

Geosys

**Systemanalyse
der geothermalen
Energieerzeugung**

Teil A

Synthesebericht



Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH

GeoSys

**Systemanalyse
der geothermalen
Energieerzeugung**

Teil A
Synthesebericht

Thomas Brassler
Rémi Cannepin
Sebastian Feige
Gerd Frieling
Horst-Jürgen Herbert
Christoffer Heinen
Christian Strack
Christoph Vieten

Juni 2014

Anmerkung:

Die diesem Bericht zugrunde-
liegenden Arbeiten wurden im
Auftrag des Bundesministeri-
ums für Wirtschaft und Energie
(BMWi) im Rahmen des Vorha-
bens mit dem Förderkennzeichen
0325235 erstellt.

Die Arbeiten wurden von der
Gesellschaft für Anlagen- und
Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt
dieser Veröffentlichung liegt bei
den Autoren.

GRS - 316 (Teil A)
ISBN 978-3-939355-95-3

Deskriptoren

Geothermales Reservoir, Geothermie, Recht, Schutzgut, Systemanalyse, Technische Anlage, Umwelt

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Hintergrund	3
2.1	Übergeordnete Fragestellung	4
2.2	Gegenstand der Untersuchung	4
3	Vorgehensweise	7
3.1	Betrachtungsraum	7
3.2	Kompartimente	7
3.3	Verwendete Fachliteratur sowie benutzte Informations- und Dokumentationsdienste	8
3.4	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9
4	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	11
4.1	Kompartiment „Recht“	11
4.2	Kompartiment „Geothermales Reservoir“	18
4.2.1	Physikalische Prozesse – seismische Ereignisse	19
4.2.2	Chemische Prozesse und reaktiver Stofftransport	22
4.3	Kompartiment „Technische Anlage“	26
4.3.1	Kraftwerkstechnologien.....	27
4.3.2	Betriebsmittel.....	27
4.3.3	Betriebserfahrungen	28
4.3.4	Auswirkungen des Betriebs der Anlage	32
4.4	Kompartiment „Umwelt 1“ (oberirdische Auswirkung des Anlagenbetriebes).....	34
4.4.1	Konkrete Fragestellungen NORM & Geothermie	34
4.5	Kompartiment „Umwelt 2“ (unterirdische Auswirkungen auf Schutzgüter)	44
4.5.1	Ziel der Analysen	44
4.5.2	Bohrablauf und -technik.....	45
4.5.3	Werkstoffe	46

4.5.4	Auswirkungen bei der Stimulation geothermaler Lagerstätten	47
4.5.5	Schadstoffemissionen und -immissionen	48
4.5.6	Auswirkungen hydro-geomechanischer Prozesse.....	51
4.5.7	Thermische Auswirkungen.....	52
4.5.8	Funktionsverluste (Wasser und Boden)	52
4.5.9	Erfolgte und derzeitige Forschungsarbeiten, möglicher Forschungsbedarf.....	53
4.6	Verbesserung der Akzeptanz.....	55
5	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	59
5.1	Allgemeines	59
5.2	Kompartiment „Recht“	60
5.3	Kompartiment „Geothermales Reservoir“	65
5.4	Kompartiment „Technische Anlage“	68
5.5	Kompartiment „Umwelt“	69
6	Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	77

1 Einleitung

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie¹ (BMWi) geförderte Vorhaben 0325235 „Systemanalyse der geothermalen Energieerzeugung“ (Kurztitel: GeoSys) hat auf die Bekanntmachung über die Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich Erneuerbare Energien (amtlicher Teil des Bundesanzeigers Nummer 186, Seite 4352, Freitag, 5. Dezember 2008), Unterpunkt 2.4 Geothermie („*Entwicklung von Methoden, Verfahren und Entscheidungshilfen, die zur Vorbereitung dienen und im Zuge der Exploration das Fündigkeits- und Erfolgsrisiko vermindern*“) Bezug genommen. Im Vorhaben wurden mittels einer interdisziplinären Systemanalyse der Entwicklungsstand und die Fortschritte der Tiefengeothermie in Deutschland aufgezeigt sowie aus Sicht der GRS bestehender Handlungsbedarf identifiziert. Die Studie stellt einen Beitrag zur Verbesserung der mittelfristigen Verfügbarkeit und der Effizienz der in Deutschland betriebenen Tiefengeothermie-Anlagen dar. Sie soll dazu führen, die Produktivität und Akzeptanz geothermaler Anlagen zu steigern. Dazu wurden die technischen und ökologischen Aspekte sowie die zu betrachtenden Schutzgüter, Prozesse und Wirkfaktoren identifiziert sowie verfügbare Daten analysiert und dokumentiert. Hierauf aufbauend wurden anhand konkret identifizierter Phänomene im Anlagenbetrieb Modellrechnungen und probabilistische Analysen durchgeführt, die sowohl die Untersuchung möglicher Anlagenzustände als auch deren potenzielle Auswirkungen beinhalten. Die Arbeiten wurden von einer systematischen Untersuchung des Rechtsrahmens begleitet.

Als Systemanalyse berücksichtigt das Vorhaben gleichermaßen Planungs- und Explorationsphase, Errichtungsphase, Test- und Betriebsphase sowie den Rückbau einer Anlage der Tiefengeothermie zur Strom- und Wärmeerzeugung. Die Systemanalyse zeigt Wirkungszusammenhänge und Handlungsbedarf auf und liefert neue Ansätze und Entscheidungshilfen zum Umgang mit identifizierten Problemen.

Der vorliegende Berichtsteil A stellt in stark komprimierter Form das Vorhaben, dessen wissenschaftlich-technische Ergebnisse sowie die zusammengestellten wesentlichen Erfahrungen aus den Kompartimenten „Recht“, „Geothermales Reservoir“, „Technische Anlage“ und „Umwelt“ dar.

¹ Bei Vorhabensbeginn lag die Zuständigkeit beim damaligen Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (heute: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, BMUB)

Ausführliche Details finden sich in der separaten, ca. 800-seitigen Ergebnisdokumentation (Berichtsteil B), die als CD dieser Publikation im Rahmen der Schriftenreihe „GRS-Bericht“ (GRS-316) beigelegt ist.

Auch sämtliche Tabellen und Abbildungen sind Bestandteil der ausführlichen Ergebnisdokumentation (Berichtsteil B). Identifizierte und verwendete Literatur wird ebenfalls in der Ergebnisdokumentation referenziert.

2 Hintergrund

Erklärtes Ziel der Förderinitiativen zum Ausbau erneuerbarer Energien ist die Umsetzung nachhaltiger und umweltfreundlicher Konzepte, um im Rahmen der geltenden energiepolitischen und energiewirtschaftlichen Zielstellungen und Rahmenbedingungen in Deutschland einen Beitrag zur Umgestaltung der Energieversorgung zu leisten.

Moderne Strom- und Wärmekraftwerke wie auch sonstige Industrieanlagen sind Ausdruck des technischen Fortschritts. Aufgrund gefährlicher Stoffe, technischer Vorgänge oder Zustände können sie aber auch eine Gefahr darstellen. Insofern können auch die Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien mit anderen Sach- oder Rechtsgütern, wie z. B. dem Umwelt-, Natur- oder Denkmalschutz in Konflikt geraten. Genehmigungen für solche Anlagen sind oft Gegenstand gerichtlicher Auseinandersetzungen. Dies beeinträchtigt insbesondere die Planungssicherheit der entsprechenden Vorhabensträger. Nutzungskonkurrenzen zu anderen Anlagen und Tätigkeiten am (geplanten) Standort eines Geothermiekraftwerks sind nicht ausgeschlossen.

Es gilt daher, Umwelteinwirkungen zu untersuchen, um negative Begleiterscheinungen soweit wie möglich zu vermeiden und einen Beitrag für eine sachliche Diskussion der Energieversorgung durch Geothermie-Kraftwerke zu leisten. Für einen sach- und zielgerechten Ausbau der Geothermie sind – wie bei anderen bergbaulichen Tätigkeiten – dabei zuvorderst umfassende Kenntnisse über den geologischen Aufbau des Untergrundes entscheidend. Im zweiten Schritt kommt es dann auf die eingesetzte Technik, die verwendeten Materialien und Stoffe sowie die jeweilige Schadensvorsorge an, um potenzielle Umwelt- und Gesundheitsrisiken im Zusammenhang mit Anlagen der Tiefengeothermie entsprechend beurteilen zu können.

In diesem Zusammenhang war es Gegenstand der durchgeführten Untersuchungen, die in der wissenschaftlichen Literatur und parlamentarischen Vorgängen erörterten Probleme, Hemmnisse und Vorgaben für die Genehmigung von Anlagen zur Nutzung der Tiefengeothermie, aber auch die in öffentlichen Diskussionen z. B. von Bürgerinitiativen benannten potenziellen Umwelt- und Gesundheitsrisiken sachlich und ergebnisoffen zu analysieren. Im vorliegenden Projekt lag dabei der Schwerpunkt auf einer allgemeinen, generischen Analyse der Tiefengeothermie. Für fundierte Aussagen über einzelne konkrete Anlagen wären weitergehende Analysen des geologischen Aufbaus des Untergrundes, der eingesetzten Technik, der verwendeten Materialien und Stoffe

sowie der jeweiligen Schadensvorsorge am konkreten Anlagenstandort erforderlich gewesen.

2.1 Übergeordnete Fragestellung

Auf den Menschen als Bestandteil des Ökosystems wirkt seine Umwelt mittelbar oder unmittelbar ein. Im Gegenzug resultieren dessen Handlungen in teils erheblichen Auswirkungen auf seine Umwelt. Zur Beurteilung der Zulässigkeit der Beeinträchtigung eines gesetzlich erfassten Schutzguts (Mensch, Flora, Fauna, Umweltmedium, Sach- und Kulturgut etc.) durch Wirkfaktoren (z. B. stoffliche Emissionen) durch vom Menschen ausgelöste Prozesse müssen daher die Zusammenhänge und gesetzlichen Beurteilungsmaßstäbe klar herausgearbeitet und analysiert werden. Im Rahmen des Vorhabens wurde dabei ganz wesentlich die unmittelbare wie auch mittelbare (über die Umweltmedien Boden, Wasser, Luft) Beeinträchtigung des Schutzguts „menschliche Gesundheit“ betrachtet.

2.2 Gegenstand der Untersuchung

Geothermie ist eine prinzipiell grundlastfähige Form der Energieerzeugung. Weltweit ist die Nutzung geothermaler Energie vor allem zur Stromerzeugung an vulkanisch aktive Regionen gekoppelt. Diese befinden sich insbesondere an tektonischen Plattengrenzen. Hervorzuheben ist hier der sogenannte Fire Belt, (auch unter den Bezeichnungen circum-Pacific belt oder circum-Pacific seismic belt bekannt). In diesen Regionen stehen mehrere hundert Grad heiße Fluide (Wasser / Dampf) bereits in einer Tiefe von wenigen hundert Metern an. Diese heißen Gesteinsschichten werden als Hochenthalpie-Lagerstätten bezeichnet. Die weltweite Stromerzeugung aus Geothermie wird durch die Nutzung von Hochenthalpie-Lagerstätten dominiert.

In nichtvulkanischen Gebieten sind solch hohe Temperaturen nur in weit größeren Tiefen anzutreffen. Entsprechend sind zur Energiegewinnung tiefe Bohrungen notwendig. In den wirtschaftlich erschließbaren Tiefen in Deutschland stehen Temperaturen von bis zu 170 °C an. Diese Lagerstätten werden als Niedrigenthalpie-Lagerstätten bezeichnet. Bei Hochenthalpie-Lagerstätten kann der Wasserdampf direkt zur Stromerzeugung genutzt werden. Bei Niedrigenthalpie-Lagerstätten reicht die Enthalpie zur direkten Nutzung nicht aus, hier muss der Wirkungsgrad durch eine Konversionsanlage erhöht werden.

Im GeoSys-Projekt werden nur tiefe und offene Verfahren zur geothermalen Wärme-gewinnung betrachtet. Es gibt keine einheitliche Konvention, ab welcher Tiefe eine Bohrung als tief und bis zur welcher Tiefe eine Bohrung als oberflächennah gilt. In der Literatur wird die Grenze bei einer Bohrungstiefe von etwa 400 m unter der Gelände-oberfläche definiert. Es werden sowohl Anlagen der geothermalen Stromerzeugung als auch Anlagen zur Wärmeversorgung (Kraft-Wärmekopplung) betrachtet. In Deutsch-land sind häufig binäre Anlagentypen realisiert, die beide Verfahren anwenden, um die Wirtschaftlichkeit der Anlagen zu erhöhen.

Für die Tiefengeothermie gibt es zwei grundlegende Verfahren zur geothermalen Energiegewinnung. Zum einen kann die Wärmeenergie direkt aus dem Thermalwasser hydrothermalen Lagerstätten entzogen werden (hydrothermale Geothermie) und zum anderen können Gesteine erschlossen werden, deren Temperatur hoch genug ist, um von der Erdoberfläche in den Untergrund gepumptes Wasser auf wirtschaftlich nutzba-re Temperaturen zu erhitzen (petrothermale Geothermie).

Hydrothermale Systeme sind poröse bzw. klüftige Aquifere (Grundwasserleiter), in de-nen Thermalwasser mit einer wirtschaftlichen Temperatur zirkuliert. Mit Hilfe einer sog. Bohrungsdublette wird das Thermalwasser über eine Förderbohrung der Lagerstätte entzogen und durch eine Injektionsbohrung wieder in die Lagerstätte verpresst. Das heiße Wasser kann zur Speisung von Nah- und Fernwärmenetzen genutzt werden. Ab ca. 100 °C ist auch eine Verstromung möglich.

Petrothermale Systeme gewinnen die Wärme aus heißen Gesteinen im Untergrund. Hierbei wird Wasser in klüftig-poröse Gesteinsschichten verpresst und durch eine zwei-te Bohrung wieder an die Oberfläche gefördert. Durch die Migration des Wassers zwi-schen den Bohrungen und den Kontakt mit dem Gestein erwärmt sich das Wasser. Das Wasser fungiert praktisch als Wärmetauscher und entzieht dem Gestein die in diesem gespeicherte Energie. Dieses Verfahren wird Hot-Dry-Rock (HDR) genannt. Im Geothermieprojekt Soultz-sous-Forêts sind beispielsweise die Gesteine bis in eine Tie-fe von etwa 5 km mit Wasser gesättigt, so dass zum Betrieb der Anlage kein zusätzli-ches Wasser mehr in den Untergrund eingebracht werden musste. Im tiefsten bislang auf der Erde abgeteuften Bohrloch, der supertiefen Kola-Bohrung, wurde Schwerkraft beeinflusstes Wasser bis in 9 km Tiefe angetroffen. Somit hatte sich der Begriff Hot „dry“ rock bislang nicht bestätigt. Deshalb ist man zu den Bezeichnungen Hot Wet Rock (HWR) bzw. Hot Fractured Rock-System (HFR) übergegangen. Als umfassender Begriff wird Enhanced Geothermal Systems (EGS) verwendet.

Da in Deutschland zurzeit nur hydrothermale Lagerstätten zur geothermalen Energiegewinnung genutzt werden, haben sich die Arbeiten im GeoSys-Vorhaben vornehmlich auf konkrete Fragestellungen konzentriert, die in den hydrothermalen Systemen der drei Niedrigenthalpie-Regionen Deutschlands (Norddeutsches Becken, Oberrheingraben und Süddeutsches Molassebecken) eine Rolle spielen.

Die konkreten wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele des Vorhabens waren:

- Identifizierung von Schutzgütern, Prozessen und Wirkfaktoren
- Dokumentation von Werkzeugen und Daten für die Analyse
- Evaluierung eingesetzter Technologien, Methoden und Stoffe zur Nutzung geothermaler Ressourcen unter Berücksichtigung der identifizierten Schutzgüter, Prozesse und Wirkfaktoren
- Durchführung einer quantitativen, probabilistischen Unsicherheitsanalyse zum Aspekt der Strahlenexpositionen von Beschäftigten in Geothermieanlagen,
- Bewertung weiterer wichtiger Wirkfaktoren auf Basis von Literaturrecherchen und *Expert judgement*
- Analyse des derzeit geltenden Rechtsrahmens in Bezug auf die Nutzung der Tiefengeothermie inkl. Identifizierung länderspezifischer Unterschiede sowie potenzieller Regelungsdefizite / -überschüsse unter Berücksichtigung der Eignung, der Erforderlichkeit, der Verhältnismäßigkeit und des Ziels der Vereinfachung des Verfahrens
- Formulierung von Empfehlungen und konkreten Vorschlägen.

3 Vorgehensweise

3.1 Betrachtungsraum

Unter Beachtung der typischen Standort- und Lagerstätteneigenschaften der drei gegenwärtig vorrangig bewirtschafteten Geothermie-Regionen in Deutschland, Norddeutsches Becken, Oberrheingraben und Süddeutsches Molassebecken, wurden Untersuchungsbereiche definiert. Im Vordergrund standen dabei Anlagen zur Stromerzeugung. Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Anlagen kombinieren viele Anlagen in Deutschland die Stromerzeugung mit einer Wärmeauskopplung für Fern- bzw. Nahwärmenetze. Die Betrachtungen haben somit auch Anlagen der Tiefengeothermie mit Stromerzeugung und Wärmeauskopplung berührt, wobei auf die Bereitstellung von Fern- bzw. Nahwärme nicht weiter eingegangen wird.

Die gegenwärtig in Betrieb befindlichen Geothermie-Kraftwerke in Deutschland nutzen hydrothermale Lagerstätten; petrothermale Anlagen sind gegenwärtig in Deutschland noch nicht realisiert, so dass Detailbetrachtungen dazu nicht möglich sind. Aktuelle Planungen sehen allerdings die Erschließung petrothermaler Reservoirs in Sachsen vor.

3.2 Kompartimente

Die Ermittlung und Beschreibung von Wirkfaktoren sowie den aus ihnen resultierenden Risiken erfolgte separat für einzelne, räumlich und / oder auch funktionell gegeneinander abgrenzbare Kompartimente, die konzeptionell wie folgt definiert wurden:

- Geothermales Reservoir (unter Einbeziehung des Bohrlochbereiches)
- Technische Anlage
- Umwelt

Parallel hierzu wurde in einem weiteren Kompartiment „Recht“ eine systematische Untersuchung des Rechtsrahmens durchgeführt; dieses stand mit den anderen Kompartimenten in einem intensiven Informationsaustausch.

Für den Lebenszyklus einer Anlage der Tiefengeothermie erfolgte innerhalb jedes Kompartiments die Benennung und Beschreibung von charakteristischen Prozessen, resultierenden Wirkfaktoren und betroffenen Schutzgütern (siehe Wirkfaktoren-Matrix in der ausführlichen Ergebnisdokumentation). Detailliertere Betrachtungen erfolgten insbesondere für das Schutzgut „Menschliche Gesundheit“ und den einflussnehmenden Wirkfaktor „Akkumulation von NORM², Strahlenexposition“ in allen Kompartimenten.

Die zielgerichtete Beschreibung von Schutzgütern, Wirkfaktoren und voraussichtlichen Folgen einer Maßnahme für das Schutzgut ist Grundlage für die Prognose der zu erwartenden Umweltauswirkungen einer Geothermieanlage. Damit wird ein gemeinsames Verständnis des zu untersuchenden Wirkungsgefüges geschaffen. Sowohl die Schutzgüter als auch die im Rahmen des Vorhabens zu untersuchenden Wirkfaktoren unterliegen hinsichtlich ihrer Beziehung zueinander meist einer gesetzlichen Regelung. So werden z. B. stoffliche Immissionen in den Boden, das Wasser oder die Luft als Wirkfaktor durch zulässige Ableitungsgrenzwerte beschränkt.

Der Detaillierungsgrad der Beschreibung wurde dem zu erwartenden Ausmaß der Wirkung angepasst, ein vollständiger Verzicht auf die Berücksichtigung eines Schutzgutes jedoch nachvollziehbar begründet.

3.3 Verwendete Fachliteratur sowie benutzte Informations- und Dokumentationsdienste

Ausgehend von den in der GRS bereits geführten Literaturdatenbanken wurden intensiv Quellen mit Bezug zur übergeordneten Fragestellung des Vorhabens ausgewertet. Aus zahlreichen früheren Untersuchungen der Art, Menge und des Auftretens von NORM-Rückständen liegt in der GRS bereits ein umfangreiches Detailwissen zum Themenbereich „natürliche Radioaktivität“ vor. Die im Vorhaben erfasste Literatur wird gegenwärtig in einer eigenen GeoSys-Library verwaltet. Neben Schlussberichten bereits abgeschlossener Vorhaben wurde relevante Literatur der Informations- und Dokumentationsdienste von Bundesministerien und nachgeordneten Einrichtungen erfasst. Wissenschaftliche Veröffentlichungen in Fachzeitschriften wurden regelmäßig

² NORM = Naturally Occurring Radioactive Material, „natürlich vorkommendes radioaktives Material“

gesichtet und bei Relevanz in die GeoSys-Library aufgenommen. In direktem Kontakt mit Betreibern von Anlagen wurde auf der Basis von Vertraulichkeitsvereinbarungen Einblick in umfangreiche Informationen genommen, die den Betrieb der Anlagen abbilden. Neben den Ergebnissen spezifischer Analysen konnten auch bewertende Arbeiten Dritter (z. B. Dosisabschätzungen) ausgewertet werden. Im Literaturverzeichnis der ausführlichen Ergebnisdokumentation sind dementsprechend über 350 relevante Literaturzitate aufgenommen.

Ein wichtiges Werkzeug für die Arbeit im Vorhaben stellte der GeoSys-InfoPool dar, der im Rahmen des Vorhabens entwickelt wurde. Er dient zur Sammlung und Systematisierung von Informationen (Sachverhalte, Messwerte) zum GeoSys-Vorhaben. Der GeoSys-InfoPool ist eine nach außen abgeschlossene Portal-Software zur Zusammenführung von Anwendungen und Datenquellen unter einer einheitlichen Weboberfläche. Er dient der Übernahme von relevanten Sachverhalten zu verschiedensten Themenbereichen aus der Literatur in eine Datenbank, wobei sowohl eine Zuordnung zu Anlagen als auch eine Berücksichtigung von betroffenen Schutzgütern, Wirkfaktoren und Prozessen ermöglicht ist. Gleichzeitig besteht eine direkte Verbindung zur GeoSys-Library für den Zugriff auf die Originalliteratur.

3.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Zuge des Vorhabens wurde der direkte Kontakt mit bereits im Themenfeld tätigen Institutionen gesucht. Neben direkten Anlagenbesuchen und dem Erfahrungsaustausch mit dort tätigen Wissenschaftlern und Betriebsmitarbeitern (Sultz-sous-Forêts, Landau, Insheim, Bruchsal, Neustadt-Glewe) wurden Sachverständigenorganisationen (VKTA), Forschungseinrichtungen (GFZ, KIT-LFZG, LIAG), Behörden (LGB-RP, LGRB-BW, BGR) und Ingenieurbüros (GTN, Ingenieure und Geologen) als Diskussionspartner eingebunden. Ein guter Austausch konnte mit Betreibern direkt (EnBW AG, geox GmbH / Pfalzwerke) bzw. durch Kontakt mit dem GtV – Bundesverband Geothermie e. V. erreicht werden. Eine direkte Kooperation erfolgte mit dem Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ sowie der Bergakademie TU Freiberg.

Insbesondere im Rahmen von drei durch die GRS organisierten Workshops (21. Februar 2011 in der GRS in Berlin, am 19. März 2012 und am 11. April 2013 in der GRS in Köln), aber auch durch die aktive Teilnahme am Deutschen Geothermiekongress 2012

und 2013 sowie an weiteren Veranstaltungen wurde die interessierte (Fach-)Öffentlichkeit über das Vorhaben GeoSys informiert und der Erfahrungsaustausch gefördert.

4 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Nachfolgend sind die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse des Vorhabens sowie die wesentlichen Erfahrungen aus den Kompartimenten „Recht“, „Geothermales Reservoir“, „Technische Anlage“ und „Umwelt“ in Kurzform zusammengestellt. Ausführliche Details finden sich in der als CD-Anhang beigefügten Ergebnisdokumentation.

4.1 Kompartiment „Recht“

Im rechtswissenschaftlichen Teil des Forschungsvorhabens wurde untersucht, welche Regelungen es *de lege lata* (nach geltendem Recht) gibt, um Risiken für Mensch und Umwelt auszuschließen bzw. zu minimieren, welche aktuellen parlamentarischen Vorgänge mit Bezug zur Geothermie es gibt und welche rechtlichen Ansätze *de lege ferenda* (nach einer fortzuentwickelnden zukünftigen Rechtslage) erfolgsversprechend erscheinen, um den Ausbau der Tiefengeothermie nachhaltig, umweltfreundlich und ökonomisch zu gestalten.

Nach einer kurzen Darstellung aktueller parlamentarischer Vorgänge mit Bezug zur Geothermie werden anhand einer abstrakten systematischen Darstellung zunächst die allgemeinen Regelungsbereiche, Normen (gesetzlich wie untergesetzlich) und (Genehmigungs-) Verfahren aufgezeigt, die für Planung, Errichtung und Betrieb einer Geothermieranlage relevant sind. Beginnend mit der Verfügbarkeit und dem Zugang zu Umwelt- und Geoinformationen, möglichen Umweltrechtsbehelfen und den Aspekten der Öffentlichkeitsbeteiligung über Fragen des Raumordnungs- und Planungsrechts, wird das fachgesetzliche Genehmigungs- und Anlagensicherheitsrecht dargestellt und analysiert. Dabei wird auch der Blick auf etwaige europäische Vorgaben gerichtet. So haben z. B. die EU-Mitgliedstaaten nach Artikel 13 Absatz 1 der Richtlinie 2009/28/EG sicherzustellen, dass einzelstaatliche Vorschriften für die Genehmigungs-, Zertifizierungs- und Zulassungsverfahren, die auf Anlagen zur Erzeugung von Elektrizität, Wärme oder Kälte aus erneuerbaren Energiequellen und die angegliederten Infrastrukturen der Übertragungs- und Verteilernetze angewandt werden, verhältnismäßig und notwendig sind (Stichwort: „Vereinfachung der Verwaltungsverfahren“).

Sodann werden weitere Regelungen, die überwiegend den oberirdischen Anlagenteil einer Geothermie-Anlage betreffen, namentlich solche des Strahlen-, Arbeits- und Gesundheitsschutzes beleuchtet. Hier wird besonders deutlich, dass nationale Regelungen mehr und mehr durch europäische (Richtlinien-)Vorgaben modifiziert werden, um einen gemeinsamen europäischen Binnenmarkt zu gewährleisten.

Bei der Errichtung und dem Betrieb eines Geothermiekraftwerks fallen Abfälle unterschiedlicher Art an. Diese lassen sich in die folgenden „Abfallgruppen“ aufteilen: Abwässer / Flowback, Ablagerungen an den Wandungen der Anlage (Scale), Reinigungsabfälle, Anlagenteile sowie Betriebsabfälle. Bei der Entsorgung dieser genannten Abfälle sind Aspekte unterschiedlicher Rechtsgebiete, insbesondere des Abfall-, Strahlenschutz-, Berg-, Wasser-, Transport- und Gefahrgutrechts zu berücksichtigen. Auch die in diesen Fällen einschlägigen gesetzlichen Vorgaben werden aufgezeigt und analysiert. Den rechtlichen Rahmen für die Anlagengenehmigung und den Anlagenbetrieb ergänzen daher Ausführungen zum speziellen Abfallrecht.

Auch wenn im Bereich der Tiefengeothermie bislang kein konkretes Schadensereignis bekannt ist, welches Rechtsgüter nachweislich mehr als nur leicht beeinträchtigt hat, stellt sich die Frage, welche Haftungsgrundlagen es im Falle eines theoretischen Schadensereignisses gibt. Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Haftung in solchen Fällen komplex und unter anderem aufgrund unterschiedlicher Beweislastverteilungen und mitunter verschiedener Tatbestandsalternativen durch den Gesetzgeber nicht immer eindeutig geregelt ist. Die Darstellung in der ausführlichen Ergebnisdokumentation gibt daher einen Überblick über die verschiedenen zivilrechtlichen und öffentlichrechtlichen Anspruchsgrundlagen, deren Tatbestandsvoraussetzungen und die Rechtsfolgen.

Den genehmigungsrechtlichen Rahmen ergänzend folgen auf die Tiefengeothermie bezogene Ausführungen zum Energiewirtschaftsrecht sowie zu energiepolitischen Fördermaßnahmen. Ein weiteres Kapitel schließt die allgemeine Analyse des Rechtsrahmens mit Ausführungen zu vergaberechtlichen Aspekten ab.

Auch wenn im Rahmen der durchgeführten Analyse an manchen Stellen Verbesserungsbedarf aufgezeigt wird, stellen die vorhandenen rechtlichen Strukturen, welche die Genehmigung, den Betrieb und die zukünftige Stilllegungs- und Rückbauphase regeln, alles in allem einen ausreichend gefüllten „Werkzeugkasten“ zur Verfügung, um die sich in der Praxis ergebenden Sachverhalte angemessen lösen zu können. Dieses

Ergebnis bestätigen insbesondere auch die im Rahmen des Vorhabens geführten Gespräche mit Betreibern und Behörden sowie die zur Verfügung stehenden Daten. Die Behörden haben die Möglichkeit, soweit erforderlich, im Einzelfall über entsprechende Auflagen und Kontrollen die Einhaltung des gesetzlich geforderten Sicherheitsniveaus sicherzustellen.

Es sind keine praktischen Fälle identifiziert worden, in denen sich die ermittelten und untersuchten Prozesse und Wirkfaktoren in erheblicher Weise auf die benannten Schutzgüter ausgewirkt haben und deren Schutz durch die Rechtsordnung als unzureichend bezeichnet werden müsste.

Im Einzelnen

Rechtswissenschaftliche Arbeit beinhaltet insbesondere die Analyse / Auslegung rechtlicher Texte und Quellen sowie die Darstellung ihrer wechselseitigen Bezüge. Eine solche Analyse / Auslegung (grammatikalisch, historisch, systematisch, teleologisch, verfassungs- bzw. europarechtskonform) ist wiederum immer stark textlastig, weil erläuterungsnotwendig. Ziel des hier vorliegenden Berichtes ist es, dem interessierten Leser einen schnell zu erfassenden Überblick über die durchgeführten Arbeiten zu geben. Deshalb werden aus den vielen in der ausführlichen Ergebnisdokumentation behandelten o. g. Themenbereichen und rechtlichen Fragestellungen nachfolgend nur einzelne exemplarisch genannt. Schlussfolgerungen und Empfehlungen finden sich im Abschnitt 5.

Die Planungs- und Bauzeiten von Anlagen der Tiefengeothermie liegen bei bis zu sieben Jahren. Die Gründe hierfür sind vielfältig. Eine entscheidende Rolle dürfte hierbei die Beschaffung und Erarbeitung der für eine erfolgreiche Projektplanung und Realisierung notwendigen Informationen spielen. Mit einem Geothermie-Projekt ist eine Vielzahl von Informationsbedürfnissen verknüpft. Zum einen benötigt der Projektträger für eine Wirtschaftlichkeitsprognose und zur Prüfung der Rentabilität bestimmte Daten. Zum anderen benötigen die zuständigen Behörden Daten über konkrete Vorgänge und deren Auswirkungen. Ebenso erwartet zunehmend auch die Öffentlichkeit in den verschiedenen Projektstadien verständlich abgefasste Informationen (Transparenz / Akzeptanz). Der Zugang zu solchen Umwelt- und Geoinformationen erweist sich in der Praxis aber nicht selten als kompliziert. Zwar gewährt beispielsweise das Umweltinformationsgesetz (UIG) einen Anspruch auf Zugang zu Umweltinformationen, ohne ein rechtliches Interesse darlegen zu müssen, allerdings können dem Bekannt-

geben Betriebs- oder Geschäftsgeheimnisse entgegenstehen. Informationen über vorangegangene Bergbauaktivitäten können kommerzielle Interessen beinhalten, die nicht ohne weiteres an Dritte weitergegeben werden dürfen. Wenn man die Investitionen in ein Geothermie-Projekt und insgesamt den Ausbau erneuerbarer Energien fördern möchte, scheint es wirtschaftlich geboten, den privaten Unternehmen einen größeren Zugang zu den schon existierenden Daten zu ermöglichen als es nach jetziger Rechtslage möglich ist. Andererseits kann ein unbegrenzter Zugang schon allein aufgrund des verfassungsrechtlichen Schutzes von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen nicht erfolgen. Orientiert an den Regelungen anderer europäischer Länder wurden die in der rechtswissenschaftlichen Literatur diskutierten Lösungsansätze dargestellt, analysiert und fortentwickelt. In Frage käme entweder eine Fristenregelung, eine Entschädigungsregelung oder eine Kombination aus beidem, die u. a. durch eine Änderung des § 9 UIG realisiert werden könnte.

Die Wahrnehmung und Akzeptanz der Tiefengeothermie in der Bevölkerung sind sehr unterschiedlich. Daher sind auch Fragen der Öffentlichkeitsbeteiligung und des Rechtsschutzes in Umweltangelegenheiten aktuelle Themen, die aus verschiedenen Blickwinkeln, sei es anhand aktueller Entscheidungen nationaler Gerichte und des EuGH einerseits, sei es anhand bereits vollzogener (UmwRG, VwVfG) oder erwogener Gesetzesänderungen (z. B. zur Änderung der UVP-V Bergbau mit entsprechenden Folgen für die Pflicht zur Aufstellung eines bergrechtlichen Rahmenbetriebsplans) andererseits, betrachtet und analysiert wurden. Insbesondere die Diskussion rund das „Fracking“ zur Schiefergasgewinnung hat auch die Tiefengeothermie erfasst. Da es unter dem Oberbegriff „Fracking“ deutliche methodisch-stoffliche Unterschiede gibt, insbesondere zwischen hydraulischer („Wasserfrac“) und chemischer Stimulation, ist man in der Geothermiegemeinschaft sehr um eine sachliche Differenzierung dieser Methoden bemüht. Im Bereich der hydrothermalen Tiefengeothermie, bei der bereits vorhandene, tiefliegende Aquifere in Störungszonen genutzt werden, wird zur hydraulischen Stimulation Frischwasser oder zuvor gefördertes Formationsfluid eingesetzt. Soweit Zusätze (Stützmittel, Inhibitoren) oder Stoffe zur lokalen Säurestimulation eingebracht werden, sind auch hier deutliche Unterschiede zur chemischen Stimulation im Bereich der Schiefergasgewinnung hervorzuheben. Diese Unterschiede sollten sich in einem möglichen Gesetzesentwurf über die UVP-Pflicht von Vorhaben der Tiefengeothermie widerspiegeln.

Die bisherige UVP-Richtlinie 2011/92/EU, die „Erdwärme“ bereits in Art. 4 Abs. 2 i. V. m. Anhang II Nr. 2 d) i) als Projekt nennt, bei dem die Mitgliedstaaten bestimmen, ob das Projekt einer UVP gemäß den Artikeln 5 bis 10 unterzogen werden muss, enthält einen deutlichen Auftrag an die Nationalstaaten, diese Entscheidung anhand einer Einzelfalluntersuchung oder anhand der von den Mitgliedsstaaten festgelegten Schwellenwerte bzw. Kriterien zu treffen. Auch eine Kombination dieser Verfahren ist möglich. Die bisherige Umsetzung der UVP-Pflicht für Tiefbohrungen zur Gewinnung von Erdwärme in § 1 Nr. 8 UVP-V Bergbau dürfte in diesem Zusammenhang nicht richtlinienkonform sein. Erforderlich wäre eine Vorprüfung des Einzelfalls, ob für ein konkretes Projekt am jeweiligen Standort eine UVP durchgeführt werden muss. Von Seiten der europäischen Union wird eine Änderung der UVP-Richtlinie vorbereitet. Das Europäische Parlament hat sich bereits am 9. Oktober 2013 zur Revision der Richtlinie positioniert. Auch auf nationaler Ebene wurden durch einige Bundesländer Vorschläge zur Änderung der UVP-V Bergbau gemacht.

Auf der Ebene des Planungsrechts wurde untersucht, in welcher Weise der Ausbau der erneuerbaren Energien koordiniert und gesteuert werden kann. So enthalten die verschiedenen Planungsstufen von den Verfahren der Raumordnung, den Landesplanungsgesetzen und Landesentwicklungsprogrammen bis hin zu den Verfahren der Bauleitplanung auf kommunaler Ebene verschiedene Möglichkeiten, den erneuerbaren Energien entsprechende Ansiedlungsflächen zu verschaffen. Doch auch diese Instrumente sind nicht ohne Konfliktpotenzial. So können bei den unterschiedlichen Akteuren auf den Planungsebenen – nicht zuletzt wegen unterschiedlicher politischer Ausrichtungen oder lokaler Befindlichkeiten konkurrierender wirtschaftlicher Bereiche – sehr divergierende Vorstellungen darüber vorhanden sein, wie ein solcher, koordinierter Ausbau der erneuerbaren Energien erfolgen soll. Auch lassen sich an vielen Stellen unterschiedliche Einschätzungen bezogen auf die Notwendigkeit einer Ergänzung gesetzlicher Privilegierungstatbestände zugunsten der Anlagen der Tiefengeothermie, z. B. im Bereich des Bauens im Außenbereich (§ 35 BauGB), erkennen. Die verschiedenen Aspekte und wesentlichen Instrumente wurden systematisch aufgearbeitet.

Anknüpfend an die Ebene des Planungsrechts, inkl. des Raumordnungsrechts und der Frage, wie sich die unterschiedlichen Nutzungsansprüche an den Untergrund umweltverträglich in Einklang bringen lassen, wurden im Bereich der Genehmigungen nach Berg- und Wasserrecht die verschiedenen potenziellen Konfliktfelder dargestellt. So wurde neben grundsätzlichen Untersuchungen zum Verhältnis des Bundesberggesetz-

zes (BBergG) zu den Umweltbelangen (insbesondere anhand der Regelungen der §§ 48 Abs. 2, 55 Abs. 1 BBergG) beleuchtet, inwiefern das Bergrecht und das entsprechende technische Regelwerk spezifische Regelungen für den Bereich des Bohrlochbergbaus bieten. Neben den bundesrechtlichen Regelungen wurden auch die Bergbauverordnungen der Bundesländer, insbesondere die Tiefbohrverordnungen (BVOT) untersucht. Dabei wurde anhand konkreter Beispiele auf das Verhältnis von unbestimmten Rechtsbegriffen (z. B. „Stand der Technik“) und untergesetzlichen Regelwerken eingegangen. Im Bereich des Wasserrechts wurde unter den verschiedenen wasserrechtlichen Gesichtspunkten ferner der Frage nach dem Schutzbedarf des hochmineralisierten Tiefengrundwassers nachgegangen. Nach Darstellung und Abwägung der verschiedenen vorgetragenen Aspekte wird festgestellt, dass der Grundwasserbegriff des WHG zwar Wasser unabhängig davon erfasst, in welcher Tiefe es sich befindet, dass aber die Frage, ob ein einheitliches Schutzniveau für alle Grundwasserhorizonte zu Grunde gelegt werden muss bzw. ob eine Differenzierung erforderlich oder zulässig ist, dennoch dahingehend beantwortet werden kann, dass es durchaus unterschiedliche wasserrechtliche Anforderungen an den Grundwasserzustand je nach Grundwasserhorizont bzw. -tiefe und mithin Unterschiede bei der Zulässigkeit einer Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit gibt. Festzuhalten ist ferner, dass es für den Vorhabensträger / Betreiber durch mitunter landesgesetzlich unterschiedlich ausgestaltete (wenn auch im Ergebnis häufig ähnliche) Regelungen im Berg- und Wasserrecht und die darin enthaltenen spezifischen Anforderungen komplizierter ist, das gesetzliche Regelwerk zu überblicken.

Im Bereich des Anlagensicherheitsrechts bedeutet die zunehmende Modifizierung nationaler Regelungen durch europäische (Richtlinien-)Vorgaben im Rahmen des sog. „*New Approach*“ u. a., dass das Zusammenspiel von Anlagenbeschaffenheit und -betrieb (also technische und organisatorische Lösungen) zur Erreichung des gesetzlich vorgeschriebenen Sicherheitsniveaus stärker der Eigenverantwortung der Betreiber zugewiesen ist. Generalklauseln ersetzen zunehmend Detailregelungen. Dies bringt dem Betreiber zwar mehr Flexibilität zur Anpassung an seine spezifischen betrieblichen Anforderungen, erfordert aber auch mehr eigenes Know-how zur Beurteilung der Gefahren und der Ableitung von notwendigen Maßnahmen. Dieses Know-how müssen sich insbesondere kleinere Unternehmen häufig durch externe Experten einholen.

Anlagen der Tiefengeothermie werden in Deutschland i. d. R. von kleineren regionalen oder kommunalen Unternehmen betrieben, die selbst selten mehr als eine oder zwei

Anlagen dieser Art haben. Damit stellt sich die Frage nach dem systematischen Austausch von Betriebserfahrungen sowie deren Auswertung. Der Know-how-Transfer könnte signifikant dazu beitragen, die Verfügbarkeit der Anlagen durch die Reduzierung von Revisions- bzw. Stillstandszeiten zu verbessern. Ebenso kann durch ein systematisches Vorgehen bei Austausch und Auswertung das Sicherheitsniveau der Anlage gesteigert werden. Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse könnten allerdings dazu führen, dass über bestimmte Vorgänge und Probleme sowie deren Lösung nur sehr zurückhaltend kommuniziert wird. In diesem Zusammenhang wurde untersucht, inwieweit ein verbindlicher Erfahrungsaustausch über sicherheitstechnisch bedeutsame Betriebserfahrungen zielführend erscheint, und auf welcher Ebene (legislative oder sonstige Ebene) dieser verortet werden könnte. Unterschiedliche Beispiele für Regelungen zum Wissensaustausch finden sich etwa in § 40 Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) und in § 4 Abs. 1 Nr. 6 Atomrechtliche Störfallmeldeverordnung (AtSMV).

Mit Blick auf die naturwissenschaftlich-technische Schwerpunktsetzung lag gerade im Bereich des Strahlenschutzes ein besonderes Augenmerk. Durch die am 06.02.2014 in Kraft getretene neue Richtlinie zu den Strahlenschutzgrundnormen („*Euratom Basic Safety Standards Directive*“) wird eine Fortentwicklung und Neustrukturierung strahlenschutzrechtlicher Regelungen zu natürlichen Strahlenquellen (NORM) stattfinden. So führt die Richtlinie die „*Gewinnung geothermischer Energie*“ in der Liste von Industriezweigen, einschließlich Forschung und relevanter Sekundärprozesse, auf, in denen natürlich vorkommende radioaktive Materialien eingesetzt werden und die bei der Anwendung des Art. 24 der Richtlinie hinsichtlich der abgestuften Vorgehensweise bei der regulatorischen Kontrolle zu berücksichtigen sind. Die Struktur der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV), insbesondere die §§ 93 ff. und die Anlagen XI und XII werden dementsprechend angepasst werden müssen. Insgesamt legen die Vorgaben der Grundnormenrichtlinie ein stufenweises regulatorisches Vorgehen nahe, bei dem auf den ersten Stufen vorrangig die Regelungsgedanken der Richtlinie 2013/59/Euratom übernommen werden und das in den höheren Stufen sehr eng an Teil 3 Kapitel 2 der StrlSchV angelehnt ist. Die Frist zur Umsetzung der Richtlinie zu den Strahlenschutzgrundnormen beträgt vier Jahre. Der Koalitionsvertrag von CDU, CSU und SPD für die 18. Legislaturperiode enthält korrespondierend dazu den Auftrag, den Strahlenschutz zu modernisieren. Es ist hierbei allerdings fraglich, ob die durch die Richtlinie vorgegebene Neustrukturierung lediglich durch Novellen u. a. der StrlSchV erfolgen wird, oder ob für wesentliche Bestimmungen des Strahlenschutzrechts eine neue formell-gesetzliche Grundlage geschaffen wird.

4.2 Kompartiment „Geothermales Reservoir“

Ökonomisch gesehen geht ein großer Teil der Unsicherheit beim Bau und Betrieb von Anlagen der Tiefengeothermie vom geologischen System aus. Insbesondere in der Erkundungs- und Errichtungsphase einer Geothermieanlage kommt der Beurteilung des Reservoirs eine hohe Bedeutung zu. Unsicherheiten werden durch eine der Bohrung vorangehende seismische Erkundung sowie die Auswertung vorliegender Bohrdaten (z. B. aus der Kohlenwasserstoffindustrie) vermindert. Der Prozess der Erkundung setzt sich während der Bohrung fort und reicht bis zu dem Augenblick, an dem das erste Thermalwasser die oberirdische Anlage erreicht. Bis dahin bilden geologische, geophysikalische und geochemische Analysen (z. B. Bohrkern-Untersuchungen, Bohrloch-Untersuchungen, Ergiebigkeitstests oder Monitoring) ein Grundgerüst an Daten, anhand derer stufenweise über den Fortgang der Arbeiten entschieden wird.

Mit Blick auf die Sicherung und den Erhalt des Leistungsvolumens der Anlage kommt dem anschließenden Reservoir-Management besondere Bedeutung zu. Hieraus erwachsen Anforderungen an die Exploration des Standortes und die technische Auslegung der Anlage. Ziel der Arbeiten im Kompartiment „Geothermales Reservoir“ war die Beurteilung des Standes des Prozessverständnisses wesentlicher physikalischer und chemischer Prozesse im Reservoir selbst, aber auch in den Bohrungen und in der oberirdischen Anlage unter relevanten Temperatur- und Druckbedingungen.

Jedes geothermale Reservoir ist in Bezug auf die geologisch-mineralogische Beschaffenheit, die Permeabilitäten seiner Gesteine, die Zusammensetzung der Thermalwässer und ihre Gasgehalte sowie die herrschenden Temperaturen und Drucke einmalig. Darum sind allumfassende und allgemeingültige Modelle, die alle diese Eigenschaften und ihre Änderungen während des Betriebes einer Geothermieanlage in den verschiedenen Geothermie-Regionen Deutschlands beschreiben könnten, nicht verfügbar und auch nicht einfach zu realisieren.

Die Geothermie-relevanten chemischen, physikalischen, hydraulischen und mechanischen Einzelprozesse und ihre mathematischen Formulierungen werden in der ausführlichen Ergebnisdokumentation vorgestellt. Darüber hinaus wird eine Übersicht über gängige Simulationsprogramme gegeben, die diese Prozesse beschreiben. In tabellarischer Form wird dargestellt, welche Programme welche Prozesse besonders gut, weniger gut oder gar nicht beschreiben können. Damit werden die Möglichkeiten und Grenzen der gebräuchlichsten Simulationsprogramme vorgestellt und ihre Einsatzmög-

lichkeiten aufgezeigt. Zur Beschreibung aller relevanten Prozesse im komplexen System einer Geothermieanlage müssen heute noch mehrere unterschiedliche Rechenprogramme herangezogen werden. Die Implementierung der besten Modellbeschreibungen und ihre Kopplung in einem allumfassenden Rechencode wäre ein erstrebenswertes Ziel, das auch erreichbar ist, wenn Personal- und Finanzressourcen gezielt gebündelt würden.

Der Schwerpunkt der in diesem Vorhaben detaillierter betrachteten Prozesse liegt auf besonders relevanten physikalischen und chemisch-hydraulischen Prozessen. Die Ergebnisse der Untersuchungen zu diesen Prozessen werden nachfolgend dargestellt.

4.2.1 Physikalische Prozesse – seismische Ereignisse

Durch die Erschließung geothermaler Lagerstätten und auch durch den Betrieb geothermischer Energiegewinnungsanlagen können seismische Ereignisse in der Lagerstätte ausgelöst werden, die sich bis an die Erdoberfläche fortsetzen. Derartige Mikrobeben werden in den meisten Fällen nicht gespürt und stellen keine unmittelbare, signifikante Gefahr für die Bevölkerung dar. Im Zusammenhang mit Geothermie-Projekten treten aber auch immer wieder spürbare Beben auf, die in besonderem Maße zu einer deutlichen Abnahme der öffentlichen Akzeptanz derartiger Projekte führen.

Die im Rahmen von Geothermie-Projekten auftretende induzierte Seismizität ist grundsätzlich auf dieselben physikalischen Ursachen wie bei anderen Fluidinjektionen zurückzuführen. Der Hauptmechanismus besteht darin, dass ein zusätzlich aufgebrachter Porendruck die Normalspannung und somit die Reibungskräfte auf einer Störung zwischen zwei Gesteinsblöcken reduziert; in deren Folge kann eine plötzliche Scherbewegung entlang dieser Störung auftreten. Beim Betrieb geothermischer Anlagen können darüber hinaus auch thermo-mechanische Effekte eine Rolle spielen. Induzierte Seismizität ist allerdings nicht auf geothermische Projekte beschränkt, sondern auf vielerlei weitere mögliche Ursachen zurückzuführen, wie z. B.:

- Anlage von Stauseen
- Bergbauarbeiten
- Bau von Verkehrstunneln
- Ausgrabungen
- Öl- / Gasförderung
- Bau von Unterspeichern (Gas, Druckluft)

- Flüssigkeitsverpressungen
- Niederbringung von Mineralwasserbrunnen
- Hydraulische Stimulation von Öl- / Gaslagerstätten

Bei Geothermie-Projekten wird grundsätzlich zwischen zwei unterschiedlichen Phasen differenziert, a) der hydraulisch / chemischen Stimulationsphase und b) der Zirkulations-Phase (dem Dauerbetrieb eines geothermischen Kraftwerkes). Wenn die Durchlässigkeit des Untergrundes nicht ausreicht, um ein geothermisches Kraftwerk wirtschaftlich zu betreiben, wird ein Fluid (i. W. Wasser) unter hohem Druck über ein Bohrloch in den Untergrund verpresst. Durch dieses Verfahren, die „hydraulische Stimulation“, werden neue Risse im Untergrund erzeugt oder bestehende aufgeweitet. Auch während der Zirkulation, also der Entnahme von heißem Wasser aus dem Untergrund über eine Bohrung und der Verbringung des abgekühlten Wassers über eine zweite Bohrung wieder zurück in den Untergrund, kann eine Druckerhöhung im Reservoir auftreten und Erdbeben verursachen. Die Wechselwirkung zwischen Injektion bzw. Druckaufbau und resultierenden seismischen Ereignissen ist aber nicht immer spontan und unmittelbar zuzuordnen. Unter Umständen breitet sich im Rahmen von Injektionsmaßnahmen in den Untergrund verpresstes Wasser dort nur langsam entlang von existierenden Porenräumen und Klüftzonen aus. In einem solchen Fall stellen sich neue Spannungsverhältnisse im Untergrund auch erst langsam ein und seismische Ereignisse können folglich auch mit einer Verzögerung gegenüber der Stimulations- oder Zirkulationsmaßnahme auftreten. Dieser Effekt lässt sich aber numerisch simulieren und muss bei der Festlegung von Abbruchkriterien unbedingt berücksichtigt werden.

Von Betreiberseite wird induzierte Seismizität im Rahmen von Reservoir-Erkundungen gezielt als Indikator dafür verwendet, wie weit im Rahmen einer hydraulischen Stimulation der Prozess einer „Durchlässigkeitsverbesserung“ im tiefen Untergrund reicht. Mit Hilfe einer räumlichen Darstellung der induzierten Bebenherde ist also eine räumliche Kartierung des künstlich geschaffenen Wärmetauschers möglich.

Injektionsmaßnahmen im Rahmen geothermischer Projekte sind allerdings nicht in der Lage, selbst tektonischen Spannungen im Untergrund aufzubauen, sondern nur vorhandene natürliche Spannungen lokal abzubauen. Das führt zu induzierter Seismizität, die folglich keine größeren Magnituden am betreffenden Standort erreichen kann, als ein natürliches, tektonisches Erdbeben. Allerdings können anthropogen bedingte Maßnahmen zu einer zeitlichen Vorverlagerung eines seismischen Ereignisses führen. Im Einzelfall ist die Vielzahl mikroseismischer Ereignisse im Zuge einer Injektionsmaß-

nahme auch geeignet, größere natürliche Beben an einem Standort zu verhindern oder zu verringern.

Obwohl die Risiken im Zusammenhang mit induzierter Seismizität bei Geothermie-Projekten relativ niedrig sind, wird im Hinblick auf eine Verbesserung der öffentlichen Akzeptanz empfohlen, bereits im Vorfeld einen Risikominderungsplan zu entwickeln, der die geplanten Operationen selbst sowie potenziell resultierende Belästigungen oder Schäden, die sich aus dem Projekt ergeben könnten, umfasst. In diesem Zusammenhang hat sich das sogenannte "Ampel"-System etabliert.

Das Ampelsystem und die Schwellenwerte, die bestimmte Tätigkeiten beim Betreiber der Geothermieanlage und der überwachenden Behörde auslösen, müssen immer im Voraus und für alle möglichen Vorgänge definiert werden. Maximale Bodengeschwindigkeiten eignen sich gut zur Kontrolle induzierter Seismizität. Die Werte liegen unmittelbar nach dem Ereignis vor und ermöglichen sofortige Maßnahmen, wie z. B. Reduktion oder Unterbrechung von Injektionen. Sie eignen sich hingegen nicht zur Kommunikation in der Öffentlichkeit, da sie keinen direkt sichtbaren Bezug zu feststellbaren Auswirkungen haben. Hierfür eignet sich beispielsweise die Europäische Makroseismische Skala (EMS) mit ihren deskriptiven Definitionen wesentlich besser. Neben einer an EMS-98 orientierten Ampelregelungen sind aber auch andere Grenzwerte für die einzelnen Ampelphasen möglich, z. B. die größte erfasste (vorstellbare) Magnitude an einem Standort als Grenzwert für einen Wechsel von „gelb“ nach „rot“, und eine Magnituden-Größe darunter für den Wechsel von „grün“ zu „gelb“ (weitere Details siehe ausführliche Ergebnisdokumentation).

Zusammenfassend ergibt sich bzgl. induzierter Seismizität (IS) im Zusammenhang mit Geothermie-Projekten folgender Sachstand:

- IS stellt seitens der Anlagenbetreiber ein essentielles Hilfsmittel zur Identifizierung und Charakterisierung eines geothermalen Reservoirs dar
- Die bislang im Zusammenhang mit Geothermie-Projekten aufgetretene IS hat in der Öffentlichkeit zur Befürchtung unvorhergesehener Schäden an der Erdoberfläche geführt
- IS kann allerdings keine größeren Magnituden an einem Standort bewirken, als sie durch ein natürliches, tektonisches Erdbeben auftreten könnten

- IS kann eine anthropogen bedingte zeitliche Vorverlagerung eines (sonst zu einem späteren Zeitpunkt natürlich auftretenden) seismischen Ereignisses bewirken
- Durch die Vielzahl induzierter (mikroseismischer) Ereignisse und den damit verbundenen Spannungsabbau im Untergrund ist die Verhinderung oder Verringerung größerer natürlicher Beben an einem Standort möglich
- Eine exakte Vorausberechnung der Stärke möglicher seismischer Ereignisse ist nicht möglich, eine Abschätzung des seismischen Risikos kann allerdings mit Hilfe des „Gutenberg-Richter Gesetzes“ vorgenommen werden
- Das Auftreten induzierter seismischer Ereignisse an einem Geothermie-Standort kann durch Vorfestlegung akzeptabler und / oder vorgeschriebener Magnituden-Grenzwerte („Ampelsystem“) räumlich, zeitlich und von der Intensität her eingegrenzt werden

4.2.2 Chemische Prozesse und reaktiver Stofftransport

Chemische sowie gekoppelte chemisch-hydraulische Prozesse führen zur Verlagerung von Stoffen (reaktiver Stofftransport) in den porösen und geklüfteten Gesteinen eines geothermalen Reservoirs und beeinflussen damit dessen hydraulische Eigenschaften. Weiterhin führen diese Prozesse, die alle mit der Lösungszusammensetzung der Thermalwässer im Reservoir und deren Änderungen im weiten Temperatur- und Druckbereich des geothermalen Systems (bestehend aus Reservoir, Bohrungen und der oberirdischer Anlage) zusammenhängen, zu bedeutenden Veränderungen des Anlagenzustandes (z. B. durch die Bildung von Ablagerungen in den Rohrleitungen und Korrosion metallischer Komponenten), welche die Wirtschaftlichkeit der Anlage und die Arbeitssicherheit negativ beeinflussen.

Das Verständnis dieser Prozesse sowie die Möglichkeiten und Grenzen ihrer Modellierung waren im GeoSys-Vorhaben Gegenstand vertiefter Untersuchungen. Der Stand des Wissens zu diesem Thema ist in der ausführlichen Ergebnisdokumentation zusammengefasst und weiter unten in Kurzform wiedergegeben. Belegt werden diese Ausführungen durch Modellrechnungen, die im Rahmen des Vorhabens durchgeführt wurden. Die zu Beginn des GeoSys-Vorhabens begrenzten Möglichkeiten der Modellierung geochemischer Prozesse wurden durch das zeitgleich durchgeführte, ebenfalls BMWi-finanzierte Forschungsvorhaben GeoDat deutlich verbessert. Diesbezüglich wird

daher auch auf den Schlussbericht zum GeoDat-Vorhaben (siehe beigefügte CD) verwiesen.

Die Eigenschaften von Thermalwässern und deren Änderungen durch veränderliche Temperaturen und Drücke können vornehmlich im oberirdischen Anlagenteil analysiert werden. Direkte Messungen im Reservoir und in den Bohrungen sind wesentlich schwieriger und teilweise noch nicht möglich. Sie werden nicht nur durch die schlechtere Zugänglichkeit erschwert, sondern vor allem auch durch fehlende, adäquate Probennahme- und Messtechniken. Unverfälschte Daten aus allen interessierenden Lokationen eines komplexen Geothermie-Systems mit seinen sehr unterschiedlichen Temperatur- und Druckbedingungen stellen eine wichtige Basis für ein umfassendes Prozessverständnis dar, sind aber heute noch nicht im erforderlichen Umfang verfügbar.

Abhilfe könnte eine gezielte Verbesserung der Probennahmetechnik und des Betriebsmonitorings schaffen. Unverfälschte Proben könnten dann beispielsweise im Labor zur Aufklärung von Temperatur- und Druckabhängigkeiten der Lösungszusammensetzung analysiert werden. Erste Schritte in diese Richtung stellt das im Januar 2014 angelaufenen Verbund-Forschungsvorhaben ANEMONA mit Zuwendungen des BMWi dar.

Durch eine belastbare Modellierung der im Reservoir ablaufenden chemischen und chemisch-hydraulischen Prozesse können diese verstanden und quantifiziert werden. Das wiederum sind entscheidende Voraussetzungen für eine gezielte Beeinflussung dieser Prozesse hinsichtlich einer Optimierung des Anlagenmanagements. Zurzeit bestehen hinsichtlich der praktischen Anwendbarkeit dieses wichtigen theoretischen Werkzeugs Einschränkungen, die in den Schlussberichten zu beiden Vorhaben, Geo-Sys und GeoDat ausführlich dargelegt werden. Die bestehenden Grenzen der Modellierung müssen beachtet werden, um aus Modellrechnungen keine ungerechtfertigten Schlüsse zu ziehen.

Ähnlich stellt sich die Problematik im Bereich der Bohrungen dar. Dort steht das Fluid mit dem Material der Verrohrung in Kontakt. Das metallische Material steht prinzipiell zur chemischen Reduktion von im Fluid gelösten Stoffen zur Verfügung (zum Beispiel Kupfer, Blei, Sulfate) und wird dabei selbst oxidiert (Korrosion). Die Korrosion selbst ist ein in höchstem Maße kinetisch kontrollierter Prozess, dessen Zeitabhängigkeit mit den Mitteln der thermodynamischen Gleichgewichtsmodellierung nicht abgebildet werden

kann. Die Gleichgewichtsmodellierung geht vom Prinzip des lokalen Gleichgewichts aus, d. h., dass zu jeder Zeit an jedem Ort ein Zustand thermodynamischen Gleichgewichts herrscht. Dies ist jedoch in den Bohrungen mit hohen Fließgeschwindigkeiten des Thermalwassers nicht der Fall. Es kommt lokal zu starken Übersättigungen, die an anderen, noch nicht ausreichend gut prognostizierbaren Stellen des Systems teilweise oder ganz wieder abgebaut werden.

Zur Kinetik solcher Reaktionen und ihrer Modellierung existieren Publikationen zahlreicher Forschungsinstitutionen. Die Reaktionen sind in der Regel abhängig von den metallischen Stoffen, der Lösungszusammensetzung, der Temperatur und der effektiven Oberfläche. Vor allem die (lokale!) Lösungszusammensetzung und die effektive Oberfläche sind aber a priori nicht für jeden Punkt innerhalb des modellierten Systems bekannt. Verwendbare kinetische Daten sind also, vor allem auch in Abhängigkeit von Temperatur und Druck, heute praktisch nicht verfügbar. Sie müssten durch gezielte experimentelle Arbeiten generiert werden.

Die Situation wird weiterhin dadurch komplizierter, dass eine beobachtete Zeitabhängigkeit von Auflösungs- und Ausfällungsprozessen nicht nur eine Folge der Reaktionskinetik sein muss, sondern auch dadurch entstehen kann, dass es innerhalb des betrachteten Systems Zonen unterschiedlicher hydrodynamischer Durchlässigkeit geben kann. Im einfachsten Fall könnte so ein System als aus zwei unterschiedlichen Poren-Domänen zusammengesetzt angenähert werden (dual porosity). Solch ein Fall könnte zum Beispiel auftreten, wenn es auf der Oberfläche der Verrohrung durch Korrosion zur Ausbildung von Poren kommt. Es ist denkbar, dass die Lösung, die in diesen Poren steht, nur verzögert durch Lösung, die an der Pore vorbei strömt, ausgetauscht wird. Dadurch kann sich lokal, also innerhalb der Pore, ein anderes Milieu (zum Beispiel ein anderer pH-Wert) einstellen, als in der Lösung innerhalb des durchströmten Rohres. Dies wiederum kann zur Bildung von Korrosionsphasen führen, die, wenn man den pH-Wert über das gesamte Innenvolumen des Rohres "mittelt", eigentlich gar nicht stabil sein dürften. Ein anderer Effekt kann darin bestehen, dass gelöste Stoffe zwischen den beiden Porendomänen durch Diffusion wechseln und dadurch in der Summe ein Transportverhalten zeigen, dass fälschlicherweise auf eine etwaige Reaktionskinetik zurückgeführt werden kann. In diesem Fall könnte man also bei der Modellierung des reaktiven Stofftransports das Prinzip des lokalen Gleichgewichts anwenden, müsste aber für das Strömungsregime innerhalb des Rohres ein detaillierteres Modell aufstellen.

Die Vielschichtigkeit dieser Prozesse und die Heterogenität des durchströmten Volumens stehen im Kontrast zu den eingeschränkten Kenntnissen, die man von dem System hat. Diese Kenntnisse stammen letztlich vorrangig aus früher gezogenen Bohrkerne und der zeitabhängigen Zusammensetzung des an die Oberfläche geförderten Fluids. Fügt man bei der Modellierung Zug um Zug einen theoretisch denkbaren Einflussfaktor nach dem anderen hinzu, so gelingt die "Modellierung" des geothermalen Systems eigentlich immer irgendwann. Da die oben diskutierten Einflussfaktoren aber mathematisch nicht klar voneinander zu trennen sind, bedeutet die Modellierbarkeit eines geothermalen Reservoir nicht notwendigerweise, dass man dieses auch "verstanden" hat. Daraus ergibt sich, dass heute verlässliche Prognosen noch nicht möglich sind. Dies ist ein prinzipielles Problem, das mit unserer unvermeidlich eingeschränkten Kenntnis des Systems und mit Messunsicherheiten zusammenhängt.

Dennoch gilt: Wenn man sich dieser Einschränkungen bewusst bleibt, kann der reaktive Stofftransport als Methode zum vertieften Prozessverständnis eines geothermalen Reservoirs inklusive der Bohrungen und der Oberflächenanlage wichtige, praxisrelevante Beiträge liefern. Zum einen kann die Reaktionskinetik die Prinzipien der chemischen Thermodynamik nicht "betrügen": Die Kinetik einer Reaktion hat Einfluss auf das Zeitverhalten eines Systems, aber nicht auf seine Gleichgewichtslage. Reaktionen, die thermodynamisch erlaubt sind, bleiben möglich, auch wenn sie möglicherweise langsamer oder nicht vollständig ablaufen. Darum erlauben Kenntnisse über das Vorhandensein (oder das Nicht-Vorhandensein!) einer festen Phase in einem bestimmten geochemischen Milieu Rückschlüsse auf Zusammensetzung und Porenraum eines durchströmten Mediums.

Zum anderen erlaubt die systematische Variation der Randbedingungen einer Modellrechnung Rückschlüsse auf den wahrscheinlichen Aufbau und die stoffliche Zusammensetzung eines Reservoirs. Das Vorgehen sollte daher nicht darin bestehen, an den Randbedingungen einer einzelnen Rechnung so lange "zu drehen, bis es passt", sondern anhand einer größeren Anzahl von Modellrechnungen mit stochastisch verteilten Randbedingungen zu einem "wahrscheinlich richtigen" Reservoir-Modell zu kommen, das konsistent mit allen bekannten Messdaten ist. Gegenstände solcher Variationsrechnungen sollten neben hydrodynamischen Eigenschaften auch stoffliche Zusammensetzung, Messunsicherheiten und Unsicherheiten in der verwendeten Datenbasis umfassen.

Je mehr Messdaten also vorliegen und je besser die thermodynamische Datenbasis abgesichert ist (durch die fortschreitende Kenntnis des Systemverhaltens des Reservoirs, gewonnen aus mehrjähriger Betriebserfahrung), desto mehr kann ein standort-spezifisches Reservoir-Modell verfeinert werden.

Zuverlässige Fluiddaten als Voraussetzung für das vertiefte Verständnis der möglichen mineralogischen und hydraulischen Veränderungen im geothermalen Reservoir sowie der Scale-Bildung in geothermischen Anlagen sind durch nichts zu ersetzen. Solche Daten können durch belastbare Fluidmessdaten unter In-situ-Bedingungen und durch korrekte geochemische Modellierung gewonnen werden. Die Analyse vorhandener Daten im Rahmen des GeoSys-Vorhabens haben jedoch gezeigt, dass beide Voraussetzungen heute nicht, oder nur sehr unvollständig, erfüllt sind.

Für die Gewinnung belastbarer Fluiddaten sind die genaue Kenntnis der Zusammenhänge zwischen der chemischen Zusammensetzung der Lösungen (Gasgehalte, Haupt- und Spurenelemente und Radionuklide) und der Temperatur- und Druckbedingungen erforderlich. Neben solchen Wissenslücken ist ein weiterer gravierender Grund für fehlende belastbare Fluiddaten die fehlende Technik zur Gewinnung von Fluidproben und die Messung deren relevanter Parameter (insb. Eh und pH) unter In-situ-Bedingungen. Diese Defizite haben sich im Laufe der Arbeiten im GeoSys-Vorhaben schon früh offenbart, nachdem vorhandene Daten gesichtet wurden und der Stand der geochemischen Modellierung festgestellt worden war. Diese Erkenntnisse haben dazu geführt, dass notwendige technische und wissenschaftliche Arbeiten definiert wurden, die zur Verbesserung dieser Sachlage beitragen können. Die Erkenntnis der Notwendigkeit, solche Arbeiten durchzuführen, hat sich sowohl bei Geothermiebetreibern, Forschungseinrichtungen und den involvierten Bundesministerien gefestigt.

4.3 Kompartiment „Technische Anlage“

Anlagen zur geothermischen Energieerzeugung stehen in Deutschland auf versiegeltem Anlagengelände. Die Versiegelung soll verhindern, dass gefährliche Stoffe in den Boden eingetragen werden. Die Größe der versiegelten Fläche ist abhängig von der konkreten Anlage und den Bedingungen vor Ort. Auf der versiegelten Fläche befinden sich die oberirdischen Anlagenteile, wie Thermalwasserkreislauf (Primärkreislauf), Stromerzeugungskreislauf (Sekundärkreislauf), Kühlkreislauf des Stromerzeugungskreislaufes (Tertiärkreislauf) sowie sämtliche Hilfssysteme.

4.3.1 Kraftwerkstechnologien

Geothermische Anlagen werden in Deutschland sowohl zur Fernwärmebereitstellung als auch zur Stromerzeugung genutzt. In vielen Anlagen werden diese beiden Möglichkeiten kombiniert genutzt. Dabei kann die Priorität sowohl auf der Stromerzeugung als auch auf der Wärmebereitstellung liegen.

Eine geothermische Anlage besitzt unabhängig vom Verwendungszweck immer mindestens einen Thermalwasserkreislauf. Je nach weiterer Nutzungsart schließen sich an diesen Thermalwasserkreislauf ein Fernwärmenetz und/oder ein Sekundärkreislauf zur Stromerzeugung an. Dabei können das Fernwärmenetz und der Kreislauf zur Stromerzeugung sowohl in Reihe (Bsp. Landau) als auch parallel geschaltet sein (Bsp. Unterhaching). Es gibt auch Mischformen, die über eine entsprechende Vermaschung realisiert werden. Diese einzelnen Varianten werden je nach Verwendungszweck der Anlage ausgelegt, abhängig davon, ob die Anlage wärme- oder stromgeführt betrieben werden soll.

Für eine detaillierte Beschreibung der verschiedenen Kreisläufe und Hilfssysteme, sowie der maßgeblichen Komponenten des primären und sekundären Kreislaufes der Geothermieanlagen verweisen wir hier auf die elektronische Ergebnisdokumentation.

4.3.2 Betriebsmittel

Bei ORC-Anlagen sekundärseitig verwendete Betriebsmittel (Arbeitsmedien) sind u. a. Isopentan (Landau), n-Perfluorpentane (Neustadt-Glewe), Penta-Fluor-Propan (Sauerlach), 1,1,1,2-Tetrafluorethan (R134a) (Simbach-Braunau). Das Gefährdungspotenzial ist abhängig vom verwendeten Arbeitsmedium und von Anlage zu Anlage sehr unterschiedlich. So ist Iso-Pentan beispielsweise hochentzündlich und umweltgefährlich. Im Gegensatz dazu gibt es bei dem Kältemittel R134a keine R-Sätze oder besondere Gefahrenstoffkennzeichnungen. Während R134a in der Vergangenheit ein weit verbreitetes Kältemittel von KFZ-Klimaanlagen war, darf es seit 2011 aufgrund einer EU-Richtlinie wegen seines großen Treibhauspotenzials nicht mehr in Neuwagen verwendet werden. Bei Kalina-Anlagen wird als Arbeitsmittel ein Ammoniak-Wasser-Gemisch genutzt. Ammoniak ist schwer entzündlich, giftig sowie umweltgefährlich, gleichzeitig ein in Kältemaschinen (u. a. Eissportanlagen) weit verbreitetes Arbeitsmittel.

Weitere Betriebsmittel umfassen Inhibitoren, die in das Thermalwasser gegeben werden, um die Bildung von Scale und Ausfällungen zu reduzieren oder zu verhindern. Der Inhibitor wird an die jeweiligen physikalischen und chemischen Eigenschaften des Thermalwassers angepasst und ist daher für jede Anlage individuell zu bestimmen. Mögliche Inhibitoren sind Phosphonate, Polyphosphate oder Polycarboxylate. Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung eines Derivats der Phosphonsäure.

Darüber hinaus erfolgt Einsatz von Erdölerzeugnissen zur Schmierung, Dichtung und Kühlung. Für die Schmierung von Pumpen können anstatt von Erdölerzeugnissen auch Bioschmierstoffe verwendet werden. Für die Dichtung und Schmierung im Bereich der Turbine und des Generators werden zum Teil auch gasförmige Stoffe, wie beispielsweise Stickstoff eingesetzt.

Ein weiteres Betriebsmittel ist Frostschutzmittel, welches im Bereich der Förderpumpe oder auch als Schutz gegen Vereisung des Kühlturms verwendet wird. Im Bereich des Kühlturmes ist eine Zugabe von Bioziden zum Kühlwasser zur Abtötung vorhandener Keime oder Bakterien, beispielsweise Chlordioxid, sowie Korrosionsschutz möglich. Eine Zugabe von Schwefelsäure ist bei einem hohen Kalkgehalt im Kühlwasser üblich, um eine Verkalkung in den Rohrleitungen und im Wärmetauscher zu vermeiden. Des Weiteren kommen für Klimaanlage innerhalb der Anlage verschiedene Kältemittel zum Einsatz.

4.3.3 Betriebserfahrungen

In den folgenden Kapiteln wird auf relevante Betriebserfahrung in den Anlagen eingegangen. Da dieser Bericht sich auf öffentlich zugängliche Unterlagen stützt ist die Betriebserfahrung nur vereinzelt zu recherchieren und nicht vollständig. Daher kann nur ein unvollständiges generisches Bild entworfen werden. Für mehr Details sei auch hier auf die elektronische Ergebnisdokumentation verwiesen.

4.3.3.1 Korrosion und Abrasion im Thermalwasserkreislauf

In den folgenden Kapiteln wird auf die Korrosions- und Abrasionsproblematik näher eingegangen. Während Korrosion fast in der gesamten Anlage ein Problem darstellen kann stellt Abrasion ausschließlich im Thermalwasserkreislauf ein Problem dar.

Das Thermalwasser hat je nach geothermischem Reservoir unterschiedliche chemische Zusammensetzungen. Meist hat das Wasser korrosive Eigenschaften und ist oft hoch salinar. Infolge der Druck- und Temperaturveränderungen durch die energetische Nutzung des Thermalwassers können sich je nach Zusammensetzung des Thermalwassers verschiedenste Ablagerungen/Scale bilden, die sowohl die Korrosion fördern als auch abrasiv wirken können, wenn sie im Thermalwasserkreislauf befördert werden.

Neben dem Salzgehalt können weitere Wasserinhaltsstoffe wie Schwefelwasserstoffe (Molassebecken) oder ein hoher Chloridgehalt (Norddeutsches Becken und Oberrheingraben) zu Problemen im Betrieb führen. Die fluid- und standortspezifischen Faktoren sind bei der Werkstoffauswahl zu beachten. Neben geeigneter Werkstoffauswahl gibt es verschiedene andere Möglichkeiten um die Bildung von Korrosion oder das Auftreten von Abrasion zu vermeiden oder die Auswirkungen zumindest zu vermindern. Besondere Bedeutung kommt hierbei dem Einsatz einer Druckhaltung zu, die für konstantere thermodynamische Bedingungen im System sorgt. Eine weitere Möglichkeit stellt der Einsatz von Inhibitoren im Thermalwasser dar.

Durch Korrosion und Abrasion kam es unter anderem bereits zu Schäden und Ausfällen an Förderpumpen und Wärmeüberträgern. Neben der abrasiven Wirkung der können sich die Partikel auch in den Wärmeüberträgern festsetzen und die Wärmeübertragung mindern und somit auch den Wirkungsgrad der geothermischen Anlage verringern. Regelmäßige Wartung und Reinigung der Wärmetauscher ist daher erforderlich. Maßnahmen zur Verhinderung oder Verringerung der Scale-Bildung (beispielsweise der Einsatz von Inhibitoren oder Druckhaltung) werden ergriffen.

4.3.3.2 Korrosion und mechanische Belastung im Sekundärkreislauf

Abhängig vom verwendeten Arbeitsmedium kann Korrosion auch ein Problem im Sekundärkreislauf sein. Hier ist vor allem das Wasser-Ammoniak-Gemisch in Kalina-Kreisläufen zu erwähnen, das aufgrund der chemischen Eigenschaften des Ammoniaks auf die Baugruppen der Kalina-Anlagen korrodierend wirkt. Dies hat zur Folge, dass alle Bauteile der Kalina-Anlagen aus hoch legierten Stählen oder Materialien wie Titan bestehen müssen. Insbesondere müssen selbst Bauteile, die nicht mit dem Arbeitsmedium direkt in Kontakt stehen, auch aus hochveredelten Materialien hergestellt werden.

Ein weiterer zu beachtender Aspekt ist die Notwendigkeit, Apparate zur Trennung bzw. Mischung der Medien in den Kreisprozess zu integrieren, was zu einer erheblichen Steigerung der Komplexität und zur Störung der thermodynamischen Stabilität beiträgt. Durch die Komplexität des Kreisprozesses ist es nicht zu verhindern, dass in breiten Lastbereichen Nassdampf mit hohem Wasseranteil durch die Turbine geführt wird, was zu hohem hydromechanischen Verschleiß am Turbinenlaufrad führen kann. Hier können nur Materialien mit hoher Verschleißfestigkeit gegen mechanische und chemische Angriffe genutzt werden wie bspw. Titan oder höchst legierte Edelstähle.

Korrosion und mechanische Belastungen stellen bei ORC-Anlagen in der Regel kein Problem dar.

4.3.3.3 Korrosion im Tertiärkreislauf

Abhängig von der Art der Kühlung des Kondensators (und ggf. anderer Komponenten des Kraftwerks) ergeben sich auch Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit dieser Anlagenteile. Diese weichen nicht wesentlich von den Anforderungen an konventionelle Kraftwerke ab. Betriebserfahrungen hierzu liegen bezogen auf geothermische Kraftwerke nicht vor. Die Zugabe von Bioziden und Mitteln zum Korrosionsschutz im Bereich des Kühlturmes sprechen für dort auftretende Probleme.

4.3.3.4 Mechanische Belastungen im Primärkreislauf

Die bisherigen Betriebserfahrungen zeigen, dass es im Bereich der Welle bei den Gestängepumpen (Line Shaft Pump, LSP) häufig zu Problemen kam. Zum einen kann sich die Welle durch eine schlechte Schmierung verkanten und brechen. Dies kann beim kompletten Verlust der Schmierung, aber auch schon durch eine schlechte Qualität des Schmiermittels geschehen.

Die Fahrweise der Pumpe kann sich negativ auf ihre Lebensdauer auswirken. Aufgrund einer hohen Rotationsgeschwindigkeit der Pumpe können möglicherweise Vibrationen entstehen, die zu Schäden an den einzelnen Komponenten führen können. Um diesem Phänomen entgegen zu wirken, kann die Stufenzahl der Pumpe erhöht werden, um die Rotationsgeschwindigkeit und damit auch die Vibrationen zu reduzieren .

4.3.3.5 Thermische und sonstige Belastungen

Thermische Belastungen spielen im Wesentlichen an zwei Stellen im Thermalwasserkreislauf eine große Rolle: Einerseits bei den Tauchpumpen (Electric submersible pump, ESP) und andererseits bei den Dichtungen in den Plattenwärmetauschern.

Die thermischen Belastungen der Elektrik und Elektronik bei den ESP treten auf, da diese durch den Einbau im Bohrloch nicht gut gekühlt werden können. Hierbei sind insbesondere Kabelisolierungen stark anfällig. Bei LSP treten diese Probleme nicht auf.

Aus der Betriebserfahrung heraus hat sich gezeigt, dass die Dichtungen einen weiteren Schwachpunkt bei der Nutzung von Plattenwärmeübertragern darstellen. Bei einem Verlust der Dichtfähigkeit kann es zu Leckagen von Thermalwasser oder den Arbeitsmitteln in die Anlage kommen. Die Auswahl der passenden Dichtungen muss an die Temperaturverhältnisse und Zusammensetzungen der einzelnen Medien auch insbesondere des Thermalwassers angepasst werden. Bei der Auslegung des Wärmeübertragers muss auch beachtet werden, dass bei Stillständen oder sonstigen Änderungen im Temperatur- und Druckverlauf in der Anlage es zu Veränderungen im Medium, wie z. B. zu Entmischungen, kommen kann. Es können sich z. B. auf der Thermalwasserseite Ölablagerungen bilden, welche die Dichtungen angreifen. Eine Lösung für die Dichtungsproblematik könnten semigeschweißte Wärmeübertrager sein, da diese über weniger Dichtflächen verfügen.

4.3.3.6 Sonstige Fehlerursachen

Ein weiterer Fehlermechanismus betrifft den Bereich der Elektronik. So kam es schon zu Pumpenausfällen aufgrund von Kurzschlüssen. Weitere Probleme gab es bei Ausfällen der Bohrlochsensoren. Grundsätzlich sind auch Ausfälle von sonstigen elektrischen Komponenten zu betrachten.

4.3.4 Auswirkungen des Betriebs der Anlage

4.3.4.1 Normalbetrieb

Geothermische Anlagen wirken im Normalbetrieb in verschiedener Weise auf ihre Umgebung ein. Wesentliche Wirkfaktoren, die sich aus dem Betrieb der Anlage ergeben können (aber nicht zwangsläufig müssen), sind:

- Potenzielle stoffliche Emissionen in verschiedene Bereiche der Umwelt (Reservoir, Boden, Grundwasser, Luft): Betriebliche Freisetzungen von Schmier- und sonstigen Betriebsmitteln (z. B. Inhibitoren); betriebliche Freisetzungen des Arbeitsmediums (Organische Verbindungen bei ORC-Anlagen oder Ammoniak bei Kalina-Anlagen); Abgabe radioaktiver Stoffe: Betriebliche Freisetzungen von NORM-Stoffen (Radon, NORM mit Thermalwasser); Betriebliche Freisetzungen von Dampf
- Akkumulation von NORM: Scale-Bildung in Anlagenteilen, verbunden mit erhöhter Strahlenexposition
- Schallemissionen
- Anfall von Rest- und Abfallstoffen: Schwermetalle und NORM-Stoffe in den Filtern (Entsorgung?)
- Verlust von Wasserfunktionen: Entnahme von Grund- oder Oberflächenwasser zur Kühlung

Die möglichen Auswirkungen der Wirkfaktoren aus Normalbetrieb auf die Umgebung sind abhängig von der Menge der freigesetzten Stoffe und deren Gefährlichkeit. Betriebliche Freisetzungen von Betriebsmitteln oder Arbeitsmedien lassen sich nicht vollständig vermeiden. Die sich daraus ergebenden Auswirkungen müssen im Einzelfall betrachtet werden. Die vorhandenen bzw. eingesetzten Stoffe, ihre Gefährlichkeit, die Stoffmenge und die Umsetzung konkreter Maßnahmen zur Einhaltung gesetzlicher Grenzwerte bei der Freisetzung sind entscheidend für die Genehmigungsbedürftigkeit, Genehmigungsfähigkeit und Überwachungsbedürftigkeit (z. B. gemäß der Betriebssicherheitsverordnung) der Anlage. Im Normalbetrieb sind die Mengen somit reglementiert.

4.3.4.2 Störungen und (mögliche) Folgen

Bei Störfällen (z. B. Bersten einer Leitung mit Arbeitsmedium), bei denen es zu (unkontrollierten) größeren Freisetzungen kommen kann, ist der Betreiber ebenfalls zur Schadensvorsorge durch technische wie auch organisatorische Maßnahmen verpflichtet. Insgesamt unterliegt der Anlagenbetrieb der behördlichen Aufsicht.

Die Auswirkungen einzelner Störungen können ohne detaillierte Anlagenkenntnisse nur generisch beschrieben werden. Sie können von Anlage zu Anlage unterschiedlich bedeutsam hinsichtlich der Gefährdung der Umwelt sein. Größere Auswirkungen auf die Umwelt sind allein bei Leckagen in den verschiedenen Kreisläufen und Hilfssystemen sowie bei einem Brand zu erwarten. Abhängig von den betroffenen Komponenten sind anlagenspezifisch verschieden schwere Folgen zu erwarten.

Leckagen im Primärkreislauf führen zu Freisetzungen von Thermalwasser auf das Anlagengelände, die durch die Anlagenversiegelung aufgefangen werden. Die Freisetzungen von gasförmigen NORM (Radon) geht nicht über das normale betriebliche Niveau etwa beim An- und Abfahren der Anlage hinaus. Flüssige und feste Bestandteile werden aufgefangen und nicht in die Umwelt freigesetzt.

Leckagen im Sekundärkreislauf führen zu Freisetzungen des Arbeitsmediums. Abhängig von Leckgrößen und verwendetem Arbeitsmedium können Lecks eine Gefährdung von Personal und Umwelt darstellen. Um diesem entgegenzuwirken, werden auf den Anlagen Detektoren eingesetzt, die eine Freisetzung von kritischen Stoffen anzeigen können. Dem Problem des Überdruckversagens wird in den Anlagen mit Sicherheitsventilen oder Berstscheiben begegnet.

Leckagen in Hilfssystemen können zur Freisetzung von Schmiermitteln oder anderen Betriebsmitteln auf das Anlagengelände führen. Abhängig von der Art und Menge des freigesetzten Betriebsmittels sind unterschiedliche Auswirkungen möglich. Die Anlagenversiegelung fängt die Freisetzungen auf.

Ein Brand in der Anlage kann zur Freisetzung von Brandgasen, Schadstoffen, Betriebsmitteln und Ruß führen. Typische Brandherde sind z. B. Schaltschränke, sonstige elektrische Einrichtungen, Transformatoren, Generator und heißgelaufene Lager. Brandlasten in den Anlagen sind z. B. Isoliermaterialien, Schmiermittel (Öl), Strukturmaterialien aus Kunststoff und ggf. brennbare Arbeitsmedien (Ammoniak, Iso-

Pentan). Je nach betroffenem Anlagenteil sind die Auswirkungen unterschiedlich schwerwiegend.

4.4 Kompartiment „Umwelt 1“ (oberirdische Auswirkung des Anlagenbetriebes)

Das Kompartiment Umwelt ist zur besseren Differenzierung der betrachteten Auswirkungen in zwei Teile untergliedert. Der Untersuchungsraum des Kompartimentes Umwelt 1 berücksichtigt den oberirdischen Anlagenteil. Als Betrachtungsraum ist der Umweltbereich oberhalb der Geländeoberkante definiert, der die Tier- und Pflanzenwelt beinhaltet und als Aufenthaltsraum des Menschen fungiert. Die unterirdischen Auswirkungen des Anlagenbetriebes werden dann in Kap. 4.5 behandelt.

Die zielgerichtete Beschreibung rechtlich geschützter Schutzgüter, welche die voraussichtlichen Wirkfaktoren und Folgen der Errichtung und des Betriebes einer Anlage oder der Umsetzung einer Maßnahme für das Schutzgut beinhaltet, ist Grundlage für die Prognose der zu erwartenden Umweltauswirkungen einer Geothermieanlage. Wirkfaktoren sind die von einer Maßnahme (einem Prozess innerhalb eines Kompartimentes) ausgehenden Einwirkungen auf Schutzgüter. Die im Rahmen des Vorhabens zu untersuchenden Wirkfaktoren unterliegen einer gesetzlichen Regelung. So werden z. B. stoffliche Emissionen als Wirkfaktor durch zulässige Ableitungsgrenzwerte beschränkt.

Schutzgüter und Wirkfaktoren werden zur besseren Übersicht in der ausführlichen Ergebnisdokumentation als eine Wirkmatrix dargestellt. Für die einzelnen Phasen im Lebenszyklus der Anlage werden das Eintreten der genannten Wirkfaktoren und eine entsprechende Auswirkung auf die genannten Schutzgüter überprüft. Während die Wirkmatrix sich bemüht, eine möglichst vollständige Summierung der in der Literatur bekannt gewordenen Wirkfaktoren wiederzugeben, konzentrierten sich die Detailuntersuchungen auf Einzelaspekte.

4.4.1 Konkrete Fragestellungen NORM & Geothermie

Die Errichtung und nachfolgend der Betrieb einer Anlage der Tiefengeothermie kann in Einzelfällen über den Wirkfaktor „Akkumulation natürlicher Radionuklide“ und „Freisetzung natürlicher Radionuklide“ zu einer aus Sicht des Strahlenschutzes zu bewertenden

den Auswirkung auf das Schutzgut „Menschliche Gesundheit“ führen. Es war zu prüfen, ob durch Arbeiten mit beim Betrieb der Anlage anfallenden Scale-Ablagerungen oder durch Ausübung von Arbeiten, bei denen diese Materialien anfallen, die Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung erheblich erhöht wird und Strahlenschutzmaßnahmen angezeigt sind. Gleichzeitig ist für eine geordnete Beseitigung oder Wiederverwertung von Rückständen, die aus dem Betrieb der Anlage resultieren, zu sorgen; diese dürfen auch bei Entfernung der Stoffe vom Anlagengelände nicht zu einer unzulässigen Erhöhung der Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung führen.

In einem ersten Schritt der Arbeiten wurde der Einfluss der Lagerstättegeologie des geothermalen **Reservoirs** auf die Bildung radioaktiver Kontaminationen in oberirdischen Anlagenteilen bewertet. Grundsätzliche Prozesse der Anreicherung wurden beschrieben und Sachverhalte wie Messdaten und technische Randbedingungen im GeoSys-Infopool erfasst. Aus diesem Schritt resultierte eine Konzentration auf die Gebiete „Oberrheingraben“ und „Norddeutsches Becken“, da dort die Radionuklidkonzentrationen in tiefen Wässern deutlich erhöht sind.

Für die **Technische Anlage** selbst konnten Informationen zum Einfluss der Förder-technik auf die Bildung radioaktiver Kontaminationen im oberirdischen Anlagenteil zusammengestellt werden. Von Betreibern gelieferte Daten haben es gestattet, in typischen Betriebsabläufen Expositionspfade zu identifizieren und anlagenspezifisch Expositionsszenarien abzuleiten.

Für Beschäftigte und Einzelpersonen der Bevölkerung stellt die Anlage selbst einen Bestandteil der **Umwelt** dar: Über die Akkumulation von NORM kann es zu einer Strahlenexposition von Beschäftigten am Arbeitsplatz kommen, während Ableitungen natürlicher radioaktiver Stoffe oder die Beseitigung / Verwertung von Rückständen in einer Strahlenexposition der Bevölkerung resultieren. Diesbezüglich wurden die Bildungsprozesse radioaktiver Kontaminationen (Fällungsprozesse / Chemismus der Ablagerungen) betrachtet und wesentliche Eingangsdaten einer Dosisabschätzung wie Nuklidvektoren der Kontaminationen, Aktivitätskonzentrationen von Kontaminationen, Ortsdosisleistungen, Oberflächenkontaminationen sowie Radon in Betriebsstätten und Freisetzung in die Umgebung zusammengetragen und geprüft.

Neben einer möglichst umfangreichen Erfassung und Sichtung der aktuell verfügbaren Daten waren nachstehende zentrale Fragen im Vorhaben zu beantworten:

- Mit welcher resultierenden Unsicherheit kann ein Bearbeiter sagen, dass die Strahlenbelastung unterhalb (oberhalb) eines Dosisricht- oder Grenzwertes liegt?
- Welche unsicheren Parameter tragen zur Wahrscheinlichkeitsverteilung der Gesamtdosis infolge aller Arbeiten besonders bei?

Dosisabschätzungen erfolgen für Anlagen der Tiefengeothermie deterministisch, d. h. für einzelne Pfade verschiedenster Szenarien werden Dosen abgeschätzt und zu einer Gesamtdosis addiert. Die Annahmen werden konservativ gehalten und müssen damit nicht unbedingt realistische Expositionspfade und Expositionsannahmen darstellen. Nachteilig ist, dass bei wesentlichen Änderungen im Betriebsregime (Technische Modifikationen, geänderte Handlungsabläufe) eine Neubewertung erforderlich ist. Die deterministische Annahme von Fallunterscheidungen, Ausfällen oder Schäden führt gleichzeitig zu einer ungeordneten und unübersichtlichen Szenarien-Sammlung. Gleichzeitig muss klar sein, dass eine deterministische Abschätzung unter Verwendung typischer gemittelter Parameterwerte nur unwahrscheinlich zu einer mittleren Dosis als Ergebnis führt.

Im GeoSys-Vorhaben wurde exemplarisch ein probabilistischer Ansatz zu Beantwortung obiger Fragen verfolgt. Es ergeben sich nachstehende Vorteile:

- Unsicherheiten, z. B. zu ermittelnde Aktivitätskonzentrationen oder Dosisleistungen in der Anlage, können direkt benannt ODER in separaten Unterprogrammen berechnet werden
- Die Behandlung von Unsicherheiten ist bzgl. einzelner Parameter (nachfolgend „unscharfe Parameter“ genannt) mittels Monte-Carlo-Simulation möglich, wobei das Verteilungsmuster einer Datenmenge (normal, gleich, log-verteilt) berücksichtigt werden kann und Konservativitäten beschränkt werden
- Erfahrungen aus statistischen Reihenuntersuchungen können „verarbeitet“ werden

Es wurde eine probabilistische Ereignisablaufanalyse mit Hilfe der Ereignisbaum-Technik durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde das im Rahmen der US-Studie NUR-

EG-1150 entwickelte Rechenprogramm EVNTRE eingesetzt. Das Ziel einer Ereignisbaumanalyse besteht im Allgemeinen darin, die Wahrscheinlichkeit für bestimmte unerwünschte Ereignisse zu ermitteln und festzustellen, welche Phänomene besonders zu den unerwünschten Ereignissen beitragen. Die hier verwendete Ereignisbaumtechnik ist besonders flexibel. Der Nutzer hat vielfältige Möglichkeiten zum Aufbau des Baumes, zur Berechnung der Zweigwahrscheinlichkeiten, sowie zur Auswertung. Von besonderem Nutzen ist die Möglichkeit, beliebige frei programmierbare Unterprogramme zu erstellen, mit denen im vorliegenden Fall pfadspezifische Expositionen berechnet werden konnten.

Der in einer ersten vorläufigen Form aufgesetzte Ereignisbaum führte bei Einsetzen von Punktdaten, die als Grundlage einer realen deterministischen Dosisabschätzung bekannt waren, zu vergleichbaren Ergebnissen. Der Ereignisbaum ist somit geeignet, das System „geothermale Energieerzeugung“ im Sinne einer Expositionsabschätzung zuverlässig abzubilden. Gleichzeitig zeigte sich, dass sowohl durch die Angabe von Eintrittswahrscheinlichkeiten für das Überschreiten von Dosissschwellen als auch aus der Sensitivitätsanalyse der unscharfen Parameter über deterministische Betrachtungen hinausgehende Rückschlüsse gezogen werden konnten.

In einem zweiten Bearbeitungsschritt konzentrierten sich die Arbeiten auf unscharfe Parameter, die nicht über den gesamten Bereich variiert werden dürfen, da

- sie untereinander in Beziehung stehen
- sie in bislang unbekannter Beziehung zueinander stehen, beziehungsweise
- deren Unschärfe aus einem nicht erlaubten Pooling, wie der Summierung von Daten verschiedener Anlagen aus verschiedenen Geothermie-Provinzen resultiert

Die Version 2 des Ereignisbaumes berücksichtigt stärker das Verteilungsmuster von Datenmengen und trägt den Nuklidvektoren anlagenteilspezifischer Rückstände Rechnung. Mit Punkt-Eingangsdaten einer deterministischen Abschätzung wurden wiederum vergleichbare Ergebnisse erzielt. Darüber hinaus konnte die in der Gesamtmenge an Daten enthaltene Varianz von Messwerten genutzt werden, die Überschreitungswahrscheinlichkeit für eine Jahresdosis $> 6 \text{ mSv a}^{-1}$ zu bestimmen. Einzelne unscharfe Parameter wurden im Rahmen der Sensitivitätsanalyse als besonders wirksam in Bezug auf die Unsicherheit des Gesamtergebnisses identifiziert.

4.4.1.1 Umsetzung rechtlicher Vorgaben

Teil 3 der deutschen Strahlenschutzverordnung berücksichtigt eine erheblich erhöhte Exposition durch natürliche Strahlenquellen und regelt das Ergreifen von Strahlenschutzmaßnahmen für den Fall, dass die Exposition von Arbeitskräften oder Einzelpersonen der Bevölkerung nicht außer Acht gelassen werden kann.

Die Regelungen besitzen allerdings nicht die gleiche Regelungsbreite und -tiefe wie die Bestimmungen in den anderen Teilen der Verordnung, da vor allem die Einwirkungsmöglichkeiten auf natürlicherweise vorhandene radioaktive Quellen zwangsläufig erheblich geringer als die auf künstliche radioaktive Quellen sind. In Abgrenzung zu „Tätigkeiten“, bei denen Materialien aufgrund ihrer radioaktiven Eigenschaften (radioaktive Quellen, Kernbrennstoff) genutzt werden, werden Handlungen, die – ohne Tätigkeit zu sein – bei natürlich vorkommender Radioaktivität die Strahlenexposition oder Kontamination erhöhen können, als „Arbeiten“ bezeichnet.

In Form von „Positivlisten“ werden in den Anlagen XI und XII der StrSchV Arbeitsfelder, bei denen erheblich erhöhte Expositionen durch natürliche terrestrische Strahlungsquellen auftreten können, sowie überwachungsbedürftige **Rückstände** ausgewiesen. Die Überwachungsgrenzen und die Verwertungs- oder Beseitigungsoptionen sind für Rückstände je nach Höhe der Aktivitätskonzentration geregelt und sichern die Einhaltung des in § 97 festgeschriebenen Dosisgrenzwertes von 1 mSv a^{-1} für Einzelpersonen der Bevölkerung. Werden die Werte der spezifischen Aktivität für den jeweiligen Entsorgungs- oder Verwertungsweg überschritten, sind entweder andere Optionen der Entsorgung bzw. Verwertung mit höheren Überwachungsgrenzen zu wählen oder es ist über eine Expositionsrechnung der Nachweis zu erbringen, dass das Dosislimit von 1 mSv a^{-1} sowohl für den nicht beruflich strahlenexponierten Arbeiter als auch für eine Person der lokalen Bevölkerung sicher eingehalten wird. Eine Verdünnung zum Erreichen bzw. Unterschreiten von Überwachungsgrenzen ist jedoch ausdrücklich nicht gestattet (§ 102 in entsprechender Anwendung von § 97 Absatz 2 StrlSchV). Zum Erreichen bestimmter für die Beseitigung erforderlicher Eigenschaften wie z. B. das Eluatverhalten kann eine Vorbehandlung des Materials wie Immobilisierung erforderlich sein.

Die Strahlenschutzverordnung berücksichtigt die Tiefengeothermie nicht explizit als **Arbeitsfeld**, bei dem erheblich erhöhte Expositionen durch natürliche terrestrische Strahlungsquellen auftreten können, und die bei der Erdwärmegewinnung anfallenden

Rückstände (Anlagen XI und XII der StrlSchV). Infolgedessen finden die §§ 93 ff. StrlSchV vom Wortlaut her keine unmittelbare Anwendung. Es ist aber gängige Praxis der zuständigen Behörden, die Regelungen der StrlSchV durch Nutzung der Auffangtatbestände in §§ 96 Abs. 5 und § 102 StrlSchV auch auf die Tiefengeothermie anzuwenden. Für den Verdachtsfall beträchtlicher Strahlenexpositionen in nicht explizit genannten Arbeitsfeldern oder bei Arbeiten mit nicht genannten Rückständen können entsprechende Anordnungen getroffen werden.

4.4.1.2 Dosisabschätzungen

Um aus der Pflicht einer dauerhaften Dosisüberwachung und Anzeigepflicht entlassen zu werden, muss der Nachweis der Einhaltung des arbeitsplatzbezogenen Dosisgrenzwertes von 6 mSv a^{-1} geführt werden. Für gewählte Beseitigungs- und Verwertungsoptionen zur Abgabe von Rückständen kann eine Entlassung aus der Überwachung bei Unterschreiten einer effektiven Jahresdosis von Einzelpersonen der Bevölkerung von 1 mSv a^{-1} erreicht werden. Sowohl die Abschätzung der arbeitsplatzbezogenen Dosis als auch der Nachweis des erforderlichen Schutzes der Bevölkerung vor Strahlenexpositionen bei Beseitigung bzw. Verwertung von Rückständen erfordern die Annahme realistischer Expositionspfade und Expositionsannahmen.

Für die Expositionsrechnung im Zusammenhang mit Dosisabschätzung am Arbeitsplatz oder der Entlassung von NORM-Rückständen aus der Überwachung gibt es gegenwärtig keine autorisierten Berechnungsgrundlagen, diese befinden sich in Vorbereitung. Die gebräuchlichen Berechnungsmethoden orientieren sich gegenwärtig primär an den autorisierten Berechnungsgrundlagen Bergbau (BglBb), die jedoch für Arbeiten an bergbaulichen Hinterlassenschaften entwickelt wurde und nicht ohne weiteres auf NORM-Rückstände übertragbar ist. Die Berechnungsgrundlagen Bergbau sind nur zum Teil für die NORM anwendbar, da sich die Szenarien der Beseitigung (Behandlung, Lagerung, Ablagerung) je nach Option beträchtlich unterscheiden. Die BglBb schließen zudem untertägige Anlagen und Einrichtungen ebenso wie die stoffliche Nutzung und Folgenutzung kontaminierter Materialien aus. Es liegt somit im Ermessen der zuständigen Strahlenschutzbehörde, ob die vom Antragsteller vorgelegte Expositionsrechnung anerkannt wird oder nicht.

Basierend auf Empfehlungen des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) und umfassenden Praxiserfahrungen zahlreicher Bearbeiter kann eine vereinfachte Expositions-

abschätzung vorgenommen werden, welche die relevanten Pfade, abweichende Expositionsszenarien und expositionsrelevante Randbedingungen hinreichend berücksichtigt. Die praktischen Erfahrungen zeigen eindeutig die Tendenz, dass die angewandten Methoden (Anlehnung an die BglBb) behördlich akzeptiert werden.

Aufgrund der Bedeutung standort- und anlagenspezifischer Eigenschaften jeder einzelnen ober- und untertägigen Installation kann eine radiologische Bewertung über gesamte Geothermie-Provinzen nicht empfohlen werden. Vielmehr sind Einzelfallbetrachtungen erforderlich, die den jeweiligen Expositionsszenarien und den Quellen ionisierender Strahlung Rechnung tragen. Seitens eines Betreibers zur Verfügung gestellte Informationen über Betriebsabläufe zeigen, dass sehr komplexe und kleinräumige Szenarien (Filterwechsel, Reinigung WT, Öffnen von Anlagenteilen) betrachtet werden müssen und wesentliche Änderungen im Betriebsregime (technische Modifikationen, geänderte Handlungsabläufe) nicht ungewöhnlich sind.

Die probabilistische Abschätzung resultierender Jahresdosen für Beschäftigte in Anlagen der Tiefengeothermie (gepoolte Daten) zeigt, dass die Dosis mit hoher Wahrscheinlichkeit unter 6 mSv a^{-1} bleibt. Detailliertere Betrachtungen einer einzelnen Anlage legen den Schluss nahe, dass die Wahrscheinlichkeit für ein Überschreiten dieses Dosiskriteriums bei nur etwa 2 % liegt. Dosisabschätzungen für Einzelpersonen der Bevölkerung infolge der Beseitigung oder Verwertung von Rückständen aus dem Betrieb von Geothermieranlagen waren nicht Gegenstand der probabilistischen Analysen. Nach gegenwärtigem Kenntnisstand werden verschiedene Beseitigungs- und Verwertungsoptionen wahrgenommen. Probleme existieren bezüglich der Beseitigung brennbarer Rückstände wie Filtermaterialien, für die der Nachweis der Einhaltung des 1-mSv-Kriteriums bei Verbrennung aufwändig ist und noch nicht geführt wurde. Die Beseitigung von Rückständen zur Deponierung bedarf aufgrund des Überschreitens von Eluatwerten der Immobilisierung, die in Einzelfällen auch dann nicht die geforderten Eluatwerte für nicht-radioaktive Elemente erbringt. Grundsätzlich besteht vermehrt das Problem der Annahme der nach Klasse 7 ADR als radioaktive Stoffe angelieferten Rückstände aus NORM-Industrien bei Ankunft an der Deponie, was nach Planfeststellungsbeschluss i. d. R. nicht gestattet ist.

Die Sensitivitätsanalysen für unscharfe Parameter der probabilistischen Untersuchungen geben Hinweise auf Parameter, die aufgrund großer Unsicherheiten große Unsicherheiten des Gesamtergebnisses auslösen. Untersuchungsbedarf wird gegenwärtig mit Blick auf die Radon-Exposition von Beschäftigten bei Aufenthalt in Dampfwolken

bei Separatorbetrieb gesehen, da die Datenlage zur Aktivitätskonzentration unzureichend ist und Eingabedaten zum Gleichgewichtsfaktor (Verhältnis von Radon-Folgeprodukten) nur auf Annahmen beruhen. Gegenwärtig liegen keine Angaben zur zeitlichen Entwicklung der Dosisleistung an Anlagenteilen und zur Entwicklung der Dosisleistung nach erfolgter Reinigung vor, so dass auch hier der Bedarf für weitergehende Untersuchungen festgestellt werden muss.

Für die Expositionsermittlung sind die stofflichen, insbesondere die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Rückstände von prioritärer Bedeutung. Diese wiederum werden entscheidend durch die Bildungsprozesse der Rückstände kontrolliert. Sowohl die Sensitivitätsanalysen unscharfer Parameter der probabilistischen Untersuchung als auch die grundsätzlichen Erfahrungen der GRS bezüglich charakteristischer Rückstandsparameter von NORM, abweichender Szenarien des Umgangs mit NORM und divergierender Freisetzungsprozesse der Radionuklide lassen anraten, folgende Parameter im Zusammenhang mit einer Bewertung der Arbeiten mit NORM in Anlagen der geothermalen Energieerzeugung vertiefender zu untersuchen:

- Nuklidvektoren (Bauteil-spezifisch)
- Tätigkeitsspezifische Staubkonzentrationen
- Aktivitätskonzentration der Staubfraktionen
- Radon-Emanationsrate, Diffusionskoeffizient für Radon im Material
- Gleichgewichtsfaktor Radon / Radon-Folgeprodukte

Darüber hinaus sind für eine Reduzierung der Unsicherheit einer probabilistischen Dosisabschätzung die Kenntnisse bzgl. Scale-Bildung als Funktion von Zeit und Fördervolumen zu verbessern.

4.4.1.3 Vergleich zu anderen Industriezweigen

In weiteren der Energieerzeugung zuzuordnenden Industriezweigen kommt es im Zusammenhang mit der Förderung mineralisierter, Radium-reicher Solen zu einer Akkumulation von NORM in Betriebsanlagen und der Umwelt.

Im Mittel fallen in der deutschen Erdöl- bzw. Erdgasindustrie jährlich 130 Tonnen radioaktiv kontaminierte Produktionsrückstände (Schlämme und Scale) sowie 218 Tonnen

radioaktiv kontaminierter Stahlschrott an. Nach Trennung vom Stahl verbleiben durchschnittlich 150 Tonnen pro Jahr, die als schwach radioaktive Stoffe zu entsorgen sind. Dies entspricht 0,3 % der in Deutschland anfallenden NORM-Rückstände von insgesamt 100.000 t mit erhöhten Aktivitätskonzentrationen natürlicher Radionuklide. Die spezifische Aktivität von Produktionsrückstände der Erdöl- / Erdgasindustrie beträgt durchschnittlich ca. 20 Bq g^{-1} , wobei ein Wertebereich zwischen weniger als 5 Bq g^{-1} und in seltenen Einzelfällen bis zu 1.000 Bq g^{-1} abgedeckt wird. (Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung e.V.)

Im Rahmen der Wasserhaltung einiger Steinkohlebergwerke bzw. -provinzen werden Grubenwässer gefördert, die sowohl innerhalb der Prozessleitungen als auch bei Mischung mit Oberflächenwässern zu Radium-reichen Ablagerungen führen. Eine Abschätzung der bislang angefallenen Rückstandsmengen, wie der Menge an Flusssedimenten mit erhöhter natürlicher Radioaktivität, deren Kontamination auf Ableitungen ungereinigter bzw. teilgereinigter Abwässer des Steinkohlebergbaus zurückzuführen ist, gestaltet sich aufgrund der diffusen Ableitung in die Umwelt schwierig. Unter Berücksichtigung der abgegebenen Menge allein höher mineralisierter Grubenwässer muss mit Gesamtaktivitäten von einigen 100 GBq a^{-1} gerechnet werden. Während in der Vergangenheit die Ableitung der Wässer über die Vorflut erfolgte, werden heute untertägige effektive Wasserbehandlungsanlagen mit einer technisch gesteuerten Fällung des Radiums unter Zugabe von Bariumchlorid und Sulfat installiert. Die resultierenden NORM-Rückstände verbleiben nach Bergrecht im Bereich des Bergwerkes.

Für beide Industriezweige ist charakteristisch, dass die Förderung von mineralisierten Wässern als offene Systeme realisiert ist und damit Aktivitäten im Rahmen der gestatteten Ableitungen an die Umwelt abgegeben werden. Im Vergleich dazu beruht das technische Konzept einer Geothermieranlage auf einem geschlossenen System, was zumindest keinen wesentlichen Umgang oder eine Abgabe von gefördertem Wasser vorsieht.

Die derzeit geschätzten Mengen anfallender radioaktiver Rückstände aus Anlagen der Tiefengeothermie liegen bei 5 – 6 Tonnen pro Jahr. Unter Berücksichtigung einer Steigerung der Energieerzeugung durch Nutzung geothermaler Energie und einen Ausbau des Sektors auf eine Stromerzeugungsmenge von etwa 1.500 GWh im Jahr 2020 werden Jahresmengen von einigen 100 Tonnen an NORM-Rückständen abgeschätzt. Diese Abschätzung berücksichtigt allerdings weder die Erschließung pet-

rothermalen Systeme noch den zunehmender Einsatz von Inhibitoren zur Vermeidung von Ablagerungen in der Anlage.

4.4.1.4 Umsetzung der neuen EU-Richtlinie 2013/59/EURATOM

Neben einer expliziten Nennung der geothermalen Energieerzeugung als Industriezweig, in dem mit NORM umgegangen wird, ist nach der EU-Richtlinie zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung (RL 2013/59/EURATOM) ein grundsätzlicher Handlungs- und Prüfungsbedarf absehbar.

Ebenso wie die Basic Safety Standards der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) übernehmen die neuen BSS der EU die ausgeführten Grundprinzipien des Strahlenschutzes sowie das System der situationsbedingten Anforderungen an den Strahlenschutz mit geplanten, existierenden und Notfall-Situationen. Der Schutz von Beschäftigten und Personen der Bevölkerung vor ionisierender Strahlung infolge eines Umgangs mit NORM wird nicht mehr wie bislang in einem separaten Teil (Teil 3 BSS 96/29 EURATOM) (EU-BSS 1996) geregelt, sondern vollständig in das Gesamtsystem des Strahlenschutzes integriert.

Tätigkeiten und Arbeiten in Anlagen der geothermalen Energiegewinnung werden im internationalen Kontext als „Geplante Situationen“ eingeordnet. Als Folge greifen Dosisgrenzwerte für Beschäftigte und Dosisrichtwerte für die Bevölkerung.

Aufgrund der Aktivitätskonzentrationen natürlicher Radionuklide der Uran- und Thorium-Zerfallsreihen mit deutlich über 1 Bq g^{-1} bedarf der Umgang mit NORM Rückständen der Geothermie besonderer Beachtung. Wie in Artikel 25b (1) und Artikel 25c der neuen EU-BSS ausgeführt, bedarf der Umgang mit Materialien mit Aktivitätskonzentrationen oberhalb der Grenzen von 1 Bq g^{-1} (Radionuklide der U-238- und Th-232-Zerfallsreihe beziehungsweise oberhalb von 10 Bq g^{-1} (K-40) der behördlichen Anmeldung.

Für den Fall, dass die Expositionen infolge des von Tätigkeiten mit NORM im Bereich 1 mSv a^{-1} bis $\leq 6 \text{ mSv a}^{-1}$ liegen, fordern die EU-BSS zumindest, die Expositionen fortlaufend zu überwachen (Artikel 33.,2). Für Jahresdosen $> 1 \text{ mSv a}^{-1}$ sind entsprechend der Art der Einrichtung und der Strahlenquellen angepasste Strahlenschutzvorkehrun-

gen zu treffen. Eine Genehmigungspflicht gegenüber der Behörde besteht nach Auffassung der neuen EU-BSS bei Überschreitung eines möglichen jährlichen Dosisbetrages von $> 6 \text{ mSv a}^{-1}$. Arbeitsplätze mit effektiven Jahresdosen $> 1 \text{ mSv a}^{-1}$ werden zukünftig als geplante Expositionssituationen betrachtet. In Folge der Überschreitung sind die in Kapitel VI (Schutz von Beschäftigten, Auszubildenden und Studenten) dargelegten Anforderungen zu prüfen. Effektive Dosen von $> 1 \text{ mSv a}^{-1}$ werden als möglich erachtet, was in Zukunft bei Umsetzung der EU-BSS die Anmeldung der Tätigkeit bei der zuständigen Behörde erfordern könnte.

Für Radon an Arbeitsplätzen wird nach den neuen EU-BSS in Artikel 54 die Einführung eines Referenzwertes von nicht über 300 Bq m^{-3} gefordert. Gleichzeitig werden die Mitgliedstaaten aufgefordert, im Rahmen eines nationalen Radon-Aktionsplanes in sogenannten Radon-Verdachtsgebieten in ebenerdigen oder unterirdischen Arbeitsplätzen die Radonkonzentration am Arbeitsplatz zu bestimmen. Im Sinne einer Optimierung wird erwartet, dass entsprechende Maßnahmen zur Reduzierung der Strahlenbelastung durch Radon bei einem möglichen Überschreiten des gewählten Referenzwertes ergriffen werden. Für den Fall, dass eine Absenkung der Radonkonzentration unter den Referenzwert nicht möglich ist, wertet auch die Europäische Kommission die Exposition am Arbeitsplatz als geplante Situation und fordert die behördliche Anmeldung und fortlaufende Überwachung.

4.5 Kompartiment „Umwelt 2“ (unterirdische Auswirkungen auf Schutzgüter)

Der Untersuchungsraum des Kompartimentes Umwelt 2 bezieht sich auf den Teil der Geothermieanlage, welcher sich unter der Erdoberfläche befindet. Es wurden nur Systeme betrachtet, die ihre Wärmeenergie aus Niedrig-Enthalpie-Lagerstätten durch „offene“ Systeme beziehen. Die Arbeiten sind generisch und beziehen sich nicht speziell auf einen Anlagentyp, da der Bohrungsausbau unabhängig vom Anlagentyp (Kalina-, ORC-Prozess oder Wärmeauskopplung) ist.

4.5.1 Ziel der Analysen

Ziel der Arbeiten im Kompartiment Umwelt 2 war es, die bohrtechnischen und hydrogeologischen Risiken sowie die daraus resultierenden Wirkfaktoren während der Erschließungs- und Betriebsphase zu identifizieren, zu beschreiben und zu bewerten. Die

hierzu notwendige Systemanalyse schließt sowohl ökologische als auch technische Aspekte ein. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse führen zu einem besseren Verständnis der technischen Risiken und möglicher Beeinträchtigungen von Schutzgütern, die durch die Erschließung und Nutzung geothermaler Lagerstätten hervorgerufen werden können.

4.5.2 Bohrablauf und -technik

In der Optimierung der Erkundungsbohrungen bzw. der Exploration liegt ein großes ökonomisches Einsparungspotenzial. Der Einsatz von schnelleren bzw. effizienteren Bohrverfahren mit kleinen und mobilen Anlagen trägt erheblich dazu bei, Kosten bei der Exploration zu sparen. Optimierungsmöglichkeiten zur Kosteneinsparung während der Erschließung geothermischer Lagerstätten sind:

- Minimierung des Bohrrisikos durch eine gute Vorplanung zur Vermeidung von Standzeiten
- Reduzierung der Anlagenkosten durch einen kontinuierlichen und automatisierten Bohrablauf sowie eine Verringerung der Umrüstzeiten
- Erhöhung der effektiven Bohrgeschwindigkeit
- Schnelle und materialsparende Verrohrung der Bohrung
- Echt-Zeit-Informationsaustausch mit dem Bohrgerät und Einbindung von Spezialisten
- „Underbalanced Drilling“-Optionen zur Vermeidung von Feststoffeinträgen in das Speichergestein und Gewährleistung eines schnellstmöglichen Bohrvortriebes
- „Coiled Tubing“- Bohren
 - Reduzierter Aufwand für den Ein- und Ausbau des Bohrgestänges
 - Höhere Gesamtbohrgeschwindigkeit
 - Bohrlochdurchmesser bis 8 ½“ am 3 ½“Coiled Tubing
- Monobore und Slim Casing Verrohrungen
- Einsatz von automatischen Bohrsystemen mit einer hohen Datenübertragungsrate
- Casing / Liner Expansion (aufweitbare Verrohrung)

Eine zusätzliche Möglichkeit, die Bohrkosten zu senken, sind multilaterale Bohrungen mittels Sidetracks, die von einer bestehenden Bohrung ausgehend im Untergrund abgezweigt werden. Dieses Verfahren wird z. B. eingesetzt, wenn die erste Bohrung nicht fündig ist und dient dem Erreichen eines „neuen“ Zielhorizontes, um die Gesamtproduktivität des Bohrlochs zu steigern oder um den Injektionsdruck bei Injektionsbohrungen zu verringern. Der entscheidende Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die Kosten für die oberen Bohrlochsektionen eingespart werden.

Durch eine angepasste Messtechnik kann der Bohrprozess effizienter geplant werden. Zum Beispiel könnten durch die „Downhole“-Messtechnik, (Seismic) Prediction while Drilling ((S)PWD) „Measurement While Drilling (MWD)“-Technik, bereits während des Bohrvorganges die vorausliegenden Schichten und Störungen erfasst werden. Somit könnten bereits während der Bohrung Aussagen zu den Reservoir-Charakteristiken gemacht werden, um den Bohrverlauf an die entsprechenden Erfordernisse anzupassen.

4.5.3 Werkstoffe

Durch die Zementierung des Ringraumes zwischen der Verrohrung und dem Gebirge wird sichergestellt, dass keine hydraulische Verbindung zwischen Grundwasserstockwerken entstehen kann, die Verrohrung fest im Gebirge verankert ist, keine hydraulische Verbindung zwischen Lagerstätte und Tagesoberfläche entsteht und die Verrohrung vor aggressiven Formationswässern geschützt ist. Eine weitere Aufgabe ist es, die Verrohrung selbst vor Knicken oder sonstigem Versagen zu schützen.

Die derzeitige Zementationstechnik bei Geothermie-Bohrungen entspricht im Prinzip der von herkömmlichen Öl- und Gasbohrungen. Die geochemische Umgebung ist bei Geothermie-Bohrungen jedoch vielerorts aggressiver, deshalb werden höhere Anforderungen an die Zemente gestellt. Die Zementierung muss speziell an die lokalen geologischen, hydraulischen und chemischen Bedingungen angepasst werden, damit die Zementierung gleichermaßen chemisch und mechanisch stabil ist.

Bei der Erforschung zur Zementierung von CO₂-Speicherbohrungen wurden neue Techniken aufgezeigt; diese Techniken können auch auf andere Bohrungen, wie die der Tiefengeothermie übertragen werden:

- Einsatz von Zementen mit einer höheren Elastizität
- Nutzung von Zementen mit speziellen Additiven und / oder kleineren Anteilen von Portland- Zement, um die Beständigkeit zu erhöhen
- Einsatz von Zementen ohne Calcium, das durch CO₂ zu einem Karbonat umgewandelt werden kann, sowie der Einsatz von Calcium-Phosphat-Hydraten und Calcium-Aluminosilikaten

In der Abdichtung des Ringraumes vor allem beim Rückbau einer Bohrung in der Nachbetriebsphase können z. B. arteigene Abdichtungsmaterialien wie Ton oder Salz verwendet werden. Diese verhalten sich plastisch und entstandene Risse und Klüfte können anders als bei einem spröden Zement wieder verheilen.

4.5.4 Auswirkungen bei der Stimulation geothermaler Lagerstätten

In der Öffentlichkeit wird die Erschließung und Förderung von unkonventionellen Gasvorkommen durch Fracking-Verfahren derzeit hinsichtlich der Risiken für Mensch und Umwelt kontrovers diskutiert. Dies lenkte den Blick auch auf die Geothermie-Branche, in der ebenfalls Stimulationsmaßnahmen angewendet werden, die von der E&P-Industrie³ übernommen und an die Bedürfnisse der Geothermie adaptiert wurden.

Bei der Stimulation geothermaler Lagerstätten bzw. dem Fracken von unkonventionellen Gaslagerstätten werden unterschiedliche Gesteine und Fluide im Untergrund angetroffen. Im Wesentlichen muss die Rheologie der Prozessfluide (Bohrspülung und Stimulationsfluid) an die Bedingungen im Untergrund durch die Zugabe von Additiven angepasst werden. In der Bevölkerung besteht die Sorge, dass durch Stimulationsmaßnahmen Schadstoffe in oberflächennahe Grundwasserleiter migrieren können. Es werden zwei grundsätzliche Stimulationsverfahren unterschieden: Die hydraulische und die chemische Stimulation.

³ E&P-Industrie = Explorations- und Produktions-Industrie

Bei der **hydraulischen Stimulation** geothermaler Lagerstätten werden in der Regel kompakte Sandsteine, Granite oder Kalkformationen angetroffen. In diesen Gesteinen erzeugte Klüfte und Spalten werden nicht sofort wieder geschlossen, sondern durch die Gesteinsmatrix gestützt. Bei der unkonventionellen Gasförderung werden dagegen i. d. R. Gesteine gefrackt deren Selbststützfunktion nicht gegeben ist (z. B. Tonsteine). Deshalb müssen Stoffe zugesetzt werden, welche die erzeugten Klüfte und Spalten „offen“ halten. Zudem können die Kohlenwasserstoffe in der Lagerstätte das Stimulationsfluid chemisch negativ beeinflussen. Die Zugabe bestimmter Additive soll dies verhindern. In der Geothermie kann aufgrund der Selbststützfunktion gänzlich auf den Einsatz von schädlichen Zusatzstoffen bei der hydraulischen Stimulation der Lagerstätte verzichtet werden.

Es besteht allerdings die Gefahr, dass durch hydraulische Stimulationsmaßnahmen Scherspannungen im Untergrund schlagartig abgebaut werden, welche zu spürbaren seismischen Ereignissen an der Oberfläche führen. Spürbare seismische Ereignisse können in allen drei Geothermie-Regionen auftreten, wobei die Wahrscheinlichkeit im tektonisch aktiven Oberrheingraben wesentlich höher ist als im Norddeutschen Becken- oder im Süddeutschen Molassebecken. Eine Zusammenfassung der Seismik-Problematik wird im Kapitel 4.2.1 gegeben.

Bei der **chemischen Stimulation** geothermaler Lagerstätten (überwiegend im Süddeutschen Molassebecken) werden Säuren eingesetzt. Durch die Reaktion der Säuren mit dem Gestein wird diese neutralisiert. Dadurch ist eine Migration von Säure aus dem Zielhorizont in oberflächennahe Grundwasserleiter sehr unwahrscheinlich. Ein möglicher Schadstoffaustrag wird im Kapitel 4.5.5 diskutiert.

4.5.5 Schadstoffemissionen und -immissionen

Um die Rheologie bzw. die Eigenschaften der Prozessfluide (z. B. Bohrspülung, Stimulationsfluid) an die Bedingungen im Untergrund einzustellen, werden ihnen häufig Additive zugemischt. Diese können umweltschädlich sein. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass die erbohrten geologischen Schichten Formations- bzw. Lagerstättenwässer enthalten können, die mit Kohlenwasserstoffen angereichert und hochmineralisiert sind bzw. schädliche Konzentrationen an Metallen oder Gasen (Schwefelwasserstoff) enthalten. Diese Wässer sind meistens von sich aus schon als stark wassergefährdend (WGK 2 – 3) einzustufen und damit bedenklicher als die eingebrachten Additive. Zudem kann ein Stoffeintrag von der Oberfläche durch mögliche Störfälle und ein Versi-

ckern der Schadstoffe in den Untergrund erfolgen. Ein oberflächlicher Eintrag von Schadstoffen in den Boden und oberflächliche Gewässer wird bei einem nach den WEG-Richtlinien erstellten Bohrplatz und einem planmäßigen Bohrbetrieb im Normalbetrieb aber wirkungsvoll unterbunden.

Während des Durchteufens von oberflächennahen Grundwasserleitern dürfen nur unbedenkliche Bohrspülungen verwendet werden. Bevor in tieferen Schichten mit bedenklichen Fluiden gebohrt wird, werden die darüber liegenden Schichten gegen diese mit einzementierten Rohren abgedichtet. Damit soll ein Eintrag von Bohrspülung in oberflächennahe Grundwasserleiter nahezu ausgeschlossen werden. Aus qualitativer Sicht stellen die einzementierten Rohre eine wirkungsvolle Abschirmung des Grundwasserleiters vor dem Einfluss der Bohrspülungen und im späteren Betrieb vor dem Thermalwasser dar. Grundsätzlich kann bereits durch eine optimale Vorplanung und durch den Einsatz zertifizierter Bohrunternehmen eine wesentliche Risikoverminderung erfolgen.

Die Ringraumzementierung stellt das wichtigste Sicherheitselement bei der Abdichtung von verschiedenen Grundwasserstockwerken dar. Es gibt Ansätze, die Ringraumzementierung durch Latex-Materialien zu ergänzen um deren Duktilität gegenüber Scherbewegungen oder thermalen Volumenänderungen im Untergrund zu verbessern. Da die Langzeitstabilität der eingesetzten Dichtmaterialien noch nicht ohne Zweifel nachgewiesen ist, besteht hier noch Forschungsbedarf. Die für den Bohrlochausbau eingesetzten Materialien und Stoffe müssen in Bezug auf mögliche Veränderungen der Grundwassereigenschaften beurteilt werden, diese werden nur zugelassen, wenn sie das oberflächennahe Grundwasser nicht gefährden oder schädlich verändern. Durch folgende Migrationswege ist ein potenzieller Schadstoffeintrag in oberflächennahe Grundwasserleiter aus dem Untergrund prinzipiell möglich:

- Entlang von künstlichen Wegsamkeiten (Bohrung)
- Entlang von Störungen oder Klüften

Im späteren Anlagenbetrieb sind Schädigungen der Ringraumzementierung nur sehr schwer und kostenintensiv zu beheben. Deshalb muss die Integrität des Verbundsystems aus Zement und Verrohrung schon während des Bohrlochausbaus bzw. umgehend danach sichergestellt sein.

Der Aufstieg von Thermalwässern entlang einer fehlerhaften Ringraumzementierung oder der Ausfluss aufgrund von Leckagen in der Verrohrung kann durch folgende Maßnahmen detektiert werden:

- Monitoring bzw. Prüfungen zur Gewährleistung der Bohrlochintegrität
 - Druckprüfungen nach dem Bohrlochausbau
 - Zementbondlogs

In der Betriebsphase sollte die Bohrlochintegrität durch periodische Ringraumdrucküberwachungen überprüft werden. Der Aufstieg von Fluiden in höher liegende Schichten durch künstlich induzierte Störungen oder Klüfte ist allerdings in der Regel aus folgenden Gründen unwahrscheinlich:

- Die Bruchlängen bei Stimulationsmaßnahmen erreichen aufgrund der großen Tiefe der Lagerstätte nicht oberflächennahe Grundwasserleiter
- Durch das Monitoring seismischer Ereignisse können nicht planmäßig erzeugte Risse detektiert und Gegenmaßnahmen getroffen werden
- Ein Vermischen von hochmineralisierten Tiefenwässern mit oberflächennahen Wässern bei einem ausgeglichenen Druckpotenzial findet aufgrund der unterschiedlichen Dichte nur über sehr lange Zeiträume statt

Modellierungen und Erfahrungen aus durchgeführten Projekten zur Stimulation von niedrigpermeablen geothermalen Lagerstätten ergaben, dass Risslängen bis zu 500 m in vertikaler Richtung anwachsen können. Somit würden oberflächennahe Grundwasserleiter bei Lagerstättentiefen von > 2.000 m wie sie in Deutschland überwiegend vorkommen, nicht durch künstlich erzeugte Risse erreicht werden.

Aufgrund der im lokalen Maßstab großen Heterogenität des geologischen Untergrundes und der dadurch einhergehenden Unsicherheiten (vor allem im zerklüfteten Oberrheingraben), muss eine Bewertung der möglichen Wegsamkeiten für jedes Geothermieprojekt einzeln vorgenommen werden und sollte deren Entstehung niemals von vornherein ausgeschlossen werden.

4.5.6 Auswirkungen hydro-geomechanischer Prozesse

Im süddeutschen Raum stehen im Untergrund vielerorts Anhydrit-Schichten an. Die Umwandlung von Anhydrit in Gips aufgrund eines Wasserzutrittes kann oberflächennah zu Hebungsprozessen führen. Damit es zu einer Hebung kommt, muss der Quelldruck des Anhydrits höher sein als der Gebirgsdruck. Da sich die Tiefengeothermie in Teufenbereichen > 2.000 m befindet, sind durch Quellen von Anhydrit verursachte signifikante Hebungsvorgänge aufgrund des hohen lithostatischen Druckes in dieser Tiefe nicht zu erwarten, sofern ein Aufstieg bzw. Ausfluss von Flüssigkeit in oberflächennahe Gesteinsschichten ausgeschlossen wird.

Bei Tiefengeothermie-Projekten wird das geförderte Thermalwasser durch eine Injektionsbohrung wieder in den Untergrund injiziert. Damit bleibt auch der Porendruck im Reservoir nahezu konstant und verhindert effektiv Setzungsvorgänge. Die hydraulische Verbindung der beiden Bohrungen kann durch Zirkulations- oder Tracer-Tests sicher nachgewiesen werden.

Durch unterschiedliche Temperatur- und Druckbedingungen sowie die Veränderung der Thermalwasserzusammensetzung wird das geochemische Gleichgewicht zwischen gefördertem und anstehendem Thermalwasser in der Lagerstätte gestört. Durch das Reinjizieren kann es in der Mischungszone in der Lagerstätte zu Ausfällungs- und Lösungsprozessen kommen. Durch die Zugabe von Inhibitoren und Druckhaltemaßnahmen versucht man, die Ausfällungen (Scale) insbesondere in der Anlage zu verhindern. Dadurch wird die Lösung größerer Mineralmengen im Untergrund unterbunden. Wenn trotzdem Hohlräume im Untergrund gebildet werden, werden diese sofort mit Flüssigkeit gefüllt, die so gering kompressibel ist, das größere Setzungsbeträge nicht zu erwarten sind. Dies wird z. B. bei der Flutung einsturzgefährdeter Salzbergwerke angewendet. Durch das Fluten der Bergwerke werden der Einsturz von Hohlräumen und eine damit verbundene Setzung der Geländeoberfläche verhindert.

Während des Abteufens der Bohrung werden unterschiedliche Grundwasserstockwerke identifiziert und gegeneinander abgedichtet. In der Bohrphase würde ein unbeabsichtigtes Verbinden unterschiedlicher Grundwasserstockwerke registriert und es können umgehend Gegenmaßnahmen getroffen werden. Durch ein Monitoring (z. B. Druckprüfungen) können undichte Ringraumzementierungen auch während des Anlagenbetriebes erkannt werden.

Die Bohrungsintegrität kann signifikant durch deren Erstellung in einer Störungszone beeinflusst werden. Da in der Geothermie aufgrund ihrer hohen Durchlässigkeiten bevorzugt gestörte oder geklüftete Bereiche angebohrt werden, kann es bei einem Abbau von Scherspannungen bzw. bei einem Versatz von Klufflächen zu einer Beeinträchtigung der Bohrungsintegrität kommen. Durch eine optimale Auslegung der Materialien insbesondere der Rohre sowie dem Einsatz besonderer Bohrtechniken, kann das Risiko der Scherung einer Bohrung wesentlich vermindert werden.

4.5.7 Thermische Auswirkungen

Während des Anlagenbetriebes erwärmt das in den Bohrungen zirkulierende Thermalwasser die Bohrungsmaterialien. Dadurch wird das Nahfeld der Förder- und Reinjektions-Bohrung konduktiv erwärmt. Diese Wärmeabgabe an die umgebenden Gesteins- und Bodenschichten wird durch die Zementierung der Verrohrung gehemmt, zudem ist eine Abkühlung des Thermalwassers aus ökonomischer Sicht zu unterbinden. Die abgegebene Wärmeleistung ist vernachlässigbar und führt nicht zu einer Beeinträchtigung von Flora oder Fauna.

Die Bohrungsmaterialien sollten keinen größeren und häufigen Temperaturwechseln ausgesetzt werden, was bei Standzeiten ohne kontinuierliche Thermalwasserförderung auftreten kann. Temperaturänderungen führen zur Expansion und Kontraktion der Materialien, was insbesondere die Integrität der Zementation beeinflussen kann.

Eine durch die Auskühlung des Reservoirs und des Deckgebirges hervorgerufene Kontraktion der Gesteine und eine Fortsetzung bis an die Geländeoberfläche kann vernachlässigt werden. Durch die geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Mineralphasen im Gestein reduziert sich der Porenraum bei Abkühlung nur unwesentlich. Die Absenkungsbeträge liegen weit unter denen aus dem Steinkohle-, dem Erz- und Kalibergbau und sind für die Stabilität von Gebäuden unbedenklich.

4.5.8 Funktionsverluste (Wasser und Boden)

Der Bau eines befestigten Bohrplatzes sowie eine Flächenbelegung durch die Geothermieanlage sind nicht vermeidbar. Nach einer erfolglosen Bohrung kann der Bohrplatz bis auf den Bohrkopf wieder komplett renaturiert bzw. der zwischengelagerte Mutterboden wieder eingebracht werden. Bei Einhaltung der Vorschriften wird die

Beeinträchtigung des Schutzgutes Boden insgesamt als vernachlässigbar angesehen. Der rechtliche Schutz des Bodens ist ausreichend.

Für den Bohrbetrieb und für mögliche Stimulationsmaßnahmen wird Wasser mit Trinkwasserqualität benötigt. Dieses Prozesswasser muss in der Regel nach Abschluss der Arbeiten aufbereitet oder entsorgt werden.

Da im Anlagenbetrieb das anstehende Thermalwasser aus der Lagerstätte als Prozesswasser verwendet wird, muss bei der geothermalen Nutzung von hydrothermalen Lagerstätten kein zusätzliches Wasser mehr zugeführt werden.

Bei Tiefengeothermie-Anlagen in Deutschland wird das geförderte Thermalwasser durch eine Injektionsbohrung wieder in den Untergrund verpresst. Somit entfällt eine Entsorgung möglicher hoch mineralisierter Wässer und es erfolgt keine gravierende Druckreduzierung in der Lagerstätte.

4.5.9 Erfolgte und derzeitige Forschungsarbeiten, möglicher Forschungsbedarf

An der Weiterentwicklung der konventionellen Bohr- bzw. Richtbohrtechnik forschen mehrere Universitäten. Die TU-Clausthal und die TU Bergakademie Freiberg besitzen z. B. Versuchsanlagen, mit denen verschiedene Bohrprozesse untersucht werden können. Das Geothermiezentrum in Bochum plant eine Versuchsanlage zur Entwicklung bzw. Weiterentwicklung folgender Komponenten:

- Bohrantriebe
- Geophysikalische Messsonden
- Hydraulische Stimulationstechnologien und
- Mikroseismische Überwachungstechniken

Da Bohrungen für die Erschließung geothermaler Lagerstätten in größere Tiefen als in der Kohlenwasserstoffindustrie vorstoßen und somit auch höheren Temperaturen und Drücken ausgesetzt sind, wurde der Forschungsverbund Geothermie und Hochleistungsbohrtechnik (Gebo) gegründet. Der Forschungsverbund hat das Ziel, neue Konzepte zur geothermischen Energiegewinnung in tiefen geologischen Schichten mit geringerem geologischem und technischem Risiko zu entwickeln. Hauptziel des

Forschungsverbundes ist es, die Kosten um 30 -50 % zu reduzieren. Die geplanten Einsparungen sollen durch die nachstehenden drei Maßnahmen erreicht werden:

1. Änderung der Bohrlochkonstruktion

Zielvorstellung ist es, ein sogenanntes Monobohrloch herzustellen, d. h. ein Bohrloch, das von oben beginnend bis zur Endteufe mit gleichem Durchmesser gebohrt wird. Nach gängiger Technik werden heute Bohrlöcher hergestellt, die mit großem Durchmesser (bis 80 cm) beginnen und sich nach unten teleskopartig verjüngen (bis auf ca. 15 cm). Von Zeit zu Zeit muss das Bohrloch durch sog. Rohrfahrten stabilisiert werden. Durch diese Rohrfahrten kann immer nur mit einem kleineren Bohrmeißel weiter gebohrt werden. Das Monobore-Bohrloch vermeidet, bei gleichem Enddurchmesser, die großen Anfangsdurchmesser der herkömmlichen teleskopartigen Konstruktion. Kleinere Durchmesser lassen sich zudem schneller bohren, benötigen weniger Bohrspülung, weniger Stahl für die Bohrlochstabilisierung und weniger Zement, um die Rohrfahrten im Gebirge zu verankern und sie benötigen kleinere Anlagen und Aggregate (z. B. für Spülpumpen).

2. Änderung des Bohrprozesses

Zielvorstellung ist das Bohren mit einem Endlosrohr, das von einer Rolle abgewickelt wird und gleichzeitig die Nutzung dieses Rohres als "Stützrohr" zur Stabilisierung des Gebirges. Diese Bohrprozessänderung zusammen mit dem Ziel der Herstellung eines Monobore-Bohrloches lassen sich nur erreichen, wenn der "Bohrstrang" für seine Nutzung als "Stützrohr" aufgeweitet wird. Hierbei wird u. a. an gefalteten Rohren geforscht. Die derzeitigen Bohrvorgänge mit einem Bohrstrang, der aus etwa 10 m langen Bohrstangen zusammengeschaubt wird, muss beim Bohren alle 10 m (20 oder höchstens 30 m) unterbrochen werden, um eine neue Bohrstange bzw. Stangenzug nachzusetzen. Ist die Verrohrungsteufe erreicht, muss der Strang ausgebaut und die Verrohrung zur Gebirgsstabilisierung eingebracht werden. Der gesamte Prozess ist zeitaufwendig und mit dem Risiko verbunden, dass es während des Ein- und Ausbaus zu Brüchen im Bohrloch kommt. Der Einsatz eines abwickelbaren, gefalteten Endlosrohres und seine Nutzung als "Stützrohrfahrt" spart Zeit und verringert Risiken aufgrund von Bohrlochverbruch und Bohrgestängebruch, da das Endlosrohr ja nur einmal eingesetzt wird.

3. Einsatz künstlicher Intelligenz

Ziel hierbei ist die Entwicklung eines Bohrsimulators, der geeignet ist, die Bohrplanung zu unterstützen und die Bohrungsausführung in Echtzeit zu überwachen. Somit sollen

Risiken bzw. suboptimale Bohrbedingungen früh erkannt und durch entsprechende Gegenmaßnahmen vermieden werden. Schwingungen im Bohrstrang zum Beispiel können Bohrfortschritt und Bohrmeißel-Lebensdauer erheblich beeinflussen.

Zurzeit ist der erwähnte Ansatz der Monobore-Bohrlochkonstruktion nur in Verbindung mit innovativen Bohranlagenkonzepten und dem Coiled Tubing Verfahren anwendbar. Die Techniken sind noch nicht für tiefe Geothermie-Bohrungen anwendbar. Ob eine wirtschaftliche aber auch technisch vertretbare Anwendung erreicht werden kann, bleibt abzuwarten.

In der Forschung werden zudem thermische Vortriebstechniken untersucht. Ein F&E-Vorhaben untersucht z. B. die Gesteinszerstörung durch Laser. Bisher werden diese Techniken aber nur im Labor verwendet.

Das Ziel gegenwärtiger und zukünftiger Forschungsprojekte muss es sein, den gesamten Bohrablauf zu optimieren und durch Kombination innovativer Technologien und Werkstoffe die Effizienz herkömmlicher Konzepte zu steigern. Die Reduzierung der Bohrkosten ist erforderlich, um die geothermische Energiegewinnung rentabler zu machen.

4.6 Verbesserung der Akzeptanz

Die Stiftung Risiko-Dialog St. Gallen führte eine Stakeholder-Analyse an vier ausgewählten Geothermie-Standorten in Deutschland durch, um ein gegenwärtiges Meinungsbild zur Tiefengeothermie zu erhalten. Folgende Schlussfolgerungen wurden herausgestellt:

„Für die Akzeptanz eines Geothermie-Projekts in der Bevölkerung ist nicht in erster Linie die ‚klassische‘ Öffentlichkeitsarbeit der Projektbetreiber maßgebend. Es sind die eigenen Erfahrungen und harten Fakten, welche die Grundlagen für den Grad der Akzeptabilität eines Geothermieprojekts legen. Gab es Erderschütterungen? Ist die Umwelt gefährdet? Welchen Nutzen hat die Gemeinde davon? Wird die Wärme zu Heizzwecken in den Häusern der Bürger verwendet? Dies sind die Fragen, welche die Öffentlichkeit beschäftigen.“

Die Bürgerinitiativen stellen denn auch klar: *„Unsere Ablehnung der Geothermie ist keine Frage der Öffentlichkeitsarbeit, sondern der Fakten“*. Die Akzeptanz in der Öffentlichkeit kann aber auch durch Kommunikation und Beteiligung mitbeeinflusst sein. Deshalb ist es angebracht, die Rolle der Öffentlichkeitsarbeit, der Partizipation und von Wahrnehmungsprozessen wie Risikowahrnehmung und Vertrauen für die Einstellung der Öffentlichkeit gegenüber der Geothermie zu untersuchen.

Im Abschlussbericht zum Mediationsverfahren in Groß Gerau wird beispielsweise hervorgehoben:

„Das allgemeine Befürworten von Erneuerbaren Energien und die gleichzeitige Ablehnung von lokalen Anlagen im eigenen Umfeld ist ein häufiges Phänomen. Es hat sich in verschiedenen Studien zu Erneuerbaren Energien gezeigt, dass dieser scheinbare Widerspruch jedoch selten auf egoistischen Motiven beruht, sondern oftmals lokale und projektbezogene Ursachen hat. Es gilt daher, in einer Bürgerbefragung ein projektbezogenes Stimmungsbild zu erheben. Außerdem hat sich gezeigt, dass die Akzeptanz mit verstärkter Kommunikation und einer Mitentscheidungsmöglichkeit steigt.“

Zudem können Ergebnisse des Mediationsverfahrens „Tiefe Geothermie Vorderpfalz“ zur Akzeptanzbildung herangezogen werden. Die wesentlichen Ergebnisse sind:

- Stärkung der Bürgerbeteiligung
- Einbeziehung von Bürgervertrauensleuten in Verfahren und Überwachung
- Grundwasserschutz – Qualitätskontrolle während der Bohrung
- Offenlegung der Alarm- und Gefahrenabwehrpläne zur Anlagensicherheit
- Beschreibung des Umfeldes der Anlage
 - Beschreibung der Anlage und der in der Anlage vorhandenen gefährlichen Stoffe
 - Ermittlung und Analyse der Risiken von Unfällen und Mittel zu deren Verhinderung
 - Schutz- und Notfallmaßnahmen zur Begrenzung der Auswirkungen von Unfällen

- Angaben zur Zusammensetzung des Thermalwassers zur Abschätzung der potenziellen Gefährdung
- Umsetzung eines Mindestabstandes zwischen Wohnbebauung und Anlagen der Tiefengeothermie
- Umsetzung der Maßnahmen zur Verringerung des Erdbebenrisikos
- Hydrogeologisches und seismisches Monitoring
- Fonds zur Ergänzung der Bergschadensausfallkasse

Grundlegende Überlegungen zur Standortauswahl können zukünftige Konfliktsituationen vermindern oder sogar vermeiden. Zu den Möglichkeiten gehört beispielsweise, den oberirdischen Anlagenstandort möglichst dicht an einem bestehenden oder geplanten Industrie- oder Gewerbegebiet anzusiedeln, um von den Oberflächen-Anlagen ausgehende Beeinträchtigungen der Umwelt zu reduzieren. Dies wurde z. B. schon bei Anlagen in Landau und Unterhaching berücksichtigt.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die komplexen Systeme von Anlagen der Tiefengeothermie in Deutschland wurden untersucht. Der Nutzen des Vorhabens ergibt sich aus den nachfolgend als Schlussfolgerungen und Empfehlungen zusammengefassten Ergebnissen. Die ausführliche Ergebnisdokumentation stellt das Vorhaben detailliert dar, bedarf aber einer umfassenden Beschäftigung mit der Berichtsform. Die hier im Schlussbericht gewählte komprimierte Form soll eine unmittelbare Verwertbarkeit der Ergebnisse mit einem raschen Einstieg in die Thematik sichern.

5.1 Allgemeines

Von Seiten der Geothermie-Branche wird angeführt, dass die Geothermie beim Umbau der Energieversorgung auch im Strombereich eine wichtige Rolle spielen kann. Hinsichtlich der immensen theoretischen Potenziale der Technologie wird dazu regelmäßig auf die Studie des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) aus dem Jahr 2003 verwiesen.

Das derzeit praktisch nutzbare Potenzial liegt deutlich darunter. Um durch geothermale Energie einen signifikanten Anteil zum sog. Energiemix, insbesondere zur Stromerzeugung beizutragen, müsste eine Vielzahl an Anlagen gebaut werden. Zurzeit sind in Deutschland Anlagen in Betrieb, die bis zu 7 MW elektrische Leistung erzeugen können. Hiervon muss der Eigenverbrauch (in der Regel etwa 25 bis 30 % der Bruttoleistung) abgezogen werden, so dass der tatsächlich ins öffentliche Netz eingespeiste Strom deutlich unter der angegebenen Bruttostromerzeugung liegt. Eine wesentliche Erhöhung des Wirkungsgrades einer geo-thermalen Anlage zur Stromerzeugung ist aufgrund der geringen Thermalwassertemperaturen nicht absehbar. Um ein durchschnittliches konventionelles Großkraftwerk (ca. 1.000 MW) zu ersetzen, müssten dementsprechend mehr als 150 Geothermie-Kraftwerke gebaut werden. Die immer wieder angeführte Grundlastfähigkeit von Geothermie-Kraftwerken muss daher, auch vor dem Hintergrund der derzeit noch häufigen Revisions- / Stillstandszeiten, deutlich relativiert werden. Im Wärmebereich ist das Potential der Geothermie hingegen deutlich höher. Dies haben insbesondere die zahlreichen Projekte in der Molasse erfolgreich gezeigt.

Wiederholt haben Ereignisse und Probleme in Anlagen der Tiefengeothermie und die Information hierüber Bürger verunsichert. Anders als der Sach- war der Imageschaden

groß. Die Verbesserung des Betriebsmonitorings und der Probennahmetechnik sowie eine über die einzelne Anlage hinausgehende systematische Gewinnung, Auswertung und Berücksichtigung von Betriebserfahrungen sind daher nicht nur die wesentlichen Elemente zur Verbesserung der Anlagenverfügbarkeit, sondern liefern auch wichtige Grundlagen für die Kommunikation mit der Öffentlichkeit. Die Anlagenverfügbarkeit ist zudem ein wesentlicher Punkt hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit der Anlage. Entsprechende Fortschritte auf diesem Gebiet haben nach diesseitiger Einschätzung die größten ökonomischen Auswirkungen.

Derzeit werden in Deutschland nur hydrothermale Lagerstätten für tiefengeothermische Projekte erschlossen. Ein großes, noch unerschlossenes Potenzial liegt bei den petrothermalen Systemen in Kristallin-Gebieten. Schätzungen zufolge können 95 % des geothermischen Potenzials den petrothermalen Hot-Dry-Rock-Systemen zugeordnet werden (BMU 2004). Durch das Marktanreizprogramm der Bundesregierung wird die Erschließung dieser Lagerstätten gefördert. Jedoch wurde bislang keine einzige Anlage in Deutschland vollständig realisiert. Um die geothermale Stromerzeugung als zukünftige Energiequelle zu nutzen, müsste die Weiterentwicklung dieser Systeme vorangetrieben werden.

5.2 Kompartiment „Recht“

Alles in allem stellen die vorhandenen rechtlichen Strukturen, welche die Genehmigung, den Betrieb und die zukünftige Stilllegungs- und Rückbauphase regeln, einen ausreichend gefüllten Werkzeugkasten zur Verfügung, um die sich in der Praxis ergebenden Sachverhalte angemessen lösen zu können. Die Behörden haben die Möglichkeit, im Einzelfall über entsprechende Auflagen und Kontrollen die Einhaltung des gesetzlich geforderten Sicherheitsniveaus sicherzustellen. Dennoch ist festzuhalten, dass es zahlreiche Faktoren gibt, die den Bau der Anlage verzögern oder den planmäßigen Betrieb der Anlage in erheblicher Weise beeinflussen können.

Bestmögliche Informationen sowohl auf Seiten der Unternehmer (Planungsgrundlage) als auch auf Seiten der Öffentlichkeit (Transparenz als Mittel zur Erhöhung der Akzeptanz) sind ein wesentlicher Faktor zur erfolgreichen Durchführung eines Geothermie-Projektes. Daher sollte an der Optimierung der Zugangsrechte zu Informationen mit speziellem Bezug auf die Besonderheiten eines Geothermie-Projektes gearbeitet wer-

den, ohne jedoch den Ausgleich entgegenstehender Interessen aus den Augen zu verlieren.

Als Umweltinformationen sollten insbesondere die verwendeten und auf dem Betriebsgelände gelagerten (z. B. wassergefährdenden) Stoffe des Primär- und Sekundärkreislaufs, die sich auf die Umweltbestandteile des § 2 Abs. 3 Nr. 1 UIG auswirken oder wahrscheinlich auswirken, mit Angaben zur Stoffbezeichnung, zum Verwendungsbzw. Lagerort, der Verwendungs- bzw. Lagermenge und der ermittelten Wassergefährdungsklasse zugänglich gemacht werden.

Im Bereich des Zugangs zu Umweltinformationen und Geodaten für private Unternehmen kommt eine Modifikation des § 9 Umweltinformationsgesetz (UIG) in Betracht. Dabei käme entweder eine Fristenregelung oder eine Entschädigungsregelung oder eine Kombination aus beiden Regelungen in Frage, welche den verfassungsrechtlichen Anforderungen an den Schutz von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen als entgegenstehende Interessen gerecht werden. Eine Fristenregelung erscheint dabei vorzuzugswürdig, da sie praktisch besser handhabbar ist und somit einen effektiveren Zugang zu den Daten gewährleistet.

Die Frage nach der Bedeutung der Erfordernisse der Raumordnung und der Landesplanung bei bergbaulichen Vorhaben, hier der Tiefengeothermie, ist nicht einfach zu beantworten. Als Anknüpfungspunkte für die Berücksichtigung von Erfordernissen und Zielen der Raumordnung und Landesplanung im Bergrecht kommen § 11 Nr. 10 und § 48 Abs. 2 BBergG in Betracht. Aufgabe der Raumordnung ist es, den Gesamttraum der Bundesrepublik Deutschland und seine Teilräume durch zusammenfassende, übergeordnete Raumordnungspläne und durch Abstimmung raumbedeutsamer Planungen und Maßnahmen zu entwickeln, zu ordnen und zu sichern (vgl. § 1 Abs. 1 Raumordnungsgesetz (ROG)). Dabei sind unterschiedliche Anforderungen an den Raum aufeinander abzustimmen, die auf der jeweiligen Planungsebene auftretenden Konflikte auszugleichen und Vorsorge für einzelne Nutzungen und Funktionen des Raumes zu treffen. Die Schaffung der räumlichen Voraussetzungen für die vorsorgende Sicherung sowie für die geordnete Aufsuchung und Gewinnung von standortgebundenen Rohstoffen zählt nach § 2 Abs. 2 ROG ebenso zu den bundesgesetzlich geregelten Grundsätzen der Raumordnung wie die Berücksichtigung der räumlichen Erfordernisse für die Energieversorgung. Daraus lassen sich Hinweise darauf ableiten, dass auch unterirdische Vorhaben relevante Gegenstände raumordnerischer Planungen sein können.

Gegenstand des Raumordnungsrechts ist somit nicht nur die oberirdische Verortung von Raumnutzungen und Raumfunktionen, sondern es umfasst auch Nutzungen des Raums in der Tiefe. Dies erlaubt raumordnerische Festlegungen, um Nutzungskonkurrenzen im Untergrund planerisch zu lösen. Eine dreidimensionale Raumplanung z. B. im Sinne einer gleichzeitigen Nutzung übereinander liegender Gesteinsschichten für unterschiedliche Zwecke (Stockwerksnutzung) ist im Raumordnungsrecht bisher allerdings nicht vorgesehen. Insofern ist eine stärkere Harmonisierung des Planungsrechts (insbesondere des Raumordnungsgesetzes und der Raumordnungsverordnung) mit dem Bergrecht erforderlich.

Auf Ebene der Regionalplanung sollten die in den Landesentwicklungsplänen (LEP) zumeist allgemein formulierten Grundsätze und Ziele zu erneuerbaren Energien bzw. der Geothermie konkretisiert werden. Sie sind dann bei kommunalen Planungen entsprechend zu berücksichtigen. Fraglich ist allerdings, ob eine regionalplanerische Ausweisung von Gebietsfestlegungen gemäß § 8 Abs. 7 ROG sinnvoll ist. Dies liegt zuvorderst daran, dass es Aufgabe des Bergrechts ist, die Aufsuchung und Gewinnung des bergfreien Bodenschatzes „Erdwärme“ zu regeln und Bergbauberechtigungen zu erteilen. Darüber hinaus ist die Prognose im Vorfeld mangels entsprechend detaillierter Datenlage (z. B. durch seismische Untersuchungen) schwierig, ob trotz einer regional hohen Eignung lokal die Ergiebigkeit der wasserführenden Schichten für einen wirtschaftlichen Betrieb einer Anlage am Standort ausreicht. Schließlich wird angeführt, dass die Obertageanlagen der Tiefengeothermie wegen ihres geringen Flächenbedarfs nicht raumbedeutsam seien.

Sofern eine Obertageanlage der Tiefengeothermie im Außenbereich⁴ errichtet werden soll, stellt sich die Frage der Privilegierung nach § 35 Abs. 1 BauGB. Anders als andere Anlagen der Erneuerbaren Energien ist die Tiefengeothermie bisher nicht ausdrücklich in der Liste der privilegierten Vorhaben nach § 35 Abs. 1 BauGB aufgenommen. In der Praxis hat sich dies in der Regel nicht als Problem erwiesen. Dies liegt insbesondere daran, dass die zuständige Behörde die Obertageanlage im Einzelfall als Elektrizitäts- und / oder Wärmeanlage zulassen kann, sofern die vom BVerwG als Zulässigkeitsvoraussetzung angesehene Ortsgebundenheit der Anlage bejaht wird. Allerdings

⁴ Außenbereich/Innenbereich sind Begriffe im deutschen Bauplanungsrecht im Zusammenhang mit der Zulässigkeit von Bauvorhaben. Unter den Außenbereich fallen alle Grundstücke, die nicht im Geltungsbereich eines qualifizierten Bebauungsplans liegen und die auch nicht zu einem im Zusammenhang bebauten Ortsteil (unbeplanter Innenbereich) gehören.

zeigt bspw. das Verfahren der Gemeinde Brühl vor dem Verwaltungsgericht Karlsruhe (Urteil vom 01.08.2013 – 5 K 2037/12), dass eine ausdrückliche Privilegierung der Tiefengeothermie Klarheit schaffen könnte.

Soll die Obertageanlage im Innenbereich⁴ errichtet werden, kann es auf Ebene der Kommunalplanung geboten sein, die Tiefengeothermie ausdrücklich in den Flächennutzungs- und Bebauungsplänen zu berücksichtigen (z. B. im Rahmen einer Festsetzung als Sondergebiet im Sinne des § 11 BauNVO für Anlagen, die der Erforschung, Entwicklung oder Nutzung erneuerbarer Energien dienen). Auch sollte eine Betrachtung über das Gemeindegebiet hinaus erfolgen, bspw. hinsichtlich der Lage und Größe schon von der Bergbehörde ausgewiesener Erlaubnisfelder in Nachbargemeinden oder ausreichender Abstände zu schon vorhandenen Anlagen, damit diese sich nicht gegenseitig beeinflussen. Ein frühzeitiger Abgleich zwischen der Erteilung bergrechtlicher Berechtigungen zur Aufsuchung und Gewinnung von Erdwärme und einer hiermit korrespondierenden Kommunalplanung könnte auch dazu beitragen, kritische Einwendungen bezüglich einer späteren Anlagenplanung in Teilen zu antizipieren und seitens des Vorhabensträgers in einen Dialog mit der Öffentlichkeit einzutreten. Eine ähnliche Zielrichtung verfolgt die Regelung in § 25 Abs. 3 VwVfG.

Das BBergG enthält Verordnungszuständigkeiten sowohl für den Bund als auch für die Länder. Infolgedessen können teilweise von Bundesland zu Bundesland abweichende Regelungen gelten. Mit der Einheitlichkeit der Rechtsordnung und Verwaltungspraxis beschäftigen sich der Länderausschuss Bergbau (LAB) und dessen Fachausschüsse. Dennoch kann es vorkommen, dass sich trotz weitgehenden Konsenses in den Fachausschüssen eine einheitliche Umsetzung in den Ländern verzögert oder länderspezifische Sonderwege beschritten werden. Insbesondere im Bereich der Tiefbohrverordnungen (BVOT) wäre allerdings eine einheitliche Verordnungsgebung wünschenswert. Es sollte erwogen werden, ob unter den Voraussetzungen der Art. 72 Abs. 2 und Art. 74 Abs. 1 Nr. 11 GG eine bundesrechtliche Zuständigkeit für eine Tiefbohrverordnung neu geschaffen oder bestehend mit § 68 Abs. 2 Nr. 3 BBergG begründet werden kann. Die bundesrechtliche Zuständigkeit und Umsetzung hätte den Vorteil, dass eine einheitliche Rechtslage in allen Bundesländern zeitgleich geschaffen würde. Dies wäre auch für Unternehmen, die in verschiedenen Bundesländern tätig sind, eine Vereinfachung. Bei einer bundeseinheitlichen Umsetzung könnte auch ein Freiraum für länderspezifische Anpassungen an den praktischen Bedarf in den einzelnen Bundesländern

bleiben. Beispielweise sind in der BVOT Niedersachsen auch Regelungen für den Offshore-Bereich getroffen.

Im Bereich des Wasserrechts sollte nicht zuletzt aus Gründen der Rechtssicherheit beim behördlichen Vollzug das Aufbrechen von Gesteinen unter hydraulischem Druck aus Tiefbohrungen heraus zur Aufsuchung oder Gewinnung von Erdgas, Erdöl oder Erdwärme als eigener Benutzungstatbestand im Rahmen des § 9 WHG ausgestaltet werden. Bisher kamen hierfür mehrere Tatbestandsalternativen in Betracht. Darüber hinaus sollte der Besorgnisgrundsatz in § 48 WHG um eine Formulierung ergänzt werden, wonach eine Erlaubnis für das Aufbrechen von Gesteinen unter hydraulischem Druck aus Tiefbohrungen zur Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas, Erdöl oder Erdwärme nur erteilt werden darf, wenn dabei keine Stoffe oder Gemische zum Einsatz kommen, die nach der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 („CLP-Verordnung“) als gefährlich und in eine höhere Wassergefährdungsklasse als Wassergefährdungsklasse 1 einzustufen sind (Einstufung bisher nach der Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe (VwVwS); die Einstufung erfolgt zukünftig nach dem in der AwSV-E geregelten Verfahren). So wird einerseits verdeutlicht, dass der Schutz des Trinkwassers als wichtigstes Lebensmittel absolute Priorität hat. Eine solche Formulierung wird andererseits keine größeren Einschränkungen für die Tiefengeothermie mit sich bringen.

Anlagen der Tiefengeothermie werden in Deutschland i. d. R. von kleineren regionalen oder kommunalen Unternehmen betrieben, die selbst selten mehr als eine oder zwei Anlagen dieser Art haben. Damit stellt sich die Frage nach dem systematischen Austausch von Betriebserfahrungen sowie deren Auswertung. Der Know-how-Transfer könnte signifikant dazu beitragen, die Verfügbarkeit der Anlagen durch die Reduzierung von Revisions- bzw. Stillstandszeiten zu verbessern. Die Verpflichtung zum Wissensaustausch würde den Dialog der Betreiber, Behörden und wissenschaftlichen Einrichtungen intensivieren und dazu beitragen, den Erkenntnisgewinn für eine Evaluierung zu maximieren. Als Vorbild für eine solche Regelung könnte § 40 Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) dienen. Hierfür wären allerdings noch weitere verfassungs- und verwaltungsrechtliche Fragen eines solchen gesetzgeberischen Eingriffs in die Handlungsfreiheit der Unternehmen zu prüfen.

Über die vorstehenden Schlussfolgerungen und Empfehlungen hinaus enthält die ausführliche Ergebnisdokumentation weitere Folgerungen, welche sich aus der Analyse des derzeitigen Rechts, seiner praktischen Anwendung und den Vorschlägen zu seiner Weiterentwicklung ergeben. Auf diese Dokumentation wird insofern verwiesen.

5.3 Kompartiment „Geothermales Reservoir“

Die sich gegenseitig beeinflussenden thermischen, hydraulischen, mechanischen und chemischen Prozesse, die in der Tiefengeothermie eine Rolle spielen, sind eng mit dem geologischen System des geothermalen Reservoirs gekoppelt. Sie hängen, in den hier betrachteten hydrothermalen Systemen, alle mit dem dort vorliegenden Thermalwasser zusammen, das aus großer Tiefe an die Erdoberfläche gefördert, dort abgekühlt und wieder reinjiziert wird.

Für den sicheren und rentablen Betrieb einer Anlage der Tiefengeothermie ist es daher von entscheidender Bedeutung, die Veränderungen des Energieträgers Thermalwasser auf seinem Weg aus dem Reservoir in die oberirdische Anlage und zurück ins Reservoir zu verstehen, sie zu quantifizieren und damit belastbar vorhersagen zu können. Weiterhin ist es wichtig, die mechanischen (seismischen) Prozesse zu verstehen, die mit der Stimulation der Thermalwasserförderung zusammenhängen. Diese Prozesse lassen sich in einem bestimmten Umfang beeinflussen. Geschieht dies auf der Grundlage eines vertieften Systemverständnisses, lässt sich der Anlagenbetrieb aus Sicht der Wirtschaftlichkeit, des Arbeitsschutzes und des Umweltschutzes optimieren.

Das Systemverständnis ist jedoch noch lückenhaft und für die drei Geothermie-Regionen Deutschlands unterschiedlich. Auch werden an das Systemverständnis in den drei Geothermie-Regionen Deutschlands voneinander abweichende Anforderungen gestellt, weil differierende geologische Randbedingungen zu unterschiedlichen Auswirkungen der gleichen Prozesse führen können.

Zwischen den Geothermieanlagen im Norddeutschen Becken und im Oberrheingraben einerseits und denen im Süddeutschen Molassebecken andererseits gibt es grundsätzliche Unterschiede, die vor allem in den Salzgehalten der Thermalwässer begründet liegen – hochsalinare Wässer in Norddeutschland und dem Oberrheingraben und nahezu Süßwasser im Süddeutschen Molassebecken.

Die großen Temperatur- und Druckänderungen im Verlaufe der Förderung des Thermalwassers führen zu starken Ausfällungen in Anlageteilen (Scale-Bildung) in Norddeutschland und im Oberrheingraben, bereiten aber bei Anlagen im Süddeutschen Molassebecken kaum Probleme. Damit sind auch die durch Scale-Bildung hervorgerufenen Probleme in den ersten beiden Regionen ungleich größer und vielfältiger. Solche Probleme stellen beispielsweise ein hoher Pumpenverschleiß und intensive Korrosion

der Verrohrungen sowie häufige Filterwechsel in der obertägigen Anlage, der Arbeitsschutz hinsichtlich radioaktiver Scale und deren Entsorgung dar.

Die Scale-Bildung ist ein physikalisch-chemischer Prozess, der auf die Übersättigung der Thermalwässer durch Temperatur- und Druckänderungen zurückzuführen ist. Übersättigte Lösungen haben die Tendenz, diese Übersättigungen abzubauen, indem übersättigte Mineralphasen ausgeschieden werden (Scale-Bildung). Der Abbau der Übersättigungen erfolgt jedoch nicht spontan, sondern ist kinetisch kontrolliert. Das heißt, Ausfällungen finden i. d. R. nicht an den Stellen statt, an denen sich Übersättigungen einstellen, sondern im weiteren Verlauf der Anlage oder noch später nach der Reinjektion im Reservoir.

Der Einsatz von sog. Inhibitoren kann die Scale-Bildung zwar verlangsamen, aber nicht verhindern. Die Entwicklung von Inhibitoren erfolgt heute noch experimentell und empirisch, weil die vorhandenen wissenschaftlichen Grundlagen ungenügend sind.

Gleichzeitig ist aber auch zu bedenken, dass sich geochemische Gleichgewichte früher oder später immer einstellen. Die Verhinderung lästiger Ausfällungen in der Anlage führt dann zu verstärkten Ausfällungen später im Reservoir. Dort können Ausfällungen zur Verstopfung des Porenraums führen, was wiederum Stimulationsarbeiten erforderlich machen kann, um die Förderleistung auf einem für die Anlage wirtschaftlichen Niveau zu halten.

Die Kenntnis der chemischen und hydraulischen Prozesse ist heute noch lückenhaft. Es ist zwar möglich, durch „Drehen“ an den vielfältigen Schrauben der Modellierungswerkzeuge, Beobachtungen nachzuvollziehen. Wo diese aber fehlen und man auf Prognosen angewiesen ist, sieht es schlechter aus. Belastbare Prognosen sind mit den heute verfügbaren Modellierungswerkzeugen und der lückenhaften Datenlage nicht möglich. Dies hat mehrere Ursachen:

- Das Reservoir ist für Probennahmen nicht leicht zugänglich
- Unverfälschte Probennahme von Thermalwässern ist mit den heute verfügbaren Probennahme-Systemen nicht möglich
- Die quantitativen Zusammenhänge zwischen Lösungszusammensetzung, Druck und Temperatur sind nur sehr lückenhaft bekannt

- Die thermodynamische Datenbasis, um solche Zusammenhänge rechnerisch zu ermitteln, ist unvollständig
- Wegen der unzureichenden Messdatenlage können Modellierungsergebnisse nicht überprüft werden
- Kinetische Daten fehlen
- Die relevanten elektrochemischen Reaktionen, die besonders für Korrosionsprozesse verantwortlich sind, sind noch weniger bekannt als geochemische Gleichgewichtsreaktionen

Diese Wissenslücken sind besonders für die Anlagen in Norddeutschland und im Oberrheingraben problematisch. Sie wirken sich in den Anlagen im Süddeutschen Molassebecken nicht so stark aus.

Um die Wissenslücken zu schließen und damit einen wirtschaftlicheren Betrieb von Anlagen zu ermöglichen, bieten sich folgende Maßnahmen an:

- Schaffung von Techniken für eine unverfälschte Probennahme von Thermalwässern
- Verbesserung des Anlagen-Monitorings
- Vervollständigung der thermodynamischen Datenbasis für die geochemische Modellierung
- Ermittlung kinetischer Daten
- Untersuchung der relevanten elektrochemischen Reaktionen
- Implementierung der besten Prozessmodellbeschreibungen in einem einzigen Rechencode

Ein weiteres an das geothermale Reservoir gebundenes und noch nicht zufriedenstellend gelöstes Problem ist die eingeschränkte bzw. fehlende öffentliche Akzeptanz von Geothermieanlagen. Verantwortlich dafür sind im Wesentlichen mikroseismische Ereignisse als Folge der oft notwendigen Stimulation der Durchlässigkeit durch Fracking. Diesbezüglich bietet sich eine verstärkte Implementierung des so genannten „Ampelsystems“ an (siehe Kapitel 4.2.1).

5.4 Kompartiment „Technische Anlage“

Der verstärkte und zielgerichtete Austausch von Betriebserfahrungen zwischen den Behörden und zwischen den Kraftwerksbetreibern wird empfohlen. Ein solcher Austausch hat sich z. B. im Rahmen der World Association of Nuclear Operators (WANO) für Kernkraftwerke (innerhalb Deutschlands: VGB Power Tech) als hilfreich erwiesen. In der Kerntechnik existieren auch nationale und internationale Behördennetzwerke, zum Beispiel bei der IAEO und der OECD/NEA.

Auf Grundlage der öffentlich zugänglichen Informationen bezüglich Betriebserfahrungen lassen sich allgemeine Punkte ableiten, die jedoch auch wirtschaftlichen Zwängen unterliegen. Diese Punkte sind:

- Möglichst redundanter Aufbau der Anlagen, um bei Ausfall eines Stranges auf den Anderen umschalten zu können
- Regelmäßige und zielgerichtete Prüfungen und Wartungen (der bisherige Umfang ist nicht feststellbar)
- Vorhaltung von Ersatzteilen auf der Anlage

Im Hinblick auf Forschungsvorhaben zur geothermischen Energieerzeugung lässt sich aus Sicht der technischen Anlage empfehlen, dass vor allem Forschungsvorhaben zu folgenden Themenbereichen fortgesetzt werden:

- Standortangepasste Werkstoffentwicklung bzw. -auswahl zur Vermeidung oder Verminderung von Korrosion und Abrasion,
- Frühzeitige Detektierung von Korrosion und Abrasion,
- Einsatz von Inhibitoren, Filterung, Druckhaltung u. a. zur Vermeidung oder Verminderung von Scale-Bildung und daraus folgender Abrasion oder Wirkungsgradminderung,
- Verbesserung der Zuverlässigkeit der Förderpumpen

5.5 Kompartiment „Umwelt“

Für geothermische Anlagen sind die hervorgerufenen Umweltauswirkungen im Normalbetrieb nach dem Stand der Technik vertretbar. Vor allem die oberirdischen Wirkfaktoren sind bekannt und gut kontrollierbar. Die unterirdischen Wirkfaktoren sind schwerer zu detektieren und zu beheben, wenn Störfälle auftreten.

In der Vorerkundungsphase (seismische Erkundung der unterirdischen Schichten) sind die auftretenden Wirkfaktoren vernachlässigbar und temporär.

In der Erschließungsphase führt die Erstellung des Bohrplatzes und möglicher Zufahrtsstraßen zu einem Abtrag oder einer Verdichtung des Bodens. Dieser Prozess ist wie bei allen Bauvorhaben unumgänglich und dient dem Schutz des Grundwassers. Bei Nichtfündigkeit kann der Boden wieder eingebracht und der Bohrplatz rückgebaut bzw. renaturiert werden.

Die Lärmentwicklung während der Erschließungsphase muss die Vorgaben der TA-Lärm einhalten. Durch Schallschutzwände und -gehäuse kann der Lärmpegel signifikant verringert werden. Lärmintensive Arbeiten und Lkw-Fahrten sollten nicht in der Nacht durchgeführt werden. Durch die Höhe des Bohrturmes und einen 24-Stunden Bohrbetrieb kommt es zu einer visuellen Beeinträchtigung des Landschaftsbildes und einer Lichtemission bei Nacht. Dieser Umstand ist temporär.

Ein oberflächlicher Schadstoffeintrag in den Boden oder das oberflächennahe Grundwasser ist während der Erschließungsphase im Normalbetrieb durch einen nach WEG-Vorgaben erstellten Bohrplatz nicht gegeben. Ein Schadstoffausstoß in die Luft wird hauptsächlich durch Baumaschinen, Lkws und Generatoren hervorgerufen. Ausgasungen aus Prozesswässern in die Umgebungsluft werden durch Gasabscheider unterbunden. Der direkte Eintrag von Schadstoffen in anstehende Tiefenwässer, die durch ihre Zusammensetzung ein höheres Gefährdungspotenzial aufweisen als die eingebrachten Prozesswässer, wird als vertretbar angesehen und führt nicht zu einer Degradierung der Tiefenwässer (Ausnahme Molassebecken).

Für den Bohrbetrieb wird Frischwasser zum Anmischen der Bohrspülung und möglicher Stimulationsfluide benötigt. Dieses Wasser verbleibt im Untergrund oder wird bei Rückförderung durch Servicefirmen fachkundig entsorgt. Das Verpressen in so ge-

nannte Disposal-Bohrungen wird allerdings als bedenklich angesehen und sollte einer genaueren Untersuchung unterzogen werden.

Durch Stimulationsmaßnahmen erzeugte Risse in Tiefen > 2.000 m erreichen nach derzeitigem Kenntnisstand nicht oberflächennahe Grundwasserleiter. Hebungsprozesse durch quellende Gesteinsschichten sind bei großen Lagerstättentiefen aufgrund des geringen Quelldruckes im Gegensatz zum lithostatischen Druck ausgeschlossen. Umläufigkeiten im Ringraum müssen durch entsprechende technische Maßnahmen und deren Überprüfung ausgeschlossen werden.

Es sollte darauf hingewirkt werden, die internen Sicherheitsstandards (Sicherheitsmanagement-Systeme) der Bohr- und Serviceunternehmen (z. B. Spülungsservice) zu vereinheitlichen und ein verbindliches Sicherheitsniveau länderübergreifend vorzugeben.

In der Betriebsphase muss die Geothermieanlage die Vorgaben der TA-Lärm einhalten. Die Versiegelung des Anlagengeländes dient dem Boden- und Grundwasserschutz. In bestimmten Betriebszuständen kommt es z. B. bei der Anlage in Landau zu einem Dampfaustrag in die Atmosphäre. Dieser Prozess kann zu einer visuellen Beeinträchtigung führen, ist jedoch auf wenige Betriebsstunden und spezielle Betriebssituationen begrenzt.

Der Ringraum der Bohrung wird im Falle des Aufsteigens von Thermalwässern aus dem Untergrund (Störfall) in oberflächennahe Schichten als potenzieller Hauptfließweg angesehen. Nach Erstellen der einzelnen Rohrfahrten ist eine Integritätsprüfung des Verbundsystems aus Verrohrung und Zementation in der Bergverordnung vorgeschrieben. Im Anlagenbetrieb gilt das allgemeine Prinzip der Schadensvorsorge (siehe u. a. § 55 Abs. 1 BBergG). Die Integrität muss deshalb durch Monitoring-Maßnahmen und Prüfungen im Anlagenbetrieb sichergestellt werden. Im Regelwerk ist ein solches Monitoring während des Betriebs bisher nicht vorgesehen.

Bei Gewährleistung der Integrität stellt das Verbundsystem im Normalbetrieb einen ausreichenden Schutz vor der Migration von Thermalwasser in oberflächennahe Grundwasserleiter dar. Aus diesem Grunde sollte auf dem Gebiet der Zementation bzw. der Bohrlochverschlüsse weiter geforscht werden, damit das Risiko des Versagens der Bohrungsintegrität durch Korrosion oder mechanische Prozesse in der Betriebs- und vor allem in der Nachbetriebsphase so weit wie möglich minimiert wird. Die

Entwicklung neuer Bohrlochverschlusstechniken, bestehend aus einer Kombination von langzeitstabilem quellfähigem Bentonit, in Alternanz mit zementierten Bohrlochabschnitten könnte eine Lösung für die bisher noch offene Frage des Langzeitverhaltens zementierter Bohrlochverschlüsse in der Nachbetriebsphase sein. Bentonit, ein natürliches Dichtmaterial ist im Gegensatz zum heute verwendeten Zement langzeitstabil. Mit Bentonit verfüllte Bohrlochabschnitte können den freien Fluss von Lösungen zuverlässig und dauerhaft verhindern, weil Bentonit bei Kontakt mit Wasser quillt, sein Volumen stark vergrößert und somit selbsttätig zum Verschließen von Wasserwegsamkeiten führt. Die heute übliche Zementation ist dagegen problembehaftet. Beton, egal welcher Rezeptur, ist i. d. R. in der geologischen Umgebung, in die er eingebracht wird, nicht langzeitstabil. Je nach Rezeptur und Porenvolumen wird jeder Beton schneller oder langsamer zersetzt. Damit verliert er auf lange Sicht seine Dichtwirkung. Eine Kombination mit dem natürlichen Dichtmaterial Bentonit scheint deshalb empfehlenswert.

Senkungsprozesse an der Geländeoberfläche durch eine Entnahme des Thermalwassers oder die Lösung von Gesteinen (Kavernenbildung) wird durch die Reinjektion des Thermalwassers unterbunden. Zudem sind Senkungsprozesse durch die Abkühlung des Untergrundes sehr marginal und somit vernachlässigbar. Da Tiefengeothermie-Anlagen in Deutschland das anstehende Thermalwasser aus der Tiefe fördern und wieder reinjizieren, wird kein Frischwasser in der Betriebsphase benötigt bzw. verbraucht. Die Auswirkungen einer steigenden und langzeitlichen Energieentnahme aus der gleichen Lagerstätte, z. B. auf die Hydraulik (z. B. Malmaquifere im Molassebecken), sind noch nicht absehbar. Langzeiterfahrungen von hydrothermalen Geothermieanlagen im Pariser Becken zeigen, dass auch nach der veranschlagten Lebensdauer von ca. 30 Jahren eine längere geothermale Nutzung der Bohrungen zu erwarten ist. Thermale Einflüsse auf das Tiefengestein, oberflächennahe Bodenschichten und Grundwasserleiter sind sehr gering und damit vernachlässigbar.

In der Nachbetriebsphase bzw. beim Rückbau einer Geothermieanlage ist zu beachten, dass einige Anlagenbauteile durch radioaktive Scale kontaminiert sein können und gesondert entsorgt werden müssen. Besonders beim Rückbau und Verfüllen der Bohrung muss besondere Sorgfalt gelten, damit eine Alteration der Abdichtung in der Nachbetriebsphase ausgeschlossen ist. Hier sollte besonders auf dem Gebiet der Verfüllmaterialien weiter geforscht werden.

Die Verbesserung der Akzeptanz tiefengeothermischer Projekte kann durch den Einsatz eines unabhängigen Kontrolleures gesteigert werden. In England ist z. B. seit

1996 festgelegt, dass die Integrität von Offshore- und Onshore-Bohrungen von einer unabhängigen und sachkundigen Person geprüft werden muss. Der Prüfer kann die Ergebnisse der Drucktests und CBL (Cement Bond Logs) einsehen und bei Bedenken diese an die zuständige Behörde weiterleiten.

Die Thermalsolen einiger deutscher Geothermie-Provinzen sind durch eine erhöhte Aktivitätskonzentration natürlicher Radionuklide charakterisiert. Im Verlauf der Förderung und energetischen Nutzung kommt es zur Fällung von Mineralien mit vergleichsweise hohen Aktivitätskonzentrationen natürlicher Radionuklide. Neben den resultierenden technischen Problemen sind im Sinne eines umfassenden Arbeitsschutzes und Schutzes der Bevölkerung Untersuchungen einer möglichen erhöhten Strahlenexposition erforderlich.

Nach Sichtung der vorhandenen Untersuchungsergebnisse können in begründeter Weise Anlagen im Bereich des Süddeutschen Molassebeckens davon ausgenommen werden. Die dort erschlossenen Thermalwasseraufkommen sind als gering mineralisierte karbonatische Wässer der verkarsteten Malmaquifere charakterisiert und zeichnen sich durch niedrige Aktivitätskonzentrationen natürlicher Radionuklide aus. Infolge dessen kommt es in den übertägigen Anlagenteilen nicht zu einer nennenswerten Ablagerung von mineralischen Rückständen. Eine erhöhte Strahlenexposition von Beschäftigten und Einzelpersonen ist nach gegenwärtigem Kenntnisstand dort nicht zu besorgen.

Eine Reihe von Anlagen der reinen Wärmeerzeugung durch Tiefengeothermie nutzen Thermalwasserhorizonte meist geringerer Temperatur und Salinität (Anlagen in Waren und Prenzlau). Auch für diese gibt es gegenwärtig keine Hinweise für erhöhte natürliche Radioaktivität des Thermalwassers oder entstehender Rückstände. Standortspezifische Untersuchungen konnten im Vorhaben nicht durchgeführt werden.

In einigen wenigen Anlagen der Tiefengeothermie im Oberrheingraben und im Norddeutschen Becken führen inwandige Ablagerungen zu erhöhten Dosisleistungen im Bereich des übertägigen Betriebsteils und zum Anfall von radioaktiven Rückständen, die einer geordneten Beseitigung oder Verwertung zugeführt werden müssen. Der Umgang mit derartigen Rückständen und der Strahlenschutz bezüglich NORM zum Schutz der Beschäftigten und der Bevölkerung vor erhöhten Strahlenexpositionen wird in Deutschland durch die Kombination aus eigenverantwortlicher Überwachung der Industriebranche und den Vorschriften der Strahlenschutzverordnung in angepasster

Weise geregelt. Entsorgungsoptionen werden erfolgreich genutzt. Bis auf wenige Ausnahmen können Rückstände aus der Überwachung und damit dem Geltungsbereich der Strahlenschutzverordnung entlassen werden. Die bisherigen Erfahrungen mit der Entlassung von NORM-Rückständen aus der behördlichen Überwachung durch Einhaltung restriktiver Dosisrichtwerte in Deutschland sind positiv. Zahlreiche Untersuchungen haben den Kenntnisstand erweitert und sind bei der Entwicklung des Regelwerkes berücksichtigt worden. Bei einer unverändert restriktiven Haltung der Entsorgungswirtschaft bezüglich der Annahme von aus der Strahlenschutzüberwachung entlassenen Rückständen ist jedoch zukünftig mit erheblichen Schwierigkeiten bei der Entsorgung dieser Rückstände zu rechnen. Für Rückstände, bei denen die Freisetzung nicht-radioaktiver Kontaminanten eine ausschlaggebende Rolle spielt und bestimmte Beseitigungsoptionen ausschließt, sind auch zukünftig alternative Entsorgungsoptionen unter Einsatz spezieller Immobilisierungsstrategien zu prüfen. Für den Anteil der zu erwarteten NORM-Rückstände, die nicht aus der Strahlenschutzüberwachung entlassen werden können und als NORM-Abfälle zu beseitigen sind, ergibt sich die zwingende Notwendigkeit, ausreichende, geeignete Endlagermöglichkeiten und Kapazitäten zu schaffen – ein Problem das gleichermaßen alle NORM-Rückstände verschiedenster Industriezweige betrifft.

Vorliegende Dosisabschätzungen sowie die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten probabilistischen Analysen zeigen, dass Überschreitungen der zulässigen effektiven Jahresdosen nicht oder nur in unwahrscheinlichen Fällen zu besorgen sind. Im Verlauf des Vorhabens wurden keine unzulässig hohen Jahresdosen von Beschäftigten bekannt. Allerdings muss einschränkend angemerkt werden, dass der Zugang zu sensiblen personenbezogenen Daten der Jahresdosen sehr eingeschränkt ist und die Kenntnisse auf Gesprächen mit Betreibern beruhen. Aufgrund stark variierender Expositionsrandbedingungen sind anlagenspezifische Einzelfallbetrachtungen erforderlich. Szenarien Beschreibungen, welche die Variabilität der möglichen relevanten Eingangsparameter der Dosisabschätzung abdecken, können in Verbindung mit probabilistischen Analysen hier helfen, erste Abschätzungen frühzeitig vornehmen zu können – ein solches Vorgehen sollte auch auf behördliche Akzeptanz hin überprüft werden. Zur Schließung von Kenntnislücken werden bereits weitere Vorhaben durch den Zuwendungsgeber gefördert.

In Mediationsverfahren äußerten Bürger ihre Besorgnis über eine mögliche Erhöhung der Freisetzung, einen vermehrten Transport aus dem Untergrund und nachfolgend

eine gesundheitlich bedenkliche Anreicherung von Radon in Gebäuden durch den Betrieb von geothermischen Kraftwerken. Ein diffusiver Aufstieg von Fluiden und Radon durch die Deckgebirgsschichten kann ausgeschlossen werden. Aus Bergbaudisziplinen mit intensiver Schaffung von untertägigen Hohlräumen sind Setzungserscheinungen bekannt, die, wenn sie oberflächlich wirksam werden, Schäden an erdberührenden Teilen von Bauwerken verursachen können. Entlang von derartig geschaffenen Wegsamkeiten im Fundament kann Radon aus der Bodenluft des nahen Umfeldes in das Gebäude migrieren. Da die aus Tiefen von > 3.000 m geförderten Thermalwässer in den als Dubletten ausgeführten Geothermalkraftwerken nach Wärmeentzug reinjiziert werden, sind Setzungen nicht zu besorgen.

Es ist nicht zu erwarten, dass in der Tiefengeothermie Radon-Arbeitsplatzkonzentrationen von > 300 Bq m⁻³ verbreitet in Anlagen auftreten. Der mögliche Zutritt von Radon aus dem Baugrund und die Ausbildung möglicher erhöhter Innenraumaktivitätskonzentrationen in oberflächliche Anlagen- und Gebäudeteile von Geothermieanlagen werden durch die bekannten Prozesse wie Ankopplung an den Untergrund, Lüftung und Ausbildung eines Druckgradienten kontrolliert.

Radium-haltige Rückstände aus Reinigungsarbeiten stellen potenzielle Radon-Quellen dar. Die vorübergehende Lagerung dieser Rückstände in definierten Verwahrbereichen außerhalb der Maschinenhallen auf dem Betriebsgelände gewährleistet, dass in Räumen mit Aufenthalt von Beschäftigten unzulässig hohe Radonkonzentrationen vermieden werden.

Die Vermittlung eines behördlich geregelten und gesicherten Umgangs mit Materialien mit erhöhten Gehalten natürlicher radioaktiver Stoffe ist hierzulande selbst bei äußerst sachgerechter Darstellung schwierig und stößt bei der Bevölkerung auf Vorbehalte und Misstrauen. Es wird empfohlen, ein hohes Maß an Transparenz bei der Beschreibung von Vorgängen und Prozessen im Rahmen des Betriebes geothermaler Anlagen zu zeigen. Vergleichsmaßstäbe müssen behutsam eingeführt werden und sollen nicht vom eigentlichen Sachverhalt ablenken.

Keinesfalls sollte der Eindruck entstehen, dass die Eigenverantwortung des Betreibers die Behörde aus der Aufsichtspflicht entlässt.

Es ist nicht Aufgabe der zuständigen Behörde, den privatwirtschaftlichen Betrieb einer Geothermieanlage durch Stellungnahmen zur Thematik zu fördern. Gleichwohl er-

scheint es geboten, dass Behörden auch im Fall der Einhaltung von Grenz- und Richtwerten ihrer Informationspflicht proaktiv nachkommen.

Die Bestrebungen der Betreiber, offen mit der für ihren Industriezweig „Erneuerbare Energien“ zunächst sicherlich unerwartet bedeutsamen Thematik umzugehen, sind anzuerkennen.

6 Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die ausführliche Vorhabens- und Ergebnisdokumentation ist diesem Bericht als elektronische Datei auf CD beigelegt. Neben umfangreichen Hintergrundinformationen zu den untersuchten Sachverhalten beinhaltet sie in detaillierter Form Grundlagen für Berechnungen und Operationen, zusammengestellte Daten zu verschiedenen Sachverhalten, sowie ein Verzeichnis aller verwendeten Quellen.

Von der GRS organisiert und moderiert wurde auf dem Geothermiekongress 2012 in Karlsruhe ein Workshop zur „Professionellen Risikoanalyse“ in der Tiefengeothermie. Die hohe Beteiligung an diesem Workshop hat gezeigt, dass die GRS ein offensichtliches Bedürfnis der Community richtig erkannt und bedient hat. Vertreter von Versicherungen, Genehmigungsbehörden, Medienwissenschaften und der GRS stellten unterschiedliche Ansätze zur Risikobewertung vor. In den „Foren“ (weiteren Vortragsveranstaltungen zu verschiedenen Themenschwerpunkten) hat die GRS weiterhin zwei Vorträge zum Monitoring und zu rechtlichen Rahmenbedingungen gehalten, die ebenfalls auf Interesse gestoßen sind.

Über die Ergebnisse des Vorhabens und der Teilarbeitspakete wurde regelmäßig im Rahmen der GRS-Geothermie-Frühjahrstreffen berichtet. Mit Beiträgen auf Fachkongressen und Tagungen wurde das Fachpublikum über den fortlaufenden Erkenntniszuwinn informiert und die Diskussion mit diesem gesucht.

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de