 12,7 ct/kWh, Daten für 1. Halbjahr 2015; priv.

Tab. 17.5 Kenndaten der weltweit in Betrieb befindlichen geothermischen Grubenwasseranlagen

Nr.	Ort	Land	Bergwerk/Stollen	Rohstoff	Teufe in m	Typ	T_w in °C	V in m^3/h	Q_{Heiz} vor/nach WP in kW	Versorgte Objekte	Inbetr.	Quellen
1a	Freiberg	Erzgebirge, Deutschland	Rothschönberger Stolln	Silber	220	o.	14	–	600/860	Kreiskrankenhaus Freiberg	2014	Ulbricht 2013 Johnson Controls KKH FG 2014
1b	Freiberg	Erzgebirge, Deutschland	Reiche Zeche, Rothschönberger Stolln	Silber	228	o.	18; 15 (Heiz.); Kühl.)	56 (144)*	155/200 (670)*; 155 (500)*	Universitätsgebäude	2013	Grab et al. 2010 SIB 16.10.2013 Baukonzept 2015
1c	Freiberg	Erzgebirge, Deutschland	Alter Fürstenstolln	–	55	o.	10	22	96/130 120/– (Kühl.)	Schloss Freudenstein	2009	Lagerpusch 2010 Hall et al. 2011 Batchelor et al. 2015
2	Marienberg	Erzgebirge, Deutschland	Wismut-Schacht 302	Uran	144	o.	12	120	700–830/ 800–1700	Freizeitbad	2007	Wieber und Ofner 2008 Lagerpusch 2010)
3	Pobershau	Erzgebirge, Deutschland	Waldfisch-Stollen	Zinn	12	g.	–	–	–/15	Zweifamilienhaus	2008	Lagerpusch 2010 MA 2015
4a	Ehrenfriedersdorf	Erzgebirge, Deutschland	Nord-West-Feld	Zinn	100	o.	10	–	65/95 66/– (Kühl.)	Mittelschule	1994	Wieber und Ofner 2008 Debes 2012b Lagerpusch 2010
4b	Ehrenfriedersdorf	Erzgebirge, Deutschland	Zinngrube, Revier Sauberg	Zinn	110	o.	11	22	82/120	Besucherbergwerk	1998	Raube 2012 Wieber und Ofner 2008 Wieber und Ofner 2008 Kissing 2009 Lagerpusch 2010
5a	Bad Schlema	Erzgebirge, Deutschland	Grube Schlema-Alberoda	Uran	90	o.	11	14	100/200	Schule	2013	Wismut 2012 Debes 2012b Vater 2012 Ramos et al. 2015
5b	Bad Schlema	Erzgebirge, Deutschland	Grube Schlema-Alberoda	Uran	102	g.	21	–	–/–	Einfamilienhaus	2007	Debes 2012a LfUG 2012 Vater 2007 Vater 2012

Tab. 17.5 (Fortsetzung)

Nr.	Ort	Land	Bergwerk/Stollen	Rohstoff	Teufe in m	Typ	T_W in °C	V in m^3/h	Q_{Heiz} vor/nach WP in kW	Versorgte Objekte	Inbetr.	Quellen
6	Marl	Ruhrgebiet, Deutschland	Zeche Auguste Victoria	Steinkohle	700	g.	16-21	–	70/–	4 Familienhäuser	2010	RAG 2009 Bracke und Bussmann 2015 Lintker 2014 Louie 2015 Thien 2015
7	Bochum	Ruhrgebiet, Deutschland	Zeche Robert Müser	Steinkohle	570	o.	20	40	–/690	Feuerwache, 2 Schulen	2012	Raube 2012 Bracke und Bussmann 2015 Willmes und Bücker 2014
8a	Essen-Katernberg	Ruhrgebiet, Deutschland	Zeche Zollverein	Steinkohle	950	o.	30	522	790/–	Museum	2000	Wieber und Ofner 2008 Debes 2012b RAG 2009 Thien 2015
8b	Essen-Heisingen	Ruhrgebiet, Deutschland	Zeche Heinrich	Steinkohle	335–480	o.	22	20	354/–	Seniorenheim	1984	Wieber und Ofner 2008 Wieber und Ofner 2008 RAG 2009 NRW 2004 Wolf et al. 2007
9	Landsweiler-Reden	Deutschland	–	Kohle	800	o.	32	50	450/–	Gebäude des Garten Reden	2012	Reden 2008 RKN 2012 Frisch 2012 TKLN 2014
10	Wettelrode	Mansfeld-Südharz, Deutschland	Röhrig Schacht, Segen-Gottes-Stollen	Kupfer	300	o.	13	90–150	32/47	Bergbaumuseum	2013	Koch 2012 Ramos et al. 2015 Hoffmann et al. 2014
24	Zagorje ob Savi	Slowenien	–	Braunkohle	450	o.	28	3	–/–	Forschungseinheit OLEA	ca. 2012	Op't Veld 2012 Vidrih et al. 2011

Tab. 17.5 (Fortsetzung)

Nr.	Ort	Land	Bergwerk/Stollen	Rohstoff	Teufe in m	Typ	Tw in °C	V in m ³ /h	Q _{Heiz} vor/nach WP in kW	Versorgte Objekte	Inbetr.	Quellen
25	Markham	Wales, Großbritannien	Markham Colliery Shaft 3	Kohle	235	o.	15	15–26	34–58/54–78	Bürogebäude Alkane Energy	ca. 2015	Athresh et al. 2015
26	Crynant	Wales, Großbritannien	Süd-Wales Kohlerevier	Kohle	65	–	12	7	–/35	Farmgebäude	2014	Farr und Tucker 2015
27	Dawdon, County Durham	England, Großbritannien	„East of Wear“ Bergbaugebiet	Kohle	–	o.	19	<100	–/12	Bürogebäude	2011	Preene und Younger 2014 Bailey et al. 2013
28	St Day, Cornwall	England, Großbritannien	Mount Wellington Mine	Zinn	–	g.	–	–	–/20	Fabrik- und Bürogebäude	2008	Preene und Younger 2014
29	Shuttlestone, Glasgow	Schottland, Großbritannien	–	Kohle	100	o.	12	10,8	–/65	16 Wohnhäuser	1999	Hassani et al. 2011 Wieber und Ofner 2008 Banks et al. 2008 Preene und Younger 2014
30	Lumphinnans	Schottland, Großbritannien	–	Kohle	170	o.	14,5	–	–/65	18 Wohnhäuser	2001	Wieber und Ofner 2008 Banks et al. 2003 Preene und Younger 2014
31	Norberg	Schweden	Mimer-Mine	Eisen	300	o.	4–7	–	–/180	mehrere Gebäude	1985	Wolf et al. 2007 Arkay 1993
32	Ljusnarsberg	Schweden	–	Kupfer	310	–	2–13	–	–/–	mehrere Gebäude	–	Arkay 1993
33	Nowoschachtinsk	Russland	–	Steinkohle	50–150	o.	12–13	960	7800/10900	Wohnhäuser, öffl. Gebäude	2007–2009	JISC 2007
34	Heerlen	Niederlande	Oranje Nassau	Kohle	700	o.	28 (Heiz.)	<120	–/–	Einkaufszentrum, Büros	2013	Jones et al. 2014 Verhoeven et al. 2013
					250		16 (Kühl.)	<230	–/–			

Tab. 17.5 (Fortsetzung)

Nr.	Ort	Land	Bergwerk/Stollen	Rohstoff	Teufe in m	Typ	T_W in °C	V in m^3/h	Q_{Heiz} vor/nach WP in kW	Versorgte Objekte	Inbetr.	Quellen
35	Pribram	Böhmen, Tschechien	Prokop-Schacht	Uran	–	o.	28	36	420/500	Schule, Verwal- tungsgebäude	1989	Myslil und Frydrych 2005 Wolf et al. 2007
36	Marienbad	Böhmen, Tschechien	Hachov-Plana	Uran	–	–	ca. 20	–	–/550	Bergwerks- gebäude	1989	Wolf et al. 2007
37	Novaky- Laskar	Slowakei	Bohrung S1-NB-II	Braunkohle	1851	o.	58	50	2733/–	Bergwerk- belüftung	2001	Halmo 2010
54	Park Hills	Missouri, USA	–	Blei	122	o.	14	16,9	–/113 –/– (Kühl.)	Verwaltungs- gebäude	1995	Wieber und Ofner 2008 GeoExchange 2002 Hall et al. 2011
55	Scranton	Pennsylvania, USA	Marvine Mine Pool	Steinkohle	122	o.	14	–	–/– (Kühl.)	Universitäts- gebäude	2010	Korb 2012
56	Kingston	Pennsylvania, USA	–	Steinkohle	–	o.	16	20,4	130/–	Freizeitzentrum	1981	Wikipedia 2012a Korb 2012
57	Butte	Montana USA	Orphan Boy Mine	Gold, Silber, Kupfer	245	g.	20–27 24–35	18–20	108/147 100/120 (Kühl.)	Universitäts- gebäude	ca. 2014	Wikipedia 2012b Thornton 2013 ORNL 12. 2014
58	Calumet	Michigan, USA	–	Kupfer	90	o.	13–18	20	129/–	Keweenaw Research Center	–	Louie 2015
59	Springhill	Nova Scotia, Kanada	–	Kohle	140	o.	18	14,4	111/– 16,8	Fabrikgebäude, Restaurant	1989	Wieber und Ofner 2008 Jessop et al. 1995 Raymond und Therrien 2008 Banks et al. 2003 Herteis 2015

* – geplante Endausbaustufe, T_W – Grubenwassertemperatur, Q – Volumenstrom, P_{Heiz} – Heizleistung, WP – Wärmepumpe, Inbetr. – Inbetriebnahme, o. – offen, g. – geschlossen

Tab. 17.6 Kenndaten der weltweit geplanten, im Bau befindlichen oder stillgelegten geothermischen Grubenwasseranlagen

Nr.	Ort	Land	Bergwerk/ Stollen	Rohstoff	Teufe in m	Typ	T_W in °C	V in m³/h	Q_{Heiz} vor/nach WP in kW	Versorgte Objekte	Status	Quellen
11	Zwickau	Erzgebirge, Deutschland	–	Steinkohle	625	o.	24	30	500 / 600	Universitäts- gebäude	Probe-betrieb	Sunbeam 2013 Röder 2012 Röder 2015
12	Bad Schlema	Erzgebirge, Deutschland	Grube Schlema- Alberoda	Uran	–	o.	27		2400/–	Gewerbe, Wohnhäuser	Studie	Vater 2012
13	Aue	Erzgebirge, Deutschland	Schacht 383	Kupfer	–	o.	20–25	100	1000/–	Industriegebiet	Studie (storn.)	ReSource 2011
14	Friedeburg, Hettstedt- Burgörner	Mansfeld- Südharz, Deutschland	Schlüssel Stollen	Kupfer	79–90	o.	8–12	1.200	1400/–	Industriegebiet	Studie	Hoffman und Joppich 2012 Lau 2012
15	Wiederstedt	Mansfeld- Südharz, Deutschland	Mundlochstollen Wiederstedt	Kupfer	<5	o.	10–12	120	–/–	Novalisschloss	In Planung	Lau 2012 ncn KG - 2012 MK 2012
16	Bottrop	Ruhrgebiet, Deutschland	Prosper Haniel	Steinkohle	>1200	g.	25–30		500/–	Wohn- und Gewerbegebiete	Num. Studie	Bracke und Bussmann 2015 Bracke und Bussmann 2015
17	Hamm (Sieg)	Siegerland- Wied, Deutschland	Grube Huth	Eisen	465	–	10	12	69/–	Industrie-, Verwaltungs- gebäude	Studie	Wieber 2010
18	Seelbach bei Hamm	Siegerland- Wied, Deutschland	Grube Kupferner Kessel	Eisen	–	–	10	13	78/–	Waldschwimm- bad	Studie	Wieber 2010
19	Bitzen	Siegerland- Wied, Deutschland	Grube St. Andreas	Eisen	730	–	13	11	100/–	Wohnhäuser	Studie	Wieber 2010
20	Pracht- Wickhausen	Siegerland- Wied, Deutschland	Grube Hohe Grete	Eisen	430	–	10	6	36/–	–	Studie	Wieber 2010

Tab. 17.6 (Fortsetzung)

Nr.	Ort	Land	Bergwerk/ Stollen	Rohstoff	Teufe in m	Typ	T_W in °C	V in m³/h	Q_{Heiz} vor/nach WP in kW	Versorgte Objekte	Status	Quellen
21	Breitscheid	Siegerland- Wied, Deutschland	Grube Alte Hoff- nung/Tränke	Eisen	300	–	10	15	87/–	Firmengebäude	Studie	Wieber 2010
22	Willroth	Siegerland- Wied, Deutschland	Grube Georg, Schacht 2	Eisen	850	o.	17–22	194	900/1200	Gewerbegebiet	Studie	Münch 2009 Wieber 2010 Münch 2010
23									441	5100/– (Kühl.)		
23	Alsdorf	Aachener Revier, Deutschland	Eduard Schacht	Steinkohle	860	g.	22–26	–	–/420	Wohnpark, Energeticron	In Bau	Stüber 2012 Clauser et al. 2005 GrEEN 2015 Schetelig et al. 2005
38	Handlova	Slowakei	Alter Stollen	Braunkohle	–	o.	18	216	–/2840	Wohngebiet	Studie	Halmo 2010
39	Hrastnik, Trbovlje	Slowenien	Trbovlje- Hrastnik-Mine	Braunkohle	40	o.	14	41	–/–	Bürogebäude	Studie (storn.)	Butolen 2010
40a	Zagorje ob Savi	Slowenien	Bore KT-1/97	Braunkohle	425	–	30-32	36	–/–	Schwimm-, Sporthalle	Studie	Butolen 2010
40b	Zagorje ob Savi	Slowenien	Bore FK-1/97	Braunkohle	180	–	13	40–43	–/–	–	Studie	Butolen 2010
41	Mieres, Asturien	Spanien	–	Kohle	362	o.	17-23	23508	137.000/ 160.000	Universitäts- gebäude	Studie	Loredo et al. 2011 Ordonez et al. 2010 Jardon 2013
42	Dolni Rychnov	Tschechien	Anezka, Bohrung HDR1	Braunkohle	24	o.	10	1	11/–	Rathaus, Kindergarten, Seniorenheim	Studie	ENERGONPLAN s.r.o. 2011
43	Czeladz	Polen	Saturn Mine, Schacht Pawel	Kohle	188	o.	12-14	1440	–/–	Historisches Bergwerk	Studie	Op't Veld 2012 Malolepszy et al. 2005 Vidrik et al. 2011

Tab. 17.6 (Fortsetzung)

Nr.	Ort	Land	Bergwerk/ Stollen	Rohstoff	Teufe in m	Typ	T_W in °C	V in m³/h	Q_{Heiz} vor/nach WP in kW	Versorgte Objekte	Status	Quellen
44	Nowa Ruda	Polen	–	Kohle	890	o.	23	72	419/1600	–	Studie	Malolepszy 2003
45	Burgas	Bulgarien	Cherno More Mine	Kohle	–	–	16	–	–/70-80	Fabrik	Studie	Op't Veld 2012 Remining Lowex 2012 Vidrih et al. 2011
46	Recsk	Ungarn	–	Kupfer	1160	o.	29	72	–/2,5	Bäder, Hotels	Studie	Hall et al. 2011 Dillenardt und Kranz 2010 Toth und Bobok 2007
47	Gardanne	Frankreich	Morandat Mine	Kohle	1109	o.	25	–	–/–	–	In Planung	Op't Veld 2012 brgm 2014
48	Freyming- Merlebach	Frankreich	Freyming- Merlebach-Mine	Kohle	1250	o.	52	–	–/–	–	Studie	minewater project 2011
49	Kongsberg	Norwegen	Kings Mine	Silber	33	g.	16	–	12/–	Unterirdischer Festsaal	Studie	Banks et al. 2003 Preeue und Younger 2014 Banks et al. 2004
50	Folldal	Norwegen	Folldal Mine	Kupfer, Zink, Schwefel	600	g.	6	–	13,4/18	Museum	Still. (1998– 2008)	Hall et al. 2011 Banks et al. 2003 Ramos et al. 2015
51	Midlothian	Schottland, Großbritan- nien	Monktonhall Colliery	Kohle	900	o.	13	108	1150/1500	–	Still	Banks et al. 2003 minewater project 2011
52	Mossend, North Lanarkshire	Schottland, Großbritan- nien	–	Kohle	–	o.	–	–	–	Beheizung eines Containers	Still. (1992–n/a)	Banks et al. 2009

Tab. 17.6 (Fortsetzung)

Nr.	Ort	Land	Bergwerk/ Stollen	Rohstoff	Teufe in m	Typ	T_W in °C	V in m^3/h	Q_{Heiz} vor/nach WP in kW	Versorgte Objekte	Status	Quellen
53	Fohnsdorf	Österreich	Kohlenmulde	Kohle	750	o.	30	–	–/900	180 Niedrig- energiehäuser	Studie	Bieg et al. 2013
60	Britannia Beach	British Columbia, Kanada	Britannia Mine	Kupfer	1250	o.	15	600	960–4000/ 1200– 5000	–	Studie	Hall et al. 2011 Grasby et al. 2012
61	City of Yellowknife	North West Territories, Kanada	Con Mine, Robertson Schacht	Gold	400	o.	35	21	240/300	–	Studie (storn.)	Ghomshei 2007 Anselmi 2014
62	Bruce Mines	Ontario, Kanada	–	Kupfer	103	o.	8	14	–/–	Treibhäuser, Gebäude	Studie	Jarvie-Eggart und Michelle 2015
63	Springfield	Illinois, USA	Panther Creek Mine #2	Kohle	–	–	–	18	–/–	National Guard Headquarter	Studie	IDoMA 04.15
64	Timmins	Ontario, Kanada	MacIntyre und Hollinger Mine	Gold	250	o.	12–13	–	–/–	Arena, Krankenhaus	Studie (storn.)	Hall et al. 2011
65a	Kingston	Pennsylvania, USA	–	Steinkohle	87	o.	13	–	–/–	Freizeitzentrum	Still. (1979– 1999)	Korb 2012
65b	Kingston	Pennsylvania, USA	–	Steinkohle	–	o.	–	–	–/–	Medizinisches Zentrum	Still. (1980er– 2000er)	Korb 2012
66	Carbondale	Pennsylvania, USA	–	–	–	–	–	–	–/–	–	Still. (1980er– 1990er)	Korb 2012
67	Pittsburgh	Pennsylvania, USA	–	Kohle		o.	14	23	–/–	Kirche	Außer Betrieb	Korb 2012 Ove 2008 Burtner et al. 2009
68	Murdochville	Quebec, Kanada	Gaspe Mine, Schacht P1100	Kupfer	670	o.	7	177	765/1020	Gewerbegebiet	(Num.) Studie	Raymond und Therrien 2008 Raymond und Therrien 2008 Raymond und Therrien 2014

T_W – Grubenwassertemperatur, Q – Volumenstrom, P_{Heiz} – Heizleistung, WP – Wärmepumpe, storn. – storniert, num. – numerisch, still. – stillgelegt, o. – offen, g. – geschlossen

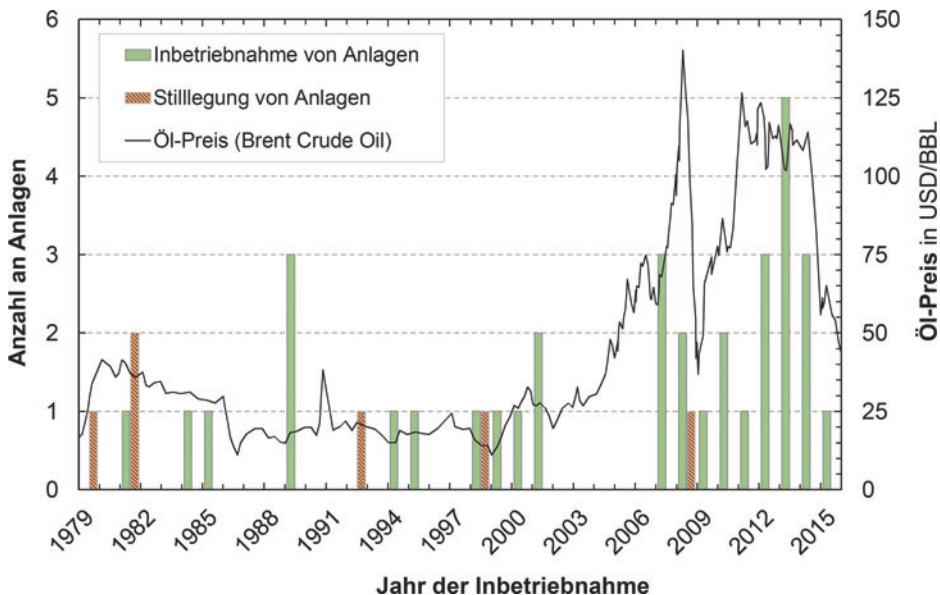


Abb. 17.4 Zeitliche Entwicklung von Errichtung/Inbetriebnahme bzw. Stilllegung von Grubenwasseranlagen weltweit im Vergleich zum Öl-Preis. (Datenquelle Öl-Preis: tradingeconomics.com)

Haushalte bis 5000 kWh/Jahr, Statistisches Bundesamt – Destatis 24.März.2016), weshalb hier auf eine entsprechende Darstellung verzichtet wird.

Aus der Datenabstraktion der umfangreichen Recherche in Abb. 17.5 geht hervor, dass eine geothermische Grubenwassernutzung ehemaliger Bergwerke – sowohl in umgesetzten Anlagen als auch mit Machbarkeitsstudien – im europäischen und weltweiten Vergleich bisher besonders in Deutschland forciert wurde, vgl. auch Tab. 17.5 und 17.6. Hierbei ist immer die existierende Wärme- und Kälteabnehmerstruktur sowie die Bergwerksnähe relevant, welche besonders häufig in Deutschland infolge einer hohen

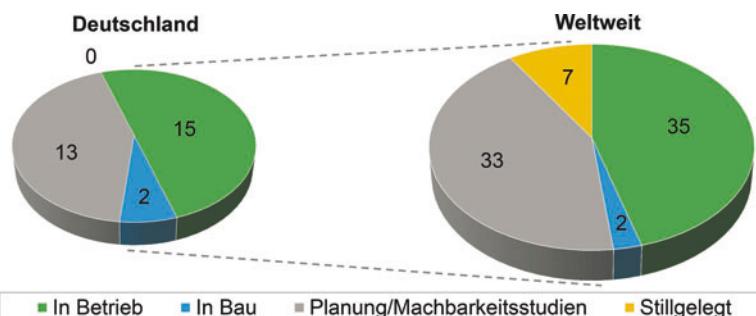


Abb. 17.5 Übersicht der betriebenen, geplanten (bzw. in Bau befindlichen) und stillgelegten geothermischen Anlagen mit Grubenwassernutzung weltweit und in Deutschland, Stand 12.2015

Besiedlungsdichte gegeben ist. Es sei hierzu erwähnt, dass nationale Studien von Ländern außer Deutschland selten veröffentlicht und demzufolge schwierig recherchierbar sind.

Die Anzahl der vorliegenden Studien zeigt, dass bei zukünftig evtl. weiter steigenden Energiepreisen mit einem weltweiten Ausbau der Grubenwassernutzung gerechnet werden kann. Die mit 35 geringe Anzahl an recherchierten weltweit in Betrieb befindlichen Anlagen ist auf verschiedene Ursachen und differenzierte Hemmnisse zurückzuführen, vgl. [Abschn. 17.2.2](#).

Bei Betrachtung der Leistungsbereiche sowohl installierter als auch geplanter möglicher Anlagen ([Abb. 17.6](#)) ist deutlich eine Konzentration von Anlagen im kleinen Leistungsbereich bis max. 200 kW erkennbar, was vorwiegend durch die derzeitige Abnehmerstruktur mit überwiegend Einzelkunden erklärbar erscheint. Größere Leistungsbereiche bedürfen einerseits einer breiteren Abnehmerstruktur und folglich eines Wärme- bzw. Kältenetzes, welches mit weiteren Investitionskosten verbunden ist. Andererseits wären Großabnehmer, wie Industrikunden, denkbar, wobei jedoch die Standortnähe und der Wärmepreis wesentliche Entscheidungskriterien darstellen. Die recherchierten Machbarkeitsstudien und Planungen zeigen aber auch hier einen Trend zu größeren Anlagenleistungen auf.

Einzig die Kühlung mittels Grubenwasser erscheint derzeit noch deutlich unterrepräsentiert, obwohl diese gegenüber der Wärmebereitstellung keine Wärmepumpe und folglich weniger Installations- und Betriebskosten (Wartung, Strom) aufweist.

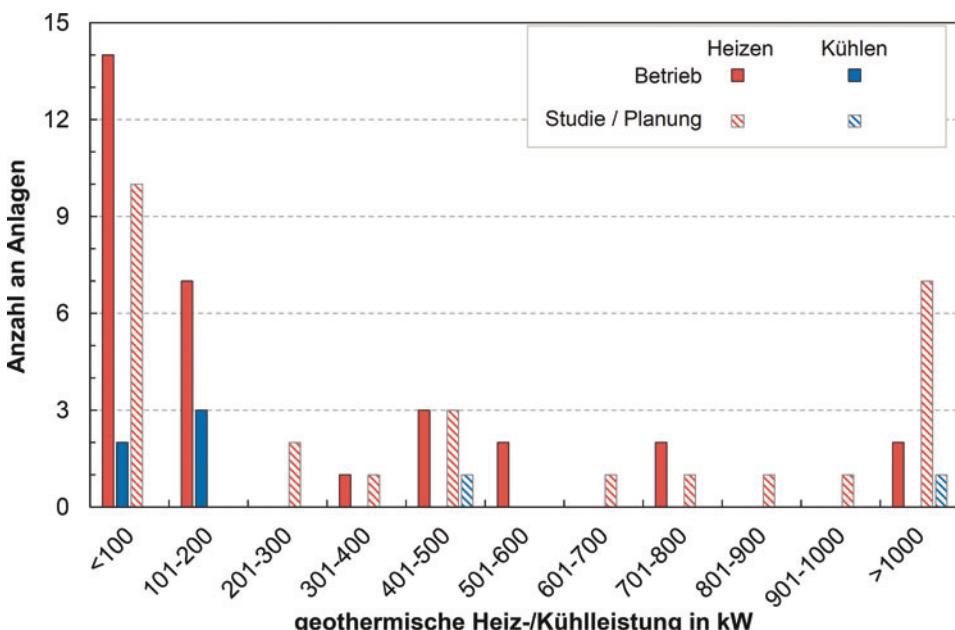


Abb. 17.6 Recherchierte und berechnete geothermische Heiz- und Kühlleistung der Anlagen in Betrieb sowie der Studien und geplanten neuen Anlagen

Die kumulierte Heiz- und Kühlleistung aller weltweit in Betrieb befindlicher Anlagen beläuft sich dabei auf >22,5 MW (heizen, nach der Wärmepumpe) sowie >0,6 MW (kühlen). Die Problematik bei dieser Datenzusammenstellung sind die z. T. unvollständigen Angaben von bereits realisierten Projekten.

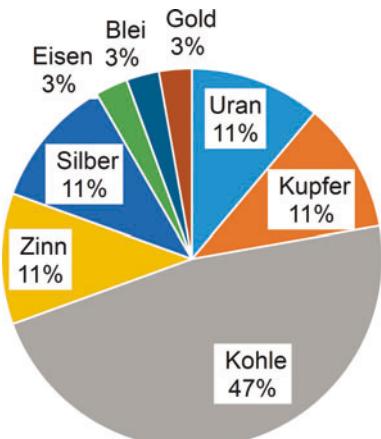
Die geothermische Nachnutzung von Grubenwässern aus dem Altbergbau kann ebenso hinsichtlich der ursprünglich abgebauten Erze und Mineralien unterschieden werden. Aus Abb. 17.7 ist u. a. eine überproportional gehäufte Nachnutzung von gefluteten Kohlegruben ersichtlich, was einerseits mit der großen Anzahl und andererseits mit den dabei z. T. großen Tiefen dieser Bergwerke und somit erhöhten Wassertemperaturen korrespondiert. Aufgrund der hier aufgelisteten 35 Anlagen weist diese Zusammenstellung gegenüber einer Studie von Loredo et al. (2016) (mit 28 Grubenwasseranlagen) eine geringfügige Verschiebung der ursprünglich abgebauten Erze auf.

Aus dieser Darstellung können teilweise evtl. häufig auftretende Probleme aufgrund des Wasserchemismus gefolgt und auf andere zukünftige Standorte übertragen werden.

In Abb. 17.8 und 17.9 sind die recherchierten Anlagen mit den aus Tab. 17.5 und 17.6 zugewiesenen Nummerierungen entsprechend ihres Betriebsstatus eingetragen. Es sei hierzu angemerkt, dass für die Kontinente Südamerika, Afrika, Asien und Australien keine Anlagen recherchiert werden konnten. Es ist aber nicht auszuschließen, dass u. a. in Südamerika Studien zur Nachnutzung von Altbergbau bis hin zu einer Umsetzung durchgeführt wurden.

Nachfolgend sind die geplanten und realisierten Grubenwasseranlagen in Deutschland und Europa in Abb. 17.8 dargestellt. Für Europa ist eine Konzentration der Anlagen vor allem auf Mitteleuropa und Großbritannien ersichtlich, was u. a. mit den Erzlagerstätten und den jeweiligen gefluteten alten Abbaugebieten sowie der heutzutage vorherrschenden Besiedelungsdichte (Abnehmerstruktur) zu erklären ist. Für Süd- und Osteuropa konnten Studien zu potentiellen Standorten recherchiert werden, jedoch sind dort andere Faktoren, wie eine unzureichende Abnehmerstruktur bzw. fehlende Investoren und finanzielle Unterstützungen, als Hemmnisse für eine Realisierung vorhanden.

Abb. 17.7 Vorwiegend abgebaute Rohstoffe in den aktuell 35 gefluteten Bergwerken mit geothermischer Grubenwassernutzung



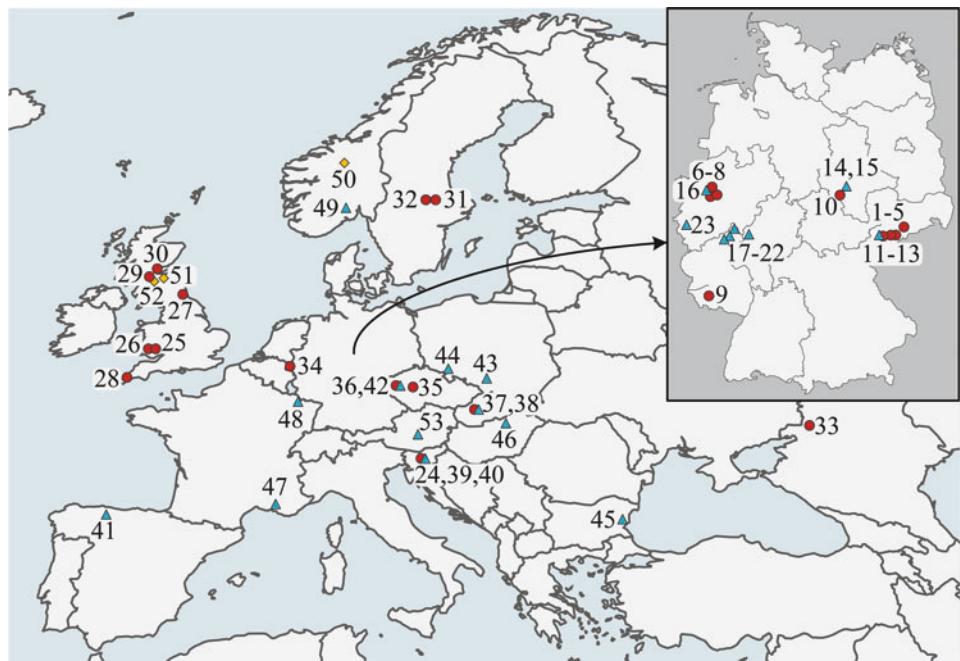


Abb. 17.8 Übersicht der Grubenwasseranlagen in Deutschland und Europa (rot: Anlage ist in Betrieb; gelb: Anlage wurde nach Betrieb stillgelegt; blau: Bau oder Planung einer Anlage, Machbarkeitsstudie) Nummern wie Tab. 17.5 und 17.6

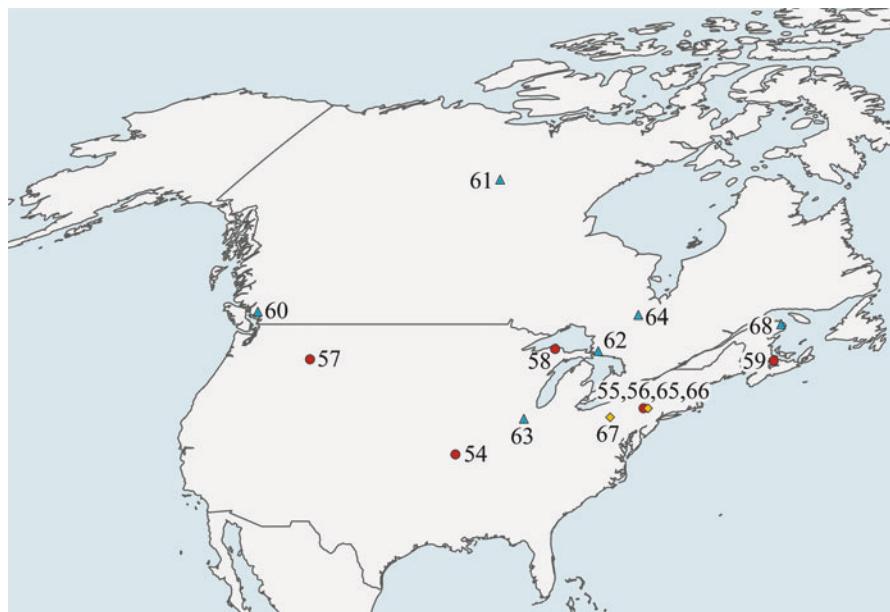


Abb. 17.9 Übersicht der Grubenwasseranlagen in Nordamerika (rot: Anlage ist in Betrieb; gelb: Anlage wurde nach Betrieb stillgelegt; blau: Bau oder Planung einer Anlage, Machbarkeitsstudie) Nummern wie Tab. 17.5 und 17.6

In Deutschland sind die ehemaligen Bergbauregionen in Ost-, Mittel- und Westdeutschland mit einer vergleichsweise großen Zahl von realisierten Grubenwasseranlagen vertreten. Vor allem der Bereich des Erzgebirges (Ostdeutschland) ist aufgrund der historisch bedingten Schließungen und Flutungen alter Metallerz-Bergbaue nach 1990 mit vielen Anlagenbeispielen vertreten. Im Ruhrgebiet und in südlich gelegenen Bereichen (Westdeutschland) existieren ebenfalls vereinzelt Anlagen, wobei nach der sukzessiven Schließung des Steinkohlebergbaus und der nachfolgenden Flutung ebenso große Potentiale vorhanden sind, was an den gehäuften Studien Nr. 16–23 in Abb. 17.8 deutlich wird.

Allgemein ist davon auszugehen, dass ein weitaus größeres Potential vorhanden ist, als es die derzeitige Nutzung widerspiegelt. Diese Diskrepanz ist vor allem auf die derzeitigen Energiekosten (vgl. Abb. 17.4) zurückzuführen und könnte sich zukünftig bei sich ändernden Marktbedingungen auch positiv auf die Anlagenanzahl der geothermischen Grubenwassernutzung auswirken.

In Abb. 17.9 sind die geplanten und realisierten Grubenwasseranlagen in Nordamerika mit den zugewiesenen Nummerierungen aus Tab. 17.5 und 17.6 eingetragen. Darin hebt sich vor allem der östliche Teil mit einer großen Anlagen- und Studiendichte gegenüber dem restlichen Kontinent ab.

Die erste in der Literatur u. a. von Jessop et al. (1995) auch als Pionierarbeit umfangreicher beschriebene Anlage befindet sich in Springhill, Kanada. Weiterhin konnten für Kanada vor allem wissenschaftliche Artikel recherchiert werden, welche umfangreiche Potentialstudien zu gefluteten Bergwerken und Einschätzungen zu Wärme- bzw. Kältenutzern für Kanada ausweisen. Beispielhaft seien hier Grasby et al. (2012) bzw. Watzlaf und Ackman (2006) genannt, welche über 2200 geflutete Bergwerke mit einem theoretischen Gesamtwärmepotential von 18,6 TJ betrachteten.

Das Potential erscheint somit, wegen der zahlreichen gefluteten Bergwerken, sehr groß zu sein. Für Nordamerika gelten dazu dieselben Hemmnisse wie für andere Standorte weltweit, wobei hier vor allem die z. T. geringe Besiedlungsdichte ein wesentliches Hemmnis darstellen könnte. Beim Vergleich des wichtigen Betriebskostenfaktors Strom kann für Kanada im Jahr 2014 ein gegenüber Deutschland um ca. 58 % geringerer Preis genannt werden (Statista 2016), welcher sich maßgeblich auf die Wirtschaftlichkeit einer Grubenwasseranlage mit Wärmepumpen auswirkt.

17.4.2 Ausgewählte Beispiele

Von den derzeit recherchierbaren weltweit betriebenen Anlagen zählen die Anlagen in Springhill, Nova Scotia (Kanada, Banks et al. 2004; Jessop et al. 1995), Heerlen (Niederlande, Roijen et al. 2007; Roijen 2011), Lumphinnans (Großbritannien, Banks et al. 2004; Watzlaf und Ackman 2006), Parkhill (USA, Watzlaf und Ackman 2006), Folldal und Kongsberg (Norwegen, Banks et al. 2004), Zeche Heinrich, Marienberg (Deutschland, Matthes und Schreyer 2007b, Preene und Younger 2014), zu den am umfangreichsten beschriebenen geothermischen Grubenwasseranlagen. Nachfolgend werden

mit der „Reichen Zeche“ (Freiberg) und „Ehrenfriedersdorf“ zwei Standorte in Sachsen ausführlich betrachtet.

17.4.2.1 Reiche Zeche in Freiberg

Im Freiberger Revier mit seinen Polysulffilterzen wurde in den Jahren 1168 bis 1915 vorrangig Silber, aber auch Kupfer, Blei, Arsen und später Zink und Pyrit (FeS_2) abgebaut (Tichomirowa et al. 2010). Am Standort Freiberg wurde dazu u. a. der Schacht *Reiche Zeche* bis auf 724 m (-263 m NHN) abgeteuft (Konrad et al. 2010). Zwischen 1968 und 1969 wurde der Bergbau im Freiberger Revier endgültig eingestellt und anschließend wurden die Gruben unterhalb des künstlich angelegten Entwässerungssystems mit dem Hauptentwässerungsstollen *Rothschönberger Stolln* (Bauzeit: 1844–1890, Länge des Haupttraktes: 28,9 km) mit einem Volumen von ca. 2,6 Mio. m^3 geflutet. Folgende weitere Entwässerungsstollen von unterschiedlicher Tiefe werden weiterhin zur Wasserabfuhr verwendet: Hauptstollen Umbruch (1822–1850, 3,6 km), Alter Tiefer Fürstenstollen (1384–19. Jh., 10 km), Verträglicher Gesellschafts Stolln (1801–1810, 2,3 km) (Huber 1990; Tichomirowa et al. 2010).

Der prinzipielle Aufbau des Schachtsystems Reiche Zeche ist mit den beiden Entwässerungsstollen Rothschönberger Stolln (RSS) und Hauptstollen Umbruch (HU) in Abb. 17.10 dargestellt. Aus den tieferen gefluteten Grubenbauen steigt in der Hauptschachtröhre der Reichen Zeche artesisch warmes Wasser auf und wird an einem Überlauf (RZUL) in den Rothschönberger Stolln eingeleitet.

Die durchschnittliche Wassertemperatur und -menge des Entwässerungsstollens Rothschönberger Stolln (RSS) ist in Tab. 17.7 angegeben. Das im Schacht Reiche Zeche aufsteigende Wasser zeigte nach Baacke (2000) innerhalb von 15 Jahren eine Temperaturabsenkung um ca. 5 K auf. Dies wird einerseits mit absinkenden Kaltwasserfronten (Verdrängung des warmen Wassers) und andererseits durch Erreichen eines chemischen Gleichgewichtszustandes mit Rückgang an exothermischen chemischen Reaktionen in den gefluteten tiefen Grubenabschnitten erklärt. Ein weiteres stetiges Absinken der Wasseraustrittstemperatur ist nach Modellrechnungen von Baacke (2000) nicht zu erwarten (Baacke 2000; Konrad et al. 2010).

Aktuelle Nachnutzung der Gruben am Standort Freiberg

Am Standort Reiche Zeche wurde nach der Flutung des Freiberger Reviers eine Weiternutzung als Forschungs- und Besucherbergwerk angestrebt, was aufgrund des künstlich angelegten Entwässerungssystems ohne Pumpen möglich ist. Somit sind große Bereiche geflutet, jedoch auch oberflächennähere Stollensysteme nutzbar. Daraus wurden die zwei Nachnutzungsarten umgesetzt:

- Nutzung der Grubenluft
- Nutzung des Grubenwassers (2 Anlagen).

Erstere stellt mit der Gewinnung von „Rohluft“ aus einem nicht gefluteten Bergbaustollen unter Tage für das Kreiskrankenhaus Freiberg vermutlich eine einzigartige Nutzungsvariante dar. Die gewonnene keim-, staub- und pollenfreie, feuchte Luft wird dabei zur

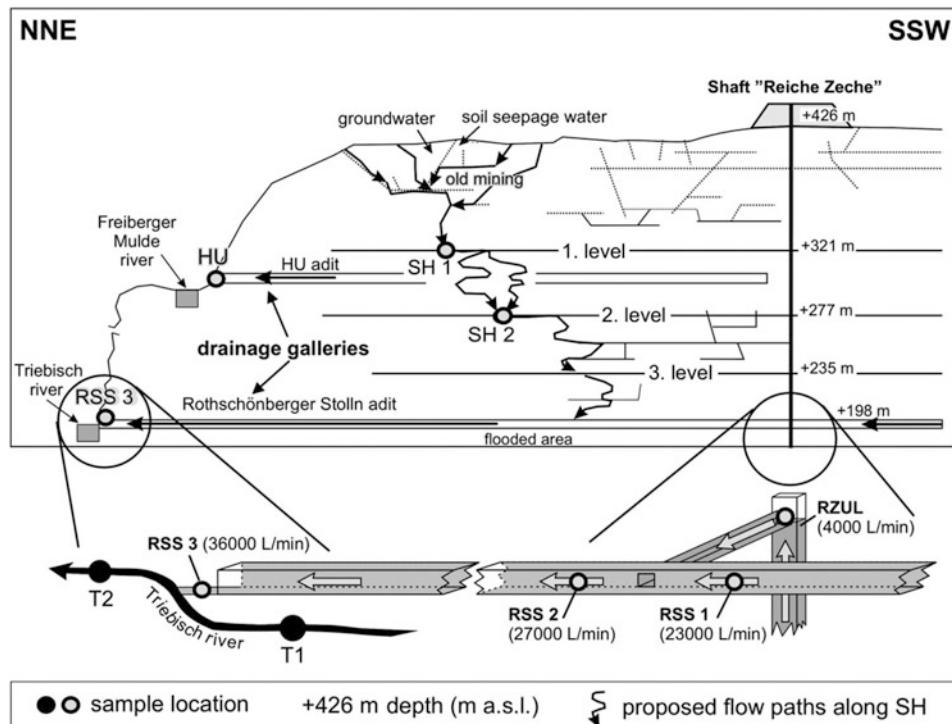


Abb. 17.10 Schematisches Profil des Freiberger Bergbaureviers mit Entnahmestellen für Wasserproben im Entwässerungsstollen (Rothschönberger Stolln, RSS), am Wasseraustritt der gefluteten Reichen Zeche (RZUL) und dem Fluss Triebisch (Zufluss zur Elbe). (Aus Tichomirowa et al. 2010, mit freundlicher Genehmigung von Elsevier AG 2016. All Rights Reserved)

Tab. 17.7 Reservoirdaten des Entwässerungssystems am Standort Reiche Zeche. (Aus Huber 1990 und Konrad et al. 2010)

Ort (Abkürzung aus Abb. 17.10)	Wassermenge	Temperatur
Rothschönberger Stolln (RSS1)	> 540 m ³ /h	10,2–13,7 °C
Schacht Reiche Zeche Überlauf (RZUL)	70–360 m ³ /h	18,5–20 °C

Kühlung, Heizung und Befeuchtung bestimmter Hausbereiche genutzt. Dazu werden pro Stunde ca. 73.000 m³ Frischluft aus dem Muldental durch das alte Stollensystem gedrückt, wodurch die Luft auf ihrer ca. 3 km langen Wegstrecke eine relative Luftfeuchtigkeit von 95 % bei ganzjährig nahezu konstantem Temperaturniveau von ca. 10 °C aufweist. Die Grubenluft wird anschließend beim Verbraucher auf 21 °C erwärmt (rel. Feuchte ca. 50 %) und besitzt somit sehr gute Eigenschaften für OP-Säle und Patientenzimmer (Gahlen 2009; MSG 25.05.2011).

Die deutlich bekanntere Nutzungsart stellt die geothermische Grubenwassernutzung dar, welche nachfolgend vertiefend erläutert wird.

Konzeption und Umsetzung der Grubenwasseranlage (Nr. 1b)

Bei der Planung einer solchen Geothermieanlage mit Grubenwassernutzung am Standort Reiche Zeche (Freiberg) wurden im Vorfeld folgende Nutzerbedingungen festgelegt, um Bürogebäude, Labore und eine Versuchshalle des Instituts für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen der TU Bergakademie Freiberg mit Wärme und Kälte zu versorgen (Grab et al. 2010; Konrad et al. 2010):

- Realisierung von Heizung und Kühlung,
 - z. T. zeitlich häufig wechselnden Betriebsmodi (Heizen/Kühlen),
 - Nutzung von Wasser aus dem Schacht Reiche Zeche (vorwiegend Heizfall) und aus dem Rothschönberger Stolln (vorwiegend Kühlfall),
- Nutzung eines Sekundärkreislaufes (Prozesswasser) zum Wärmetransport (siehe Abb. 17.11),
 - hierzu Hebung von Grubenwasser um ca. 12 m in einen Maschinenraum,
 - Sekundärkreislauf mit ca. 216 m Höhendifferenz,
- Erweiterbarkeit des Sekundärkreislaufes bei Bedarf (Größe der Rohrleitung (Abb. 17.12), Platzbedarf im Maschinenraum für zusätzliche Pumpen und Wärmeübertrager),

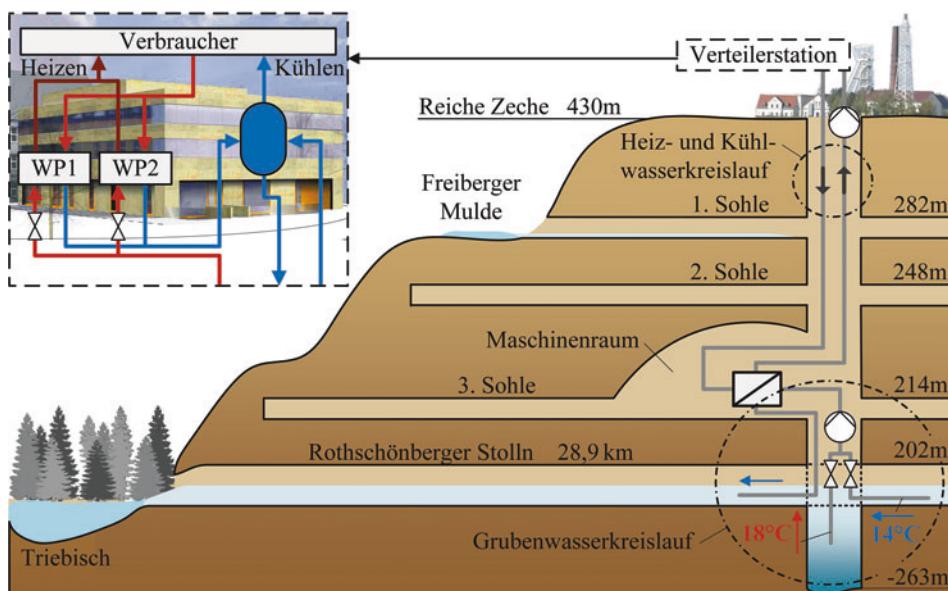


Abb. 17.11 Schematisches Profil des Reichen-Zeche-Schachtes (Freiberg) und Darstellung des geothermischen Grubenwasserkreislaufes (Anlagennr. 1b, Tab. 17.5) mit oberirdischer Verteilstation und Nutzern

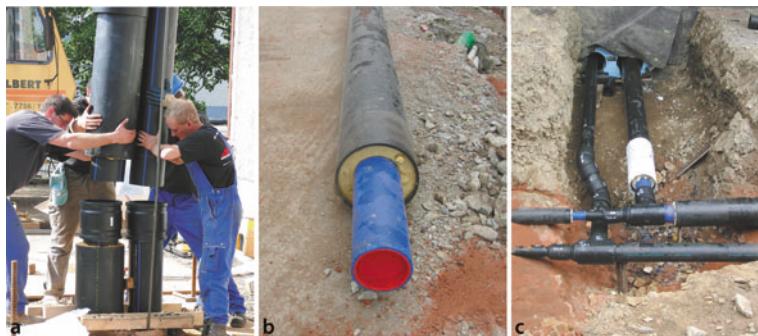


Abb. 17.12 **a** Vor- und Rücklauf des Prozesswasserkreislaufes, **b** das Vorlaufrohr ist wärmege-dämmt ausgeführt, **c** Verteilung des Prozesswassers

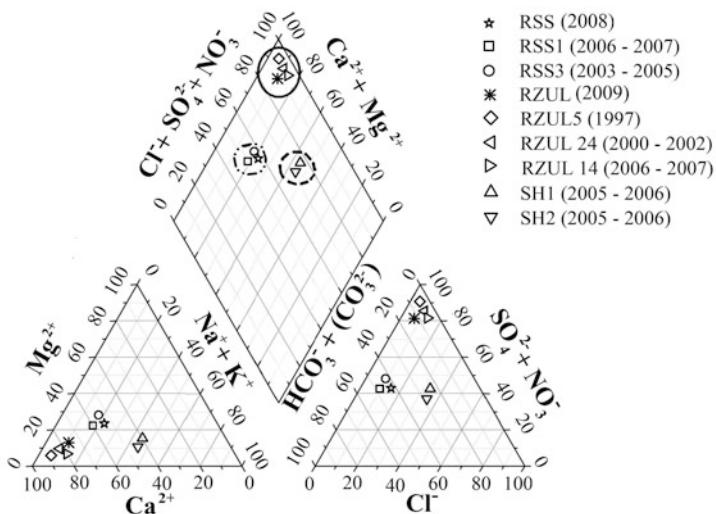
- 1. Ausbaustufe: ca. 200 kW Heizleistung (155 kW Kälteleistung),
- 2. Ausbaustufe: ca. 670 kW Heizleistung (500 kW Kälteleistung) evtl. zukünftig (die zweite Ausbaustufe wurde in der Rohrdimensionierung und in den Planungen zum Platzbedarf für zusätzliche Wärmeübertrager und Pumpen unter Tage mit vorgesehen)
- oberirdische Installation von mehreren „blindem“ Verteilern für zukünftige Abnehmer am Standort Reiche Zeche.

Zur Verminderung von Anlagenausfällen und Zerstörungen wurden folgende Maßnahmen geplant und umgesetzt:

- weitestgehend geschlossener Kreislauf des Grubenwassers (Ausschluss von zusätzlichen Sauerstoffzutritten → Vorbeugung gegen Ausfällungen und Verockerung);
- Fließgeschwindigkeit > 1 m/s, um Ablagerungen im System zu vermeiden;
- sofern möglich werden Anlagenstillstände vermieden;
- Wahl entsprechender Werkstoffe (Titan-Wärmeübertrager, Edelstahl und PE-Rohre (Grubenwasserkreislauf);
- Einbau eines auswechselbaren Filters vor den Wärmeübertragern;
- Druck- und Temperaturmesstechnik zur Überwachung des Anlagenbetriebes;
- regelmäßiger Betrieb von Klappen, Ventilen und Pumpen zur Vermeidung von Ablagerungen;
- Einplanung regelmäßiger Reinigungen der unter Tage installierten Wärmeübertrager (1/2- bis 1-jährliches Intervall);
- Notabschaltung (stromlos) der gesamten unterirdischen Anlage bei zu hohen Wasserständen.

Hydrochemische Zusammensetzung des Wassers

In Abb. 17.13 sind ausgewählte Messwerte aus der Literatur von drei Messstellen in der Reichen Zeche in Freiberg vor dem Bau einer Anlage zur geothermischen



- junges Grundwasser, ungespannt, erdalkalisch und überwiegend sulfatisch
- junges Grundwasser, gespannt, erdalkalisch und hydrogencarbonatisch-sulfatisch
- tertiärer Grundwasserleiter, erdalkalisch mit höheren Alkaligehalten, überwiegend sulfatisch

Abb. 17.13 Piper-Diagramm zu chemischen Analysen von Wasserproben aus dem Freiberger Revier mit RSS Rothschönberger Stolln, RZUL – aus Schachtröhre Reiche Zeche aufsteigende Wässer als Überlauf in RSS, SH – in Bergwerk einsickernde Grubenwässer, Daten von 2008–2009. (Aus Konrad et al. 2010, 2000–2007 aus Tichomirowa et al. 2010)

Grubenwassernutzung eingetragen. Zusätzlich ist eine mögliche Einordnung analog zu Tiefenwässern nach Löffler (2011) dargestellt. Es ist dabei deutlich die variierende Mineralisation zwischen den Wässern eines Reviers mit unterschiedlichem Herkunfts- und Probenort erkennbar. Konrad et al. (2010) weisen z. B. für die aus der Schachtröhre aufsteigenden Wässer am Überlauf zum Rothschönberger Stolln ein chemisches Ungleichgewicht, aufgrund des schnellen Wasseraufstieges und Wasserzutritten, aus. Wiederum befindet sich das Grubenwasser aus dem Rothschönberger Stolln vor der Einleitung nahezu im chemischen Gleichgewicht.

Konrad et al. (2010) haben hydrochemische Modellierungen mit dem Programm PhreeqC zur Vorhersage der Änderung des chemischen Gleichgewichts in Abhängigkeit der Temperatur durchgeführt. Sie geben an, dass selbst ohne Temperaturabsenkung bei den im chemischen Ungleichgewicht befindlichen, fließenden Wässern (RZUL) mit Ausfällungen von $\alpha\text{-Al(OH)}_3$, Quarz, ZnSiO_3 , Calcit (bei Luftkontakt) zu rechnen ist. Mit einer Absenkung bzw. Erhöhung der Temperatur bleiben jedoch die Gesamtmengen an Ausfällungen (Präzipitatmengen) nahezu konstant. Im Rothschönberger Stolln ist mit leichten Ausfällungen von Fe(OH)_3 zu rechnen.

Durch entsprechende Vorkehrungen (erhöhte Strömungsgeschwindigkeit >1 m/s, kaum Stillstandszeiten, geschlossener Kreislauf unter Luftabschluss, Materialauswahl,

regelmäßige Reinigungen) sind verschmutzungsbedingte Anlagenstörungen vermeidbar, vgl. dazu nachfolgenden Abschnitt zum Probefeldbetrieb (Konrad et al. 2010).

Ausgewählte Ergebnisse des Anlagenbetriebes

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme und Testphase der Forschungsanlage erfolgte eine Evaluierung des Anlagenbetriebes für den Sommer- und Winterbetrieb. Bereits beim Bau der Anlage wurde auf ein sehr umfangreiches Monitoringsystem geachtet, weshalb eine Evaluierung überhaupt erst ermöglicht wird. Mithilfe der installierten Messtechnik können sowohl die Grubenwasserseite als auch die Prozesswasserseite intensiv betrachtet werden. Die Evaluierung des Anlagenbetriebs ermöglicht nach der Inbetriebnahme die Erkennung und Abstellung von möglichen Problemen sowie eine Optimierung der Anlagenfahrweise. Für die untersuchte Anlage werden für jeden Kreislauf die Volumen- sowie die Wärmeströme an verschiedenen Stellen ermittelt, wodurch Verluste an das umgebende Erdreich, Wärmeübertragerwirkungsgrade sowie die Funktionsweise u. a. der Pumpen untersucht werden können. Neben der Wärmebilanzierung wird auch die Leistungsaufnahme der elektrischen Verbraucher wie Gruben- und Prozesswasserpumpen sowie der Wärmepumpen erfasst und ausgewertet. Durch ständige Änderungen der Wärme-/Kälteanforderungen in Kombination mit einem instationären Systemverhalten tritt eine hohe Volatilität der Einzelmesswerte auf, welche aufgrund der hohen Messwertenfrequenz (alle 5 min) erfasst werden können. Zur Wahrung der Übersichtlichkeit und Dämpfung dieser Schwankungen sind in den nachfolgenden Diagrammen gleitende Mittelwerte dargestellt. Abb. 17.14 zeigt die ermittelten Wärme- und Kälteleistungen, welche von der Grubenwasseranlage zur Verfügung gestellt wurden.

Bei Betrachtung der benötigten Kälteleistung im Sommer fällt die starke Korrelation mit der Außentemperatur auf. Der Wärmebedarf im Sommer beschränkt sich dagegen nur

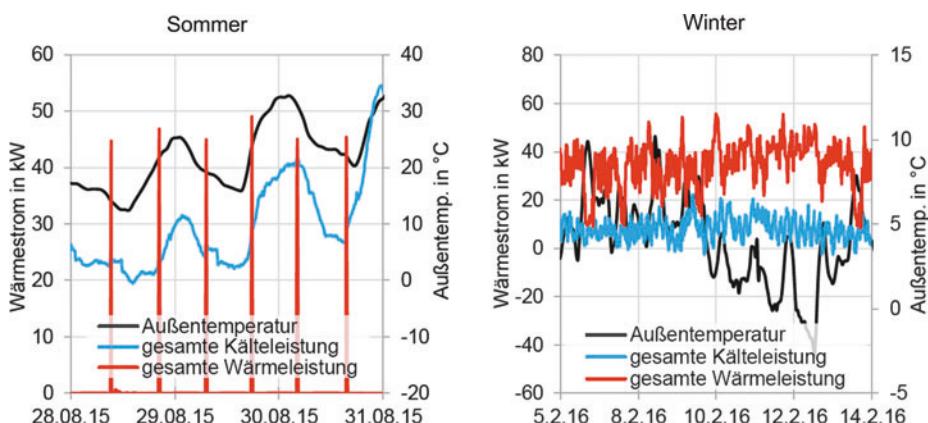


Abb. 17.14 Verlauf der Außentemperatur sowie der Wärme- und Kälteleistung im untersuchten Sommer- und Winterzeitraum

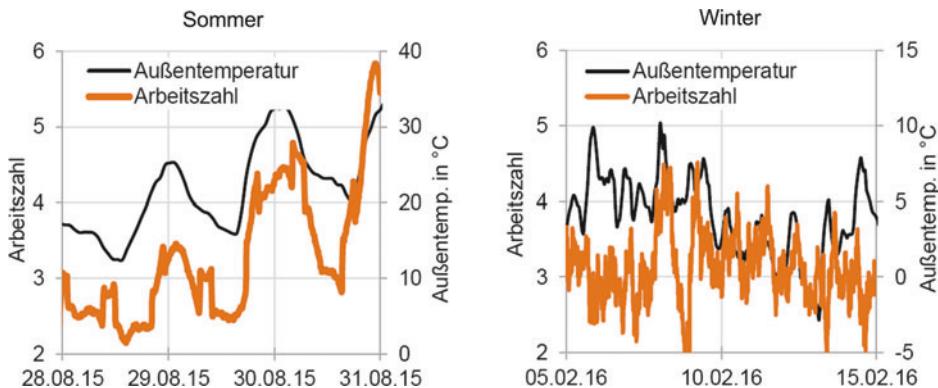


Abb. 17.15 Arbeitszahl der gesamten Anlage für einen repräsentativen Untersuchungszeitraum im Sommer und im Winter

auf die Bereitung des Warmwassers. Die Kühlung wird mit steigendem Kältebedarf immer effizienter, was sich auch in der sehr stark ansteigenden Arbeitszahl in [Abb. 17.15](#) widerspiegelt.

Bei der energetischen Betrachtung konnte über einen ersten Auswertezeitraum für den Sommer 2015 eine gute Arbeitszahl (= Elektroenergieaufwand/Gesamtnutzen) von 3,24 ([Abb. 17.15](#)) und im Winter 2015/2016 von 3,10 ermittelt werden. Beide Werte berücksichtigen, dass sowohl im Sommer als auch im Winter ein Heiz- und Kühlbedarf besteht. Weiterhin sind in dieser Betrachtung alle elektrischen Verbraucher (außer Messtechnik) mit berücksichtigt, was bei sonst üblichen Evaluierungen meist nicht gegeben ist.

Aufgrund einer defekten Regelklappe sowie einzeln aufgedeckter erhöhter Energieverbräuche infolge der bisherigen Anlagenregelung besteht in der Betriebsweise noch ein wesentliches Potential zur weiteren Steigerung der Arbeitszahl.

Betriebserfahrungen und Schlussfolgerungen

In den ersten Jahren mit realem Probebetrieb wurden verschiedene Erkenntnisse, wie z. B. zur Verschmutzung einzelner Anlagenteile, Messdatenauswertung bei komplizierter Anlagensteuerung, Sicherungsmaßnahmen bei Sonderereignissen (Hochwasser im Schachtsystem) gewonnen und Anpassungsmaßnahmen ab- und eingeleitet. Ein zuvor nicht erwartetes Problem zeigte sich in einer schlechten Datenverfügbarkeit (~70 %, 2015) für eine automatisierte Anlagenüberwachung und ein energetisches Monitoring vor allem von obertägigen Messgeräten (Wärmemengenzähler, Elektroenergiezähler), welche in kurzen Zeitintervallen über M-BUS abgefragt wurden.

Folgende wesentlichen Erkenntnisse können bisher gefolgert werden:

- Ein in der Rohrleitung (Grubenwasserkreislauf) eingebauter Filter zeigte seine Wirksamkeit, wobei mithilfe einer installierten Differenzdruckmessung eine Vorhersage

zum Reinigungsintervall und zum Wechsel desselben aus Betriebserfahrungen ableitbar ist.

- Die Wärmeübertragerplatten verschmutzen mit zunehmender Betriebsdauer auf der Grubenwasserseite, wobei die Ablagerungen jedoch gering und leicht zu entfernen sind, [Abb. 17.16](#).
- Einige Messfühler wie z. B. pH-Wert-Sensoren weisen aufgrund der z. T. aggressiven Wässer eine erhöhte Ausfallquote auf, was bei einer Kostenplanung zu berücksichtigen ist.
- Unterirdisch angebrachte Schaltschränke sollten in einem flutungssicheren Raum installiert werden, um vor eventuellen Hochwasserereignissen geschützt zu sein.
- Klappen, Ventile und Pumpen müssen in regelmäßigen Abständen automatisiert bewegt/betrieben werden, um ein Ausfall durch Ablagerungen zu vermeiden.
- Der Wirkungsgrad der Wärmeübertragung im Wärmeübertrager (Grubenwasser/Sekundärkreislauf) sollte stetig überwacht werden, um Reinigungen rechtzeitig vornehmen zu können.
- Eine kontinuierliche Messwerterfassung und die dauerhafte Aufzeichnung in einer Datenbank sind wichtig, um sowohl automatisiert den Anlagenzustand zu überwachen als auch bei einer möglichen Fehlersuche manuell Daten verfügbar zu haben.
- Die Datenaufzeichnung sollte gleichzeitig zur außenwirksamen Darstellung verwendet werden.
- Das Messwerterfassungssystem mit dem verwendeten Übertragungsprotokoll ist sorgfältig auszuwählen, um eine hohe Datenverfügbarkeit zu gewährleisten.



Abb. 17.16 Zusammengebauter Titanplatten-Wärmeübertrager der Grubenwasseranlage Reiche Zeche (links), Ablagerungen auf einer Wärmeübertragerplatte auf der Grubenwasserseite (rechts)

Aufgrund der angewandten Schutzmaßnahmen vor übermäßigen Ablagerungen werden u. a. die ungeregelten Grubenwasserpumpen dauerhaft betrieben, auch wenn keine Wärme- oder Kälteanforderung vorliegt. Dies mindert die energetische Effizienz ungemein.

Die Anlage zur geothermischen Grubenwassernutzung stellt insgesamt eine moderne, voll funktionsfähige Einrichtung mit maximierten Anlagenbetriebsstunden (bis auf Stillstände im Grubenwasserkreislauf bei Wartungsarbeiten) dar.

17.4.2.2 Ehrenfriedersdorf (Sachsen)

In Ehrenfriedersdorf in Sachsen wurde seit dem 13 Jhd. bis 1990 Zinnerz gewonnen. Bereits 1992 wurde im Zinnbergwerk (Zinnerz GmbH) eine Wärmepumpe mit 16 kW zur Versorgung eines Betriebsgebäudes installiert (später wieder stillgelegt) (Rottluff 1993). Von Juli 1993 bis Feb. 1994 wurden die Zinnerzgruben geflutet. Die Gebirgstemperatur liegt zwischen 11 und 14 °C und die nach der Flutung ermittelten Wassertemperaturen liegen zwischen 10 und 12 °C (Rottluff et al. 1994).

Konzeption und Umsetzung der Grubenwasseranlagen (Nr. 4a, 4b)

Insgesamt gibt es derzeit zwei separat betriebene geothermische Anlagen zur Grubenwassernutzung in Ehrenfriedersdorf, welche als Vorreiter für die energetische Nachnutzung von gefluteten Grubenbauen im Erzgebirge gelten, siehe Anlagenschema in Abb. 17.17.

Anlage zur Beheizung einer Mittelschule (4a) Bei der Planung zur Beheizung einer Mittelschule wurde die Grubenwassernutzung in Betracht gezogen. Dazu wurden bereits

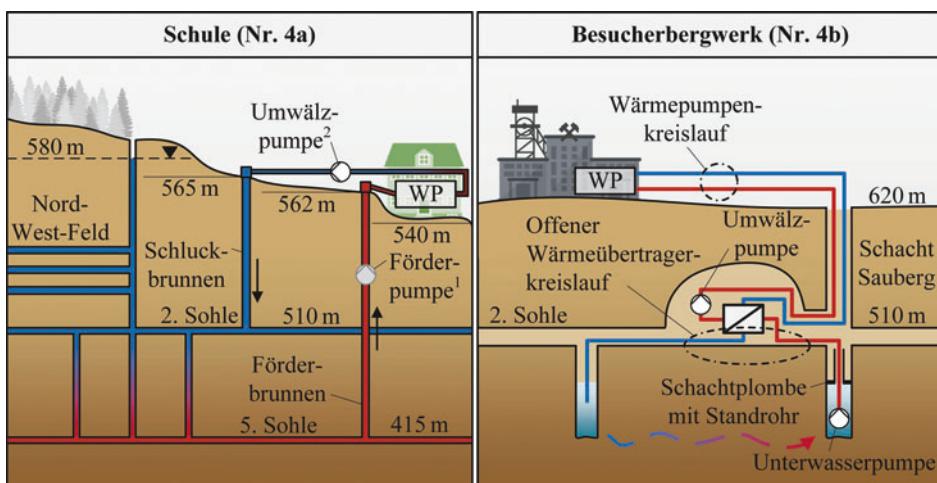


Abb. 17.17 Schematische Bergwerksprofile und Aufbau von zwei separaten Grubenwasseranlagen in den gefluteten Gruben in Ehrenfriedersdorf (Sachsen), links: Anlage 4a, mit Umbauten wie in Tab. 17.8 nach Müller und Rottluff (2005); ¹ursprünglicher Aufbau, ²2011 Entfernung des Förderstranges; rechts: Anlage 4b mit untertägigem Grubenwasserkreislauf; Anlagennummern wie in Tab. 17.5

bei der Verwahrung des Bergwerkes vor der Flutung perspektivisch zwei Richtbohrungen (Förderbohrung = 143 m, Schluckbohrung = 53 m) für eine spätere Grubenwassernutzung abgeteuft. Nach erfolgter Flutung im Februar wurde im April 1994 die erste Stufe der geothermischen Grubenwassernutzung mit Beheizung der Mittelschule aus dem „Nordwestfeld“ als offenes System mit Grubenwasserförderung bis über Tage (Höhendifferenz ca. 47 m) mittels einer Unterwasserpumpe aufgenommen, vgl. Abb. 17.17 links. Dabei war der Höchststand des Flutungswasserspiegels noch nicht erreicht. Eine Erweiterung der installierten Anlage (bis 70 m³/h) um zusätzliche Abnehmer wie z. B. einen Kindergarten, ein Jugendzentrum sowie ein Altersheim sollten als zukünftige Ausbaustufen folgen, wurden jedoch außer dem Anschluss eines Turnhallenneubaus und der Grundschule bisher (Stand Mitte 2016) nicht realisiert.

Der Grubenwasserkreislauf wurde aus innenseitig kunststoffbeschichteten Stahlrohren für die Steigleitung (Förderbohrung) und einer Stahl-Versturzleitung (Schluckbohrung), im obertägigen Teil aus erdverlegten HDPE-Rohren mit entsprechenden Stahl-Absperrvorrichtungen sowie einer Doppelpumpe (Wilo DPn 50/200-1) und Anschlussleitungen aus Stahl zu einem direkt im Wärmepumpenkreislauf integrierten gelöteten Wärmeübertrager aufgebaut. Es waren wenige Messstellen während der Inbetriebnahme sowie einzelne dauerhafte im Wärmepumpenkreislauf verbaut, welche sich jedoch als zahlenmäßig zu gering herausstellen sollten.

Bei der Inbetriebnahme wurde der maximale Durchfluss an Grubenwasser über einen Schieber auf ca. 9,5 m³/h gedrosselt. Die Heizzentrale der Schule bestand neben der Wärmepumpe (Sulzer Escher Wyss, $Q_{Heiz} \sim 95 \text{ kW}$) weiterhin aus einem Gas-BHKW (ca. 65 kW) und einem Gas-Spitzenlastkessel (ca. 155 kW). Das Gas-BHKW lieferte hierbei den Strom für die Grubenwasseranlage, was sich zukünftig negativ auf die Betriebsstunden der geothermischen Grubenwasseranlage auswirken sollte (Müller und Rottluff 2005; Rottluff 2012).

Anlage zur Beheizung eines Besucherbergwerkes (4b) Eine weitere Wärmepumpenanlage, die die Wärmequelle Grubenwasser nutzt, wurde mit der Gründung eines Besucherbergwerkes (1995) in Ehrenfriedersdorf geschaffen, wobei dieses mitsamt seinen Betriebsgebäuden (Mineralogisches Museum und die Bergschmiede) seit 1998 unter Nutzung von 10 °C konstant warmen Grubenwasser mittels einer mehrstufigen, elektrisch betriebenen Wärmepumpe ($Q_{Heiz} = 120 \text{ kW}$) beheizt und mit Warmwasser versorgt wird.

Diese realisierte Anlage zur Beheizung der Besucherbergwerksgebäude wurde von vornherein mit zwei Kreisläufen (Grubenwasser-, Prozesswasserkreislauf) geplant und realisiert, siehe Abb. 17.17 rechts. Es handelt sich hierbei um einen offenen Grubenwasserkreislauf unter Tage, wobei die verschraubten Plattenwärmeübertrager für den Sekundärkreislauf in 110 m Tiefe, die Umwälzpumpen aber über Tage installiert sind. Mit dem geschlossenen Prozesswasserkreislauf (Sekundärkreislauf) über zwei Schachtrohrleitungen muss, im Vergleich zu einem offenen System bis über Tage, nur ein Bruchteil der Elektroenergie zum Pumpenantrieb bereitgestellt werden. Ein weiterer positiver Effekt dabei ist, dass die mit Grubenwasser durchströmten Bauteile minimiert werden und

folglich die Wartung und mögliche notwendige Reinigung auf wenige Anlagenteile (z. B. Wärmeübertrager) begrenzt ist. Eine solche Technologie ist nur dann anwendbar, wenn der untertägige Bereich jederzeit zugänglich ist. Im vorliegenden Fall ist dies durch die Nutzung als Besucherbergwerk gewährleistet.

Der Wärmebedarf der angeschlossenen Bergwerksgebäude beträgt ca. 120 kW (Heizsystem mit Niedertemperaturheizkörpern, teilweise Fußbodenheizung), wofür max. 22 m³/h Grubenwasser im Grubenwasserkreislauf gepumpt werden müssen. Hierzu wird das Grubenwasser (Sauberger Hauptschacht) über eine von zwei Unterwasserpumpen unterschiedlicher Baugröße zum Wärmeübertrager gepumpt, darin bis auf 4 °C abgekühlt und über PE-Leitungen entfernt von der Entnahmestelle zurück in die gefluteten Sohlen gespeist. Das an den Wärmepumpen nutzbare Temperaturniveau beträgt zwischen 7 und 9 °C. Die mehrstufige Wärmepumpe wird jeweils gesondert über einzelne Umwälzpumpen entsprechend des Wärmebedarfs versorgt und betrieben (Bussmann 15.04.1998; Rottluff 1998).

Auch in dieser Anlage wurde aufgrund von Einsparungen nur wenig Messtechnik installiert und folglich auch hier keine langfristige Messwerterfassung realisiert. Einzig in den Anfängen wurde durch einen Verein ehrenamtlich eine Messwerterfassung durchgeführt. Die Wärmepumpeneinheit über Tage wird dauerhaft überwacht, um evtl. Änderungen im Betrieb zu erkennen (Rottluff 1998).

Betriebserfahrungen

Anlage zur Beheizung einer Mittelschule (4a) Die Grubenwasseranlage zur Beheizung der Mittelschule wies über große Betriebszeiträume einen zuverlässigen Betrieb auf, vgl. Tab. 17.8. Dennoch kam es aufgrund des ursprünglich umgesetzten 1-Kreislauf-Systems nach 7 Jahren zu stärkeren Verschmutzungen u. a. im Wärmepumpen-Wärmeübertrager und folglich zu Anlagenstörungen.

Die Problematik der Verschmutzung von Anlagenteilen wurde zusätzlich durch eine ungünstige Zusammenstellung der Heizzentrale aus bestehenden (Gas-Spitzenlastkessel) und neuen Heiztechniken (Gas-BHKW mit stromseitig gekoppelter Grubenwasseranlage) unterstützt. Bis zu einem grundlegenden Umbau der Heizungszentrale, aufgrund eines Defektes des BHKWs (vgl. Tab. 17.8), wurde die Grubenwasseranlage folglich nur betrieben, wenn das BHKW in Betrieb war und dieses die Grundlast an Wärme nicht allein bereitstellen konnte (ab Außentemperaturen ca. ≤ 6 °C). Daraus resultierten lange Stillstandszeiten für die Grubenwasseranlage, was einerseits bei mineralisierten Wässern aufgrund von dabei auftretenden Absetzungen und Ausfällungen generell als ungünstig einzustufen ist. Andererseits sollten solche Anlagen mit Nutzung erneuerbarer Energiequellen stets im Hinblick auf eine Maximierung der Laufzeiten geplant und betrieben werden.

Aus den aufgetretenen Anlagenstörung und erfolgter Ursachenforschung (vgl. Tab. 17.8) wurden folgende Verbesserungsvorschläge von Müller und Rottluff (2001, 2005) abgeleitet:

Tab. 17.8 Zusammenstellung der Betriebszeiträume und dokumentierten Vorkommnisse des Betreibers, dem Verein Energiemodell Sachsen e. V. (Nach Müller und Rottluff (2001, 2005), Rottluff (2012), Weller et al. (2008))

Betrieb	Vorkommnis	Annahmen	Reaktion des Betreibers bzw. der Firmen
1994–1998	Zuverlässiger Grundlastbetrieb Langsam absinkender Durchfluss	Verschmutzung von Anlagenteilen (Filtereinsatz – Pumpe, Wärmeübertrager)	Rücknahme der Drosselung im Grubenwasserkreislauf Ende 1998 Bericht über sinkenden Durchfluss Sichtprüfung + Druckwasserspülung des Wärmeübertragers (erfolglos)
1998–Anfang 2000	Unterschreitung min. Wasser-volumenstrom	Untertägiger Teil verschlossen (konnte ausgeschlossen werden) Ablagerungen im System (vermutlich Eisenhydroxid, etwas Karbonat)	Automatische Abschaltung der Wärmepumpe Vergleich Durchfluss mit Pumpenkennlinie → erhöhter Druckverlust auf Seiten des Wärmeübertragers 2 chemische Spülungen → Durchflusserhöhung*
<i>Vorschlag:</i> 1.) Erneuerung Wärmeübertrager und Änderung der Stahl- in PE-Leitungen, 2.) Anlagenumbau (geschlossener WP-Kreislauf: Erneuerung integrierter Wärmeübertrager, getrennter Grubenwasserkreislauf mit verschraubtem Plattenwärmeübertrager inkl. Anschlüssen zur Reinigung			
Bis 03.2005	Unterschreitung min. Wasservolumenstrom, Ausfall der Wärmepumpe	Unterwasserpumpe und Wasserröhler defekt Verschmutzungen im System	Durchflussmessungen weisen erhöhten Druckverlust auf Wärmepumenseite auf Rohrprobe (Ablagerungen, s. Abb. 17.18a)
<i>Vorschlag:</i> Anlagenumbau: geschlossener WP-Kreislauf mit Erneuerung integrierten Wärmeübertragers, getrennter Grubenwasserkreislauf mit verschraubtem Plattenwärmeübertrager inkl. Anschlüssen zur Reinigung, Ausbau Unterwasserpumpe, Ringsaugventil, Steig- und Versturzleitung			
Bis 2007	Zuverlässiger Betrieb		
2007	Defekt des BHKW (Stromversorger für Wärmepumpe Grubenwasser) Umbau Heizungs- und Gruben-wasseranlage	Verschleiß BHKW Stetige Verschmutzung von Anlagenteilen	Reparatur des BHKW Umbau der Anbindung der Wärmepumpe an Stromnetz Grubenwasseranlage wird in 2 Kreisläufe aufgeteilt (obertägiger verschraubter Plattenwärmeübertrager)
2007–08.2011	Zuverlässiger Betrieb		
08.2011–11.2011	Bohrungssanierung und Umbau an Grubenwasseranlage		Kurzeitige Wasserabsenkung zum Ausbau: Unterwasserpumpe, Ringabsaugventil, Steig- und Versturzleitung
2011 bis heute	Zuverlässiger Betrieb		

* von 9,4 auf 10,2 m³/h, jedoch zeitnahe Sättigung des Spülmittels, chemische Reinigung nur bedingt erfolgreich

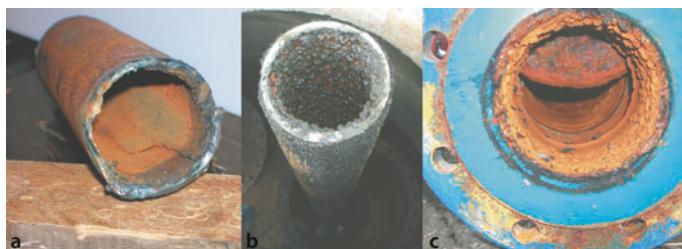


Abb. 17.18 Ausgebauten Anlagenteile mit markanten Ablagerungen: **a** oberirdisch installiertes Stahlrohrstück zum Wärmepumpen-Wärmeübertrager 2005 nach ca. 11 Jahren Betriebszeit (Müller und Rottluff 2005), **b** und **c** bei Sanierung der Bohrung entfernte Versturzleitung und Schieber 2011 nach ca. 18 Jahren Betriebszeit und Sauerstoffkontakt beim Ausbau. (Rottluff 2012)

- An den höchsten Punkten eines Rohrleitungssystems mit Förder- und Schluckbohrung sind geeignete und ausreichend dimensionierte Entlüfter und Manometer anzubringen.
- Es sind vor und nach kritischen Anlagenteilen (Pumpen, Schiebern, Wärmeübertragern etc.) ausreichende Messanschlussstützen, z. T. mit dauerhaft installierten Messgeräten (z. B. Differenzdruckmesser), vorzusehen.
- Bei Inbetriebnahme sind die Druckverluste der Neuanlage als Vergleichswerte aufzuzeichnen,
- Eine kontinuierliche Anlagenüberwachung und Datenaufzeichnung (Monitoring) ermöglicht hilfreiche Rückschlüsse und Vorplanungen von anlagenspezifischen Reinigungs- und Wartungsintervallen (hier 1-mal jährlich).
- Eine Ausführung der geothermischen Grubenwasseranlage als 2-Kreislauf-System mit „kurzen“ Längen des Grubenwasserkreislaufes erscheint hinsichtlich der Vermeidung von übermäßigen Verschmutzungen als sinnvoll.

Bei den Wartungen bzw. Umbaumaßnahmen konnten durch Müller und Rottluff (2005), Rottluff (2012) folgende Verschmutzungen differenziert nach eingesetztem Material und Installationsort (vgl. Abb. 17.18) festgestellt werden:

- An den Innenseiten der Metallbauteile traten Ablagerungen als Folge der Mineralisation des Grubenwassers auf, wobei Ablagerungen im Verdampfer der Wärmepumpe zur Anlagenstörung führten.
- Oberflächenbehandelte Innenflächen (kunststoffbeschichtet) der Stahlrohr-Steigleitung (Förderbohrung) wiesen nach ca. 18 Jahren Betriebszeit lediglich eine dünne, ockerfarbige, schlammartige Schicht auf, die sich im feuchten Zustand leicht mechanisch entfernen ließ (abwischen).
- Nicht oberflächenbehandelte Stahlrohre der Schluckbohrung (Versturzleitung) sowie Absperrschieber und Bohrungsverrohrung wiesen tiefschwarze Ablagerungen unterschiedlicher Mächtigkeit (Innen/Außen) auf. Bei nicht durchströmten Teilen (z. B.

Rohraußenseiten) wurde eine ca. 1–2 mm starke Ablagerung, bei durchströmten Bau teilen eine ca. 5–7 mm dicke Ablagerung detektierbar, die sich nach Luftkontakt (Sauerstoff) innerhalb weniger Stunden rostbraun verfärbte. Diese Ablagerungen waren mechanisch nur schwer zu entfernen.

- Korrosion am Stahl war dagegen kaum festzustellen, das Material der Versturzleitung war kaum korrodiert.

Anlage zur Beheizung eines Bergbaumuseums (4b) Vom Anlagenbetreiber wurden keine nennenswerten Fehlfunktionen der Grubenwasseranlage mitgeteilt. Es wird jedoch die jährliche z. T. aufwendige Reinigung der geschraubten Plattenwärmeübertrager unter Tage als Aufwand und folglich als Belastung empfunden, weshalb alternative Reinigungsmöglichkeiten (u. a. Druckluftspülung) getestet wurden.

Weiterhin wurde eine mögliche Installation eines Monitoringsystems unter Tage aufgrund der Höhendifferenz und Entfernung zum Museum als erhöhter Zeit- und Kostenaufwand angesehen, weshalb ein solches bisher nicht installiert wurde.

Aufgrund der aktuellen extrem niedrigen Energiepreise für Gas (3–5 ct/kWh, Jahr 2016) ist für den Anlagenbetreiber der Strompreis (>20 ct/kWh, Jahr 2016) für die Wärmepumpe inkl. Peripherie selbst bei hoher Anlageneffizienz derzeit höher, weshalb die Nutzung einer erneuerbaren Energie als alleinige Argumentation von Betreiberseite kritisch hinterfragt wird.

17.5 Fazit

Aufgrund der stetig wachsenden Zahl an stillgelegten und gefluteten Bergwerken steigt auch das Potential zur geothermischen Nachnutzung der Grubenwässer zum Heizen (mittels Wärmepumpen) und Kühlen. Hierzu sind in diesem Beitrag die möglichen Varianten zur Umsetzung detailliert aufgeführt.

Wesentliche Vorteile (u. a. Kosten) zeigten sich bei der Berücksichtigung einer geothermischen Nachnutzung vor der jeweiligen Bergwerksflutung durch Planungsarbeiten, der Erschließung bzw. der Sicherung von Abschnitten und dem Einbau notwendiger Leitungen. Wie allgemein üblich, ist auch bei Grubenwasseranlagen in der Planungsphase eine Erstellung einer Machbarkeitsstudie unter entsprechender Betrachtung und Berücksichtigung folgender Aspekte notwendig:

- oberirdische standortnahe Abnehmerstruktur mit Energiebedarfsermittlung,
- am Standort nutzbare Wärme-/Kälteverteilnetze,
- Reservoirtemperatur und Ergiebigkeit,
- geotechnische Voruntersuchungen,
- Wasserchemismus und dessen Einfluss auf Anlagenteile und möglichen Verschmutzungsgrad,

- evtl. thermische Auswirkungen auf das Reservoir,
- Investitionskosten und evtl. länderspezifische Förderungen.

Trotz der sehr hohen Anzahl an möglichen Standorten zur geothermischen Grubenwassernutzung konnten bisher weltweit nur 35 in Betrieb befindliche Anlagen recherchiert werden, wofür häufig die erhöhten Kosten zur Anlageninstallation (z. B. bergtechnische Kosten, Vorbeugung von Korrosionen) und die derzeit niedrigen Kosten von konkurrierenden fossilen Energieträgern benannt werden.

Als weitere wesentliche Punkte können sicherlich das z. T. geringe technische Interesse von Installateuren und Wärmeversorgern, die ungenügende Öffentlichkeitsarbeit und Datenlage zu Funktionsbeispielen von geothermischen Grubenwasseranlagen und die teilweise rechtlich unklare Situation zur Nachnutzung alter Grubenbaue angeführt werden.

Anlagenspezifisch erscheint ein geschlossenes System mit untertäigem Primär- und Sekundärkreislauf (bis über Tage) die technisch günstigste und eine sehr häufig umgesetzte Variante zu sein. Als wesentlicher Vorteil kann hierbei die Minimierung der Anlagenteile, welche mit dem Grubenwasser direkten Kontakt haben, angeführt werden. Dies ist allerdings meist nur dann anwendbar, wenn der untertägige Bereich jederzeit z. B. über ein Besucherbergwerk o. ä. zugänglich ist. Allgemein ist für solche Anlagen ein angepasstes Anlagenmonitoring zu empfehlen, einerseits um den Istzustand einzuschätzen und mögliche Probleme erkennen zu können. Andererseits wird dadurch eine öffentlichkeitswirksame Darstellung zum Abbau von Vorurteilen und zum Nachweis der Anlageneffizienz erst ermöglicht.

Die Anzahl von insgesamt zwei in der Umsetzung befindlichen Anlagen und 33 recherchierten z. T. wissenschaftlichen Studien zur geothermischen Grubenwassernutzung weltweit weisen einen möglichen potentiellen Anstieg einer Nutzung der Ressource Grubenwasser aus. Die Umsetzungen sind dabei u. a. von der zukünftigen Entwicklung konkurrierender Energiepreise, der Erstellung langfristiger und konkurrenzfähiger Energieliefermodelle sowie einer kombinierten Nutzung der Potentiale zur Heizung und Kühlung abhängig. Wesentlichen Einfluss können ebenso gesetzliche Vorgaben im Rahmen von z. B. Energieeffizienzmaßnahmen und eventuelle finanzielle Anreize durch Fördermaßnahmen haben.

Literatur

- Anselmi, E.: Con geothermal not feasible, says city. Officials concede controversial energy source is less than thought. In: Northern News Services, 11.11. http://www.nnsl.com/frames/newspapers/2014-11/nov12_14geo.html, (2014). Zugegriffen: Dez. 2015
- Arkay, K.: 1st Springhill Geothermal Energy Conference, Springhill, Nova Scotia. Geological Survey of Canada (1993)
- Athresh, A. P., Al-Habaibeh, A., Parker, K.: Innovative approach for heating of buildings using water from a flooded coal mine through an open loop based single shaft GSHP system. Energy Procedia. **75**, 1221–1228 (2015)

- Baacke, D.: Geochemisches Verhalten umweltrelevanter Elemente in stillgelegten Polysulfiderzgruben am Beispiel der Grube „Himmelfahrt“ in Freiberg/Sachsen. Dissertation. TU Bergakademie Freiberg (2000)
- Bailey, M., Moorhouse, A., Watson, I. (Hrsg.): Heat extraction from hypersaline mine water at the dawdon mine water treatment site. Conference: Mine Closure, At Cornwall, UK. https://www.researchgate.net/publication/281033759_Heat_Extraction_from_Hypersaline_Mine_Water_at_the_Dawdon_Mine_Water_Treatment_Site (2013). Zugegriffen: 17. Nov. 2017
- Balkenhol, R. K.: Experimentelle Untersuchungen und Modellierungen von Folgereaktionen der Pyritverwitterung in Braunkohletagebau-Haldensedimenten. Dissertation. Georg-August-Universität zu Göttingen. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultäten (2000)
- Banks, D.: An Introduction to Thermogeology. Ground source heating and cooling, 2. Aufl. John Wiley and Sons Ltd, Chichester (2012)
- Banks, D., Pumar, A. F., Watson, I.: Existing Open Loop Minewater-Sourced Heat Pump Schemes in Scotland: Factors for Success and Failure. HolyMoor, 08.10.2008
- Banks, D., Pumar, A. F., Watson, I.: The operational performance of Scottish minewater-based ground source heat pump systems. Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol. **42**(3), 347–357 (2009). <http://doi.org/10.1144/1470-9236/08-081>
- Banks, D., Skarphagen, H., Wiltshire, R., Jessop, C.: Mine water as a resource: Space heating and cooling via use of heat pumps. Land. Contam. Reclamat. **11**(2), 191–198 (2003). <http://doi.org/10.2462/09670513.814>
- Banks, D., Skarphagen, H., Wiltshire, R., Jessop, C.: Heat pumps as a tool for energy recovery from mining wastes. In: Giere, R., Stille, P. (Hrsg.) Energy, Waste and the Environment – a Geochemical Perspective, Bd 236. S. 499–513. Geological Society, London, Special Publication (2004)
- Batchelor, T., Curtis, R., Ledingham, P., Law, R.: Country Update for the United Kingdom. Paper-ID: 01076. In: International Geothermal Association IGA (Hrsg.) Proc. of World Geothermal Congress 2015. Melbourne, 19–24. April 2015
- Baukonzept 2015 – Baukonzept Dresden GmbH: Projekt: Geothermische Grubenwassernutzung in Freiberg. <http://www.baukonzept-dresden.de/portfolio/geothermische-grubenwassernutzung-in-freiberg/>. Zugegriffen: Dez. 2015
- Beck, H. P., Schmidt, M.: Windenergiespeicherung durch Nachnutzung stillgelegter Bergwerke. Abschlussbericht: BMU FKZ 0325074. Clausthal-Zellerfeld: Universitätsbibliothek Clausthal (2011)
- Bernhard, M.: Die Silberstrasse und ihre Geschichte. Unter Mitarbeit von G. Graf. Sonderausg. Sachsenbuch, Leipzig (1992)
- Bieg, M., Angerer, A., Martinelli, W., Hammer, S., Mottaghy, D.: Erkundung des geothermischen Potentials eines ehemaligen Untertagebaus. bbr Fachmagazin für Brunnen und Leitungsbau. **2013**(6), 46–53 (2013)
- Bracke, R., Bussmann, G.: Heat-Storage in deep hard coal mining infrastructures. Paper-ID: 38002. In: International Geothermal Association IGA (Hrsg.) Proc. of World Geothermal Congress 2015. Melbourne/Australia, 19–24. April
- Bracke, R., Ignacy, R., Eicker, T., Bussmann, G.: Geothermische Nachnutzung von Steinkohlebergwerken über geschlossene Wärmetauschersysteme. Sitzung AG Bergbauinfrastruktur und Grubenwasser, Bochum, 19.06.2015 (2015)
- brgm : French National Geological Survey. Institut Carnot (2014)
- Burtner, D., Cairns, H., Cash, C.: AMD Geothermal Project. John Wesley A.M.E. Zion Church. <http://2009.treatminewater.com/images/CCashPittsburghGeothermal.pdf> (2009). Zugegriffen: Nov. 2012
- Bussmann, W.: Energiequelle Grubenwasser. Geothermische Vereinigung e.V., <https://idw-online.de/de/news2637> (1998). Zugegriffen: Febr. 2016

- Butolen, H.: Geothermal energy from mining sources in the Zasavje region. Pre-investment Study. Summary (2010)
- Clauser, C., Heitfeld, M., Rosner, P., Sahl, H., Schetelig, K.: Nutzung von Erdwärme in aufgelassenen Bergwerken. Beispiel Aachener Steinkohlerevier. In: Beratende Ingenieure 2005 (Juni), S. 15–17. Köllen Druck + Verlag GmbH (2005)
- Curtis, R., Roijen, E.: Question and Discussion. In: Faull, M.L. (Hrsg.) Heat-Pump Technology using Minewater, S. 26–31. National Coal Mining Museum for England (2011)
- Debes, C.: Minewater geothermal energy in Europe – Pilots in ReSource and Remining LOWEX. In: Debes, C. (Hrsg.) 2. Workshop Minewater – Renewable Energy. ReSource – Turning Problems into Potentials. Ehem. Seite: Resource-ce.eu. Eisleben (2012a). Zugegriffen: Aug. 2012
- Debes, C.: Übersicht über Pilotanlagen zur Gewinnung von Grubenwasser-Geothermie in Europa. in Betrieb, im Bau oder Investitionen gesichert. Ehem. Seite: Resource-ce.eu ReSource (2012b). Zugegriffen: Nov. 2015
- Dillenhardt, J., Kranz, K.: Geologisch-Hydrogeologische Kartierung im Alten Tiefen Fürstenstolln zur geothermischen Grubenwassernutzung im Schloss Freudenstein, Freiberg. Diplomkartierung. TU Bergakademie, Freiberg (2010)
- Eikmeier, B., Wagner, H. J.: Seasonal Storage of Solar Heat in Underground Mines. In: ISES (Hrsg.): Proc. of Solar World Congress. Adelaide, Australia, 25–30 Nov., S. 1849–1854 (2001)
- ENERGONPLAN s.r.o. : RESUME – Geothermal energy from mining sources. Study on geothermal energy and underground mining water usage in undermined territories of Sokolov region. Hg. v. Resource-ce.eu. http://www.central2013.eu/fileadmin/user_upload/Downloads/outputlib/Resource_4.2.6_Pre-investment_study_geothermal_energy_PP7_Summary_EN_20110531.pdf?PHPSESSID=832c2007231d4ef0b9ff71d356cf847f (2011). Zugegriffen: Okt. 2010
- Ernst, P., Hiebling, J.: Aspekte der Nutzung geothermischer Energie. Erdöl Erdgas Zeitschrift. **95**, 412–420 (1979)
- Evans, A. M.: Erzlagerstättenkunde. Enke Verlag, Stuttgart (1992)
- Farr, G., Tucker, D.: Mine water as an Energy Source for Heat Pumps. a case study from the South Wales Coalfield. South West Regional Group of the Geological Society. Bristol, <http://www.wdsgreenenergy.co.uk/awards/> (2015). Zugegriffen: Apr. 2015
- Flynn, T., Trexler, D., Hendrix, J.: Geothermal Enhancement of Mineral Processing in Nevada. Final Report (DOE/SF/15603-1). Hg. v. National Technical Information Service. Divison of Earth Sciences Environmental Research Center University of Nevada (1986)
- Frisch, C. M.: Wassergarten Reden. <http://www.industriekultur-ansichten.com/orte/deutschland/154-garten-reden> (2012). Zugegriffen: Okt. 2012
- Gahlen, K.: Variationen zur geothermischen Nutzung der Infrastruktur von Steinkohlenbergwerken in Nordrhein-Westfalen. In: Der Geothermiekongress 2009. Bochum, 17.–19. Nov. Bundesverband Geothermie (2009)
- Galinsky, G., Leistner, J., Scheuermann, G.: Kavernenkraftwerk Drei-Brüder-Schacht. Geschichte und Überlegungen zur Rekonstruktion, 2. Aufl. Saxonia, Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, Freiberg (2001)
- GeoExchange: Municipal Building Park Hills, Missouri. <http://www.geoexchange.org/pdf/cs-064.pdf> (2002). Zugegriffen: Okt. 2012
- Ghomshesi, M.: Geothermal energy from Con Mine for Heating the City of Yellowknife, NWT: A concept study. Internal Report. The Norman B. Keevil Institute of Mining Engineering (2007)
- Ghoreishi Madiseh, S. A., Ghomshei, M. M., Hassani, F. P., Abbasy, F.: Sustainable heat extraction from abandoned mine tunnels: A numerical model. Journal of Renewable and Sustainable Energy. **4**(3), 033102 (2012). <http://doi.org/10.1063/1.4712055>
- Grab, T., Storch, T., Gross, U., Kleutges, J., Grötzsch, S.: Geothermieanlage zur Grubenwassernutzung für Heizung (200 – max. 670 kW) und Kühlung (155 – max. 500 kW). In: GtV – Bundesverband Geothermie e.V. (Hrsg.) Der Geothermiekongress 2010. Karlsruhe, Nov. 17–19 (2010)

- Grasby, S. E., Allen, D. M., Bell, S., Chen, Z., Ferguson, G., Jessop, A. et al.: Geothermal energy resource potential of Canada. Geological Survey of Canada. Open File 6914, (19Nov. 2015) (2012)
- GrEEN: GrubenwasserEnergie für das ENERGETICON. Sitzung AG Bergbauinfrastruktur und Grubenwasser, 19 Juni 2015
- Griebler, C., Mösslacher, F.: Grundwasser-Ökologie. Facultas (UTB, 2111), Wien (2003)
- Hall, A., Scott, J. A., Shang, H.: Geothermal energy recovery from underground mines. Renewable and Sustainable Energy Reviews. **15**(2), 916–924 (2011). <http://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.007>
- Halmo, J.: Nutzung der Thermal- und Grubenwässer im Bereich des Bergbauunternehmens Hornonitrianske bane, Slowakei. Bohrung S1-NB-II. Zeitschrift: Geothermische Energie **67**, S. 6–13 (2010)
- Hassani, F., Koufos, K., Ghoreishi, A., Ghomshei, M. M.: A Study on the Extraction of Low Temperature Geothermal Energy from Mines in Canada. In: Liu, M. (Hrsg.) Proc. of Int. Conf. of WREC-Asia & SuDBE2011. Int. Conf. on Sustainable Development in Building and Environment. Chongqing, China, 28–31 Okt. 2011. World Renewable Energy Network (2011)
- Heitfeld, M., Rosner, P., Schetelig, K., Sahl, H.: Nutzung aufgegebener Tagesschächte des Steinkohlebergbaus für die Gewinnung von Erdwärme. Glückauf. **142**(10), 432–438 (2006)
- Hellawell, J. M.: Biological indicators of freshwater pollution and environment management. Pollution Monitoring Series. Elsevier Applied Sciences Publishers, London (1986)
- Herteis, B.: Springhill Mine Water Geothermal. Proposed Springhill Surface Coal Recovery Project – Round Table Discussion, 12 Febr. 2015
- Hoffman, M., Joppich, M.: Vorstellung der Geothermie-Anlage Röhrig-Schacht Wettelrode. Resource Project – Workshop. Zwickau, 16 Aug. 2012
- Hoffmann, M. et al.: Energieeffiziente FernwärmeverSORGUNG unter Nutzung der Wärme aus Grubenwässern und anderen natürlichen Wärmequellen. FKZ: 0327481A, Westsächsische Hochschule Zwickau (2014)
- Hölting, B., Coldevey, W. G.: Hydrogeologie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (2013)
- Huber, G.: Energetische Nutzung von Grubenwässern. Dissertation. TU Bergakademie, Freiberg (1990)
- IDoMA – Illinois Department of Military Affairs : Geothermal Retrofit of Illinois National Guard's State Headquarters Building. Final Technical Report. 27 Apr. 2015
- 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 and Enviroment. **32**(2), 139–151. <http://doi.org/10.1007/s10230-013-0224-x>
- Jarvie-Eggart, Michelle E.: Responsible mining. Case studies in managing social and environmental risks in the developed world. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, Englewood, CO (2015)
- Jensen, E. B.: Mine Water Used to Heat Ventilation air at Henderson Molybdenum Mine. Mining Engineering. **35**(1), 17–20 (1983)
- Jessop, A.: Geothermal Energy from old Mines at Springhill, Nova Scotia, Canada. In: World Geothermal Congress. Firenze, Italy, May 18–31, S 463–468, 08 Okt. 2012
- Jessop, A. M., MacDonald, J. K., Spence, H.: Clean Energy from Abandoned Mines at Springhill, Nova Scotia. Energy Sources. **17**(1), 93–106 (1995). <http://doi.org/10.1080/00908319508946072>
- JISC – Joint Implementation Supervisory Committee: Low-Potential heat of abandoned coal mines water for heating needs of Novashaktinsk. Hg. v. Joint Implementation Supervisory Committee. <http://ji.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/VB1T6B30ENIRDH5AZXLCO3MOXPYSND> (2007). Zugriffen: Okt. 2012
- Johnson Controls: Hohe Heizkosten sind heilbar: Grubenwasser dient als Energiequelle für zweistufige Ammoniak-Wärmepumpe im Kreiskrankenhaus Freiberg. Fallstudie. <http://www>.

- johnsoncontrols.com/de_de/-/media/jci/be/germany/solutions-by-industry/files/bts_case_study_hospital_freiberg_de.pdf. Zugegriffen: 20. Nov. 2017
- Jones, P., Lang, W., Patterson, J., Geyer, P.: Smart Energy Regions. The Welsh School of Architecture, Cardiff University, Cardiff. <http://www.smart-er.eu/sites/default/files/Smart%20Energy%20Regions.pdf> (2014). Zugegriffen: 20. Nov. 2017
- Kaltschmitt, M.: Energie aus Erdwärme. Geologie, Technik und Energiewirtschaft, Spektrum Verlag, Heidelberg (2009)
- Kissing, H.: Thermische Nutzung des Grubenwassers der Schiefergruben der MAGOG GmbH & Co KG in Schmallenberg/ Ortsteil Bad Fredeburg. 5. NRW Energiekonferenz. Bochum, 17 Nov. 2009
- KKH FG – Kreiskrankenhaus Freiberg : Energetische Optimierung: Silberbergwerk als energetische Goldgrube. <http://www.kkh-freiberg.com/index.php?id=334> (2014). Zugegriffen: 17. Nov. 2017
- Koch, L. (2012): Grubenwasser-Geothermie im Mansfelder Land. ReSource Turning Problems into Potentials. Freiberg, 15.06.2012
- Konrad, C., Grund, K., Burghardt, D., Manke, T., Kluge, H., Beckert, A., Bachmann, S.: Geothermische Grundwassernutzung für den Standort Reiche Zeche in Freiberg, in Grubenwässer – Herausforderungen und Lösungen, (Hrsg.) Merkel und M. Schipek, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie, S. 159–164 (2010)
- Korb, M. C.: Minepool Geothermal in Pennsylvania. In: Department of Environmental Protection Pennsylvania (Hrsg.) 14th Conference on Abandoned Mine Reclamation: New Frontiers in Reclamation. Pennsylvania. Online verfügbar unter https://www.portal.state.pa.us/portal/server.pt/gateway/PTARGS_0_2_1391321_0_0_18/Mine_Pool_Geothermal_in_PA-2012.pdf (2012). Zugriffen: Nov. 2015
- Kremer, E., Neuhaus, P. U.: Bergrecht. Stuttgart [u.a.]: Kohlhammer (Kohlhammer Studienbücher. Rechtswissenschaft). (2001)
- Kynoch, B.: Mining Heat. In: Canadian Conculting Engineer (May), S. 18–23. <https://www.canadianconsultingengineer.com/digital-archives/may-2010/> (2010). Zugegriffen: Nov. 2015
- la Touche, G. D., Preene, M.: The potential use of ground energy in the mining industry – exploration to closure. In: Rüde, R. T., Freund, A., Wolkersdorfer, C. (Hrsg.) 11th Int. Mine Water Association Congress. Mine Water – Managing the Challenges. Aachen, Germany. Int. Mine Water Association, S. 161–166. https://imwa.info/docs/imwa_2011/IMWA2011_DiggesLaTouche_259.pdf (2011). Zugegriffen: 17. Nov. 2017
- Lagerpusch, K. H.: Stellenwert Bergbau – Geothermie in Sachsen. Workshop „Bergbau-Geothermie“ im Rahmen der ReSource-Arbeitsgruppe „Natürliche Potentiale“. Bad Schlema, 04 Febr. 2010
- Lau, S.: Potentialanalyse der Grubenwasserstandorte unter dem Aspekt einer zukünftigen geothermischen Nutzung. Grubenwasser-Geothermie im ehemaligen Mansfelder Kupferbergbaurevier. Symposium Grubenwasser Geothermie. Lutherstadt Eisleben, 30 Aug. 2012
- LfULG, Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie : Abschlussbericht : Förderprogramm „Immissions- und Klimaschutz einschließlich der Nutzung erneuerbarer Energien“. Ergebnisse im Zeitraum 2000–2008. Hg. v. Freistaat Sachsen. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. (2012)
- Lintker, S.: Energetische Nachnutzung ehemaliger Bergbaustandorte in NRW. Erneuerbare Energien im Bergbau in Chile. EnergieAgentur NRW. Essen, 24 Nov. 2014
- Löffler, H.: Ein Anwendungsbeispiel für hydrochemische Auswerteverfahren im norddeutschen Raum mit dem Versuch einer Grundwassertypisierung. In: Guntau, M., Werner, P., Störr, M., Hartmann, O. (Hrsg.) Zur Geschichte der Geowissenschaften in der DDR – Teil II. Ostklüne: Verlag Störr (Schriftenreihe für Geowissenschaften, 18), S. 381–385 (2011)
- Loredo, C., Roqueñí, N., Ordóñez, A.: Modelling flow and heat transfer in flooded mines for geothermal energy use: A review. International Journal of Coal Geology (2016). <http://doi.org/10.1016/j.coal.2016.04.013>

- Loredo, J., Ordóñez, A., Jardón, S., Álvarez, R.: Mine water as geothermal resource in Asturian coal mining basins (NW Spain). In: Rüde, R. T., Freund, A., Wolkersdorfer, C. (Hrsg.) 11th Int. Mine Water Association Congress. Mine Water – Managing the Challenges. Aachen, Germany. Int. Mine Water Association, S. 177–181. https://www.imwa.info/docs/imwa_2011/IMWA2011_Loredo_314.pdf (2011)
- Louie, E. P.: Writing a community guidebook for evaluating low-grade geothermal energy from flooded underground mines for heating and cooling buildings. Masterthesis. Michigan Technological University. <https://digitalcommons.mtu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1924&context=etds> (2015). Zugegriffen: 17. Nov. 2017
- MA – Mineralienatlas – Fossilienatlas. <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Deutschland/Sachsen/Erzgebirgskreis/Marienberg%2C%20Revier/Marienberg/Pobershau> (2015). Zugegriffen: Nov. 2015
- Malolepszy, Z.: Low Temperature Man-Made Geothermal Reservoirs in abandoned workings of underground Mines. In: Proc. of th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering (2003)
- Malolepszy, Z., Demolin-Schneiders, E., Bowers, D.: Potential Use of Geothermal Mine Waters in Europe. In: International Geothermal Association IGA (Hrsg.): Proc. of World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey, 24.–29. April 2005, 20 Nov. 2015
- Matthes, R., Schreyer, J.: Remediation of the old Wismut-Shaft 302 in Marienberg and Installation of a technical Plant for geothermic Mine Water Use (Ore Mountains, Germany). In: Cidu, R., Frau, F., International Mine Water Association (Hrsg.) Int. Mine Water Association Symposium. Water in Mining Environments. Cagliari/Italy, S. 227–231. https://imwa.info/docs/imwa_2007/IMWA2007_Matthes.pdf (2007a). Zugegriffen: Mai. 2015
- Matthes, R., Schreyer, J.: Sanierung des WISMUT-Schachtes 302 in Marienberg und geothermische Nutzung des Grubenwassers. Fachbericht. In: Bergbau. 9, 445–446 (2007b)
- Merkel, B., Planer-Friedrich, B.: Grundwasserchemie. Praxisorientierter Leitfaden zur numerischen Modellierung von Beschaffenheit, Kontamination und Sanierung, 2. Aufl. Springer, Berlin (2008)
- MK – Mansfelder Kupferspuren (Hrsg.): Kupferspuren – [082] Mundloch Wiederstedter Stollen. http://kupferspuren.artwork-agentur.de/index.php?option=com_content&task=view&id=263&Itemid=58 (2012). Zugegriffen: Nov. 2012
- minewater project : Mine water as a Renewable Energy Resource. An information guide based an the Minewater Project and the experiences at pilot locations in Midlothian and Heerlen. Hg. v. minewater project. http://skrconline.net/content/images/stories/documents/mine_water_renewable_energy_guide.pdf (2011). Zugegriffen: Nov. 2015
- MSG – Mittelsächsischer Gesundheitsbote: Die beste Luft Freibergs gibt es im Krankenhaus. Freiberg. www.lmkgmbh.de/lmk/images/pdf-dateien/gesundheitsbote_0511.pdf (2011). Zugegriffen: 25. Mai 2011
- Mühlenweg, U., Brasser, T., Hertes, U.: Charakterisierung von mineralisierten Tiefengrundwässern in nichtsalinaren Festgestein. Untersuchung von Wechselwirkungsreaktionen mit Abfällen bei der immissionsneutralen Ablagerung. Hrsg. v. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit GRS mbH. Braunschweig (1997)
- Müller, B., Rottluff, F.: Ursachen der Durchflussminderung an der Wärmepumpenheizungsanlage in der Mittelschule Ehrenfriedersdorf. (unveröffentlichte Studie). Unter Mitarbeit von B. Müller und F. Rottluff. Hrsg. v. Verein Energiemodell Sachsen e.V. (2001)
- Müller, B., Rottluff, F.: Abschlussbericht zu den Ergebnissen der Durchflussmessungen im März 2005 an der Grubenwasseranlage der Wärmepumpe der Mittelschule Ehrenfriedersdorf. unveröffentlichte Studie. Verein Energiemodell Sachsen e.V. Ehrenfriedersdorf (2005)
- Münch, M.: Grubenwasserwärmennutzung. Heizwärme- und Kühlwassbereitstellung durch geothermische Nutzung thermaler Grubenwässer. Seminar für kommunale Vertreter. Hg. v. igem.

- Institut für geothermisches Ressourcenmanagement. http://www.tsb-energie.de/fileadmin/files/pdf/Publikationen/Vortraege/Muench_Grubenwasser_2009.pdf (2009). Zugegriffen: Nov. 2015
- Münch, M., Himmel, J., Kill, T.: Thermische Grubenwassernutzung Grube Georg/Willroth. Nachnutzung eines gefluteten Grubengebäudes als saisonaler Wärmespeicher. Teil 2:Technisch-wirtschaftliche Machbarkeitsstudie. Hrsg. v. igem – Institut für geothermisches Ressourcenmanagement. <https://www.wald-rlp.de/fileadmin/website/fawfseiten/fawf/.../Seeg/grubegeorgi.pdf> (2010). Zugegriffen: Okt. 2012
- Myslil, V., Frydrych, M. S. V.: Geothermal Energy Potential of Czech Republic. In: Proc. World Geothermal Congress (2005)
- ncn KG :www.ncn.de: Heizen mit Grubenwasser. Hg. v. Geothermische Vereinigung – Bundesverband Geothermie e.V. Geothermische Vereinigung, <http://www.geothermie.de/news-anzeigen/2012/09/07/heizen-mit-grubenwasser.html> (2012). Zugegriffen: Nov. 2012
- Niemann, A.: Machbarkeitsstudie zur Nutzung von Anlagen des Steinkohlenbergbaus als Pumpspeicherwerke. 2. Int. Arbeitsgespräch Geothermie und Grundwasser. Essen. <https://www.uni-due.de/imperia/md/content/wasserbau/30-11-niemann.pdf> (2012). Zugegriffen: Nov. 2015
- NRW – Landesinitiative Zukunftsenergien : Geothermie – Erdwärme für Nordrhein-Westfalen, (2004). Zugegriffen: Okt. 2012
- Oelsner, C.: Grundlagen der Geothermie. Bergakademie Freiberg, Freiberg. https://www.bezregarnsberg.nrw.de/themen/g/geothermie/geothermie_ea_nrw.pdf (1982)
- Op't Veld, P.: Overview minewater projects in REMINING-lowex. ReSource, 30 Aug. 2012. Ehem. Seite: Remining-lowex.org. Zugegriffen: Nov. 2012
- Ordonez, A., Andres, C., Alvarez, R., Jardon, S.: Harnessing groundwater as a water supply and energy resource. Seguridad y medio ambiente. **30**(118), 43–60 (2010)
- ORNL – Oak Ridge National Laboratory (12. 2014): Case Study of the ARRA-Funded GSHP Demonstration at the Natural Sources Building, Montana Tech.
- Ove, T.: Mine water plagued church, soon it will heat and cool it. Pittsburgh Post-Gazette, 01.11.2008. <http://www.post-gazette.com/stories/local/neighborhoods-city/mine-water-plagued-church-soon-it-will-heat-and-cool-it-619206/> (2008). Zugegriffen: Nov. 2015
- PKG – Personenkreis Geothermie der AD-HOC-Arbeitsgruppe Geologie, Staatlichen Geologischen Dienste: Fachbericht zu bisher bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben in den Bundesländern. Information aus den Bund/Länderarbeitsgruppen der Staatlichen Geologischen Dienste. BGR, LIAG, SGD, BLA-GEO, BLAG-KLiNa, LAWA. Wiesbaden. www.infogeo.de/dokumente/download_pool/FS2011_Top_6.2_Anlage_PK_Geothermie_Bericht.pdf (2011). Zugegriffen: Nov. 2015
- Preene, M., Younger, P. L.: Review or critical Assessment. Can you take the heat? – Geothermal energy in mining. Mining Technology. **123**(2), 107–118 (2014). <http://doi.org/10.1179/1743286314Y.0000000058>
- RAG – Deutsche Steinkohle : Wasserhaltungen der RAG Deutsche Steinkohle. 2. Sitzung des AK „Bergbau Infrastruktur-Geothermische Fragen“. Otto Uhl, Vortrag (2009)
- Ramos, E. P., Breede, K., Falcone, G.: Geothermal heat recovery from abandoned mines: a systematic review of projects implemented worldwide and a methodology for screening new projects. Environmental Earth Sciences. **73**(11), 6783–6795 (2015). <http://doi.org/10.1007/s12665-015-4285-y>
- Ramos, E. P., Falcone, G.: Recovery of the geothermal energy stored in abandoned mines. In: Hou, M. Z., Xie, H., Were, P. (Hrsg.) Clean Energy Systems in the Subsurface: Production, Storage and Conversion. Proc. of the 3rd Sino-German Conf. Underground Storage of CO₂ and Energy", Goslar, Germany, 21-23 May 2013. Springer, Berlin (2013)
- Raube, J.: Wärmenutzung aus Grubenwasser in Bochum-Werne. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. EnEFF : Stadt Forschung für die energieeffiziente Stadt. http://www.eneffstadt.info/fileadmin/media/Veranstaltungen/Dateien/Vortraege_Statusseminar_Dezentrale_

- Energiesysteme_2012/09_Raube_Waermenutzung_Grubenwasser.pdf (2012). Zugegriffen: Nov. 2015
- Raymond, J., Therrien, R.: Low-temperature geothermal potential of the flooded Gaspé Mines, Québec, Canada. *Geothermics*. **37**(2), 189–210 (2008). <http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2007.10.001>
- Raymond, J., Therrien, R.: Optimizing the design of a geothermal district heating and cooling system located at a flooded mine in Canada. *Hydrogeol J.* **22**(1), 217–231. <http://doi.org/10.1007/s10040-013-1063-3> (2014)
- Raymond, J., Therrien, R., Hassani, F.: Overview of Geothermal Energy Resources in Quebec (Canada) Mining Enviroments. In: N. Rapantova und Z. Hrkal (Hrsg.): Proc. 10th Int. Mine Water Association Congress. Karlsbad, Czech Republic. Int. Mine Water Association, S. 99–111. http://www.imwa.info/docs/imwa_2008/IMWA2008_039_Raymond.pdf (2008)
- Reden : Ausbau der Geothermie durch Nutzung von Grubenwasser Reden (2008). Zugegriffen: Okt. 2012
- Remining Lowex : Remining Lowex – Review 2011. News from the Pilot Communities. http://www.remining-lowex.org/wp-content/uploads/2010/12/Remining_Lowex_Review_2011.pdf (2012). Zugegriffen: Nov. 2012
- ReSource: Pre-investment study geothermal energy from mining sources. Exemplary region: Aue. Abschlussbericht. Hrsg. v. ReSource – Turning Problems into Potentials – New Groth from old mines – Exploring Post-mining potentials in Central Europe (2011) Zugegriffen: Nov. 2015
- RKN – Rosenkreis Neunkirchen (Hrsg.): Der Wassergarten im Garten Reden. <http://www.rosenkreis.de/index.php?id=1726>. Zugegriffen: Okt. 2012
- Röder, U.: Geothermie im Fokus der Nachnutzung von Bergbaufolgelandschaften am Beispiel des Zwickauer Steinkohlenreviers. Geothermische Nutzung von Flutungswässern. Vortrag, 30 Aug. 2012
- Röder, U.: Geothermische Nutzung von Flutungswässern aus den Abbauhöhlräumen des Zwickauer Steinkohlenreviers. Stand und Zwischenergebnisse des Projektes, 08 Sept. 2015
- Rodríguez, R., Diaz, M.B.: Analysis of the utilization of mine galleries as geothermal heat exchangers by means a semi-empirical prediction method. *Renewable Energy*. **34**(7), 1716–1725 (2009)
- Rijken, E.: The use of an open-loop heat-pump system to heat social housing and an offical building throughout the town of heerlen, the Netherlands. In: Faull, M.L. (Hrsg.) Heat-pump technology using minewater, S. 15–25. National Coal Mining Museum for England Publications (2011)
- Rijken, E., Op't Veld, P., Demolin-Schneiders, E.: The Minewaterproject Heerlen – low exergy heating and cooling in practice. In: 28th AIVC and 2nd Palenc Conference. Building Low Energy Cooling and Ventilation Technologies in the 21st Century. Crete, Greece, 27–29 Sept. 2007
- Roschlau, H., Heintze, W.: Wissensspeicher Bergbautechnologie. Erzbergbau und Kalibergbau. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie (1975)
- Rosner, P., Eßer, M., Heitfeld, M., Hofmann, T.: CAP und GrEEN – Nutzung von Erdwärme aus stillgelegten Bergwerken des Aachener Reviers im Rahmen der EuRegionale 2008. In: Der Geothermiekongress 2009. Bochum, 17–19 Nov. Bundesverband Geothermie (2009)
- Rottluff, F.: Energimodel Sachsen: Grubenwassernutzung im Erzgebirge. Geothermische Energie. Mitteilungsblatt der Geothermischen Vereinigung e. V. **2**(5), 6–8 (1993)
- Rottluff, F.: Neue Wärmepumpenanlage im Besucherbergwerk Zinngrube Ehrenfriedersdorf. Hg. v. Geothermische Energie 21. <http://www.geothermie.de/uploads/media/Geothermische.Energie.Nr.21.pdf> (1998). Zugegriffen: Jan. 2013
- Rottluff, F.: Abschlussbericht zur Sanierung der Bohrungen zur Grubenwasserentnahme/-rückführung aus dem Nord-West-Feld (NWF) der ehemaligen Zinngrube Ehrenfriedersdorf. unveröffentlichte Studie. Hrsg. v. Verein Energiemodell Sachsen e.V. Ehrenfriedersdorf (2012)

- Rottluff, F., Köckritz, V., Ewe, H.: Ehrenfriedersdorf : Grubenwärmemenutzung in Betrieb genommen. Geothermische Energie. Mitteilungsblatt der Geothermischen Vereinigung e. V. 3(8), 4–6 (1994)
- Schaberg, A.: Nutzung von gefluteten Grubenräumen zur Langzeit-Wärmespeicherung. Meßtechnische und numerische Untersuchung. Dissertation. TU Bergakademie Freiberg (1998)
- Schetelig, K., Heitfeld, M., Mainz, M., Hofmann, Th., Essers, M.: Geothermie aus Grubenwasser. regenerative Energie aus stillgelegten Steinkohlenbergwerk (2005)
- Schneider, H., Hurtig, E., Schneider, D., Wormbs, J.: Forschung und Entwicklung für die Geothermie in Ostdeutschland. In: Guntau, M., Werner, P., Störr, M., Hartmann, O. (Hrsg.) Zur Geschichte der Geowissenschaften in der DDR – Teil II. Ostklüne: Verlag Störr (Schriftenreihe für Geowissenschaften, 18), S. 345–367 (2011)
- Schneider, J., Eggeling, L., Hesshaus, A.: Tiefengrundwassercharakteristik und hydrochemische Untersuchung. In: Bauer, M., Freedon, W., Jacobi, H., Neu, T. (Hrsg.) Handbuch Tiefe Geothermie. Prospektion, Exploration, Realisierung, Nutzung, S. 559–591. Springer Spektrum, Berlin (2014)
- SIB (16.10.2013), Staatsbetrieb Sächsisches Immobilien- und Baumanagement: Medieninformation. Technische Universität Bergakademie Freiberg Geothermische Anlage zur Nutzung des Energiepotenzials des Rothsönberger Stolln geht in Betrieb. 63/2013.
- Statista : Strompreise in ausgewählten Ländern weltweit im Jahr 2014. Hg. v. Statista. NUS Consulting. <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/13020/umfrage/strompreise-in-ausgewahlten-laendern/> (2016). Zugegriffen: 20. Nov. 2017
- Statistisches Bundesamt – Destatis: Preise. Daten zur Energiepreisentwicklung – Lange Reihen von Januar 2000 bis Februar 2016. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden (5619001161024). https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Energiepreise/EnergiepreisentwicklungPDF_5619001.pdf?__blob=publicationFile (2016). Zugegriffen: 24 März. 2016
- Stüber, K.: Warmes Grubenwasser soll Energie liefern. In: Aachener-Zeitung, 14.10.2012. <http://www.aachener-zeitung.de/artikel/2811701>, (2012). Zugegriffen: Nov. 2012
- Sunbeam – Sunbeam GmbH: Forschung für Energieeffizienz: Projekt: Geothermische Nutzung von Grubenwässern zur Nahwärmeversorgung. Hg. v. EnEFF : Stadt Forschung für die energieeffiziente Stadt. <http://www.eneff-stadt.info/de/pdf/waerme-und-kaeltenetze/projekt/details/geothermische-nutzung-von-grubenwaessern-zur-nahwaermeverversorgung/> (2013). Zugegriffen: Jan. 2013
- Symmangk, R.: Bergbau- und Industriegeschichte. In: Hugenroth, P. (Hrsg.) Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft. Böden ohne Grenzen – Allgemeiner Exkursionsführer, Bd. 111. Unter Mitarbeit von Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft – DBG. Dresden, 02.-09.09.2007 (DBG, 111), S. 87–99 (2008)
- Thien, L.: Geothermal Re-use of Coal Mining Infrastructures and Mine Water in Hard Coal Mining in the Ruhr Area/Germany. Paper-ID: 28017. In: Int. Geothermal Association IGA (Hrsg.): Proc. of World Geothermal Congress 2015. Melbourne/Australia, 19.–24. Apr (2015)
- Thornton, R.: Convection mechanisms for geothermal heat exchangers in a vertical mine shaft. In: 2013 Transactions of the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Bd. 332, S. 4
- Tichomirova, M., Heidel, C., Junghans, M., Haubrich, F., Matschullat, J.: Sulfate and strontium water source identification by O, S and Sr isotopes and their temporal changes (1997–2008) in the region of Freiberg, central-eastern Germany. Chemical Geology. 276(1–2), 104–118 (2010). <http://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.06.004>
- TKLN – Tourismus- und Kulturzentrale des Landkreises Neunkirchen: Ein Rundgang durch den Erlebnisort Reden. 2. Aufl. Tourismus- und Kulturzentrale des Landkreises Neunkirchen, Schiffweiler (2014)

- Toth, A. N.: Geothermal Potential of an Abandoned Copper Mine. Sustainable green energy : Geothermal Resources Council 2011 annual meeting, October 23–26, San Diego, California, USA. Geothermal Resources Council Transactions. **35**, 139–142 (2011)
- Toth, A. N., Bobok, E.: A Prospect Geothermal Potential of an Abandoned Copper Mine. Paper-ID: SGP-TR-183. In: Proc. of 32th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford, California, 22.–24. Jan. Stanford University. https://pangea.stanford.edu/ERE/db/IGAstandard/record_detail.php?id=5088 (2007). Zugegriffen: Mai. 2015
- Ulbricht, S.: Wieder Pionierrolle für Freiberg. Projekt Energetische Optimierung im Kreiskrankenhaus Freibergnutzt Warmwasser des Supertunnels. Wochenspiegel – regional S. 3, 02. Jan. 2013
- Vater, A.: Geothermie – Nutzung von Wärme aus der Erde. Seniorenkolleg an der TU Chemnitz. Bad Schlema, 30.10.2007. http://www.tu-chemnitz.de/seniorenkolleg/v5/archiv/Bewertg_071030-geothermie.pdf (2007). Zugegriffen: Nov. 2012
- Vater, A.: Geothermische Nutzung von Grubenwasser aus der Grube Schlema-Alberoda. Arbeitsgruppe Geothermie und Grubenwassernutzung, 06 Sept. 2012
- Verhoeven, R., Willems, E., Harcouet-Menou, V., Boever, E. de, Hiddes, L., Op't Veld, P., Demollin, E.: The EC REMINING-lowex project in Heerlen the Netherlands: development of a geothermal mine water pilot project to a full scale hybrid sustainable energy infrastructure Mine Water 2.0. In: Int. Geothermal Association IGA (Hrsg.) Proc. of European Geothermal Congress 2013. Pisa, Italy (2013)
- Verhoeven, R., Willems, E., Harcouët-Menou, V., de Boever, E., Hiddes, L., Veld, P. Op't, Demollin, E.: Minewater 2.0 Project in Heerlen the Netherlands: Transformation of a Geothermal Mine Water Pilot Project into a Full Scale Hybrid Sustainable Energy Infrastructure for Heating and Cooling. Energy Procedia. **46**, S. 58–67. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.158> (2014)
- Vidrih, B., Medved, S., Vetršek, J., Roijen, E.: Standardized solutions for low exergy mine water systems configurations including solutions for high quality energy demand, Technical Guidebook, Work package 2, Concerto Initiative, EC 6th Framework (2011)
- Volland, J.: Energieeinsparverordnung (EnEV). Mit ergänzenden Vorschriften, Schnelleinstieg, Chancen nutzen, Risiken vermeiden. 3., aktualisierte Aufl. Rehm, Heidelberg (2014)
- Watzlaf, G. R., Ackman, T. E.: Underground Mine Water for Heating and Cooling using Geothermal Heat Pump Systems. Mine Water and Environment. **25**(1), 1–14 (2006)
- Weller, B., Rexroth, S., Jakubetz, S.: Denkmal und Energie. Technologien und Systeminnovationen zur Energieversorgung und -einsparung bei Baudenkmälern. Abschlussbericht (AZ: 22814-25). Hrsg. v. Deutschen Bundesstiftung Umwelt und TU Dresden. Institut für Baukonstruktion – TU Dresden (2008)
- Werner, T.: Ökologische Investments. Chancen und Risiken grüner Geldanlagen. Gabler, Wiesbaden (2009)
- Wieber, G.: Studie zur Erfassung und Quantifizierung des Wärmeflusses aus gefluteten Grubenbauen des ehemaligen Erzbergbaus in Hamm/Sieg und Abschätzung der geothermischen Nutzungsmöglichkeiten. Endversion. Hrsg. v. Igem. https://www.waldrlp.de/fileadmin/website/fawseiten/projekte/downloads/110802_Potentialstudie_Endbericht.pdf (2010), Zugegriffen: Nov. 2012
- Wieber, G., Münch, M., Himmel, J., Kill, T.: Thermische Grubenwassernutzung Grube Georg/Willroth. Nachnutzung eines gefluteten Grubengebäudes als saisonaler Wärmespeicher. Teil 1: geologische Potentialanalyse. Hg. v. igem – Institut für geothermisches Ressourcenmanagement (2010)
- Wieber, G., Ofner, C.: Geothermische Potenziale gefluteter Bergwerke. bbr Jahresmagazin, 12/2008. http://www.fachzeitschriften-wvgw.de/fileadmin/PDF/bbr/12_2008/bbr_5912_72_77_Ofner_Wieber.pdf (2008). Zugegriffen: Nov. 2012

- Wieber, G., Pohl, S.: Mine Water: A Source of Geothermal Energy – Examples from the Rhenish Massif. In: Rapantova, N., Hrkal, Z. (Hrsg.) Proc. 10th Int. Mine Water Association Congress. Karlsbad, Czech Republic. Int. Mine Water Association, S. 113–116 (2008)
- Wieber, G., Simon, R., Münch, M., Ofner, C.: Thermische Grubenwassernutzung zur Gebäudebeheizung am Neuhoffnungsstollen in Bad Ems. igem – Institut für geothermisches Ressourcenmanagement. <http://www.wald-rlp.de/fileadmin/website/fawfseiten/projekte/downloads/badems160608.pdf> (2008), Zugegriffen: Apr. 2015
- Wikipedia (Hrsg.): Wilkes-Barre, Pennsylvania – Wikipedia, the free encyclopedia. <http://en.wikipedia.org/w/index.php?oldid=522909565> (2012a). Zugegriffen: Nov. 2012
- Wikipedia (Hrsg.): Butte, Montana – Wikipedia, the free encyclopedia. <http://en.wikipedia.org/w/index.php?oldid=523178605> (2012b). Zugegriffen: Nov. 2012
- Willmes, J., Bücker, C.: Nutzung von Grubenwasser zur Wärmeerzeugung. Ein Projektbeispiel. bbr Sonderheft Geothermie. **2014**, 46–52 (2014)
- Wismut – Wismut GmbH Geothermie in Bad Schlema. Projekt „Schillerschule“. Hg. v. Wismut GmbH, (2012) Zugegriffen: Nov. 2012
- Wisotzky, F.: Angewandte Grundwasserchemie, Grundwasserbelastung und Aufbereitung. Chemische Grundlagen der anorganischen Wasserchemie (ch17:Kap. 2). Springer, Berlin (2011)
- Wolf, P., Lagerpusch, K. H., Hofmann, K.: Zur geothermischen Nutzung von Grubenwässern in Sachsen. Sächsischer Geothermietag Spezial: Geothermie und Bergbau. Marienberg, 26 Nov. 2007
- Wolkersdorfer, C.: Water Management at Abandoned Flooded Underground Mines. Fundamentals, tracer tests, modelling, water treatment. Habilitationsschrift. TU Bergakademie Freiberg (2008)
- Younger, P. L., Banwart, S. A., Hedin, R. S.: Mine water. Hydrology, pollution, remediation. Dordrecht [u.a.]: Kluwer Academic Publishers (Environmental pollution). <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz100169090cov.htm> (2002). Zugegriffen: 20. Nov. 2017