

Querschnittstudie Erfolgsfaktoren für mitteltiefe Aquiferwärmespeicher in Norddeutschland

Lars Holstenkamp¹, Julian Justus Lauer¹, Philipp Neidig¹, Oliver Opel¹, Jens Steffahn², Nikolai Strodel¹, Maud Vogel¹, Heinrich Degenhart¹, Dieter Michalzik², Thomas Schomerus¹, Jörg Schönebeck³ und Thor Növig⁴

¹ Leuphana Universität Lüneburg, ² GeoDienste GmbH, ³ KBB Underground Technologies GmbH, ⁴ GeoEnergy Celle e.V.

Keywords: Aquifer Thermal Energy Storage (ATES), mitteltief, Potenzial

Zusammenfassung

Aquiferwärmespeicher stellen eine technisch weitgehend ausgereifte und im Vergleich sehr kostengünstige Option für saisonale Wärmespeicherung dar. Im Vergleich zu Erdsondenspeichern liegen die spezifischen Speicherkosten um den Faktor 5-10, im Vergleich zu oberirdischen Speichern etwa um den Faktor 20 niedriger. Mitteltiefe Aquiferspeicher eignen sich dabei für Wärmemengen über 1 GWh/a und lassen sich bei entsprechender Geologie bis ca. 50-100 GWh/a skalieren. Typischerweise werden Wärmerückgewinnungsgrade im Bereich von 60-80 % erzielt (Sanner 1999, Strodel et al. 2015, Opel et al. 2016). Trotz der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten (u. a. Industrieabwärme, Kraft-Wärme-Kopplung, Solarthermie) wurden bislang in Deutschland nur zwei mitteltiefe bzw. tiefe Aquiferwärmespeicher umgesetzt.

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderte Projekt „Aquiferspeicher“, das von der Leuphana Universität Lüneburg, GeoDienste GmbH, GeoEnergy Celle e.V. und KBB Underground Technologies durchgeführt wird, untersucht daher – basierend auf einem interdisziplinären Ansatz – geologische, wirtschaftliche und sozio-technische Standortfaktoren sowie rechtliche Rahmenbedingungen mit dem Ziel, mögliche Standorte und verallgemeinerbare Erfolgsfaktoren zu identifizieren.

Im Fokus sind dabei neben der Geologie (günstige Speicheraquifere, Grenzwerte für Porosität, Permeabilität, Tiefenlage und weitere spezifische Parameter für die Nutzung als Speicherhorizont) sowie der Abnehmer- bzw. Erzeugersituation (bestehende Wärmenetze, Wärmebedarfsdichten, Erzeugungsstrukturen, Abwärmepotenziale) insbesondere betriebstechnische Hemmnisse und deren erfolgreiche Antizipation sowie mögliche Geschäfts- und Finanzierungsmodelle. Hierbei sollen neben Kraft-Wärme-Kopplung und Solarthermie auch die Nutzung von Überschussstrom („Power-to-Heat“) und industrieller Abwärme thematisiert werden. Weitere Schwerpunkte sind die Erarbeitung von Kostensenkungspotenzialen durch bedarfsgerechte Bohr- und Ausbautechnologien sowie rechtliche Aspekte (Bergrecht, Energierecht), unter anderem mit dem Ziel, Genehmigungsverfahren besser planbar zu gestalten.

Im Beitrag werden erste Ergebnisse des Forschungsprojektes präsentiert und insbesondere Ansätze zur Bestimmung günstiger Standorte vorgestellt.

1. Einleitung

Der Endenergiebedarf soll bis zum Jahr 2020 gegenüber 2008 um 20% reduziert und zu 18% aus Erneuerbaren Energien bereitgestellt werden. Diese energiepolitischen Ziele werden aus gegenwärtiger Sicht nicht erreicht, weil 40% des Endenergieverbrauchs auf den Wärmemarkt entfallen und dort zu wenig geschieht. Selbst wenn der Anteil von Strom am Endenergieverbrauch voraussichtlich deutlich steigen wird, so sind doch im Bereich der effizienten Wärmeerzeugung und -nutzung vor diesem Hintergrund wesentliche Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen notwendig. Zugleich rückt die Kopplung von Strom- und Wärmesektor in den Blickpunkt. Insgesamt wächst dabei die Bedeutung von Wärmespeichern, da sie neben der effizienten Zwischenlagerung vorübergehend nicht benötigter Wärme wichtige Funktionen wie die Reduzierung der konventionellen Spitzenlastbereitstellung, die Erhöhung des Anteils regenerativ erzeugter Wärme oder im Fall von Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und Power-to-Heat (PtH) die Flexibilisierung der Stromerzeugung übernehmen. Deshalb können Speicher wirtschaftlich nicht isoliert, sondern nur im Kontext von Energieerzeugung und -verbrauch betrachtet werden.

Aquiferwärmespeicher (Aquifer Thermal Energy Storage, ATEs) stellen eine im Vergleich zu anderen Wärmespeichern relativ kostengünstige technische Lösung für die saisonale Speicherung dar. Das hier beschriebene Forschungsvorhaben widmet sich dabei mitteltiefen Aquiferspeichern, d. h. abgeschlossenen wasserführenden Gesteinsschichten in ca. 400-1.000 m Tiefe, die zur Speicherung größerer Abwärmemengen genutzt werden können (MICHALZIK 2013). Gegenüber oberflächennahen Projekten erlauben diese eine Speicherung und Entnahme in höheren Temperaturbereichen. Zudem werden im Allgemeinen Trinkwasseraquifere kaum beeinträchtigt. Trotz der günstigen Eigenschaften sind bislang in Deutschland nur zwei Projekte realisiert worden (Neubrandenburg, Reichstag); drei weitere befinden sich in unterschiedlichen Planungsphasen (siehe Tabelle 1). Auch international sieht es nicht besser aus: Die Projekte in Utrecht und Zwammerdam sowie in Le Plaisir-Thiverval-Grignon sind nicht mehr in Betrieb. Weitere Vorhaben sind den Verfassern nicht bekannt.

Tab. 1: Übersicht über mitteltiefe Aquiferwärmespeicher (eigene Zusammenstellung).

(a) Deutschland

| | Neubrandenburg | Reichstag | BMW | Campus Leuphana | TU Berlin |
|---|-------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|-------------|
| Ort | Neubrandenburg | Berlin | Dingolfing | Lüneburg | Berlin |
| Land | Deutschland | Deutschland | Deutschland | Deutschland | Deutschland |
| Inbetriebnahme | 2004 | 2000 | geplant | geplant | geplant |
| Projektstatus | in Betrieb | in Betrieb | geplant | geplant | geplant |
| Tiefe [m] | 1.250 | 320 | 500-700 | 400-450 | 560 |
| Gesteinsschicht | Obere Postera-Sandstein | Hettang Sandstein | Niederbayrischer Malm | Obereozän | - |
| Speicherkapazität [MWh] | 12.000 | - | 115.000 | 10.000 (Dublette) | <= 50.000 |
| natürliche Temperatur Thermalwasser [°C] | 55 | 19 | - | 20-25 | - |
| Wärmeentnahme [MWh/a] | 7.000 | 2.050 | 22.700 | >1.700 | - |
| Entnahmetemperatur [°C] | 75-80 | 30-65 | - | 25-80 | 5-90 |
| Wärmeeinspeicherung [MWh/a] | 8.000 | 2.650 | 25.200 | >3.000 | - |
| Einspeichertemperatur [°C] | 85-90 | 70 | 130 | 85-90 | - |

(b) International

| | Universität | De Bruggen | Le Plaisir-Thiverval-Grignon |
|--------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------------------------|
| Ort | Utrecht | Zwammerdam | Thiverval-Grignon |
| Land | Niederlande | Niederlande | Frankreich |
| Inbetriebnahme | - | - | 1987 |
| Projektstatus | außer Betrieb | außer Betrieb | Versuch abgeschlossen |
| Tiefe [m] | - | - | ca. 500 |
| Entnahmetemperatur [°C] | - | - | max. 180 |

Aus diesem Grund wird in einem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsvorhaben untersucht, welches Potenzial für mitteltiefe ATES-Projekte in Norddeutschland besteht, welche Hemmnisse bei der Umsetzung auftreten und welche Lösungsansätze verfügbar sind. Daraus werden Empfehlungen für die Förderpolitik (mögliche Demonstrationsvorhaben), für die Rechtsetzung und die weitere Forschung und Entwicklung (Roadmap) abgeleitet. Dabei werden in einem interdisziplinären Team geologische (Abschnitt 2) und rechtliche Grundlagen (Abschnitt 3) analysiert sowie wirtschaftliche Lösungen identifiziert (Abschnitt 4).

2. Identifikation geeigneter Aquiferspeicherhorizonte

2.1 Relevante Aquifereigenschaften

Um brauchbare ATES-Horizonte in Norddeutschland im mitteltiefen Teufenbereich von 400 - 1.000 m zu identifizieren, sind neben der Tiefenlage und den damit verbundenen Temperaturniveaus hauptsächlich Kenntnisse zur lithologischen Ausbildung notwendig. Mit einer wirtschaftlichen Nutzung der Aquiferspeicherhorizonte, die sich überwiegend aus der prozentualen Wiedergewinnbarkeit (Verhältnis eingespeicherter zu ausgespeicherter Wärmeenergie) ergibt, sind vor allem entsprechende Anforderungen an die geohydraulischen Eigenschaften verbunden. Besonders bedeutsam ist dabei die Transmissibilität als Produkt aus Permeabilität und Mächtigkeit. Klassischerweise werden als Randbedingungen für einen „brauchbaren“ hydrothermalen Aquifer eine Mindestmächtigkeit von 20 m, eine Mindestpermeabilität von 250 bis 500 mD sowie eine Nutzporosität von mindestens 20 % formuliert (ROCKEL & SCHNEIDER 1992, NLFb 1994). So lassen sich erfahrungsgemäß Zirkulationsraten für einen wirtschaftlich darstellbaren Wärmeentzug realisieren.

Im Falle einer Wärme-Zwischenspeicherung kommt diesen Parametern ebenfalls eine besondere Bedeutung in Bezug auf die erreichbaren Einspeicher- und Ausspeicherraten zu. Andererseits darf besonders die Permeabilität gegenüber einer ausschließlich auf Wärmeentzug ausgelegten Erschließungsvariante nicht zu hoch ausfallen. Wie bereits durch Modellrechnungen gezeigt werden konnte, wirkt sich eine zu hohe Permeabilität kontraproduktiv auf die Wiedergewinnbarkeit der eingespeicherten Wärme aus (DRIJVER et al. 2012). Eine zu hohe Gebirgsdurchlässigkeit resultiert aufgrund der freien Konvektion (ungehinderten Auftriebsströmung) in einer zu raschen Abfuhr der Wärme, so dass bei der Ausspeicherung nur Bruchteile wiedergewonnen werden können. Aufgrund der thermalen Dispersion wirkt sich eine zu hohe Differenz zwischen der eingespeicherten Temperatur und der untertägigen Reservoirtemperatur ebenfalls negativ auf die Speichereffizienz aus.

2.2. Identifikationsprozess

Für die Identifikation geeigneter Aquiferspeicherhorizonte werden im Rahmen des vorgestellten Projekts zunächst flächen- und teufendifferenzierte Angaben aus bestehenden Übersichtskarten und Katasterdaten Norddeutschlands verwendet. Besonders hervorzuheben sind dabei das Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland (REINHOLD et al. 2011), das Geothermische Informationssystem für Deutschland (AGEMAR et al. 2014) sowie der Geotektonische Atlas von Nordwest-Deutschland (BALDSCHUHN et al. 2001). Über diese Informationssysteme sind bereits Aussagen in einem regionalen bis lokalen Maßstab zu Tiefenlage und Reservoirtemperatur möglich.

Darüber hinaus werden für die im ersten Schritt ermittelten Bereiche mit mitteltiefen Speichergesteinen über Bohrungsdaten (Schichtenverzeichnisse, geophysikalische Logdaten, in-situ-Tests) und Angaben aus der Literatur (u. a. Restmächtigkeits- und Fazieskarten) Abschätzungen und ggf. Bestimmungen geohydraulischer Parameter vorgenommen. Hier bleibt allerdings noch zu klären, wie mit den bislang nicht freigegebenen Daten von Bohrungen der Kohlenwasserstoffindustrie verfahren werden soll.

Über einen iterativen, aber innerhalb der zuvor ermittelten Schwankungsbreiten zu geohydraulischen Parametern begrenzten Ansatz werden schließlich mittels numerischer Modellrechnungen mit FEFLOW jeweils für die in Frage kommenden mitteltiefen Speicherhorizonte langjährige Ein- und Ausspeicherszenarien für verschiedene Temperaturniveaus simuliert und so die Rahmenbedingungen für eine möglichst hohe Speichereffizienz bestimmt.

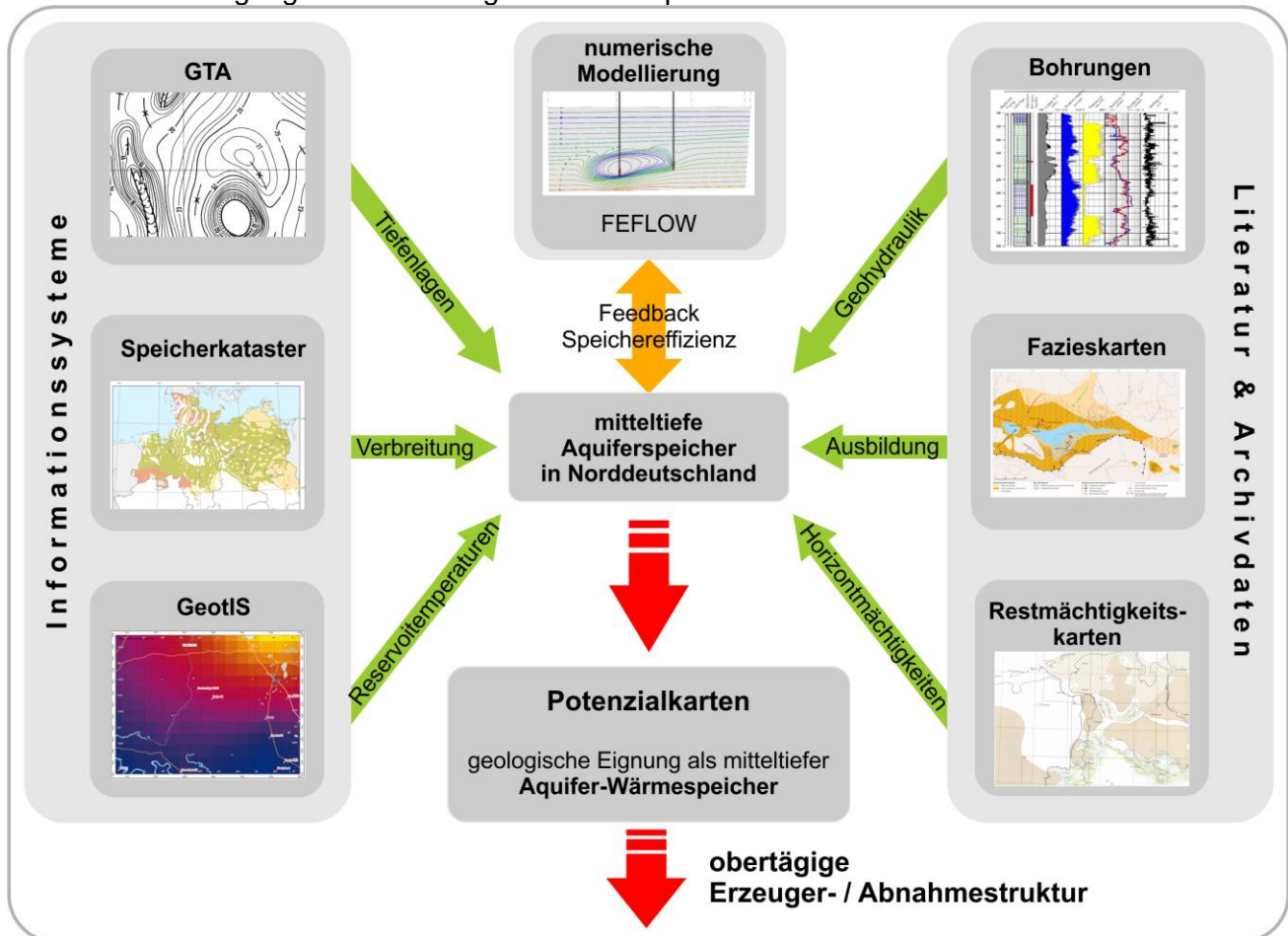


Abb. 1: Prozess zur Identifikation geeigneter Aquiferspeicherhorizonte.

2.3. Ausblick

Im Ergebnis sollen die so ermittelten Speichereffizienzen der flächendifferenzierten Darstellung in Potenzialkarten für die Nutzung des mitteltiefen geologischen Untergrundes als Aquiferspeicher dienen. Dabei sollen möglichst unterschiedliche Einspeichertemperaturen und -raten kategorisiert berücksichtigt werden, die sich im Rahmen der Recherchen zu möglichen Erzeuger- bzw. Abnahmestrukturen ergeben.

3. Rechtliche Einordnung

Aquifer-Wärmespeicher werfen auf verschiedenen Ebenen – bei der Planung im Vorfeld, bei der eigentlichen Errichtung sowie später während des Betriebs – eine Vielzahl von rechtlichen Fragestellungen auf. Auf der Planungsebene können sich Fragen bei der Raumordnung und bei der Bauleitplanung ergeben. Bei der Genehmigungserteilung sind neben dem Berg- und Wasserrecht auch immissions-, natur- und bodenschutzrechtliche sowie bau- und abfallrechtliche Anforderungen zu beachten. Nach einer erfolgreichen Inbetriebnahme kommen Fragen der finanziellen Förderung (Energieright) und der Haftung bei Schäden an Umwelt und Dritten (Haftungsrecht) hinzu (siehe Abb. 2).

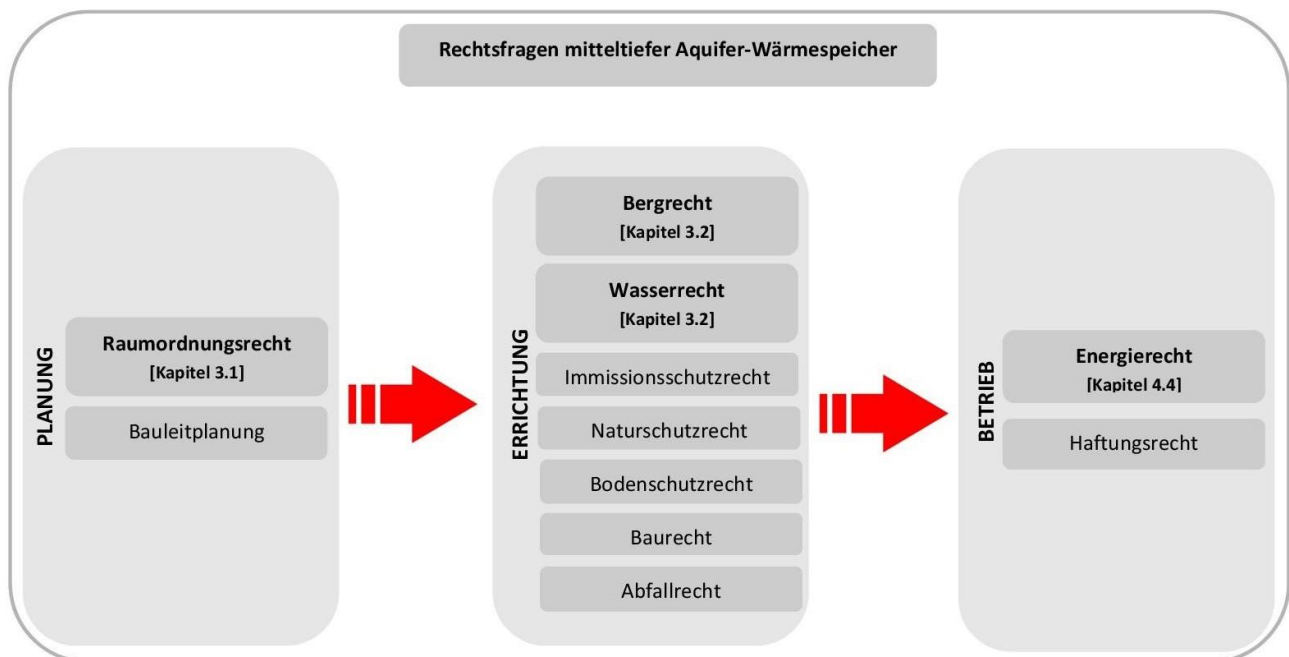


Abb. 2: Überblick über die Rechtsfragen bei mitteltiefen Aquiferwärmespeichern.

3.1 Raumordnerische Relevanz

Bei der Planung von ATES-Projekten ist zunächst das Raumordnungsrecht zu beachten. Dieses beschränkt sich nicht nur auf obertägige Vorhaben, sondern lässt sich grundsätzlich auch auf unterirdische Nutzungen anwenden (ERBGUTH 2011, HELLRIEGEL 2013, RAUMSAUER & WENDT 2014, SCHLACKE & SCHNITTKER 2016; a. A.: VON MÄSSENHAUSEN 2015). Die Anwendung des Raumordnungsgesetzes (ROG) setzt voraus, dass das jeweilige Vorhaben raumbedeutsam ist, d. h. dieses muss raumbeanspruchend und raumbeeinflussend sein. Es ist

zweifelhaft, ob ein Aquiferwärmespeicher als raumbedeutsam anzusehen ist, da sowohl die obertägigen als auch die untertägigen Auswirkungen räumlich stark begrenzt sind. Das Raumordnungsrecht ermöglicht mit Gebietsausweisungen die Steuerung von Nutzungen. Mit Vorranggebieten für bestimmte Nutzungen – als Ziele der Raumordnung – können mit dem Gebiet unvereinbare Nutzungen ausgeschlossen werden (HELLRIEGEL 2013). Damit lassen sich Flächen für ATES-Projekte sichern, entgegenstehende Nutzungen können dort dann nicht mehr verwirklicht werden. Weniger streng verhält es sich in Vorbehaltsgebieten als Grundsätze der Raumordnung; dort ist gemäß § 8 Abs. 7 Nr. 2 ROG der gewünschten Nutzung lediglich ein besonderes Gewicht in der Abwägung mit konkurrierenden Nutzungen beizumessen. Kommt es somit zu einer Abwägung zwischen einem ATES-Projekt und anderen Nutzungen innerhalb des Vorbehaltsgebiets, kommt ersterem ein besonderes Gewicht zu. Die getroffenen Festlegungen sind jedoch überwindbar, wenn die Belange der konkurrierenden Nutzung überwiegen. Eignungsgebiete können vorsehen, dass eine Nutzung in dem Gebiet zulässig ist (Grundsatz der Raumordnung), außerhalb des Gebietes aber ausgeschlossen (Ziel der Raumordnung) (HELLRIEGEL 2013). Mit diesem Instrument könnten bspw. andere bauplanungsrechtlich privilegierte Außenbereichsvorhaben an einem Standort für zulässig erklärt werden, um sie anderswo auszuschließen und den Weg für ATES-Projekte frei zu machen.

Grundsätze der Raumordnung sind in der Abwägung überwindbar (HELLRIEGEL 2013), jedoch bietet das Bergrecht mit der gebundenen Zulassungsentscheidung wenig Raum hierfür. Hingegen sind gemäß § 4 Abs. 1 ROG Ziele der Raumordnung verbindliche Vorgaben und als öffentliche Interessen i. S. d. § 48 Abs. 2 Bundesberggesetzes (BBergG) zu beachten. Stehen also raumordnerische Ziele der Errichtung eines Aquiferwärmespeichers entgegen, können diese im bergrechtlichen Zulassungsverfahren nicht überwunden werden.

3.2 Berg- und wasserrechtliche Einordnung

Im Rahmen der Errichtung von ATES-Anlagen spielen insbesondere das Berg- und das Wasserrecht eine Rolle. Für die Rohstoffgewinnung und Bohrungen in das Erdreich ist das Bundesberggesetz (BBergG) einschlägig, welches u. a. die Aufsuchung, Gewinnung und Aufbereitung von bergfreien und grundeigenen Bodenschätzen regelt. Es stellt sich zunächst die Frage, ob im Fall der Aquiferwärmespeicherung ein Bodenschatz vorliegt. Zwar ist dies bei Wasser nicht der Fall (§ 3 Abs. 1 BBergG), wohl aber wird Erdwärme – auch diejenige des Grundwassers – gem. § 3 Abs. 3 S. 2 Nr. 2 lit. b BBergG den bergfreien Bodenschätzen gleichgestellt. Dies gilt allerdings nur, wenn es sich um natürliche Vorkommen handelt (BENZ 2009). Es stellt sich also die Frage, inwiefern hierbei Erdwärme natürlichen Ursprungs genutzt wird oder lediglich künstlich in das Erdreich eingebracht und wieder gewonnen wird. Die Einordnung als Bodenschatz hätte gem. § 6 S. 1 BBergG das Erfordernis von Berechtigungen und Betriebsplänen zur Folge. Wird das Vorliegen eines Bodenschatzes bejaht, stellt sich die Frage, ob es sich überhaupt um eine Gewinnung i. S. d. § 4 Abs. 2 BBergG handelt, da man das warme Wasser, welches man unter Wärmeverluste zutage fördert, zuvor selbst eingeleitet hat. Eine Betriebsplanpflicht kann sich allerdings auch daraus ergeben, dass die Bohrungen länger als 100 m in den Boden eindringen und daher anzeigepflichtig sind, auch wenn es nicht um die Gewinnung eines Bodenschatzes geht. Die zuständige Behörde entscheidet sodann über die Notwendigkeit eines Betriebsplans (§ 127 BBergG). Die bergrechtlichen Vorschriften zu Untergrundspeichern sind indes nicht anwendbar, da man darunter gem. § 4 Abs. 9 BBergG nur Anlagen zur unterirdischen Speicherung von Gasen, Flüssigkeiten und festen Stoffen mit Ausnahme von Wasser versteht. Die Erdwärme ist somit nicht erfasst. Für die Benutzung von Gewässern bedarf es nach den Vorschriften des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) einer Erlaubnis oder Bewilligung. Letztere verleiht eine stärkere Rechtsposition, ist dafür aber nicht für jegliche Benutzungsarten möglich. Die Niederbringungen der beiden Bohrungen sind Maßnahmen, welche geeignet sind, dauernd oder in einem nicht nur unerheblichen Ausmaß nachteilige Veränderungen der Wasserbeschaffenheit herbeizuführen (unechte Benutzung i. S. d.

§ 9 Abs. 2 Nr. 2 WHG) und bedürfen daher der Erlaubnis. Die Entnahme des Grundwassers stellt eine echte Benutzung gem. § 9 Abs. 1 Nr. 5 WHG (Entnahme, Zutagefördern von Grundwasser) dar und erfordert entweder eine Erlaubnis oder Bewilligung. Kommt es bei einer Erwärmung des Wassers ggf. zum Hinzufügen von Inhibitoren, handelt es sich auch dabei um einen erlaubnispflichtigen Tatbestand (§ 9 Abs. 1 Nr. 4 WHG). Fraglich ist, ob das Wiedereinleiten des Wassers nach § 9 Abs. 1 Nr. 5 WHG (Zutageleiten und Ableiten von Grundwasser) oder nach § 9 Abs. 1 Nr. 4 WHG (Einleiten von Stoffen in Gewässer) zu bewerten ist. Letzteres hätte die Folge, dass nur eine Erlaubnis-, nicht aber eine Bewilligungserteilung möglich wäre. Die Bewilligung verschafft dem Inhaber eine stärkere Rechtsposition, da sie nur aufgrund der in § 49 Abs. 2 S. 1 Nr. 2 bis 5 Verwaltungsverfahrensgesetz (VwVfG) genannten Gründe widerrufen werden kann (Nichterfüllung von Auflagen, Eintreten nachträglicher Tatsachen oder Änderung von Rechtsvorschriften, welche die Behörde berechtigen würde, die Bewilligung nicht zu erlassen, Verhütung oder Beseitigung von schweren Nachteilen für das Gemeinwohl). Für die Zulässigkeit dieser Benutzungen kommt es darauf an, ob schädliche, auch durch Nebenbestimmungen nicht vermeidbare oder nicht ausgleichbare Gewässerveränderungen zu erwarten sind (§ 12 Abs. 1 Nr. 1 WHG). Die zuständige Behörde besitzt dabei einen Ermessensspielraum. Im Falle einer Betriebsplanpflicht entscheidet gem. § 19 WHG die zuständige Bergrechtsbehörde im Einvernehmen mit der zuständigen Wasserbehörde über die Erteilung von Erlaubnissen.

3.3 Genehmigungsrrechtlich relevante wasserchemische und mikrobiologische Aspekte

Ein Aquiferwärmespeicher ist folglich nur dann zulässig, wenn schädliche Beeinträchtigungen von Wasserressourcen vermieden werden können. Grundsätzlich ist eine thermische oder chemische Beeinflussung anderweitig genutzter oder mit oberirdischen Ökosystemen in Verbindung stehender Wasserressourcen auszuschließen.

Eine thermische Beeinflussung oberflächennaher Grundwasserleiter oder des durchwurzelter Raumes ist bei mitteltiefen Speicheraquiferen in der Regel nicht zu befürchten. Chemische Beeinträchtigungen, z. B. durch Vermischung verschiedener Grundwasserhorizonte, müssen durch eine nachgewiesen korrekte bohrtechnische Ausführung vermieden werden. Weiterhin müssen zutage geförderte salz- oder auch schwermetallhaltige Grundwässer separat in sogenannten Slopgruben aufgefangen und entsorgt werden. Auch in Filtern zurückgehaltene Feststoffe sind fachgerecht zu entsorgen.

3.4 Öffentlichkeitsbeteiligung und Akzeptanz

Aus bergrechtlicher Sicht ist eine Öffentlichkeitsbeteiligung grundsätzlich nicht vorgesehen. Jedoch ist gem. § 52 Abs. 2 BBergG für Vorhaben, welche nach der Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben (UVP-V Bergbau) einer Umweltverträglichkeit (UVP) bedürfen, ein Rahmenbetriebsplan zu verlangen. Dieser wiederum setzt ein Planfeststellungsverfahren voraus, welches eine Öffentlichkeitsbeteiligung vorsieht. Eine bergrechtliche Pflicht zur UVP liegt bei Bohrungen ab 1.000 m zur Gewinnung von Erdwärme in Naturschutz- oder Natura 2000-Gebieten vor (§ 1 Nr. 8 UVP-V Bergbau).

Eine Öffentlichkeitsbeteiligung ergibt sich auch aus dem Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz (UVPG), sofern die Pflicht zur Durchführung einer UVP gegeben ist. Dies kann sich aufgrund der Menge des benutzten Wassers ergeben: Gemäß Nr. 13.3 der Anlage 1 des UVPG bedarf es ab 5.000 m³ einer standortspezifischen Vorprüfung (sofern erhebliche nachteilige Auswirkungen auf grundwasserabhängige Ökosysteme zu erwarten sind), ab 100.000 m³ einer allgemeinen Vorprüfung und ab 10.000.000 m³ zwingend einer UVP. Bei mitteltiefen Aquiferwärmespeichern kann durchaus der Schwellenwert von 100.000 m³ Wasser jährlich erreicht werden, demnach wäre hier eine allgemeine Vorprüfung des Einzelfalls erforderlich. Gem. § 9 Abs. 1 UVPG hat die

zuständige Behörde die Öffentlichkeit zu den Umweltauswirkungen des Vorhabens zu beteiligen. § 11 Abs. 1 WHG regelt, dass Erlaubnisse und Bewilligungen für Vorhaben, welche einer UVP bedürfen, nur in einem Verfahren erteilt werden dürfen, das den Anforderungen des UVPG – auch hinsichtlich der Öffentlichkeitsbeteiligung – genügt.

Ohne UVP kommt es zu einer Beteiligung von Betroffenen, wenn man anstelle einer Erlaubnis eine Bewilligung beantragt, was für das Zutageleiten und -fördern von Grundwasser nach § 9 Abs.1 Nr. 5 WHG möglich wäre, nicht aber für das Einleiten von Stoffen in Gewässer und unechten Benutzungen gem. § 9 Abs. 2 Nr. 2 WHG.

Während eine Öffentlichkeitsbeteiligung aus demokratiethoretischen und rechtssystematischen Gründen wünschenswert sein mag, stellt sie für Anlagenbetreiber grundsätzlich ein Risiko dar: Projekte können verzögert oder sogar komplett verhindert werden. Dies kann allerdings auch dann vorkommen, wenn keine rechtliche Verpflichtung zu einer Öffentlichkeitsbeteiligung besteht. Man kann mit ZÖLLNER et al. (2009) entlang der Dimensionen Bewertung (positiv, negativ) und Handlung (aktiv, passiv) vier verschiedene Reaktionsweisen der Bevölkerung auf Erneuerbare-Energien- (und Speicher-)Anlagen unterscheiden: die aktive Unterstützung (auch: Engagement), die (passive) Befürwortung, die (passive) Ablehnung und den (aktiven) Widerstand. Probleme sozialer Akzeptanz bei Geothermievorhaben sind v. a. aus Süddeutschland seit dem Vorfall induzierter Seismizität bei den Projekten in Basel und Landau bekannt, weniger aus Norddeutschland. Tiefe und oberflächennahe Geothermie, Hydraulic Fracturing („Fracking“), Carbon Capture and Storage (CCS) und Bergbau wecken „primordiale Ängste“ der Menschen vor Ort (GROSS 2012, GROSS & MAUTZ 2015); Übertragungseffekte auf andere Vorhaben, auch Aquiferspeicher, sind – unabhängig davon, ob dies sachlich gerechtfertigt ist – wahrscheinlich. Kommunikationsstrategien zur Akzeptanzsicherung adressieren überwiegend den passiven Teil der lokalen Bevölkerung; Widerstand lässt sich nur in wenigen Fällen brechen oder durch Partizipationsangebote mildern. Bei der Ausgestaltung der Kommunikationsstrategien sollte jedoch nicht allein auf die Wissensvermittlung gesetzt werden; die unterschiedlichen Öffentlichkeiten sollten Berücksichtigung finden (BLEICHER & DAVID 2015).

4. Identifikation wirtschaftlicher Lösungen

4.1 Auswahl der Bohrtechnik

Neben der Identifikation geeigneter Speicherhorizonte und Klärung planungs- und genehmigungsrechtlicher Fragen muss auch die Wirtschaftlichkeit der Projekte überprüft werden. Selbst wenn ein Projekt öffentlich gefördert wird, sollte diese Förderung minimiert, also möglichst die wirtschaftlichste Lösung identifiziert werden. Werden betriebstechnisch relevante wasserchemische und mikrobiologische Sachverhalte berücksichtigt (siehe 4.2) und liegen ein geeigneter Wärmelieferant und ein adäquater Wärmeabnehmer vor (siehe 4.3), kommt der Auswahl der Bohrtechnik eine besondere Rolle zu. Da der unterirdische Speicher selbst im offenen System natürlich gegeben ist, stellen die Bohrkosten den bei weitem größten Anteil der Investitionskosten und der zahlungswirksamen Aufwendungen insgesamt dar.

Im Vorhaben werden bohrtechnische Fragen (bohrtechnische Probleme, Verrohrungen, Zementationen und Komplettierungen) mit der Zielstellung analysiert, Potenzial für technische Weiterentwicklungen, insbesondere aber Kostenreduktionspotenzial durch eine geeignete Auswahl an mitteltiefe Aquiferprojekte angepasster Bohrtechnik zu identifizieren.

4.2 Betriebstechnisch und ökonomisch relevante wasserchemische und mikrobiologische Aspekte

Von wirtschaftlicher Bedeutung sind weiterhin wasserchemische und mikrobiologische Aspekte, die durch Korrosion und Bildung von Ablagerungen zu Problemen führen können (WAGNER et al.

1988). Während Korrosion die direkte Zerstörung von Anlagenbauteilen wie Rohre und Pumpen betrifft, hat die Bildung von Ablagerungen vor allem eine Verschlechterung der Brunnenleistung und der Wärmetauscher zur Folge, der jeweils durch regelmäßige Wartung zu begegnen ist.

Die chemische Zusammensetzung des im avisierten Horizont anzutreffenden und später als Speichermedium genutzten Wassers ist dabei bereits während der Planungsphase zu thematisieren. Die in mitteltiefen Aquiferen anzutreffenden Wässer weisen in der Regel eine deutlich höhere Mineralisierung (d. h. Anteil gelöster Substanzen) auf als oberflächennahe Grundwässer. Ähnlich wie bei der Temperatur liegt ein sog. geochemischer Gradient vor, d. h. der Anteil gelöster Substanzen steigt mit zunehmender Tiefe des Aquifers.

Bedingt durch Druck und Temperaturschwankungen sowie durch Kontakt mit Luftsauerstoff können gelöste Mineralien ausfallen. Von besonderer Relevanz ist dabei der Gehalt an Kalziumcarbonat (Calcit), dessen Löslichkeit stark temperaturabhängig ist und durch das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht auch durch Druckänderung und Ausgasen und/oder Aufnahme von Kohlendioxid (und sich daraus ergebender Lösung zusätzlichen Calcits) beeinflusst werden kann. Die Versinterung genannten Ablagerungen finden sich hauptsächlich am Wärmetauscher und im warmen Brunnen. In kalkhaltigen Aquiferen ist die maximale Einspeichertemperatur entsprechend begrenzt, ggf. müssen technische Maßnahmen zur Vermeidung von Kalkausfällungen getroffen werden (bspw. Säuern mit CO_2).

Aber auch die Löslichkeit anderer Mineralien ist insbesondere von der Temperatur abhängig und daher besonders bei der Wärmespeicherung im Aquifer zu beachten, bei der das Wasser im Wechsel aufgeheizt und abgekühlt wird. Durch das Aufheizen steigt die Lösekapazität des Wassers an; die dadurch zusätzlich aufgenommenen Mineralien können dann beim Abkühlen ggf. wieder ausfallen. Derartige Prozesse sind nicht zu verhindern, sollten jedoch zur Vermeidung betriebstechnischer Probleme im Rahmen der Machbarkeitsuntersuchung durch eine wasserchemische Modellierung bewertet werden. In die Anlage integrierte Filter verringern die Partikelfracht im Betrieb und halten zum Schutz der Brunnenverfilterung und der Pumpen ausfallende Mineralien ebenso wie Ton- und Schluffpartikel zurück.

Probleme durch den Eintritt von Luftsauerstoff sind ebenfalls kaum vollständig zu vermeiden. Selbst sehr geringfügige Mengen im Bereich weniger $\mu\text{g/l}$ führen insbesondere zur Ausfällung von Eisen (Verockerung) durch Oxidation des gelösten, zweiwertigen zu dreiwertigem Eisen, das nahezu unlösliche und nach Alterung schwer entfernbare Oxide bildet. An diesen Prozessen sind auch Mikroorganismen beteiligt, die insbesondere bei ansonsten gehemmter chemischer Reaktion eine Rolle spielen (EGGERICHS et al. 2014). Manche dieser Organismen, wie bspw. *Gallionella* spp. können bei geringfügigem Sauerstoffzutritt auch in extrem nährstoffarmem Wasser wachsen, wobei gelöstes Eisen und Kohlendioxid als Nahrungsgrundlage dienen.

Auch häufig vorkommende Schwefelverbindungen wie Sulfide und Sulfate werden durch Sauerstoffzutritt und wechselnde Pumprichtungen beeinflusst: Sulfide können durch schwefeloxidierende Bakterien, aber auch abiotisch durch Eisenoxide zu stark korrosivem elementarem Schwefel oxidiert werden, Sulfat kann bei aufgezehrtem Sauerstoff und bspw. durch Bakterienwachstum produziertem vorliegenden organischen Material zu Sulfid reduziert werden und zu entsprechenden Korrosions- und Belagbildungsproblemen führen (OPEL 2013, OPEL et al. 2014).

Strategien zur Minimierung derartiger Probleme umfassen die richtige Materialwahl hinsichtlich Brunnenverfilterung, Verrohrung, Pumpen und Wärmetauscher sowie Maßnahmen zur Vermeidung des Eindringens von Luftsauerstoff (Stickstoffbeaufschlagung der Brunnen). Zur weiteren Optimierung des Betriebs kann ein wasserchemisches Monitoring eingesetzt werden, das anhand von Leitparametern wie pH-Wert, Sauerstoffgehalt, elektrischer Leitfähigkeit und ggf. Redoxpotential eine kontinuierliche Überwachung erlaubt. Mithilfe geeigneter Auswertungsverfahren können Prozesse wie die Verockerung, Sulfatreduzierung und ggf. Versinterung überwacht werden und bspw. bei erhöhtem Eindringen von Sauerstoff rechtzeitig Abhilfe geschaffen werden, bevor größere Schäden oder Beeinträchtigungen entstehen (OPEL 2013, OPEL et al. 2014).

4.3 Wärmequellen und -senken

Neben der Analyse (bohr-)technischer und umweltchemischer Probleme und Lösungsansätze steht im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen die Untersuchung geeigneter Anwendungsfelder, d. h. geeigneter Wärmequellen und -senken, im Mittelpunkt. Günstige Voraussetzungen werden insbesondere dort vermutet, wo ohne Zusatzaufwand oder mit nur geringeren Investitionen vorhandene industrielle Abwärme gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt in ein bestehendes Netz eingespeist werden kann. Im Einzelfall zu klären ist, ob das Temperaturniveau für eine Verwendung in betrieblichen Prozessen oder vorhandenen Wärmenetzen zur Versorgung privater Haushalte ausreicht. Bekannt, etwa im Fall Neubrandenburg, ist die Anwendung in Verbindung mit bestehenden KWK-Anlagen, die mit einem Wärmespeicher besser ausgelastet oder Strom- statt Wärme-geführt gefahren werden können. Denkbar wäre auch eine saisonale Speicherung von Wärme bei einem Überfluss an Strom, der in Wärme gewandelt wird (Power-to-Heat). Schließlich könnte der Aquiferspeicher genutzt werden, um dezentral vorhandene überschüssige Wärme auf Quartiersebene zu speichern. Eine saisonale Speicherung in Zusammenhang mit Solarthermieanlagen ist für oberflächennahe Aquiferspeicher aus den Niederlanden bekannt (SNIJDERS 2005), kommt bei solarthermischen Großanlagen bislang aber nicht zur Anwendung. Zu klären ist, ob eine Bündelung unterschiedlicher Wärmequellen technisch, rechtlich und wirtschaftlich machbar ist.

Im Projekt werden im Anschluss an Experteninterviews typische Anwendungsfälle (Erzeuger und Abnehmer) konstruiert. Das technische System und die Zahlungsströme werden mithilfe von TRNSYS modelliert, wobei die Ergebnisse der FEFLOW-Modellierungen aus dem geologischen Arbeitspaket in das Modell eingespeist werden können. Für die Lastprofile wird auf einen in Matlab programmierten Lastprofilgenerator zurückgegriffen.

4.4 Energierechtliche Aspekte

Im Rahmen des Energierechts könnten sich Besonderheiten bei der finanziellen Förderung ergeben. Hier wird insbesondere auf die Verknüpfung von Aquiferwärmespeichern mit einer KWK-Anlage, hier einem Blockheizkraftwerk (BHKW), abgestellt. Das BHKW fällt unter das Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (KWKG) nach §§ 1, 2 Nr. 14 KWKG und ist damit eine KWK-Anlage. Die finanzielle Förderung von KWK-Anlagen richtet sich nach § 6 KWKG. Besonderheiten bestehen dabei bei Anlagen, die den Strom nicht in ein Netz der öffentlichen Versorgung einspeisen (§ 6 Abs. 4 KWKG). Die Höhe des jeweiligen Zuschlags ist in § 7 KWKG geregelt. Sie richtet sich nach dem KWK-Leistungsanteil und liegt zwischen 3,1 und 8 Cent je Kilowattstunde.

Die Dauer der Zuschlagszahlung ist nach § 8 KWKG von verschiedenen Kriterien abhängig: Das erste Kriterium stellt darauf ab, ob es sich um eine neue, modernisierte oder nachgerüstete KWK-Anlage handelt. Als zweites Kriterium ist nach der elektrischen KWK-Leistung zu differenzieren. Das letzte Kriterium unterscheidet zwischen der Anzahl der Vollbenutzungsstunden. Eine Sonderregelung findet sich in § 9 KWKG für neue KWK-Anlagen mit einer elektrischen KWK-Leistung von bis zu 2 Kilowatt.

Fraglich ist, ob auch der Aquifer als Wärmespeicher nach §§ 22, 23 KWKG einzustufen ist. Nach § 2 Nr. 33 KWKG muss der Wärmespeicher eine technische Vorrichtung zur zeitlich befristeten Speicherung von Nutzwärme einschließlich aller technischen Vorrichtungen zur Be- und Entladung des Wärmespeichers sein. Der Aquifer selbst ist nicht „technisch“ in diesem Sinne, allerdings die Vorrichtungen zum Be- und Entladen. Die Einordnung ist somit zu klären. Dann besteht die Möglichkeit eines Zuschlags.

Weitere Förderungsmöglichkeiten bestehen nach dem Stromsteuergesetz. Bis zu einer Nennleistung von 2 MW sind KWK-Anlagen, wozu BHKW gehören, von der Stromsteuer befreit (normalerweise 2,05 Cent / kWh; § 9 StromStG). Dies gilt für jede Kilowattstunde Strom, die in

räumlicher Nähe verbraucht wird, also durch Eigenverbrauch oder Abgabe an umliegende Grundstücke.

Nach § 53a Energiesteuergesetz (EnergieStG) ist auch eine vollständige Befreiung von der Energiesteuer möglich, wenn:

1. die Anlage hocheffizient im Sinne des Anhangs III der Richtlinie 2004/8/EG und deren Fortschreibung ist und
2. der Nutzungsgrad für den Entlastungszeitraum wenigstens 70% beträgt.

Die vollständige Steuerentlastung wird jedoch nur für die Zeit gewährt, in der die KWK-Anlage entsprechend den Vorgaben des § 7 Einkommensteuergesetzes (EStG) abgeschrieben wird. Auch hier ist fraglich, ob neben der KWK-Anlage auch der Aquifer bzw. die Speichervorrichtung selbst erfasst wird.

Zudem ist Energiesteuerrückerstattung bzgl. des Erwerbs des Brennstoffes möglich (Erdgas 0,55 Cent / kWh, Flüssiggas 6,06 Cent / kg, leichtem Heizöl 6,135 Cent / l).

5. Erwartete Ergebnisse: Potenzialkarten, Roadmap, Förderempfehlungen

Die vorstehenden Ausführungen geben einen Einblick in die Fragestellungen, denen sich das Forschungsprojekt „Aquiferspeicher“ widmet, und in das Zusammenspiel unterschiedlicher Disziplinen im Vorhaben. Das Projekt läuft bis Frühjahr 2019. Im Ergebnis werden

- geeignete Standorte für mitteltiefe Aquiferwärmespeicher in Norddeutschland identifiziert, wobei geologische und ökonomische Potenziale unter Beachtung rechtlicher Grenzen miteinander verschnitten werden (Potenzialkarten);
- notwendige Veränderungen und mögliche zukünftige Entwicklungen abgeleitet (Roadmap) sowie
- potenzielle Demonstrationsvorhaben erkundet und aus der Roadmap Implikationen für die öffentliche Forschungs- und Technikförderung hergeleitet (Förderempfehlungen).

Quellenangaben

AGEMAR, T., ALTEN, J., GANZ, B., KUDER, J., KÜHNE, K., SCHUMACHER, S. & SCHULZ, R.: The Geothermal Information System for Germany – GeotIS.- *ZDGG*, 165/2, (2014), 129–144.

BALDSCHUHN, R., BINOT, F., FLEIG, S. & KOCKEL, F.: Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. – *Geologisches Jahrbuch*, A 153 (2001).

BENZ, S.: *Rechtliche Rahmenbedingungen für die Nutzung der oberflächennahen Geothermie*, BWV, Berlin (2009).

BLEICHER, A. & DAVID, M.: Keine Angst vor der Öffentlichkeit – Beteiligung im Rahmen der Energie- und Rohstoffgewinnung in Deutschland, *Tagungsband*, Bergbau, Energie und Rohstoffe, Freiberg (2015), online verfügbar unter

http://www.ufz.de/export/data/2/93154_Bleicher%20David_2015_Bergbau_Energie_Rohstoffe.pdf.

VON MÄSSENHAUSEN, H.-U.: § 48, in: BOLDT, G., WELLER, H., KÜHNE, G., VON MÄSSENHAUSEN, H.-U.: *Bundesberggesetz Kommentar*, 2. Auflage, De Gruyter, Berlin (2015).

DRIJVER, B., van AARSSSEN, M. & de ZWART, B.: High-temperature aquifer thermal energy storage (HT-ATES): sustainable and multi-usable, *12th International Conference on Energy Storage*, Innostock (2012), Lleida.

EGGERICHS, T., OPEL, O., OTTE, T., RUCK, W.K.L.: Interdependencies between Biotic and Abiotic Ferrous Iron Oxidation and Influence of pH, Oxygen and Ferric Iron Deposits. *Geomicrobiology Journal*, 31, (2014), 461-472.

ERBGUTH, W.: Unterirdische Raumordnung – zur raumordnungsrechtlichen Steuerung untertägiger Vorhaben, *ZUR* 2011, 121-126.

- GROSS, M.: Old Science Fiction, New Inspiration – Communicating Unknowns in the Utilization of Geothermal Energy, *Science Communication*, 35, (2012), 810-818.
- GROSS, M. & MAUTZ, R.: *Renewable Energies*, Routledge, Abingdon & New York (2015).
- HELLRIEGEL, M.: Rechtsrahmen für eine Raumordnung zur Steuerung unterirdischer Nutzungen, *NVwZ* 2013, 111-116.
- MICHALZIK, D.: Mitteltiefe Geothermie – Was ist das?, *Geothermische Energie*, 76, (2013), 30-31.
- NLfB: Regionale Untersuchungen von geothermischen Reserven und Ressourcen in Nordwestdeutschland, Endbericht, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover (1994).
- OPEL, O.: *Detektion von Verockerungsprozessen, Korrosion und Belagbildung - Monitoring der Eisenoxidation in Brunnen, Gebäuden, Leitungen und technischen Anlagen mithilfe des Redoxpotentials* (zugl.: Lüneburg, Leuphana Universität, Diss.), SVH Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften (2013).
- OPEL, O., EGGERICHS, T., OTTE, T. & RUCK, W.K.L.: Monitoring of microbially mediated corrosion and scaling processes using redox potential measurements, *Bioelectrochemistry*, 97, (2014), 137-144.
- RAMSAUER, U. & WENDT, H.: Einsatz der Fracking-Technologie insbesondere aus Sicht des Gewässerschutzes, *NVwZ* 2014, 1401-1408.
- REINHOLD, K., MÜLLER, C. & RIESENBERG, C.: *Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland – Synthese*, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin & Hannover (2011).
- ROCKEL, W. & SCHNEIDER, H.: Möglichkeiten der Nutzung geothermischer Energie in Nordostdeutschland und der Bearbeitungsstand geplanter Vorhaben, *Tagungsband, Geothermische Energie – Forschung und Anwendung in Deutschland, Fachtagung Geothermie Berlin 1991* (1992), 87-98.
- SCHLACKE, S. & SCHNITTKER D.: Fracking und Raumordnung – Steuerungspotenziale der Landesentwicklungsplanung, *ZUR* 2016, 259-269.
- SNIJDERS, A.: *Aquifer Thermal Energy Storage in the Netherlands – Status beginning of 2005*, http://www.iftechinternational.com/files/Status_ATES_NL_2005-echwo0.pdf.
- WAGNER, R., KOCH, M., ADINOLFI, M.: *Chemische und biologische Prozesse in Aquifer-Wärmespeichern*, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft 101, Oldenbourg, München (1988).
- ZÖLLNER, J., RAU, I. & SCHWEIZER-RIES, P.: Akzeptanz Erneuerbarer Energien und sozialwissenschaftliche Fragen, *Projektendbericht*, Universität Magdeburg, Magdeburg (2009).

Leuphana Universität Lüneburg, IBFR, Scharnhorststraße 1, 21335 Lüneburg
 holstenkamp@uni.leuphana.de