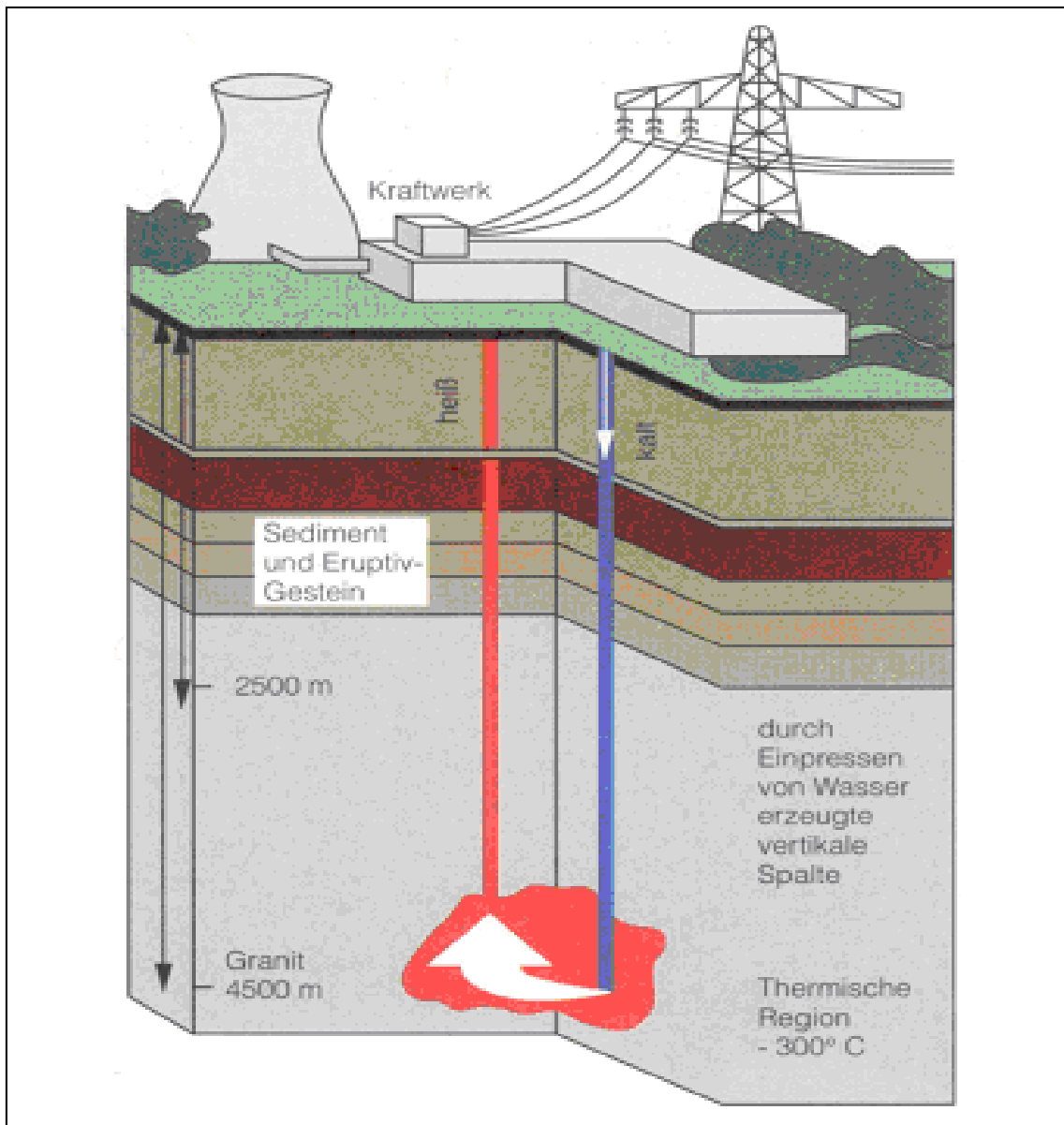


Rahmenkonzept Tiefengeothermie Freistaat Sachsen



Freiberg, den 10.08.2009

Bearbeiter: Dr. P. Wolf, Dr. M. Felix

unter Mitarbeit von: H.-J. Berger, L. Aßmann, Dr. Krentz, K. Hofmann

Freistaat



Sachsen

Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
2	Aufgabenstellung	3
3	Tiefe Geothermie in der Bundesrepublik Deutschland und Ausgangsposition im Freistaat Sachsen	4
4	Tiefe Geothermie in Sachsen	6
4.1	Geothermische Potenziale	6
4.2	Geologisch-geothermische Modellierung.....	8
4.2.1	Geologisch-tektonisches Modell	8
4.2.2	Geothermisches Modell	9
4.2.2.1	Messpunkte und Ableitung der Modellstartwerte	9
4.2.2.2	Extrapolation der Gesteinstemperaturen bis in die Teufe von 5000 m.....	14
4.3	Lösungsansätze für ein tiefes Geothermieprojekt in Sachsen.....	16
4.3.1	Geologische Voraussetzungen für hydrothermale Geothermie (NE-Sachsen).....	16
4.3.2	Geologische Voraussetzungen für petrothermale Systeme	18
4.3.3	Untersuchungsgebiete für petrothermale Geothermie.....	21
4.3.3.1	Gera-Jáchymov-Zone im Raum Aue-Schwarzenberg-Zwickau.....	21
4.3.3.2	NW-SE-Bruchzone im Raum Freiberg-Frauenstein	21
4.3.3.3	Elbezone im Raum Meißen-Dresden-Pirna	22
4.3.3.4	SW-Vogtland im Raum Schönbrunn-Oelsnitz/V.-Eichigt	23
4.3.3.5	NW-Sachsen im Raum Delitzsch-Schenkenberg	23
5	Ableitung von Vorzugsgebieten	24
6	Untersuchung der Vorzugsgebiete für ein petrothermales Geothermieprojekt	25
7	Organisatorischer Rahmen	27
7.1	Sächsische Umweltverwaltung	27
7.2	Externe Partner	27
7.2.1	Gründung eines Forschungsverbundes	27
7.2.1.1	Rechtliche Grundlagen.....	27
7.2.1.2	Finanzierung	27
7.2.1.3	Organisation	27
7.2.1.4	Arbeitsplanung	27
7.2.2	Integration weiterer externer Partner	28
7.2.3	Einbeziehung von Industrie und Kommunen	28
8	Ablauf und zeitlicher Rahmen	28
9	Aufwandsabschätzung	28
10	Literatur	30
	Tabellenverzeichnis	31
	Abbildungsverzeichnis	32
	Anlagenverzeichnis	32
	Abkürzungs- und Begriffsverzeichnis	33

1 Einführung

Mit der anspruchsvollen Zielstellung, in einem sächsischen Geothermiekraftwerk Erdwärme auf petrothermaler Basis kommerziell in Strom und Heizwärme zu wandeln, wird sowohl in Deutschland als auch in Mitteleuropa Neuland betreten.

Weltweit sind erste technische Projekte im Niedrigenthalpiebereich ($<200\text{ °C}$) in Vorbereitung, jedoch hat es unter vergleichbaren Bedingungen wie im sächsischen Grundgebirge bisher noch kein Projekt geschafft, den Routinebetrieb unter wirtschaftlichen Bedingungen aufzunehmen.

Das Forschungsprojekt Soutz-sous-Forêts (Frankreich) befindet sich gegenwärtig in der Pilotphase unter ähnlichen geologischen Bedingungen. Das heißt, die Durchführung eines petrothermalen Projektes bedarf des gesamten internationalen Know-how auf diesem Gebiet und bietet gleichzeitig die Chance, das deutsche technische und technologische Know-how weiter voranzutreiben.

Vorliegende Erfahrungen mahnen indessen zu einer wohl überlegten und schrittweisen Projektentwicklung. Neueste Erfahrungen sowohl bei der Vorbereitung als auch bei der Realisierung eines Projektes von der Dimension zweistelliger Millionen Euro Beträge erfordern eine „step-by-step“-Vorgehensweise.

Für das künftige sächsische Geothermiekraftwerk werden unter den gegebenen geologischen Bedingungen und unter Zugrundelegung der erzielten Leistungsdaten in Soutz zunächst mindestens eine elektrische Leistung von 2 MW_{el} und eine thermische Leistung von mindestens $6\text{--}8\text{ MW}_{\text{th}}$ angestrebt.

Ein Vorhaben dieser Dimension mit der Zielstellung einer voraussichtlichen Inbetriebnahme des Kraftwerkes bis 31.12. 2015 kann nur unter konsequenter Einbeziehung nationaler und internationaler Erfahrungen vorbereitet und umgesetzt werden. Aus diesem Grund wird das Rahmenprojekt aus mehreren Bausteinen (Modulen) zusammengesetzt. Nachfolgend wird zunächst der erarbeitete Stand des Rahmenprojektes vorgestellt, der im Wesentlichen die Startphase und die Grobplanung der Suchphase umfasst.

Die Fortschreibung weiterer Schritte und Ergebnisse erfolgt in eigenständigen Arbeitsplänen und Forschungsberichten.

Nachfolgenden Fachkolleginnen und Fachkollegen wird für kritische Hinweise und kollegiale Unterstützung bei der Erstellung des Rahmenkonzeptes gedankt:

Frau Dr. habil. Förster und Herrn Dr. Huenges (GFZ), Herrn Dr. Schulz (LIAG), Herrn Dr. Tischner (BGR), Herrn Herrmann und Herrn Lagerpusch (SOBA), Herrn Prof. Dr. Wagner (TUBAF).

2 Aufgabenstellung

Aufgrund der sich immer mehr verschärfenden Rohstoff- und Energiesituation gewinnt die Geothermie unter den erneuerbaren Energien immer mehr an Bedeutung. Die Ressource Geothermie besitzt unter den erneuerbaren Energien das größte Potenzial. Sie kann grundsätzlich für zwei Anwendungen genutzt werden - für die Stromgenerierung und zur Wärmegewinnung. Die geothermische Stromgenerierung auf der Basis natürlicher geothermischer Systeme belief sich in 2008 weltweit auf 60 TWh , d. h. auf ca. 1% der weltweit installierten Stromerzeugung (RYBACH 2008). Diese Kapazität wird zukünftig bei Nutzung petrothermaler Systeme (EGS - Enhanced Geothermal Systems) um ein Vielfaches erhöht werden können.

Die Bundesregierung hat mit der Novellierung des Erneuerbaren-Energie-Gesetzes (EEG) und mit dem Erneuerbaren-Energien-Wärmegesetz (EE-WärmeG) Weichen für den weiteren stabilen Ausbau der geothermischen Strom- und Wärmeerzeugung gestellt.

Die Nutzung ist direkt abhängig von den regionalen geologischen Bedingungen am jeweiligen Standort. In Mitteleuropa dominiert gegenwärtig noch die oberflächennahe Nutzung der Erdwärme zur Gebäudeheizung. Eine Erschließung der Erdwärme zur Stromgenerierung im Niedrigenthalpiebereich aus größeren Tiefen erlebt in geologisch günstigen Regionen Mitteleuropas erst in den letzten Jahren eine deutliche Entwicklung.

Die Rahmenbedingungen zur Entwicklung der Geothermie im Freistaat Sachsen werden durch das Strategiepapier des SMUL vom 17.02. 2009 gesetzt. Da Technologien zur Nutzung der tiefen Geothermie ohne Verbrennung arbeiten, somit wenig bis keine Treibhausgasemission verursachen und entsprechend eine gute Ökobilanz aufweisen, stellt die Forcierung der Energienutzung mittels Geothermie einen der Handlungsschwerpunkte im Strategiepapier dar.

In Umsetzung dieser fachpolitischen Absicht, einen innovativen Beitrag zur Entwicklung der Geothermie zu leisten, ist vorgesehen

- die Oberflächengeothermie weiter auszubauen,
- die Anstrengungen auf dem Sektor der Grubenwassergeothermie zu unterstützen und
- die tiefe Geothermie zu forcieren.

Für die Erschließung der tiefen Geothermie im Freistaat Sachsen soll das Rahmenkonzept, das im Forschungsverbund diskutiert wurde, den Grundstein für eine durch weitere Meilensteine zu ergänzende „road map“ legen.

Auf der Basis einer Sachstandsanalyse (BOECK u. a. 2005) wird das Potenzial der tiefen Geothermie im Freistaat Sachsen beschrieben und unter Ergänzung von Ergebnissen der TU Bergakademie Freiberg (WAGNER 2007 und 2008) eine Problem- und Standortanalyse für geeignete Untersuchungsgebiete zur petrothermalen Geothermie aus geowissenschaftlicher Sicht durchgeführt.

Im Ergebnis werden Vorzugsgebiete für ein sächsisches tiefes Geothermieprojekt mit dem Ziel einer zeitnahen energiewirtschaftlichen Nutzung ausgewiesen und der organisatorische, zeitliche und finanzielle Rahmen abgesteckt.

3 Tiefe Geothermie in der Bundesrepublik Deutschland und Ausgangsposition im Freistaat Sachsen

Im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) wird der Anteil der Erneuerbaren Energien an der Stromversorgung bis 2020 auf mindestens 20 % festgeschrieben. Ein erheblicher Teil des dazu erforderlichen Zuwachses wird vom Ausbau der Erdwärmenutzung erwartet.

Nach Branchenschätzungen (HUENGES u. a. 2008) gibt es in Deutschland mittelfristig Ansätze für ca. 50 tiefe Geothermieanlagen zur Strom- bzw. zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung. Die Standorte liegen vorrangig im Oberrheingraben, im Süddeutschen Molassebecken und im Norddeutschen Becken.

Im Wesentlichen werden dabei zwei Konzepte verfolgt:

- die Erschließung und Nutzung von **hydrothermalen Systemen** mit hoher hydraulischer Durchlässigkeit wie in letztgenannten Schwerpunktregionen und
- die Erschließung von **petrothermalen Systemen**, d. h. kristalline Gesteinsformationen mit primär niedriger hydraulischer Durchlässigkeit (Beispiel EU-Pilotprojekt Soultz-sous-Forêts, Abb. 1¹).

Nach HUENGES u. a. (2008) rechtfertigt die verstärkte Nachfrage nach einer **grundlastfähigen Energieversorgung** mit regenerativen Energien eine weitere Förderung der tiefen Geothermie. Schwerpunktmäßig sollen nicht nur auf positive geothermische Anomalien beschränkte tiefengeothermische Technologien gefördert und weiterentwickelt werden, sondern auch solche, die in „moderaten“ Temperaturbereichen einsatzfähig sind. Diese Technologien wären dann weltweit auch auf andere Standorte übertragbar und somit exportfähig.

In **Sachsen** treten die für die **hydrothermale Geothermie** prädestinierten tiefliegenden wasserführenden Sedimentschichten nur bis in Tiefen bis max. 1600 m im Nordosten des Freistaates auf. Die dort mittels einer Tiefbohrung im Raum Weißwasser-Bad Muskau in ca. 1400 m Tiefe erschlossene Thermalsole ist für eine balneologische Nutzung² vorgesehen. Da die bisher angetroffenen Wässer eine relativ geringe Austrittstemperatur besitzen (40 bis 50 °C), kommen sie für eine Stromgenerierung nicht infrage. Eine zusätzliche wirtschaftliche Nachnutzung der Wärmeenergie wird erwogen (s. Kap. 4.2.1).

¹ Unter dem Begriff „petrothermale Systeme“ werden sowohl Hot-Dry-Rock (HDR) Systeme als auch Enhanced Geothermal Systems (EGS) oder Hot Fractured-Rock (HFR) -Systeme subsumiert.

² Gebiete Sachsens mit Mineral-, Thermal- und Trinkwassernutzungen balneologischer bzw. sonstiger Art, die sowohl im sedimentären als auch Grundgebirgsbereich entlang von Störungszonen auftreten können, bleiben bei vorliegender Betrachtung einer industriellen petrothermalen Nutzung ausgespart (Heilwasser- und Wasserschutzgebiete und deren Umfeld).

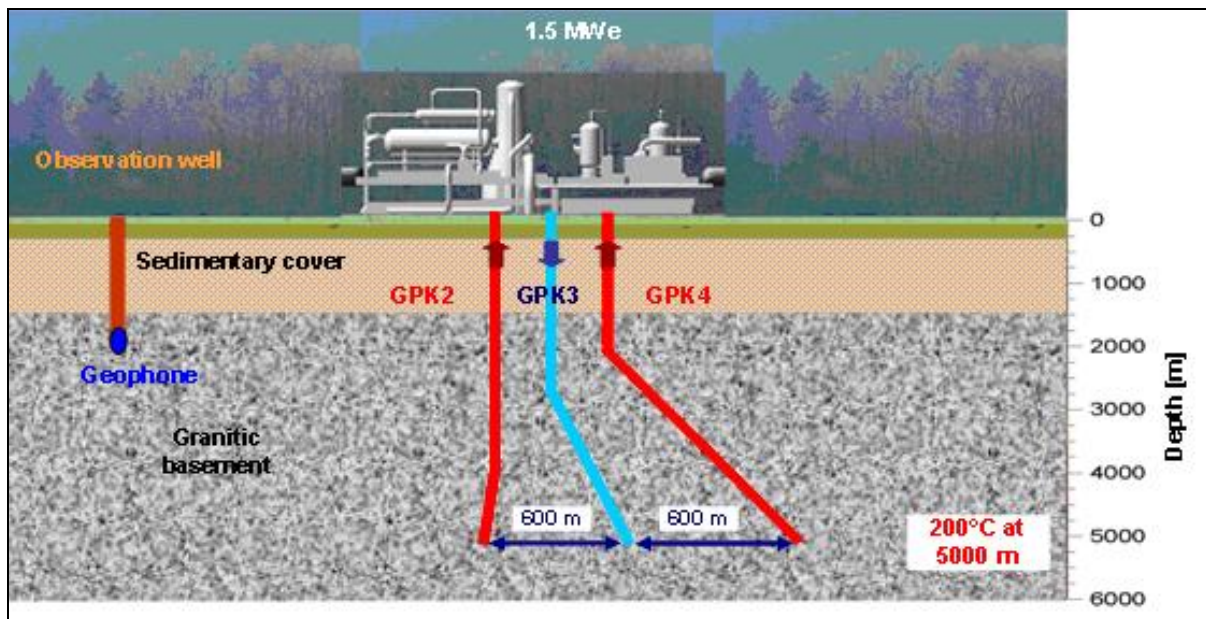


Abb. 1: Prinzipskizze des europäischen petrothermalen (Hot-Dry-Rock)-Forschungsprojektes Soultz-sous-Forêts (Frankreich)

Innerhalb des sächsischen Grundgebirges ist zunächst auch im Bereich regionaler Störungszonen für eine angestrebte Stromgenerierung in den dafür erforderlichen Teufenbereichen von einer primär niedrigen bis sehr niedrigen hydraulischen Durchlässigkeit auszugehen. Das heißt, aufgrund der geologischen Bedingungen sind hierfür **petrothermale Systeme**³ zu entwickeln. Bei petrothermalen Systemen wird in einem durch „fracking“ initiierten unterirdischen „Wärmetauscher“ das durch eine Tiefbohrung zugeführte kühle Wärmeträgermedium (i. d. R. Wasser) auf $T > 100\text{ °C}$ aufgeheizt und über eine Förderbohrung einer Kraftwerksanlage zur Stromgenerierung und/oder einer Wärmenutzung zugeführt.

Die Herstellung eines „Wärmetauschers“ mittels hydraulischer Aufweitung von Klüften und Störungen in bis zu 5000 m Teufe des Grundgebirges wird innerhalb tiefreichender und **regional ausgedehnter Störungszonen** aus den Erfahrungen des sächsischen Bergbaues heraus für besonders zweckmäßig erachtet. Zonen erhöhter Wegsamkeit in magmatischen Gesteinen mit hoher Wärmeproduktion sind dafür prädestiniert.

Als Ausgangsposition sind die tiefen geologischen Verhältnisse und die Möglichkeiten für unterschiedliche Nutzungskonzepte der tiefen Geothermie zwar grundsätzlich, jedoch nicht im Detail bekannt. Der aktuelle Datenbestand zur tiefen Geothermie wurde landesweit in einer Übersichtsstudie aufgearbeitet und ausgewertet (BOECK et al. 2005). Die dabei aus geowissenschaftlicher Sicht besonders günstigen fünf Gebiete für ein tiefes petrothermales Projekt wurden unter dem Aspekt ihrer Realisierbarkeit innerhalb tiefreichender regionaler Störungszonen abgegrenzt (Kap. 5).

Eine erste Präzisierung dieser Gebiete erfolgte auf Grundlage des unter Mitwirkung des LfULG erarbeiteten geologischen Modells zur Studie BOECK et al. (2005) sowie im Ergebnis der beiden von der TU Bergakademie Freiberg erarbeiteten Studien für ein tiefes geothermisches Projekt in Sachsen (WAGNER 2007 und 2008).

Durch das LfULG sowie den zu gründenden Forschungsverbund werden die im Ergebnis dieser Präzisierung verbliebenen Vorzugsgebiete (s. Kap. 5) einer **Fündigkeitsprognose** unterzogen, in deren Ergebnis die Ausweisung eines Projektstandortes erfolgen soll. Dazu werden speziell für die ausgewählten Vorzugsgebiete noch zahlreiche Informationen benötigt, die bisher nur unvollständig vorhanden sind. Erforderlich sind z. B. präzisierte Berechnungen der Tiefentemperatur, Messungen der Wärmeleitfähigkeit, Messungen der Permeabilität, die Präzisierung der Wärmestromdaten, der radioaktiven Wärmeproduktion und Aussagen zur Laugbarkeit von Gesteinen hinsichtlich ihrer radioaktiven Elemente im geothermischen Fluidkreislauf.

Bei der Festlegung des Standortes werden neben den Ergebnissen der geowissenschaftlichen Fün-

³ Da die mittels tiefer Erdwärmesonden (mit jeweils geschlossenem Kreislauf des Wärmeträgermediums) erzeugte Temperatur für eine Stromgenerierung nicht ausreicht (= technisches Nachfragepotenzial; TAB 2003 / Kap. 11 bei BOECK u. a. 2005) wird diese Technologie vorerst nicht weiter betrachtet.

digkeitsprognose allerdings auch die technisch-ökonomischen Randbedingungen auf der Nutzerseite für eine Projektrealisierung zu berücksichtigen sein (Kap. 5).

Am ausgewählten Standort ist bei den angestrebten Teufenbereichen im Grundgebirge damit zu rechnen, dass die Produktivität nicht ausreichend permeabler Reservoire durch Stimulationsmaßnahmen (**Reservoir-Engineering**) erhöht werden muss und eine Prüfung der Systemverlässlichkeit anzuschließen ist. Dieses setzt u. a. Kenntnisse der gesteinmechanischen Parameter und des rezenten Stress-Regimes voraus. Im Vordergrund der Untersuchungen innerhalb des ausgewählten Standortes sollte deshalb die zuverlässige Erkundung von Zonen erhöhter Permeabilität mit größeren Mengen höher temperierten Wassers stehen (interne Mitteilung GFZ Potsdam 2008).

Alle weiteren Fragestellungen bezüglich der Realisierung der Vorbohrung/Bohrungen werden Bestandteil einer gesondert zu erstellenden **Machbarkeitsstudie** sein.

Generell besteht in den gering bis nicht porösen Gesteinseinheiten des kristallinen Grundgebirges Deutschlands noch ein erheblicher Forschungsbedarf, wobei speziell für Sachsen die Fündigkeitsprognose und das Reservoir-Engineering zunächst im Vordergrund stehen müssen.

4 Tiefe Geothermie in Sachsen

4.1 Geothermische Potenziale

Generell wird bei der Abschätzung des energetischen Potenzials unterschieden in ein theoretisches Potenzial und ein technisches Potenzial. Letzteres wird in ein technisches Angebotspotenzial und ein technisches Nachfragepotenzial untergliedert.

Als **theoretisches geothermisches Potenzial Sachsens** kann mithin das gesamte gespeicherte Erdwärmevorkommen bezeichnet werden, das theoretisch in einem definierten Raumkörper der Erdkruste innerhalb der Grenzen Sachsens nutzbar ist. Da konkrete technische Methoden der Nutzbarmachung dieser Energie hierbei keine Rolle spielen, ist dieses Potenzial weitaus größer als die real nutzbare Erdwärme.

Das **technische Potenzial** hingegen beschreibt den Anteil am theoretischen Potenzial, der nach dem heutigen Stand der Technik nutzbar gemacht werden könnte. Dabei sind u. a. strukturelle und ökologische Restriktionen und gesetzliche Vorgaben zu berücksichtigen, soweit sie ähnlich den technischen Einschränkungen als gegenwärtig nicht überwindbar gelten. Wesentlich ist dabei die Unterscheidung zwischen Angebots- und Nachfrageseite. Während das **technische Angebotspotenzial** den Einfluss technischer und struktureller Restriktionen auf der Erzeugungsseite abbildet, berücksichtigt das **technische Nachfragepotenzial** zusätzlich die nachfrageseitige Situation. So z. B. Beschränkungen für den Fall, dass das Energieangebot (z. B. bei Wärme) die potenzielle Nachfrage übersteigt. Dies bedeutet, dass bei einer kommerziellen Option das technische Nachfragepotenzial in jedem Fall in die Planung einzubeziehen ist (KALTSCHMITT u. a. 1999, Tab. 1 und 2).

Tab. 1: Strom- und (Nutz-) Wärmepotenzial der kristallinen Gesteine in Deutschland;
Bezugsniveau: 3 bis 7 km nach PASCHEN u. a. (2003)*

Bereiche	Elektrische Energie [EJ]	Wärme (Kraft- Wärmekopplung ohne Wärmepumpe) [EJ]	Wärme (Kraft- Wärmekopplung mit Wärmepumpe) [EJ]
Norddeutsches Becken	66	100	190
Oberrhingraben	62	76	140
Mittel- und süddeutsches Kristallgebiet	940	1400	2500
Deutschland ges. ca.	1100 (= 35 TWa)	1600 (= 51 TWa)	2800 (= 89 TWa)

* Der auf Störungszonen entfallende Anteil wurde nicht abgezogen, da er nur wenige Prozent ausmacht.

Tab. 2: Ergebnisse der Potenzialabschätzungen für das Kristallingebiet Sachsens (incl. Störungzonen) nach Angaben des IfE (2003)

Gesamtpotenzial der geothermischen Stromerzeugung im Kristallin des Freistaates Sachsen

Temperaturklasse [°C]	Teufenintervall [km]	Recoveryfactor [%]	Zur Stromerzeugung nutzbare Energie [EJ]	Wirkungsgrad Stromer- zeugung [%]	Strom [TWh/a]	Wärme [PJ/a]
100 – 130	4 – 5	2,4	92	10,3	2,6	19
130 - 160	5 - 6	4,0	217	11,7	7,1	49
Gesamt:			309		9,7	68

Energiepotenzial in Bezug auf Störungzonen in Sachsen

Temperaturklasse [°C]	Teufenintervall [km]	Recoveryfactor [%]	Zur Stromerzeugung nutzbare Energie [EJ]	Wirkungsgrad Stromer- zeugung [%]	Strom [TWh/a]	Wärme [PJ/a]
100 – 130	4 – 5	2,4	2,8	10,3	0,1	0,6
130 - 160	5 - 6	4,0	6,0	11,7	0,2	1,4

Nach Tab. 1 beträgt das technische Potenzial an elektrischer Energie in den Kristallingebieten Gesamtdeutschlands im genannten Teufenbereich ca. 1.100 EJ (entspricht ca. 35 TWh/a). Davon ist der weit überwiegende Anteil im mittel- und süddeutschen Kristallingebiet gespeichert.

Die entsprechenden Zahlen für Sachsen im anvisierten Teufenbereich zwischen 4 bis 6 km (Tab. 2) gibt das IfE (2003) mit ca. 10 TWh/a an. Dieses Strompotenzial entspräche knapp 30 % der sächsischen Bruttostromerzeugung von 2002 (Energiebericht Sachsen 2003).

Die Nutzung des Wärmeerzeugungspotenzials ist nur im Zusammenhang mit ortsständigen Wärmenetzen möglich, die für Gesamtsachsen auch nicht annähernd flächenhaft integrierbar wären. Als Nachfragepotenzial für Sachsen wird maximal eine nutzbare Wärmemenge von 32 PJ/a angegeben (IfE 2003: Fernwärmeverbrauch von 2001).

Potenziale zur Stromerzeugung mit petrothermalen Systemen

Das Potenzial zur Stromerzeugung ist nach BMU (2007, S. 13) geringer als das Wärmepotenzial, da eine effiziente Stromerzeugung erst bei relativ hohen Temperaturen möglich ist. International werden Heißwasser-, Heißdampfvorkommen >200 °C genutzt. Derartige Vorkommen sind in Deutschland noch nicht erschlossen. Daraus ergeben sich zwei Herausforderungen:

- künftige petrothermale Systeme müssen im Temperaturbereich 100-150 °C gefahren werden und
- es sind Konzepte zu entwickeln, die eine kostengünstige Erschließung von Gesteinswärme aus großen Tiefen ermöglichen.

Das **technische Angebotspotenzial** ist durch kristalline Tiefengesteine in Deutschland allgemein und im Erzgebirge im Bereich der sauren Magmatite aufgrund ihrer hohen radiogenen Wärmeproduktion in besonderem Maße gegeben (s. Tab. 1).

Bezüglich der **technischen Nachfragepotenziale** wird in Sachsen auf eine gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung orientiert. Bei einer Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ist die Wärmemenge maßgeblich, die an ortsnahe Verbraucher abgegeben werden kann. Da ein wirtschaftlicher Betrieb eine entsprechende Anlagengröße (Fernwärmenetze) voraussetzt, kommen für geothermische Anlagen nur bestimmte Siedlungs- und Industriegebiete mit entsprechendem Wärmebedarf in Betracht.

Einschätzung des geothermischen Potenzials Sachsens

Generell führte die Einschätzung des geothermischen Potenzials durch BOECK u. a. (2005) zu Resultaten, die für kristalline Gesteinskomplexe zu erwarten waren. Die Temperaturen und die Temperaturgradienten sind im internationalen Vergleich weder signifikant überhöht noch signifikant unterschritten.

Für den Freistaat Sachsen resultiert daraus, dass für eine zukünftige Nutzung des tiefen geothermischen Potenzials durchschnittliche geothermische Bedingungen bestehen, die eine Fortführung diesbezüglicher Forschungs- und Erkundungsarbeiten rechtfertigen (BOECK u. a. 2005).

4.2 Geologisch-geothermische Modellierung

4.2.1 Geologisch-tektonisches Modell

Ein geologisch-tektonisches 3D-Modell im Sinne einer in sich konsistenten Abbildung der geologischen Körper bis zu einer Teufe von 5000 m existiert für den Freistaat Sachsen bisher nicht, befindet sich aber in Vorbereitung.

Deshalb wurde auf der Grundlage der umfangreichen Kenntnisse zum geologischen Bau zur Einschätzung des Potenzials für eine tiefegeothermische Nutzung von BOECK u. a. (2005) folgender Lösungsweg gewählt (BOECK u. a. 2005):

- Vereinfachte Darstellung der geologischen Struktureinheiten und ihre Extrapolation in die Teufe
- Zusammenfassung der Vielfalt der Gesteine anhand ihrer geothermischen Parameter zu Gesteinsgruppen
- Zuordnung von Materialparametern zu den Gesteinsgruppen (Modellparameter)
- Abgleich der Modellparameter (allerdings mit nur wenigen verfügbaren Messdaten)
- Aufbau eines geologischen 1 km x 1 km-Flächenrastermodells und Erweiterung durch Modellscheiben mit 500 m- bzw. 1000 m-Mächtigkeit nach der Teufe
- Einbeziehung der Teufenabhängigkeit der Parameter Wärmeleitfähigkeit und Wärmeproduktion

- Verwendung der Jahresmitteltemperatur an der Oberfläche und der Wärmeflussdichte als Startwerte für die Extrapolation in die Tiefe
- Temperaturextrapolation im eindimensionalen Wärmeleitungsmodell in vertikaler Richtung für jeden Rasterpunkt ohne Berücksichtigung lateraler Wärmeströmungen
- Ausgleich und Glättung der Temperaturverteilung durch Berechnung in einem größeren Raster von 5 km x 5 km.

Der beschriebene Lösungsweg macht deutlich, dass aufgrund der Modellprämissen in den Vorzugsgebieten unbedingt Verbesserungen des Ausgangsmodells erforderlich sein werden.

Die Abgrenzung des Bearbeitungsgebietes orientierte sich im Wesentlichen an der Geologischen Karte 1 : 400.000 (GÜK 400). Damit ergaben sich 18.455 1 km x 1 km-Rasterpunkte innerhalb der sächsischen Landesgrenze.

Die Vielzahl der in Sachsen vorkommenden Gesteine wurde hinsichtlich ihrer geothermisch relevanten Eigenschaften sechs Gesteinsgruppen zugeordnet (Tab. 3).

Zur Verdeutlichung der strukturellen Zusammenhänge wurden auf den einzelnen Modellebenen die wesentlichen tektonischen Strukturelemente hervorgehoben. Zur Modellvereinfachung wurde von einem senkrechten Einfallen der tektonischen Störungen ausgegangen.

Weiterhin wurden die geologischen Grenzen dargestellt, die die geologischen Struktureinheiten voneinander trennen. Dabei wurden die typischen Lagerungsformen, z. B. von Magmatiten, Gesteinsgängen etc. nach Möglichkeit berücksichtigt.

Anlage 1 zeigt die Oberflächenebene des geologisch-tektonischen Strukturmodells, Anlagen 2 bis 6 zeigen die Modellebenen 1000 m unter Gelände bis 5000 m unter Gelände.

4.2.2 Geothermisches Modell

Ein auf dem geologisch-tektonischen Modell aufsetzendes 3D-Modell der räumlichen Verbreitung der geothermischen Parameter (Arbeitsbegriff: geothermisches Modell) bis in eine Tiefe von 5000 m existiert für den Freistaat Sachsen ebenfalls bisher nicht.

Unter dem Arbeitsbegriff geothermisches Modell werden nachfolgend die verfügbaren Daten und Modellberechnungen zusammengefasst, die zur Einschätzung der Gesteinstemperaturen und des geothermischen Potenzials im Tiefenbereich bis 5000 m verwendet wurden (BOECK u. a. 2005). Es beinhaltet

- alle Messpunkte (Bohrungen, bergmännische Aufschlüsse, Thermalwasseraustritte), für die bis in den Tiefenbereich von ca. 1000 m Temperaturmessungen vorliegen sowie die schematische Ableitung der Startwerte für die oberste Modellebene;
- die Extrapolation der Gesteinstemperaturen von der Tagesoberfläche bis in die Tiefe von 5000 m einschließlich Fehlerbetrachtung und
- die Einschätzung des geothermischen Potenzials im Sinne des möglichen Wärmeentzuges.

4.2.2.1 Messpunkte und Ableitung der Modellstartwerte

Die reale Messdatendichte auf sächsischem Gebiet ist sehr gering und für eine Interpolation der Gesteinstemperaturen in größerer Tiefe nicht ausreichend. Anl. 1 zeigt die durch BOECK u. a. (2005) recherchierten geothermisch relevanten Punktdaten.

Tab. 3: Zuordnung der Gesteinskomplexe zu den Gesteinsgruppen

Gesteinsgruppe	Kurzbezeichnung	Zugeordnete Gesteinskomplexe
1	permeable Sedimente des Deckgebirgsstockwerkes	Quartär, Tertiär, Mesozoikum
2	wenig permeable Sedimente und Metamorphite	Zechstein
		Rotliegend, ungegliedert
		oberes Rotliegend
		unteres Rotliegend
		Siles (Oberkarbon)
		Hohes Dinant, Hainichener Schichten etc.
		Dinant, Kulm
		Devon
		Silur
		Ordovizium - Devon, ungegliedert
		Ordovizium
		Kambrium
		Vendium (Grauwacke etc.)
3	Intermediäre Intrusiva	Granodiorit
		Zweiglimmergranodiorit (Anatexit)
		Ostlausitzer (Seidenberger Granodiorit)
4	Gneise und niedrig fraktionierte (ältere) Metamorphite und Granitoide	Muskovit-Plattengneis
		Granulit im Verband mit Muskovit-Plattengneis
		Orthogneis (Rotgneis)
		Balstomylonitischer Augengneis
		Rumburger Granit u. ä.
		Oberes Riphäikum, ungegliedert
		Preßnitzer Gruppe und Äquivalente
		Ostergbergische Gruppe und Äquivalente
		Mittl. Riphäikum: Waldheimer Gruppe
5	Saure Magmatite mit mäßiger Wärme- produktion	Karbon bis Perm, saure u. intermed. Ganggesteine
		Karbon bis Perm, ältere Granite
		Karbon bis Perm, Monzonite
		Perm, Quarzporphyr
		Perm, Ignimbrite
		Karbon, saure Effusiva, Tuffe
		Karbon, saure Effusiva, Quarzporphyr
		Karbon, saure Effusiva, Ignimbrite
6	Saure Magmatite mit hoher Wärme- produktion	Karbon bis Perm, jüngere Granite
		Granit von Mittweida
		Teplitzer Quarzporphyr

Es ist eine sehr ungleichmäßige Verteilung festzustellen, da die Aufschlüsse im Rahmen der Lagerstätten-suche/-erkundung tiefliegender Lagerstätten angelegt wurden und nur selten auf die Ermittlung

geothermischer Parameter ausgerichtet waren. Viele Ergebnisse aus Bohrungen spiegeln lokale Besonderheiten wider und eignen sich somit nicht für eine repräsentative Parameterermittlung der geologischen Einheiten.

Eine Tiefe über 1500 m erreichen innerhalb Sachsens nur einige Bohrungen im Spremberger Raum und ein Bergwerksaufschluss der ehemaligen SDAG Wismut im Raum Schlema-Alberoda. Sowohl im Nordwestsächsischen Vulkanitkomplex als auch im gesamten Gebiet des Lausitzer Granodiorits und des sich nordwestlich anschließenden Deckgebirges - einschließlich der Elbtalzone - gibt es bislang keine geothermisch relevanten Aufschlüsse.

Aus Daten von vorhandenen Messpunkten wurde von BOECK u. a. (2005) folgende Verteilung der Parameter *Wärmeleitfähigkeit* λ , *radiogene Wärmeproduktion* A , *Wärmeflussdichte* q und *Temperaturgradient* ϖ auf die einzelnen Gesteinsgruppen des geologischen Modells abgeleitet.

Wärmeleitfähigkeit λ

Die *Wärmeleitfähigkeit* bestimmt entscheidend den Wärmetransport zur Oberfläche und damit das Temperaturfeld im Untergrund. Gesteinskörper geringerer Leitfähigkeit bewirken einen „Wärmestau“ und damit höhere Gesteinstemperaturen, Gesteinskörper erhöhter Wärmeleitfähigkeit dagegen einen „Kamineffekt“ und somit niedrigere Gesteinstemperaturen im Untergrund.

Die gemessenen λ -Werte bezogen auf die Gesteinsgruppen des geologischen Modells zeigt Abb. 2. Dabei ist zu beachten, dass Messdaten für die Granodiorite der Lausitz fehlen und auch die Werte für Granite unterbestimmt sind. Die höhere Wärmeleitfähigkeit der jüngeren Granite (1 Messwert) ist zu überprüfen.

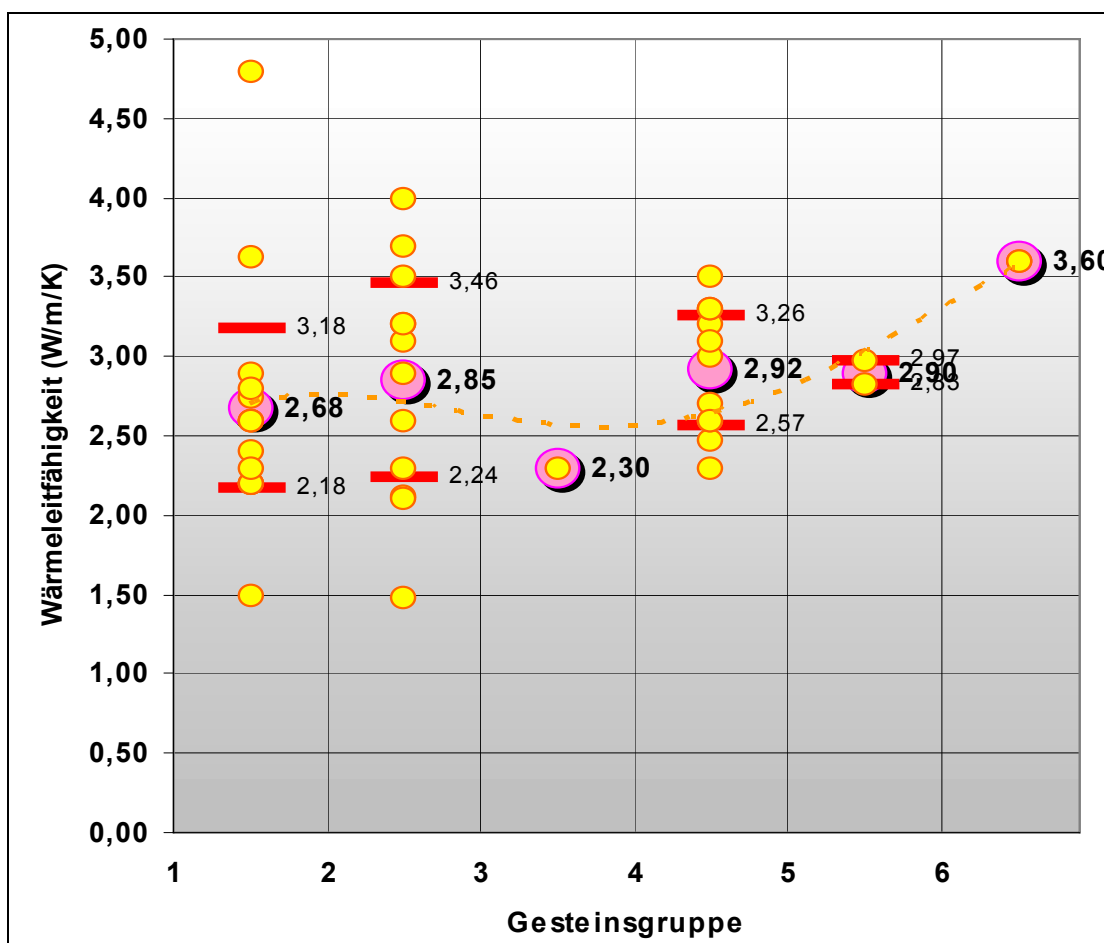


Abb. 2: Messwerte der Wärmeleitfähigkeit λ an Standorten in Sachsen und seiner Umgebung bezogen auf die Gruppeneinteilung der Gesteine im geologischen Modell (1 - Lockersedimente, 2 - Schiefer und wenig poröse Sedimentgesteine, 3 - Granodiorit, 4 - Gneis, 5 - ältere und undifferenzierte Granite, 6 - jüngere und hochdifferenzierte Granite) nach BOECK u. a. (2005); gelbe Kreise: Einzelmesswerte; rosa Kreise: Mittelwerte; rote Balken: Streubereich Mittelwert

Radiogene Wärmeproduktion A

Aufgrund der Erkundungsschwerpunkte in Sachsen dominieren die Daten für die Granite und der sauren Ergussgesteine. Abb. 3 zeigt die A-Werte bezogen auf die Gesteinsgruppen.

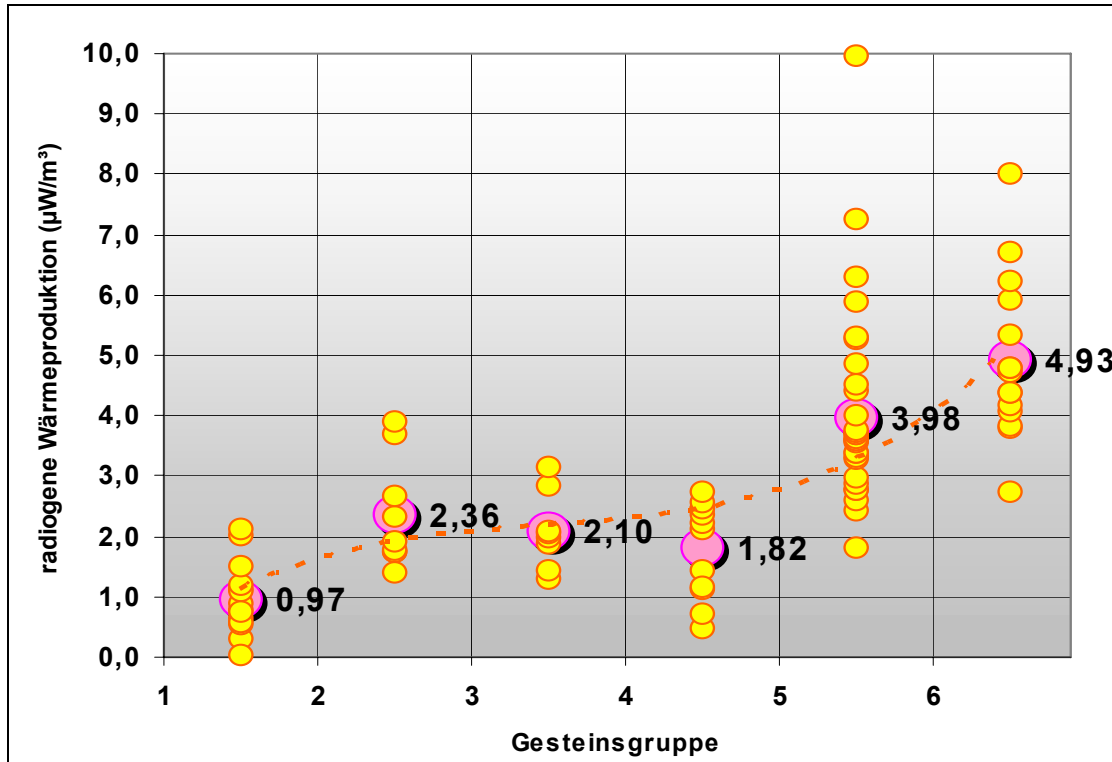


Abb. 3: Messwerte der radiogenen Wärmeproduktion A an Gesteinen aus Sachsen und seiner Umgebung bezogen auf die Gruppeneinteilung der Gesteine im geologischen Modell (1 - Locker-sedimente, 2 - Schiefer und wenig poröse Sedimentgesteine, 3 - Granodiorit, 4 - Gneis, 5 - ältere und undifferenzierte Granite, 6 - jüngere und hochdifferenzierte Granite) nach BOECK u. a. (2005)
gelbe Kreise: Einzelmesswerte; rosa Kreise: Mittelwerte

Die Wärmeproduktion des Deckgebirgsstockwerkes, der metamorphen Gneise und der Granodiorite ist naturgemäß gering, die der oberflächennah aufgeschlossenen Granite liegt im Vergleich dazu deutlich höher.

Wärmeflussdichte q_{kond}

Die Wärmeflussdichte ist das Produkt aus Temperaturgradient und Wärmeleitfähigkeit. Sie konnte nur an weniger als der Hälfte der Standorte in Sachsen sicher bestimmt werden.

Sowohl über Sedimentgesteinen als auch über den Graniten zeigen sich lokal deutlich erhöhte Werte der Wärmeflussdichte bedingt durch hohe A-Werte in den Graniten (FÖRSTER & FÖRSTER 2000).

Temperaturgradient ϖ

Da der Temperaturgradient über die Wärmeleitfähigkeit λ und die radiogene Wärmeproduktion A gesteuert wird, ist eine Kenntnis dieser beiden Parameter für eine Abschätzung der Temperatur-Tiefen-Zunahme von essentieller Bedeutung.

Hohe Wärmeleitfähigkeiten können bei geringem A zu einer geringen Temperatur-Tiefen-Zunahme führen, was im Gegenzug durch ein hohes A kompensiert werden kann. Umgedreht, können Gesteine geringer Wärmeleitfähigkeit eine schnellere Temperatur-Zunahme mit der Tiefe erzeugen. Die Untersuchung genau dieser Zusammenhänge steht für die Zielgebiete noch aus und wird erst bei Anarbeitung thermischer Gesteinsparameter durch Messwerte in den Vorzugsgebieten möglich.

Für die Parametrisierung des geologischen Modells wurden die Mittelwerte der für die Gesteinsgruppen ermittelten o. g. geothermischen Parameter eingesetzt. Dabei ist zu beachten, dass diese Werte nur bis in einen Teufenbereich von ca. 1000 m unter Gelände als belegt anzusehen sind.

Diese Werte wurden durch BOECK u. a. (2005) als Startwerte der obersten Modellebene angesetzt und in mehreren Modelldurchläufen iterativ verbessert. Die beste Annäherung wird als „wahrscheinliche“ Modellparametrisierung bezeichnet. Durch Veränderung der Parametrisierung in Richtung „negativer“ und „positiver“ Auswirkungen auf die sich daraus ergebenden Temperaturen in der Tiefe wurden weitere Modelle mit einer „optimistischen“ und einer „pessimistischen“ Parametrisierung berechnet. Abb. 4 und 5 zeigen die Ergebnisse dieser Parametrisierung.

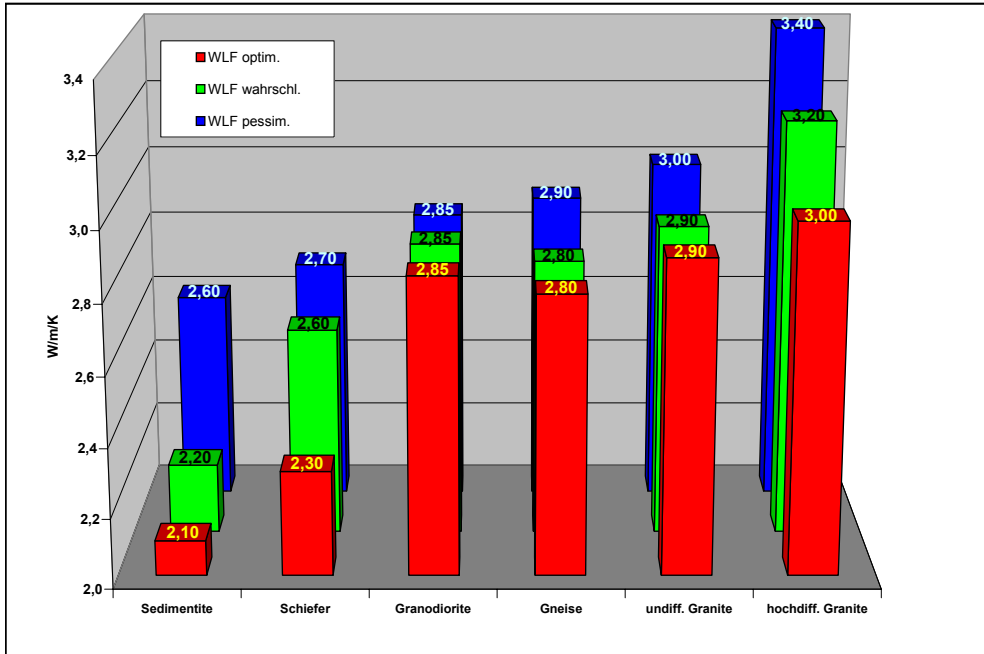


Abb. 4: Wärmeleitfähigkeit - Parametervorgabe für die oberste Modellebene

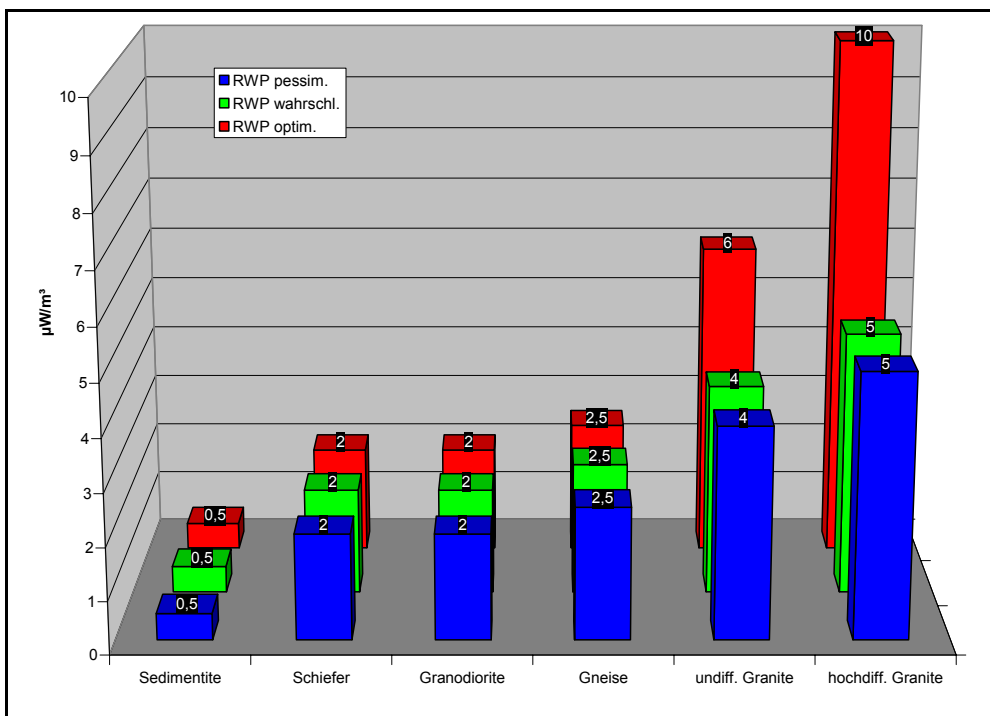


Abb. 5: radiogene Wärmeproduktion - Parametervorgabe für die oberste Modellebene

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Modellergebnisse der „optimistischen“ Modellparametrisierung bevorzugt diskutiert, da konkrete Hinweise existieren (z. B. erhöhte Temperatur-Gradienten im Raum Schlema-Alberoda), dass durch die flächenhafte Modellierung bedingt o. g. Parameter zu stark unterdrückt werden.

4.2.2.2 Extrapolation der Gesteinstemperaturen bis in die Teufe von 5000 m

Auf Grundlage des geologischen Modells und der Parameterzuordnung erfolgte durch BOECK u. a. (2005) die Extrapolation der Gesteinstemperaturen nach der Teufe.

Die Berechnung der Gesteinstemperatur für die nächstfolgende Modellebene erfolgte unter Beschränkung auf den eindimensionalen Fall nach der Formel

$$T_1 = T_0 + (q_{z,0} \cdot \Delta z / \lambda_0) - (RWP_0 \cdot \Delta z^2 / 2 \lambda_0)$$

T_0 Temperatur in der höher liegenden Modellebene; bei $z = 0$ ist $T_0 = JMT$

T_1 Temperatur in der Modellebene 1

$q_{z,0}$ Wärmeflussdichte an der Oberfläche,

λ_0 mittlere Wärmeleitfähigkeit der Scheibe zwischen Ebene 0 und Ebene 1,

RWP_0 mittlere Wärmeproduktion der Scheibe zwischen Ebene 0 und Ebene 1,

Δz Abstand der Modellebenen in vertikaler Richtung.

Der Wärmefluss an der Oberseite einer Modellscheibe setzt sich dabei aus einem hindurchgeleiteten Anteil ($\lambda_0 \cdot (T_1 - T_0) / \Delta z$) und einem innerhalb der Scheibe erzeugten Anteil $1/2 (RWP_0 \cdot \Delta z)$ zusammen, die sich an der jeweiligen Scheibenoberfläche addieren.

$$q_{z,0} = (\lambda_0 \cdot (T_1 - T_0) / \Delta z) + 1/2 (RWP_0 \cdot \Delta z)$$

Für jeden der 18.455 Rasterpunkte des Modells wurde die aus der Geologie und der Parameterzuordnung resultierende Gesteinstemperatur über ein Rastermodell von 1 km x 1 km berechnet. Für Sachsen ergab sich für die Teufenintervalle 0-500 m, 500-1000 m, 1000-1500 m, 1500-2000 m und 2000-5000 m die in Tab. 4 dargestellte optimistische Modellparametrisierung

Tab. 4: Optimistische Modellparametrisierung nach iterativer Verbesserung des Parametersatzes (WFD in W/m^2 , WLF in $W/m \cdot K$ und RWP in $\mu W/m^3$)

Tiefenintervall	Parameter	Gesteinsgruppe					
		Sedimentite 1	Schiefer 2	Granodiorite 3	Gneise 4	undiff. Granite 5	hochdiff. Granite 6
0...500 m	WFD	0,075	0,065	0,060	0,075	0,095	0,110
	WLF	2,10	2,30	2,85	2,80	2,90	3,00
	RWP	0,5	2,0	2,0	2,5	4,0	6,0
500...1000 m		1	2	3	4	5	6
	WLF	2,30	2,45	2,72	2,67	2,77	2,86
	RWP	0,5	2,0	2,0	2,5	8,0	10,0
1000...1500 m		1	2	3	4	5	6
	WLF	2,45	2,60	2,69	2,64	2,74	2,83
	RWP	0,5	2,0	2,0	2,5	8,0	10,0
1500...2000 m		1	2	3	4	5	6
	WLF	2,55	2,66	2,67	2,63	2,71	2,81
	RWP	0,5	2,0	2,0	2,5	6,0	8,0
2000...5000 m		1	2	3	4	5	6
	WLF	2,65	2,67	2,68	2,63	2,72	2,82
	RWP	0,5	2,0	2,0	2,5	4,0	6,0

Während in der optimistischen Schätzung die Temperatur in 5000 m Teufe in ganz Sachsen über 100 °C liegt und lokal bis zu 170 °C erreicht, ergeben sich in der pessimistischen Schätzung Spitzenwerte von 135 °C (Abb. 6).

Die Änderungen am Parametersatz wirken sich regional nur an den Stellen aus, an denen Gesteine anstehen, deren Eigenschaften besonders stark variieren. Folglich gibt es z. B. fast keine Änderungen im Bereich der Lausitzer Granodiorite. Vergleichsweise starke Abweichungen gibt es dagegen im Bereich der Granite und deren Ergussäquivalente, wo die Modelle um maximal 70°C voneinander abweichen (Abb.6).

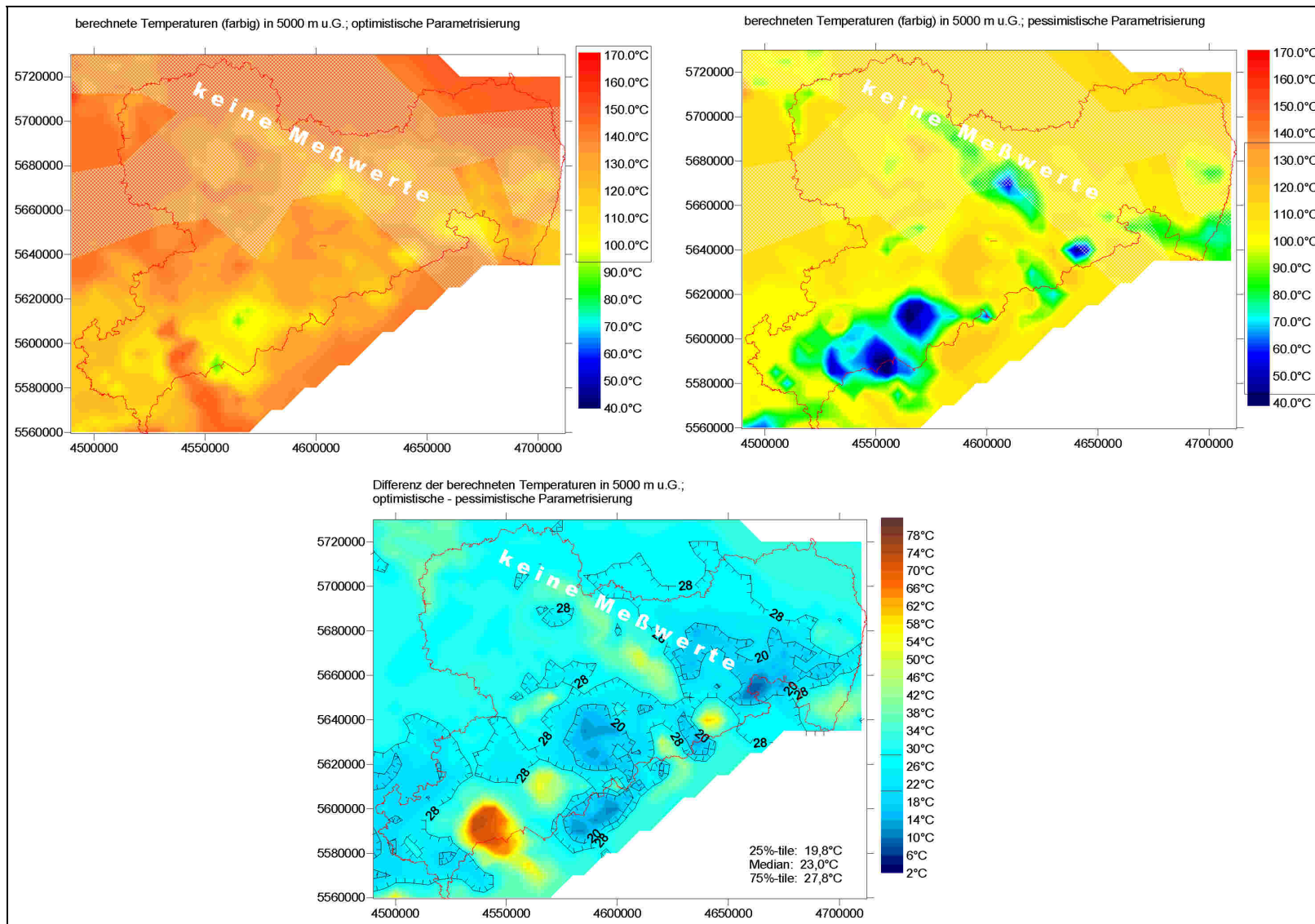


Abb. 6: Berechnete Temperaturen in 5000 m Tiefe, oben links für die optimistische Parametrisierung, oben rechts für die pessimistische Parametrisierung; unten: Differenz der berechneten Temperaturwerte nach BOECK u. a. (2005)

Abgesehen von den Granitoiden liegen die Abweichungen der Modelle gegeneinander trotz z. T. recht drastischer Änderung der Materialeigenschaften in einem großen Flächenanteil bei weniger als 25°C (Abb. 6). Auf diese Zahl dürfte der maximale Temperaturfehler der Extrapolation einzugrenzen sein. Bezogen auf den wahrscheinlichen Mittelwert der Temperatur in 5000 m Tiefe für den Freistaat Sachsen von zirka 125 °C würde ein Temperaturfehler von 25°C genau 20 % ausmachen.

4.3 Lösungsansätze für ein tiefes Geothermieprojekt in Sachsen

In Sachsen gibt es aufgrund der geologischen Ausgangsposition grundsätzlich 2 Lösungsansätze für tiefe Geothermieprojekte:

- begrenzte Nutzung eines hydrothermalen Systems (nur Wärmenutzung; keine Stromgewinnung möglich)
- Nutzung eines petrothermalen Systems zur Stromgenerierung und Wärmenutzung

Im Kap. 4.3.2 werden einige wesentliche Voraussetzungen und erforderlichen Parameter erläutert, die für die Durchführung eines petrothermalen Projektes unabdingbar sind. Grundlage dafür sind u. a. die Arbeitshilfen für die geologischen Dienste der Bundesländer (2007a, b).

4.3.1 Geologische Voraussetzungen für hydrothermale Geothermie (NE-Sachsen)

Im Raum Boxberg, Weißwasser, Bad Muskau und Rothenburg/Neiße befinden sich die regionalgeologischen Deckgebirgseinheiten der Lausitzer Triasscholle und der Nordsudetischen Kreidesenke mit ihrem Ausläufer, der Boxberger Kreidesenke. Dieser Raum besitzt durch seine Führung von Formationswässern in bestimmten stratigraphisch definierten Einheiten ein hydrothermales geothermisches Potenzial, welches bisher unzureichend erforscht und erschlossen wurde.

Auf Grundlage von mehreren Tiefbohrungen im Zusammenhang mit der Erkundung der Kupferlagerstätte Spremberg, der Erdöl-/Erdgasvorkommen Döbern/Raden, der Thermalwasserbohrung Bad Muskau und in der Literatur veröffentlichter Bohrungen auf dem angrenzenden Territorium von Polen können die geologischen Tiefenverhältnisse entlang der Schnittspur A-B (s. Anl. 1) bis in Teufen von ca. 2500 m beschrieben und hinsichtlich ihres geothermischen Potenzials grob eingeschätzt werden.

In der Nordsudetischen Kreidesenke sind im Bereich Weißwasser-Bad Muskau unter einer bis zu 200 m mächtigen Abfolge von Lockersedimenten des Quartärs und Tertiärs im Zentrum der Senke ca. 1100 m Schluffsteine, Tonsteine und Mergelsteine der Oberkreide (kro) abgelagert. Sowohl in Richtung NE, zur Struktur Döbern Ost als auch in Richtung SW, zur Struktur Mulkwitz nimmt die Mächtigkeit kontinuierlich bis auf 0 m ab (s. Abb. 7). Auf Grund der lithofaziellen Ausbildung der Oberkreide muss der gesamte Komplex überwiegend als Formationswasser freier Horizont (Grundwassergeringleiter) betrachtet werden. Eine untergeordnete Kluft-Grundwasser-Führung kann lediglich in den Randbereichen der tektonisch angelegten Strukturen von Mulkwitz und Döbern Ost vorkommen.

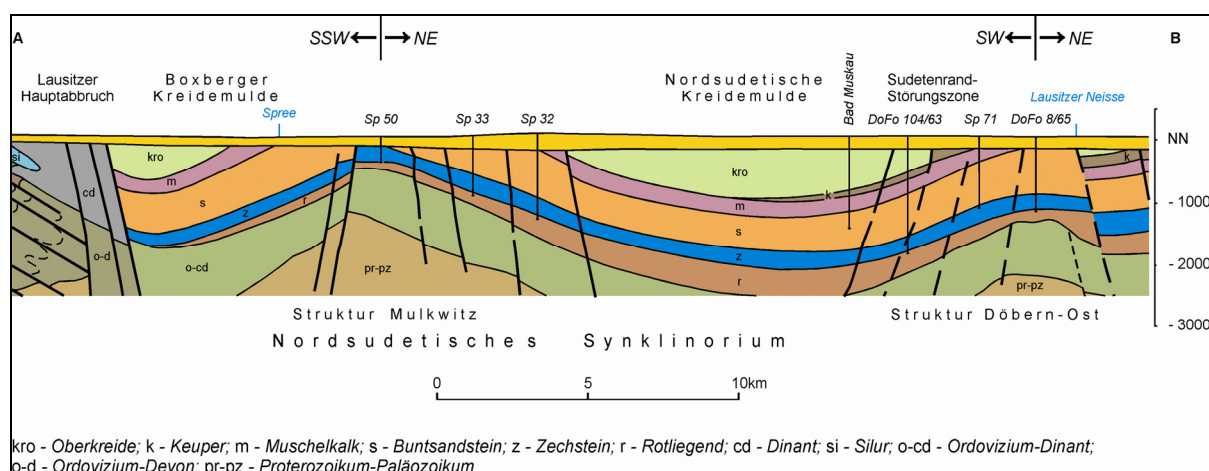


Abb. 7: Geologischer Tiefenschnitt Boxberg-Weißwasser-Bad Muskau-Lausitzer Neiße (BERGER, H.-J. in ZITZMANN, A.: Geologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland, 1 : 200 000, Blatt Cottbus, Hannover 2003)

Insbesondere an der NE-Flanke der Senke folgen darunter ca. 50 bis 100 m mächtige Sedimente des Keuper, die aus Tonsteinen, Siltsteinen und Mergelsteinen bestehen und ebenfalls überwiegend als Formationswasser freie Horizonte (Grundwassergeringleiter) fungieren.

Der Muschelkalk (m), in der gesamten Senke mit ca. 150 bis 230 m Mächtigkeit verbreitet, streicht an der NE-Flanke der Struktur Mulkwitz und an der SW-Flanke der Struktur Döbern-Ost unter dem Känozoikum aus. Kalksteine, Kalkmergelsteine und Tonsteine sind die wesentlichen Gesteine und wirken überwiegend als Formationswasser freie Horizonte (Grundwassergeringleiter). Bei entsprechend vorhandener Tektonik (Sudetenrand-Störungszone) können sie als gute Kluftwasserleiter fungieren.

Im darunter vorkommenden Buntsandstein (s) besitzt der obere Teil, ca. 150 m mächtig, mit Mergelsteinen, Tonsteinen und horizontbeständigen Anhydrit- bzw. Gipseinschaltungen stauende Eigenschaften.

Der anschließende Mittlere Buntsandstein ist ca. 250 bis 350 m mächtig und setzt sich aus einer Wechselfolge von fein- bis mittelkörnigen Sandsteinen mit hoher Porosität und Permeabilität zusammen. Eingeschaltet sind grobkörnige bis konglomeratische Sandsteine. Dieser Grundwasserleiter mit Doppelporositätseigenschaften besitzt als **oberer Formationswasser-Horizont** ein hydrothermales geothermisches Potenzial.

Im ca. 150 m mächtigen Unteren Buntsandstein kommen neben Sandsteinen, auch Schluffsteine und dolomitische Sandsteine vor, so dass dieser Horizont insbesondere in seinem unteren Abschnitt schlechte hydraulische Eigenschaften besitzt.

Der Zechstein (Werra- bis Aller-Folge) unterlagert in der gesamten Senke die bisher aufgeführten Abfolgen mit einer Mächtigkeit von bis zu 250 m. Die verschiedenen Steinsalze, Anhydrit, Dolomit und besonders der rote und der graue Salzton stellen einen nahezu von Formationswasser freien Horizont (Grundwassergeringleiter) dar.

Im Liegenden des Zechsteins wurde durch die tiefste sächsische Bohrung Döbern 104/63 (EDoFo 104/63) bei Köbeln, nördlich Bad Muskau an der SW-Flanke der Struktur Döbern-Ost in 1900 m Tiefe Sedimente des Rotliegend erbohrt, die sich aus mittel- bis grobkörnigen Sandsteinen und Konglomeraten zusammensetzen. Ähnliche Verhältnisse haben unter anderem an der NE-Flanke der Struktur Mulkwitz die Bohrungen CuSp 32, CuSp 33, CuSp 50 und CuSp 76 (Kupfer-Spremberg) angetroffen. Letztere Bohrung hat das Rotliegend hier mit 130 m Mächtigkeit durchbohrt. Innerhalb der Senke bilden die Sedimente des Rotliegend den **unteren Formationswasser-Horizont**.

Oberer Formationswasser-Horizont

Der obere Formationswasser-Horizont ist ein Poren-Kluft-Grundwasserleiter, der in der Nordsudetischen Kreidensenke von Sedimenten des Mittleren Buntsandsteins, vorwiegend verschieden körnige Sandsteine, gebildet wird. Dieser Aquifer kommt je nach Lage zur NW-SE verlaufenden Achse der Senke in einem Teufenbereich von 1000 m bis 1300 m bzw. 1300 m bis 1600 m vor (s. Abb. 7). Die Fließrichtung dieser Wässer ist jeweils auf die Beckenachse bzw. das Zentrum der Senke gerichtet. Die Senke ist insgesamt nach NW geneigt, so dass generell ein Strömungssystem nach NW ausgebildet ist. Bisher wurden die Fluida in Sachsen nur durch die Bohrung Bad Muskau nachgewiesen.

Nach MÜLLER (mündl. Information 2007) besitzen die geothermalen Wässer am Bohrlochkopf eine Temperatur von 45 bis 48 °C, im Speicher ca. 62 °C. Die Mineralisation ist in Tab. 5 dargestellt.

Tab. 5: Mineralisation der Wässer in der Bohrung Bad Muskau

Komponente	Mineralisation (in mg/l)	Komponente	Mineralisation (in mg/l)
Na	26600	Chlorid	42713
Ca	1831	Sulfat	3569
Mg	327	Hydrogencarbonat	226
K	257		

Der Aquifer führt geothermale höher mineralisierte Wässer des Na-Ca-Cl-Typs mit einer Mineralisation von ca. 85 g/l. Pumpversuche ergaben eine Ergiebigkeit von 3 l/s bzw. 250 m³/d.

Die Formationswässer entstanden im Diagenesestadium durch Mischung von syngenetischen Porenwässern mit hochkonzentrierten diagenetisch aus dem Zechstein ausgepressten Lösungen.

Für eine wärmetechnische Nutzung dieses Aquifers sind die Temperaturen geeignet. Genutzt wird das Wasser dieses Aquifers z. B. auch über die Thermalwasser-Bohrung Burg/Spreewald (Land Brandenburg) aus einer Tiefe von 1350 Metern mit einer Konzentration von 24 Prozent und einer Temperatur von 51°C im angeschlossenen Badekomplex der Spreewald-Therme (Atlas zur Geologie von Brandenburg 1999).

Unterer Formationswasser-Horizont

Der untere Formationswasser-Horizont, ebenfalls ein Poren-Kluft-Grundwasserleiter, kommt im Rotliegend vor und wird durch den oberhalb liegenden Grundwassergeringleiter der Zechstein-Formation abgedichtet. Der Aquifer wird aus wechselnd körnigen Sandsteinen und Arkosen mit eingeschalteten polymikten Konglomeraten aufgebaut. Die Fazies-Verteilung der überwiegend fluviatilen Sedimente wird durch die paläogeographischen Bedingungen gesteuert, wobei es je nach dem Vorkommen von Porenzement zu einer diagenetisch unterschiedlich intensiven Verfestigung kommt. Die Porositäten reichen bis zu 20 % und die Permeabilitäten bis zu 200 Millidarcy. In der Nordsudetischen Senke wurden sie in Teufenbereichen ab 1900 m an der SW-Flanke der Struktur Döbern Ost, auf der NE-Flanke der Struktur Mulkwitz ab ca. 400 m und im Senken-Zentrum ab ca. 2100 m angetroffen. Weiter im SE, bei Rothenburg/Neiße steigt die Oberkante des Rotliegend auf ca. 1500 m unter Gelände an.

Das Rotliegend wurde bisher lediglich an der Flanke der Struktur Mulkwitz in der brandenburgischen Bohrung Kupfer Spremberg 76 mit 130 m Mächtigkeit durchbohrt. Im Senkenzentrum ist eine Mächtigkeit von ca. 300 m auf Grund der östlich von Bad Muskau liegenden polnischen Bohrung Przewoz 1 wahrscheinlich. Generell muss auf Grund des geologischen Baus der Nordsudetischen Senke die Fließrichtung auch innerhalb des Rotliegend jeweils von den Senkenrändern in das Zentrum und hier in Richtung NW erfolgen. Das hydrothermale geothermische Potenzial dieses Aquifers ist in Sachsen bisher weder erforscht noch bekannt.

4.3.2 Geologische Voraussetzungen für petrothermale Systeme

Für petrothermale Systeme existieren in Sachsen aus geologischer Sicht optimale Voraussetzungen.

Zum einen ist innerhalb tiefreichender regionaler Störungszonen ein ausgeprägtes Ruptureninventar zu erwarten, das besonders günstige Voraussetzungen für Frac-Stimulationen bietet.

Zum anderen treten hochdifferenzierte Granite mit hoher radiogener Wärmeproduktion in diesen lineamentären Bruchzonen des sächsischen Grundgebirges auf (TONNDORF 2008). Zu diesen Zonen zählen die **Gera-Jáchymov-Zone** und die **Elbezone**.

Dazu gesellt sich die NW-SE streichende **Bruchzone zwischen Frauenstein und Freiberg**. Unter Freiberg wurde in der älteren Literatur als „Erzbringer“ für die intensiven Ag-Pb-Zn-Vererzungen nach der Teufe ebenfalls ein Granitpluton vermutet (KRAFT & TISCHENDORF 1960).

Die untertägige Verbreitung des Granites von Niederbobritsch sollte tiefenseismisch untersucht werden, wie auch die Teufenfortsetzung des sich ca. 15-20 km erstreckenden sauren Gesteinsganges zwischen Frauenstein und Freiberg.

Gute Ausgangsbedingungen unter diesen Gesichtspunkten besitzen zunächst auch das **SW-Vogtland** und das **Delitzscher Massiv** mit seiner Peripherie.

Es liegt daher nahe, ein petrothermales System in Sachsen innerhalb einer solchen Störungszone einzurichten.

Die Gewinnung geothermischer Energie erfolgt bei petrothermalen Systemen unabhängig von sedimentären Aquiferen innerhalb des kristallinen Grundgebirges. In einem ersten Realisierungsstadium wird durch Einpressen von Wasser in eine Bohrung das natürlich vorhandene Kluft- und Störungssystem geweitet, die natürliche Permeabilität erhöht und zusätzlich eine bessere Wegsamkeit geschaffen; das Gebirge wird „stimuliert“. Die entstandenen Risse stellen große Wärmetauscherflächen dar. Im späteren Kraftwerksbetrieb wird Oberflächenwasser über Injektionsbohrungen zur Aufnahme der Erdwärme in das künstlich entwickelte Reservoir gepresst und anschließend über Förderbohrungen dem Kraftwerk zugeleitet.

Mit diesen Systemen ist die Nutzung der in Kap. 4.2.2.2. modellierten Untergrundtemperaturen verbunden. Für eine effektive Stromerzeugung müssen zur Absicherung der erforderlichen Energiezufuhr die geologisch-geothermisch besonders geeigneten Grundgebirgsbereiche ausgewählt werden.

Für die Projektierung sind am Projektstandort folgende Parameter und Randbedingungen zu überprüfen, zu präzisieren sowie im Rahmen spezieller Untersuchungen von Übertage oder in der Vorbohrung zu ergänzen (Bund-Länder-Arbeitskreis, 2007b):

- **Thermophysikalische Gesteinseigenschaften** (Gesteinstemperatur, Wärmeleitfähigkeit, Dichte, spezifische Wärmekapazität, Wärmeproduktionsrate)

Bei Nachweis eines relativ dichten Gesteins kann aus dem Oberflächenwärmestrom eine Temperaturextrapolation in die Tiefe nur unter Berücksichtigung der Wärmeleitfähigkeit und der Wärme-

produktionsverteilung mit der Tiefe erfolgen. Insbesondere zur Abschätzung des Abstandes zwischen den Injektions- und Förderbohrungen voneinander sowie zur Ermittlung der thermischen Reichweite und zur Prognose der Lebensdauer der Anlage und Alterung des Systems ist die Kenntnis thermophysikalischer Gesteinsparameter wichtig.

- **Hydraulische Eigenschaften** (Permeabilität der Trennflächensysteme)

Entscheidend für den Erfolg einer EGS-Anlage sind die Vorabkenntnisse der hydraulischen Eigenschaften des unterirdischen Rupturensystems vor und nach der Frac-Stimulierung. Wesentlichen Einfluss auf den Erfolg der Stimulationsmaßnahme haben Injektionsmenge, Injektionsrate, Injektionsdruck bzw. Druckgradient sowie die hydrochemischen Eigenschaften des Injektionsfluids.

Um die für die Energiegewinnung notwendigen Durchflussraten und Temperaturen im Trennflächensystem zu erzielen, muss letzteres eine gewisse Mindestgröße aufweisen. Mit zunehmender Durchlässigkeit erniedrigt sich der Fließwiderstand; andererseits birgt eine zu hohe Durchlässigkeit die Gefahr hydraulischer Kurzschlüsse und somit unzureichender Wärmeübertragung.

- **Formationsdruck**

Für das Abteufen der Bohrung und die später vorgesehenen hydraulischen Maßnahmen im Nutzungsbereich ist die Kenntnis hydrostatischer und lithostatischer Drücke im Untergrund von wesentlicher Bedeutung.

- **Tektonische Spannungen**

Die in-situ-Spannung im Gestein (Bohrloch-Elongationen, Bohrlochrandausbrüche) und die natürlich vorhandene Permeabilität sollte vor dem Beginn der Frac-Stimulationen bestimmt werden, da dies sowohl für die Beurteilung der erfolgten Stimulation als auch für die Beurteilung der Seismizität bedeutsam ist.

- **Übertägiger Raumbedarf, Größe des Wärmetauschers**

Die Zielpunkte der Bohrungen müssen sich am natürlichen Stressfeld orientieren. Sollten Vertikalbohrungen verwendet werden, so ist dies bei der Festlegung der Bohrpunkte (Abstand mehrere 100 m) zu berücksichtigen.

- **Eigenschaften des Formations-Fluids**

Die Wässer im kristallinen Grundgebirge sind mineralisiert, wobei der Gesamtlösungsinhalt stark variiert. Die Hauptinhaltsstoffe sind Na, Ca und Chlorid. Es ist mit erhöhten Gasgehalten zu rechnen (BUCHER & STOBER 2000; WEINLICH 2008). Um den Fällungs- und Lösungsprozessen sowie der Aggressivität des zutage geförderten hoch mineralisierten, evtl. gasreichen Fluids entgegen wirken zu können, müssen die hydro- und physikalisch-chemischen Eigenschaften des Formations-Fluids bekannt sein.

Gesteine, die leicht lösliche radiogene Minerale enthalten, sind unter Einfluss von geothermalen Fluiden, die in künstlich erzeugten Bruchsystemen fließen, intensiven Auslaugungsprozesse ausgesetzt. Diese Prozesse, die zur Anreicherung der Fluide mit radioaktiven Stoffen führen, sind im Vorfeld standortspezifisch zu quantifizieren und bei der Standortauswahl zu berücksichtigen.

- **Seismische Messungen**

Bereits im Vorfeld sollte damit begonnen werden, die seismischen Aktivitäten im Umkreis von ca. 10 km um die geplante Geothermieanlage mit einer Empfindlichkeit ab Magnitude 1,0 (Richterskala) kontinuierlich zu messen. Die Messungen sind während des Abteufens der Bohrung, der Stimulation und dem Betrieb - zumindest in der Anfangsphase - fortzuführen. Insbesondere zu Beginn der hydraulischen Injektionen und während der Frac-Stimulationen ist eher mit induzierten Beben zu rechnen als im späteren stationären Produktionsbetrieb. Vorab sollten daher bereits Größe und Richtung der Hauptspannungen durch seismologische Herdflächenlösungen bestimmt werden.

- **Klüftigkeit/Wasserverluste**

Die Wasserverluste sollten möglichst gering bzw. kontrollierbar sein und unter 10 % liegen. Unter der Voraussetzung, dass i. W. nur das vorhandene Kluftnetzwerk ausgenutzt werden kann, sollte die natürliche Kluftdichte des Gebirges mittel bis hoch sein. Ausgeprägte Mylonitisierungen sind unerwünscht. Das natürlich vorhandene Kluftsystem sollte relativ gleichmäßig verteilt sein, um bei den Stimulationen unter dem vorgegebenen Stressfeld eine optimale Größe für die Wärmeaustauschflächen zu erhalten. RYBACH (2004) fordert beispielsweise eine Mindestgröße für die Wärmeaustauschfläche von mehr als 2 km².

Da granitische Gesteinsverbände wesentlich spröder auf tektonische Beanspruchungen reagieren

als metamorphes Gestein, sind Granite meist hydraulisch durchlässiger als metamorphe Gesteine (STOBER 1995; Bund-Länder-Arbeitskreis 2007b).

Durch das EGS-Projekt Soultz-sous-Forêts liegen aus dem Oberrheingraben bereits Erfahrungen aus einem tektonisch beanspruchten Gebiet in einer Dehnungsstruktur im Granit vor. Die Befunde aus dem Gneisgebirge von Bad Urach können noch nicht abschließend beurteilt werden. Das mechanische Verhalten von Graniten und Gneisen ist sehr unterschiedlich. Bestimmte Gneisvarietäten reagieren auf eine mechanische Beanspruchung eher duktil, Granite hingegen eher spröde.

Dennoch werden für EGS-Projekte aus geologischer Sicht derzeit sowohl granitische als auch metamorphe Gesteine als geeignet betrachtet.

- **Reservoirgröße**

Erfahrungen bei EGS-Projekten haben gezeigt, dass sich durch die Stimulation entsprechend dem vorherrschenden Stressfeld meist ein steil stehendes, ellipsoidförmiges Reservoir ausbildet. Die Reservoirgröße sollte ausreichend groß sein und nach RYBACH (2004) mindestens $0,2 \text{ km}^3$ betragen. Daraus ergibt sich ein untertägiger Abstand bei einem Zwei-Bohrloch-System von etwa 1000 m bei einer Länge des unverrohrten Bohrlochabschnittes von etwa 300 m.

- **Stimulationsmaßnahmen**

Bei den Stimulationsmaßnahmen muss eine ausreichend große **Durchlässigkeit** generiert werden. Zu hohe Durchlässigkeit birgt die Gefahr **hydraulischer Kurzschlüsse** und somit unzureichender Wärmeübertragung. Um dieser Gefahr vorzubeugen und eine extreme Stimulation singulärer Klüfte zu vermeiden, empfiehlt es sich, die dafür notwendigen Injektionsversuche, falls technisch machbar, abschnittsweise (mit Einsatz von Packern) durchzuführen. Nach derzeitigem Kenntnisstand liegt die Reichweite einer Stimulationsmaßnahme bei mehreren 100 m.

Der Stimulationsbereich bzw. das Reservoir dürfte sich in Richtung der maximalen horizontalen Hauptspannung des natürlichen Stressfeldes ausbilden.

Darüber hinaus ist während der Such- und Erkundungsphasen (Bund-Länder-Arbeitskreis 2007a) folgendes zu beachten:

- Die Klärung des Verlaufs von Störungen im kristallinen Grundgebirge ist generell wesentlich schwieriger als in sedimentären Ablagerungen. Deshalb sollte nach Festlegung des Projektstandortes ein erstes Ziel in einer möglichst detaillierten geologischen Erkundung des Standortbereiches unter besonderer Beachtung von Störungen liegen. Nach Festlegung des Standortes ist eine Erkundungsbohrung ins kristalline Grundgebirge bis etwa 3000 m abzuteufen. Diese Bohrung kann später als Förderbohrung auf ca. 5000 m vertieft und kommerziell genutzt werden. Bereits in der Vorbohrung sind hydraulische Versuche durchzuführen, um sowohl Aussagen zur Durchlässigkeit und zum Speichervermögen des Untergrundes vor der Stimulation als auch zu den hydrochemischen Eigenschaften der Wässer inklusive deren Gasgehalten zu erhalten. Dadurch kann präventiv auf Ausfällungen reagiert werden. Grundsätzlich sind die Bohrungen und Stimulationsarbeiten durch geophysikalische Bohrlochmessverfahren zu begleiten.
- Es besteht die Möglichkeit, dass die Erschütterungen beim Frac-Versuchen die Wahrnehmbarkeitsschwelle an der Erdoberfläche überschreiten. Das Auftreten von künstlich induzierter Seismizität hängt im Einzelnen von der geologischen Umgebung, den tektonischen Spannungen, den Injektionsdrücken bzw. Fließraten und von der Größe des stimulierten Riss-Systems ab. Das Auftreten von induzierter Seismizität wird bis zu einem gewissen Grade als beurteilbar, prognosefähig und zum Teil als beeinflussbar angesehen. Schlüssel hierzu sind laufende Messungen und Kontrolle des in die Teufe eingebrachten Injektionsdrucks sowie ein seismologisches Monitoring in der näheren und weiteren Umgebung der Anlage. Gegebenenfalls sind die Injektionsdrücke bzw. Injektionsmengen zu reduzieren. In Bereichen, in denen mit erhöhter Seismizität nach DIN 4149 zu rechnen ist, muss der Landeserdbebendienst in die Standortentscheidung mit einbezogen werden.
- Über das Langzeitverhalten der Klüfte und der Gesteinsmatrix im Zuge des Betriebs einer EGS-Anlage gibt es bislang wenige Untersuchungen und keine praktischen Erfahrungen. Möglicherweise dichten sich die Klüftflächen gegenüber der Gesteinsmatrix während einer langen Injektionszeit ab. In der Gesteinsmatrix ist verstärkt mit Alterationsreaktionen oder der Bildung von Sekundärmineralen zu rechnen, wodurch sich die Porosität der Gesteinsmatrix reduzieren kann. Es ist derzeit nicht bekannt, welche Auswirkungen diese Vorgänge auf die Lebensdauer einer EGS-Anlage haben.

4.3.3 Untersuchungsgebiete für petrothermale Geothermie

Die aus geowissenschaftlicher Sicht entsprechend Kap. 4.2 und 4.3.2 ausgewählten Untersuchungsgebiete für ein tiefes petrothermales Projekt in Sachsen werden nachfolgend kurz charakterisiert (s. Anl. 1).

4.3.3.1 Gera-Jáchymov-Zone im Raum Aue-Schwarzenberg-Zwickau

Die regionale, von Bruchstörungen begrenzte Tiefenstörungszone Finne-Gera-Jáchymov hat ein NW-SE-Generalstreichen und ist über ca. 250 km zu verfolgen. Indikationen für ein höheres Alter und eine deutliche Tiefenreichweite bis in die Mittelkruste ergeben sich aus der Tiefenseismik.

Im sächsischen Erzgebirge, dem geothermisch besonders interessanten SE-Teil dieser Zone, treten zahlreiche subparallele Störungen und bedeutende gangförmige Erzlagerstätten auf. Die Lagerstättenbereiche und deren Peripherie sind bis in Teufen von ca. 2000 m gut erkundet. Dadurch ist auch die räumliche Bindung mehrerer kleiner, teilweise verdeckter Apikalgranite in NW-SE-Anordnung innerhalb dieser Zone an der Ostflanke des Eibenstocker Granitmassives gut bekannt.

Ihre besondere Eignung ergibt sich aus

- der Existenz tiefreichender, z. T. vererzter und wasserleitender Mineralgang- und Störungssysteme, die punktuell bis ca. -2300 m Teufe erschlossen sind;
- einer hohen radiogenen Wärmeproduktion im Bereich der hochdifferenzierten Granite, an die mehrere Erzlagerstätten gebunden sind.

Suchziel: Im Untersuchungsgebiet zwischen Schwarzenberg und Aue sind Bereiche zu finden, in denen mögliche Zielgebiete von Tiefbohrungen (in 3000 m bis 5000 m Teufe) von wasserwegsamem Bruchstörungen durchörtert werden. Die Ansatzpunkte dieser Tiefbohrungen sollten möglichst nahe zu anschlussfähigen Wärmerversorgungsnetzen mit angepassten Leistungsumfängen positioniert sein.

Probleme: Das geflutete Grubenrevier der Wismut GmbH in diesem Raum samt Wasseraufbereitungsanlage dürfen nicht negativ beeinflusst werden. Wässer, die während der Such- und Erkundungsphase angetroffen werden, sind auf radiogene Belastung zu prüfen bzw. durch geeignete Maßnahmen zu behandeln. Die Lage des Untersuchungsgebietes in der Erdbebenzone 0 (nach DIN 4149: 2005-04) besagt, dass seismische (gefühlte) Intensitäten zwischen 6 und 6,5 auftreten können (maximal leichte Gebäudeschäden möglich, s. Anl. 7).

Weitere Aktivitäten: Geowissenschaftliche Untersuchungen: Die thermischen und mineralogischen Eigenschaften der Gesteine sind nur unzureichend bestimmt um Fündigkeitsprognosen (auch Tiefenangaben zu den interessierenden Temperaturbedingungen) und Langzeitprognosen über das Wärmeproduktionsverhalten der Granite machen zu können. Das moderne Stress-Feld und die Hydraulik der Störungszone müssen zur gezielten Planung von zukünftigen Frac-Arbeiten studiert werden. Die Klärung technisch-ökonomischer Randbedingungen ist erforderlich. Kontakte zur Wismut GmbH sind aufzunehmen (vgl. Tab. 6).

4.3.3.2 NW-SE-Bruchzone im Raum Freiberg-Frauenstein

Die NW-SE Bruchzone wird durch einen weit aushaltenden Porphyrgang nachgezeichnet. Ein weiteres Argument für die Ausgliederung dieses Untersuchungsgebietes ist ein sich nach Schweremessungen NW-SE erstreckender Granitkörper („Freiberger Pluton“). Dieser, soll in einer ebenfalls NW-SE-streichenden Schwächezone aufgedrungen sein. Der Granit gilt als maßgeblicher „Erzbringer“ für den Großraum des Freiberg-Brandener Lagerstättenreviers. Die kuppelförmige Anordnung der thermalen Abfolgen der Mineral- und Erzparagenesen (tiefster Aufschluss ca. 1830 m Teufe) stützt diese These. Der Pluton selbst konnte bisher noch nicht aufgeschlossen werden.

Die besondere Eignung dieser Bruchzone ergibt sich aus

- der Existenz des sich über ca. 25 km erstreckenden Porphyrganges nordöstlich Frauenstein bis in den Freiberg Raum;
- der Existenz relativ tiefreichender, vererzter Mineralgang- und Störungssysteme in der Peripherie dieser Bruchzone, die im Bereich der ehemaligen Erzlagerstätten gut erkundet sind;
- der Existenz eines kleinen geothermischen Hochs bei Freiberg (OELSNER & HURTIG 1979; FÖRSTER & FÖRSTER 2000; BOECK u.a 2005)
- der Existenz von Fernwärmenetzen in Brand-Erbisdorf und Freiberg.

Der Oberflächenwärmestromwert von 75 mW/m^2 , der in metamorphen Gesteinen der Bohrungen Oberguna 1 gemessen wurde, ist auf die Nähe zum Niederbobritzcher Granit mit erhöhter radiogener Wärmeproduktion zurückzuführen. Der Unterschied in der Wärmeproduktion zwischen Metamorphiten und Graniten liegt bei nur $3 \text{ } \mu\text{W/m}^3$. Außerhalb der Reichweite der Granite, ist das Wärmeangebot als normal einzustufen (z. B. Bohrung Großschirma 1 und 2 (61 mW/m^2) und Reinsberg 1 (64 mW/m^2 ; Daten nach FÖRSTER & FÖRSTER 2000). Das Gebiet liegt außerhalb der Erdbebenzone 0 nach DIN 4149: 2005-04 und ist somit seismisch nicht gefährdet.

Suchziel: Im Untersuchungsgebiet (Stadt- und Industriebereiche von Brand-Erbisdorf und Freiberg) sind Bereiche zu finden, in denen mögliche Zielgebiete von Tiefbohrungen (in 3000 m- bis 5000 m Tiefe) von wasserwegsamen Bruchstörungen durchörtert werden. Besonderes Augenmerk ist auf den Nachweis eines für Fracking besonders geeigneten Granitkörpers zu richten. Die Ansatzpunkte der Tiefbohrungen sollten nur wenige hundert Meter von anschlussfähigen Wärmeversorgungsnetzen mit angepassten Leistungsumfängen entfernt sein.

Probleme: Die Altbergbaubereiche sollten zur Minimierung der Havariegefahr in der Such- und Erkundungsphase umgangen werden.

Weitere Aktivitäten: Im Stadium der Suche ist die Tiefenreichweite der Bruchzone und die Lage des Granitkörpers durch tiefenseismische Untersuchungen zu präzisieren.

Das moderne Stress-Feld und die Hydraulik der Störungszone müssen zur gezielten Planung von zukünftigen Frac-Arbeiten untersucht werden.

Geowissenschaftliche Untersuchungen, Such- und Erkundungsmaßnahmen sowie die Klärung technisch-ökonomischer Randbedingungen sind erforderlich. Kontakte zu regionalen Energieversorgungsunternehmen sind aufzunehmen. Das SOBA ist bereits in Vorbereitung des Standortes einzubeziehen (vgl. Tab. 6).

4.3.3.3 Elbezone im Raum Meißen-Dresden-Pirna

Die Elbezone wird in PÄLCHEN & WALTER (2008, S. 184) als dextrale Scherzone interpretiert, in der proterozoische Grauwacken sowie proterozoische und altpaläozoische Granodiorite, altpaläozoische Grauwacken, Tonschiefer, Quarzite und Vulkanite sowie syn- bis postdeformative variszische Granite, Granodiorite und Diorite (Meißner Massiv) zusammengefasst sind. Sie ist eine bedeutende Bruchzone parallel zum Rand der osteuropäischen Tafel.

Auf den Einfluss dieser lineamentären Bruchzone und den Elementgehalt der in ihrem SE-Abschnitt platzierten Granite führt TONNDORF (2008 S. 329) das Auftreten mehrerer wirtschaftsrelevanter Uranlagstätten zurück. Die intralineamentären Granitvorkommen mit erhöhten Hintergrundgehalten an U und Th im Raum Meißen-Dresden-Pirna sind wesentliche Gründe zur Postulierung dieses Vorzugsgebietes.

Das Gebiet liegt außerhalb der Erdbebenzone 0 nach DIN 4149: 2005-04 und ist somit seismisch nicht gefährdet.

Innerhalb des Untersuchungsgebietes sind mehrere z. T. historische Mineralbrunnen (z. B. Briesnitz, Kemnitz, Falkenbrunnen) bekannt (STORCH u. a. 2000).

Suchziel: Im Untersuchungsgebiet (Großraum Dresden) sind Bereiche zu finden, in denen die mutmaßlichen Zielgebiete von Tiefbohrungen (in 3000 m- bis 5000 m Tiefe) von wasserwegsamen Bruchstörungen durchörtert werden. Besonderes Augenmerk ist auf die Auswahl eines für Fracking besonders geeigneten Granitkörpers zu richten. Die Ansatzpunkte der Tiefbohrungen sollten nur wenige hundert Meter von anschlussfähigen Wärmeversorgungsnetzen mit angepassten Leistungsumfängen entfernt sein.

Probleme: Das gesamte Gebiet der Elbezone ist geothermisch gesehen unterbestimmt. Bisher liegen keine Vorstellungen über eine thermische Zonierung (lateral und vertikal) vor. Ein Minimum im Oberflächenwärmefluss für das Gebiet der Elbesenke (OELSNER & HURTIG 1979) konnte bis zum heutigen Tag anhand fehlender Messwerte nicht belegt werden. Belege aus westlich angrenzenden Regionen gibt es nicht. Wärmestromwerte für das östlich angrenzende Gebiet (die Oberlausitz) sind nicht vorhanden.

Altbergbaubereiche sollten zur Minimierung der Havariegefahr in der Such- und

Erkundungsphase umgangen werden.

Eventuell durch das Vorhaben ausgelöste Erschütterungen dürfen keine negativen Auswirkungen auf die am nördlichen Dresdner Stadtrand gelegenen Werke der Halbleiterindustrie haben.

Weitere Aktivitäten: Geowissenschaftliche Untersuchungen, Such- und Erkundungsmaßnahmen sowie die Klärung technisch-ökonomischer Randbedingungen sind erforderlich. Lage und Tiefenreichweite der im Suchstadium ausgewählten Bruchzonen und die Konturierung des Granitkörpers sind durch weitere Untersuchungen zu präzisieren.

Kontakte zu Wismut GmbH und zu regionalen Energieversorgungsunternehmen sind aufzunehmen. Das SOBA ist bereits in Vorbereitung des Standortes einzubeziehen (vgl. Tab. 6).

4.3.3.4 SW-Vogtland im Raum Schönbrunn-Oelsnitz/V.-Eichigt

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Kreuzungsbereich der regionalen Störungszone von Leipzig-Regensburg (W-Flanke) mit NW-SE-streichenden Mineralgang- und Störungszone (Späterkundung bis ca. 1000 m Teufe). Diese Mineralgang- und Störungszone befinden sich im Einflussbereich von zwei NW-SE-streichenden Tiefenbruchzonen, der Marienbader Störungszone im NE des Triebeler Horstes und der Aš-Tachov-Störungszone an der SW-Flanke des Triebeler Horstes. Der regionaltektonische Bau wird nach KUSCHKA (1996) weiterhin durch das SW-NE-streichende Zentralsächsische Lineament beeinflusst. Der Kreuzungsbereich wird außerdem durch die verdeckte Kleinintrusion des Eichigt-Schönbrunner Granitkörpers charakterisiert. Im Grubenbereich von Schönbrunn traten zur Zeit des aktiven Bergbaus auf der -253 m-Sohle Thermalwässer auf.

Die besondere Eignung des Untersuchungsgebietes ergibt sich aus

- der Existenz tieferreichender, z. T. vererzter und wasserleitender Mineralgang- und Störungssysteme, die punktuell bis ca. 1000 m Teufe untersucht sind;
- der Existenz des verdeckten hochdifferenzierten Granits von Eichigt-Schönbrunn, in dessen Peripherie Vererzungen und Spatlagerstätten auftreten und
- der Zugehörigkeit zu weit aushaltender lineamentärer Bruchtektonik.

Suchziel: Im Untersuchungsgebiet sind Bereiche zu finden, in denen die mutmaßlichen Zielgebiete von Tiefbohrungen (in 3000 m bis 5000 m Tiefe) von wasserwegsamem Bruchstörungen durchörtert werden. Die Ansatzpunkte dieser Tiefbohrungen sollten möglichst nah an anschlussfähigen Wärmeversorgungsnetzen mit angepassten Leistungsumfängen positioniert sein.

Probleme: Aufgrund möglicher bruchstruktureller Zusammenhänge zu balneologisch und wirtschaftlich genutzten Mineralwässern (Staatsbad Bad Elster) besteht die Gefahr einer Beeinflussung der Schüttung und der Qualität dieser Wässer durch tieferreichende Bohr- und Frac-Arbeiten.

Die Lage des Untersuchungsgebietes in der Erdbebenzone 1 (nach DIN 4149: 2005-04) besagt, dass seismische (gefühlte) Intensitäten größer 6,5 auftreten können (Gebäudeschäden möglich).

Weitere Aktivitäten: Geowissenschaftliche Untersuchungen, Such- und Erkundungsmaßnahmen sowie die Klärung technisch-ökonomischer Randbedingungen sind erforderlich. Kontakte zu regionalen Energieversorgungsunternehmen und zu den Mineralquellenbetreibern sind ggf. aufzunehmen; gründliche Überprüfung der seismologischen Ausgangsposition für die Eignung als Tiefengeothermie-Standort ist erforderlich (s. Tab 6).

4.3.3.5 NW-Sachsen im Raum Delitzsch-Schenkenberg

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Kreuzungsbereich der regionalen Störungszone von Leipzig-Regensburg mit der NW-SE-streichenden Störungszone Köthen-Bitterfeld.

Im Kreuzungsbereich tritt unter känozoischer Bedeckung am N-Rand des Delitzscher Granodioritmassives der hochdifferenzierte Granitkörper von Schenkenberg auf. Auf NW-SE-streichenden Gangstrukturen treten peripher und grenzüberschreitend nach Sachsen-Anhalt Uranvererzungen auf. Außerdem wurden am W-Rand des Delitzscher Massives Scheelit-Vererzungen und subvulkanische Karbonatit-Pipes mit einer Seltene Metall/Erden-Mineralisationen nachgewiesen.

Innerhalb des Untersuchungsgebietes ist ein Mineralbrunnen bei Krostitz bekannt (STORCH u. a. 2000). Die Eignung des Untersuchungsgebietes ergibt sich aus

- der Existenz tiefreichender, z. T. vererzter Mineralgänge, Skarnlager, durch Pipes markierter Schwächzonen und Störungssysteme, die punktuell bis ca. 1000 m Teufe untersucht sind;
- der Existenz des verdeckten hochdifferenzierten Granits von Schenkenberg, in dessen Peripherie Vererzungen und Spatlagerstätten auftreten und
- der Lage im Kreuzungsbereich lineamentärer Bruchtektonik.

Suchziel: Im Untersuchungsgebiet sind Bereiche zu finden, in denen die mutmaßlichen Zielgebiete von Tiefbohrungen (in 3000 m bis 5000 m Tiefe) von wasserweg-samen Bruchstörungen durchörtert werden. Die Ansatzpunkte dieser Tiefbohrungen sollten möglichst nah an anschlussfähigen Wärmeversorgungsnetzen mit angepassten Leistungsumfängen positioniert sein.

Probleme: Die 1990 abgebrochenen geologischen Erkundungsarbeiten insbesondere auf U, Nb, Ta und TR gestatten keine endgültige Bewertung dieses Lagerstättenreviers. Eine tiefe geothermische Nutzung sollte zur Vermeidung künftiger Interessenkonflikte im Vorhinein mit dem SMWA aus Sicht der Rohstoffsicherung abgestimmt werden. Außerdem sind aufgrund der grenzüberschreitenden Lage Abstimmungen mit Sachsen-Anhalt erforderlich.

Gegenwärtiges Haupthemmnis für eine Beurteilung ist jedoch die aus geothermischer Sicht schlechte Datenlage. Die Lage des Untersuchungsgebietes in der Erdbebenzone 0 (nach DIN 4149: 2005-04) besagt, dass seismische (gefühlte) Intensitäten zwischen 6 und 6,5 auftreten können (maximal leichte Gebäudeschäden möglich).

Weitere Aktivitäten: Vorrangig sind geowissenschaftliche Untersuchungen zur Verdichtung des geothermischen Datenmaterials durchzuführen. Weitere Such- und Erkundungsmaßnahmen sollten unter dem Gesichtspunkt einer komplexen abschließenden Bewertung dieses Lagerstättenreviers ausgerichtet werden. Die notwendigerweise grenzüberschreitenden Arbeiten sollten mit Sachsen-Anhalt abgestimmt werden. Die Klärung technisch-ökonomischer Randbedingungen ist erforderlich. Kontakte zu regionalen Energieversorgungsunternehmen sind ggf. aufzunehmen (s. Tab. 6).

5 Ableitung von Vorzugsgebieten

Zur Bewertung der Untersuchungsgebiete und der Ausweisung von Vorzugsgebieten wurden folgende Negativkriterien angewendet:

- ein zu geringer geologischer und geothermischer Kenntnisstand sowie
- das Fehlen von Gesteinskomplexen mit hoher radiogener Wärmeproduktion.

Als Ausschlusskriterien werden angesehen:

- die Lage in Erdbebenzone 1 und 2 nach DIN 4149: 2005-04,
- eine zu befürchtende Beeinflussung von Thermal- und Mineralwassernutzungen sowie
- zu geringe Abnahmekapazitäten für geothermische Heizenergie vor Ort.

Die Argumente, die in Anwendung o. g. Negativ- und Ausschlusskriterien zur Reduzierung der 5 Untersuchungsgebiete auf drei Vorzugsgebiete führen, sind in Tab. 6 tabellarisch zusammengestellt.

6 Untersuchung der Vorzugsgebiete für ein petrothermales Geothermieprojekt

In den drei ausgewählten Vorzugsgebieten:

- Gera-Jáchymov-Zone im Raum Aue/Schwarzenberg-Zwickau,
- NW-SE-Bruchzone im Raum Freiberg-Frauenstein und
- Elbezone im Raum Meißen-Dresden-Pirna

wird nachfolgender Handlungsbedarf gesehen. Dieser Bedarf wird in einem Arbeitsplan, den die im Forschungsverbund beteiligten Partner erstellen, explizit dargestellt. Schwerpunkte der Untersuchungen sollen sein:

- Datenverdichtung und komplexer Vergleich der Vorzugsgebiete zwecks Minimierung des Fündigkeitsrisikos
- Explorative Untersuchung der thermischen und Reservoireigenschaften von Tiefengesteinen
- Erweiterung der petrophysikalischen, thermischen und mineralogischen Datenbasis
- Untersuchung des Stressfeldes
- Integrative Betrachtung aller geologischen Randbedingungen und Einschätzung der Eignung der Vorzugsgebiete aus geowissenschaftlicher Sicht
- Analyse der technisch-ökonomischen Randbedingungen und Einschätzung der Eignung der Vorzugsgebiete aus technisch-ökonomischer Sicht
- Einschätzung der Eignung der Vorzugsgebiete aus komplexer Sicht
- Ausweisung eines Standortgebietes und Beantragung Erlaubnisfeld.

Die Arbeiten müssen sich demnach vorrangig auf die Untersuchung der beteiligten Gesteinsformationen und ihrer für eine geothermische Nutzung prädestinierten Parameter konzentrieren. Die Parameter sind von verifizierten regionalen und lokalen geologischen Gebirgsmodellen abzuleiten. Temperaturmodelle basierend auf diesen geologischen/petrophysikalischen Modellen bilden die Grundlage für die Ausgliederung von Zieltiefen für abzuteufende Produktions- und Injektionsbohrungen.

Parallel dazu müssen die technisch-ökonomischen Randbedingungen für eine Projektrealisierung gezielt mit potenziellen Investoren diskutiert werden.

Tab. 6. Tiefengeothermisches Projekt Sachsen: Vorläufige Bewertung der Untersuchungsgebiete aus geowissenschaftlicher und technisch-ökonomischer Sicht

Untersuchungsgebiet	Kurzcharakteristika	Klärungsbedarf / Bewertung
(1) Gera-Jachymov-Zone im Raum Schwarzenberg-Aue-Zwickau ca. 460 km ²	Probleme: Das geflutete Grubenrevier der Wismut in diesem Raum samt Wasseraufbereitungsanlage dürfen nicht negativ beeinflusst werden. Wässer, die während der Such- und Erkundungsphase angetroffen werden, sind auf radiogene Belastung zu prüfen bzw. durch geeignete Maßnahmen zu behandeln. Die Lage des Untersuchungsgebietes in der Erdbebenzone 0 (nach DIN 4149: 2005-04) besagt, dass seismische (gefühlte) Intensitäten zwischen 6 und 6,5 auftreten können (maximal leichte Gebäudeschäden möglich). Die Altbergbaubereiche sollten zur Minimierung der Havariegefahr in der Such- und Erkundungsphase umgangen werden.	Klärungsbedarf ergibt sich unter Umständen aus der Zugehörigkeit der Untersuchungsgebietes zur Erdbebenzone 0 (nach DIN 4149: 2005-04); Klärung in Zusammenarbeit mit Fachgebiet Geophysik/ Seismizität; Einbeziehung SOBA und der Wismut GmbH Bei Unbedenklichkeit bzw. kalkulierbarem seismologischem Risiko als Vorzugsgebiet für die spezielle Suche eines Projektstandortes besonders geeignet.
(2) NW-SE Bruchzone im Raum Freiberg ca. 350 km ²	Die Altbergbaubereiche sollten zur Minimierung der Havariegefahr in der Such- und Erkundungsphase umgangen werden.	Einbeziehung SOBA Als Vorzugsgebiet für die spezielle Suche eines Projektstandortes geeignet; bei positivem Ausgang tiefeismischer Voruntersuchungen besonders geeignet.
(3) Elbezone im Raum Meißen-Dresden-Pirna ca. 250 km ²	Probleme: Die Altbergbaubereiche sollten zur Minimierung der Havariegefahr in der Such- und Erkundungsphase umgangen werden. Eventuell durch das Vorhaben ausgelöste Erschütterungen dürfen keinen Einfluss auf die Halbleiterindustrie haben.	Einbeziehung SOBA Als Vorzugsgebiet für die spezielle Suche eines Projektstandortes besonders geeignet.
(4) SW-Vogtland im Raum Schönbrunn-Oelsnitz/V.-Eichigt ca. 200 km ²	Probleme: Aufgrund der Zugehörigkeit zur Westböhmisches-Vogtländischen Mineralwasserprovinz (Bäderkongress 2003) und der unmittelbaren Nachbarschaft zu balneologisch und wirtschaftlich genutzten Mineralwässern besteht die Gefahr einer Beeinflussung der Schüttung und der Qualität dieser Wässer durch tiefreichende Bohr- und Frac-Arbeiten (s. Anl.8). Die Lage des Untersuchungsgebietes in der Erdbebenzone 1 (nach DIN 4149: 2005-04) besagt, dass seismische (gefühlte) Intensitäten größer 6,5 auftreten können (Gebäudeschäden möglich).	Ein vorrangiger Klärungsbedarf ergibt sich aus der Zugehörigkeit der Untersuchungsgebietes zur Erdbebenzone 1 (nach DIN 4149: 2005-04) im unmittelbaren Einflussbereich der Vogtländischen Schwarmbeben; Mineralwasserschutzgebiete (s. Anl. 8) Fraglich ist, ob sich ein wirtschaftlicher Projektstandort zu weiter entfernten Fernwärmenetzen (Oelsnitz/V, Plauen ?) nachweisen lässt; Trotz guter geologischer Ausgangsposition als Vorzugsgebiet derzeit nicht geeignet.
(5) NW-Sachsen im Raum Delitzsch-Schenkenberg ca. 300 km ²	Probleme: Für die 1990 grenzüberschreitend zu Sachsen-Anhalt abgebrochenen Such- und Erkundungsarbeiten insbesondere auf U, Nb, Ta und TR existiert noch keine abschließende lagerstättengeologische Bewertung. Eine tiefe geothermische Nutzung sollte zur Vermeidung künftiger Interessenkonflikte im Vorhinein mit dem SMWA aus Sicht der Rohstoffsicherung abgestimmt werden (s. Anl. 8). Außerdem sind aufgrund der grenzüberschreitenden Lage Abstimmungen mit Sachsen-Anhalt erforderlich. Gegenwärtiges Haupthemmnis für eine tiefengeothermische Beurteilung ist jedoch die aus geothermischer Sicht völlig unzureichende Datenlage auf sächsischem Territorium. Die Lage des Untersuchungsgebietes in der Erdbebenzone 0 (nach DIN 4149: 2005-04) besagt, dass seismische (gefühlte) Intensitäten zwischen 6 und 6,5 auftreten können (maximal leichte Gebäudeschäden möglich).	Klärungsbedarf ergibt sich unter Umständen aus der Zugehörigkeit der Untersuchungsgebietes zur Erdbebenzone 0 (nach DIN 4149: 2005-04); Klärung in Zusammenarbeit mit Fachgebiet Geophysik/Seismizität. Nach Verbesserung der Datenausgangslage und Klärung der Rohstoffperspektivität des Gesamtgebietes erneute Bewertung erforderlich. Bis dahin trotz guter geologischer Ausgangsposition als Vorzugsgebiet derzeit nicht geeignet.

7 Organisatorischer Rahmen

Zur Projektrealisierung sind aufgrund der sehr hohen Projektanforderungen sowohl innerhalb der sächsischen Umweltverwaltung als auch in Hinblick auf die externen Projektbeteiligten die entsprechenden organisatorischen Rahmenbedingungen zu schaffen.

7.1 Sächsische Umweltverwaltung

Für die Umsetzung der umfangreichen Anforderungen auf dem Sektor Geothermie sind im LfULG die erforderlichen organisatorischen und personellen Voraussetzungen (vgl. Strukturvorschlag FELIX & HOFMANN (2009)) zu schaffen. Die Arbeitsfähigkeit dieser Struktur für die Leitung und Fachbegleitung des geplanten Tiefengeothermieprojektes ist über den gesamten Projektzeitraum abzusichern.

Zur Fortsetzung des Projektes wird nach Gründung des Forschungsverbundes ein **Arbeitsplan** erstellt und das Rahmenkonzept dahingehend präzisiert.

Dieses Konzept soll entsprechend dem Projektfortschritt fortlaufend aktualisiert werden („road map“). Alle separaten Berichte, Gutachten etc., die im Laufe der Projektbearbeitung angefertigt werden, sollen sukzessive integriert werden.

Das Rahmenkonzept soll neben der aktuellen Darstellung des Bearbeitungsstandes als operative Beratungs- und Abstimmungsgrundlage mit den Projektpartnern, Investoren etc. dienen.

7.2 Externe Partner

7.2.1 Gründung eines Forschungsverbundes

Da das geplante Projekt aufgrund seines überwiegenden Forschungscharakters sehr hohe wissenschaftliche Ansprüche stellen wird, ist eine Bündelung der Fachkompetenzen der auf diesem Gebiet führenden Forschungsinstitute und Universitäten Voraussetzung. Dazu wird die Bildung eines Forschungsverbundes „Tiefengeothermie Sachsen“ als notwendig erachtet, dem neben dem LfULG und dem Sächsisches Oberbergamt folgende Forschungspartner angehören sollen:

- TU Bergakademie Freiberg, Akademiestraße 6, 09599 Freiberg
- Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Telegrafenberg, F 224, 14473 Potsdam
- Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, 30655 Hannover, Stilleweg 2
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Geozentrum Hannover, Stilleweg 2, 30655 Hannover

Eine Erweiterung um weitere Partner ist denkbar.

7.2.1.1 Rechtliche Grundlagen

Grundlage für die Zusammenarbeit ist eine Kooperationsvereinbarung der Partner. Mit dieser verpflichten sich die Beteiligten zur Unterstützung des Forschungsthemas im Rahmen des Forschungsverbundes „Tiefengeothermie Sachsen“. Die weiteren Modalitäten werden auf der Basis der Kooperationsvereinbarung zwischen den Projektpartnern gesondert vereinbart.

7.2.1.2 Finanzierung

Die Startfinanzierung im Zeitraum 2009/2010 erfolgt über Forschungsmittel des LfULG. Die Bereitstellung der Mittel erfolgt in diesem Zeitraum auf der Basis von Verträgen der Forschungsnehmer mit dem LfULG. Über die weitere Finanzierung wird im Projektverlauf nach Klärung der Bereitstellung von Fördermitteln (z. B. KfW, BMU, etc.) entschieden.

7.2.1.3 Organisation

Die Projektleitung liegt in den Händen des LfULG. Alle Entscheidungen grundsätzlichen und konzeptionellen Charakters des Forschungsverbundes erfolgen durch Mehrheitsentscheidung der Projektpartner. Die Beiträge der Forschungsnehmer bei der Umsetzung des Projektes sind klar zu fixieren.

7.2.1.4 Arbeitsplanung

Die Arbeiten erfolgen nach Erarbeitung und Abstimmung eines Ablaufplanes mit den Projektpartnern. Die Arbeitsphasen, Arbeitsschritte und Entscheidungsetappen sollten die bisherigen Erfahrungen bei

der Realisierung von Geothermieprojekten berücksichtigen (z. B. BAUER 2009) und die in Abb. 8 dargestellten Projektphasen (Spalte Rahmenkonzept) beinhalten.

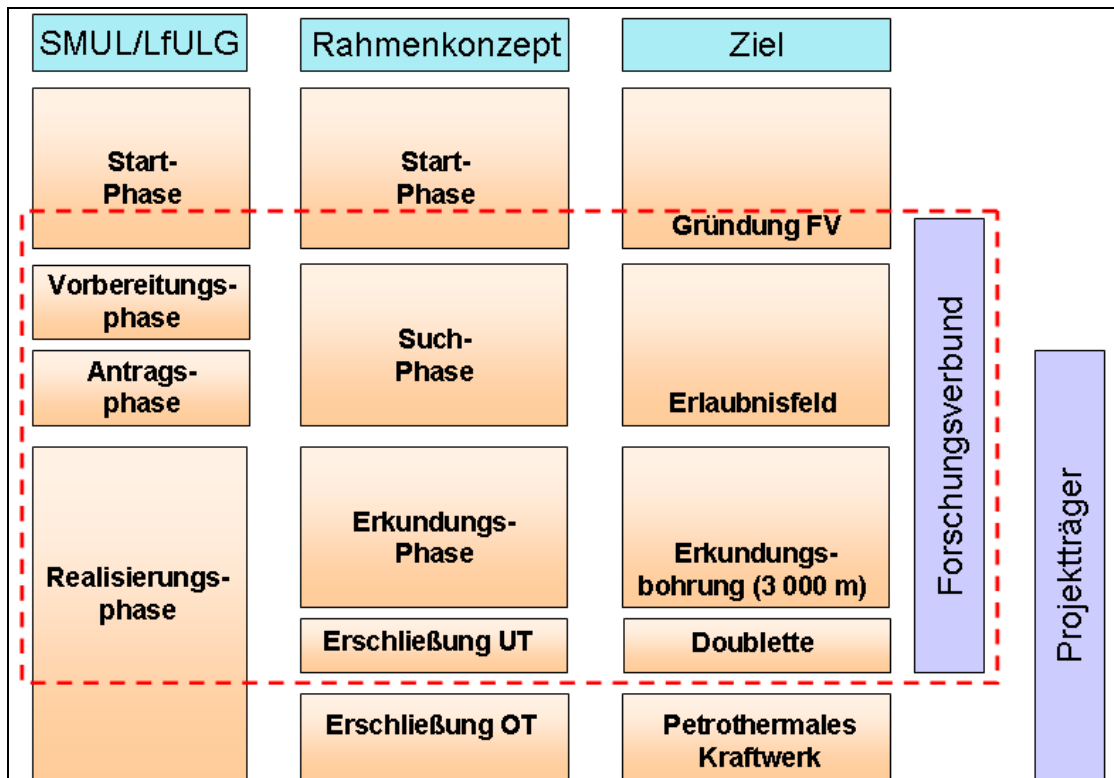


Abb. 8: Projektphasen für das Tiefengeothermieprojekt Sachsen in Anlehnung an die Vorgehensweise bei Geothermieprojekten im Oberrheingraben; rote Linie – Tätigkeitsbereich des Forschungsverbundes Tiefengeothermie Sachsen

7.2.2 Integration weiterer externer Partner

Zur Realisierung spezieller Aufgaben können weitere externe Partner (Ingenieurbüros, spezialisierte Labore etc.) in die Arbeiten einbezogen werden. Insbesondere für die Erstellung der Machbarkeitsstudie und des Businessplans kommen dafür nur wenige ausgewiesene Büros in Frage. Diese sind nicht Mitgliedern des Forschungsverbundes, sondern arbeiten diesem zu.

7.2.3 Einbeziehung von Industrie und Kommunen

Die Einbeziehung von potenziellen Industriepartnern / Energieversorgungsunternehmen / Kommunen erfolgt bereits frühzeitig im Rahmen der Einschätzung der Vorzugsgebiete aus Sicht der Strom- bzw. Wärmenutzung. Im weiteren Projektverlauf geht mit Antragstellung zu den Fördermitteln und deren Bewilligung die Verantwortung für das Gesamtprojekt auf den/die zukünftigen Betreiber des Kraftwerkes über.

8 Ablauf und zeitlicher Rahmen

Die Arbeitsetappen für das petrothermale Geothermieprojekt in Sachsen, die Aktivitäten des Forschungsverbundes Tiefengeothermie Sachsen (FV TGSN) sowie die Vorstellungen zum zeitlichen Rahmen sind in Tab. 7 kurz zusammengefasst. Sie wurden den 4 Projektphasen entsprechend Abb. 8 zugeordnet. Die Arbeit des Forschungsverbundes würde danach mit Vorlage des Forschungsberichtes 4 im Dezember 2014 mit Etappe 24 abgeschlossen sein.

9 Aufwandsabschätzung

Wird nach Erstellung des Arbeitsplanes und im Laufe der Projektbearbeitung konkretisiert.

Tab. 7: Aufgaben und Arbeitsschritte für das petrothermale Geothermieprojekt in Sachsen (vorläufige Vorstellungen LfULG)

Phase	Etappe	Inhalt	Datum / Zeitraum	Aktivitäten FV TGSN	Anmerkungen
Startphase	1	Rahmenkonzept LfULG	12.05.09		
	2		5-6/09	Gründung Forschungsverbund	
	3		5-8/09	Arbeitsplanung, Forschungsverträge	
Suchphase	4	Bewertung der drei Vorzugsgebiete, Empfehlung Standortgebiet	7-12/09		
	5		11-12/09		Auslobung Investor
	6		1/10	Forschungsbericht 1	Definition der Projektziele mit Investor
	7	Arbeiten zur Präzisierung der/des Projektstandorte/s	2/10		
	8	Machbarkeitsstudie für den Projektstandort	3-6/10		Beantragung Erlaubnisfeld (§7 BBergG)
	9		7/10	Forschungsbericht 2	
	10	Businessplan	9-11/10		
	11	Erarbeitung Förderanträge	10-12/10	Mitarbeit Förderanträge	Förderanträge BMU, KfW
Erkundungsphase	12		2/11		Positive Förderbescheide
	13		3/11		Positive Investitionsentscheidung für Bohrbeginn
	14	Konkrete Projektplanung	4-6/11		
	15	Erkundungsarbeiten am Projektstandort (z. B. 3D-Seismik)	7-12/11		Aufsuchungsbetriebsplan (§51 BBergG)
	16	Festlegung des konkreten Bohrstandortes und des untertägigen Zielgebietes	1/12		
	17	Vorbohrung (im unteren Bereich gekernt) ca. 3000 m	2-9/12		
	18	Untersuchungen im Bohrloch/am Bohrkern	3-10/12		
	19		10-12/12	Forschungsbericht 3	Beantragung, Bewilligung (§8 BBergG)
Erschließungsphase	20		1/13		Investitionsentscheidung zur untertägigen Erschließung
	21	Erweiterung Vorbohrung als Produktionsbohrung 1 auf ca. 5000 m	2-5/13		
	22	Niederbringen Produktionsbohrung 2 auf ca. 5000 m	6-12/13		
	23	Stimulation, Fraccing, Reservoirmodellierung etc.	1-6/14		
	24		7-12/14	Forschungsbericht 4	Fündigkeitsnachweis
	25		1/15		Investitionsentscheidung für oberirdige Kraftwerksinstallation
	26	Umsetzung Kraftwerksprojekt	bis 12/2015		Grundlage: genehmigter Hauptbetriebsplan Gewinnung

10 Literatur

- Atlas zur Geologie von Brandenburg, Brandenburgische Geowiss. Beitr. 6, 1999
- BAUER, W. (2009): Neue Projekte im Oberrheingraben: Schritt für Schritt - Die Vorgehensweise, Vortrag zum Geotherm-Kongress in Offenburg am 06.03.09, 360plus Consult GmbH, Karlsruhe
- BOECK, H.-J.; GRAFE, F.; LANGE, TH.; SCHNEIDER, P.; TUNGER, B.; WILSNACK, TH. (2005): Bestandsaufnahme und nutzungsorientierte Analyse des tiefeingeothermischen Potenzial des Freistaats Sachsen und seiner unmittelbaren Randgebiete. - unveröff. Abschlussbericht, C&E, Chemnitz.
- BÖLSCHKE, J. (1980): Ergebnisbericht Erzgebirge - Vogtland 1.2 - Profile EV 01 B (Lücke Klingenthal) EV 01 A (Wiederholung Teil EV 01), EV 02, EV 05. - VEB Geophysik, 40 S., 39 Anl., Leipzig
- BORMANN et. al. (1989): Geophysikalische Untersuchungen der tieferen Erdkruste und des oberen Erdmantels; Vorträge zum Berg- und Hüttenmännischen Tag 1988 in Freiberg. - Freiburger Forsch.-H. **C 440**, Freiberg
- BUCHER, K. & STÖBER, I. (2000): The composition of groundwater in the continental crystalline crust. - in: STÖBER, I. & BUCHER, K. (eds.) (2000): Hydrogeology in crystalline rocks. - Kluwer academic publishers, p. 141-176
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU Hrsg. 2007): Tiefe Geothermie in Deutschland, 42 S.
- Bund-Länder-Arbeitskreis (2007a): Nutzung der geothermischen Energie aus dem tiefen Untergrund (Tiefe Geothermie). - Arbeitshilfe für geologische Dienste
- Bund-Länder-Arbeitskreis (2007b): Nutzung der geothermischen Energie aus dem tiefen Untergrund (Tiefe Geothermie). - Geowissenschaftliche Parameter und Untersuchungsverfahren
- DEKORP RESEARCH GROUP (1994): The deep reflection seismic profiles DEKORP 3/MVE-90. - Z. Geol. Wiss., 22(6): 623-825, Berlin
- ENDERLE, U.; SCHUSTER, K.; PRODEHL, C.; SCHULZE, A. & BRIBACH, J. (1998): The refraction seismic experiment GRANU95 in the Saxothuringian belt, SE-Germany. - Geophys. J. Int., 133: 245-259, 1998
- Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) vom 25. Oktober 2008 (BGBl. I S. 2074)
- FELIX, M., HOFMANN, K.: Tagungskurzbericht GEOTHERM-Kongress Offenburg 05./06.03.09, Schlussfolgerungen für das LfULG-Freiberg 2009
- FÖRSTER, A. & FÖRSTER, H.-J. (2000): Crustal composition and mantle heat flow: Implications from surface heat flow and radiogenic heat production in the Variscan Erzgebirge (Germany). - Journal of Geophysical Research, vol. 105, No. B 12, p. 27,917-27,938, December 10
- Geothermischen Atlas der DDR (1984)
- Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien (EE-WärmeG) im Wärmebereich vom 7. August 2008 (BGBl. I Nr. 36 S. 1658)
- GTV-Beschlussvorlage Entwurf von Huenges et al. (05.11.2008); (unveröff.)
- GÜK 400
- HURTER, S. (Hrsg.) Atlas of geothermal Resources in Europe, ISBN 92-828-0999-4, Luxembourg, 1996
- Institut für Energetik und Umwelt (IfE) gGmbH (2003): Expertise zur Nutzung erneuerbarer Energien in Sachsen. - Unveröff. Endbericht, Leipzig
- KALTSCHMITT, M., HUENGES, E., WOLFF, H. (Hrsg.) 1999: Energie aus Erdwärme. - Dt. Verlag f. Grundstoffindustrie, Stuttgart.
- KNOTHE, CH.; WALTHER, K.-F. (1968): Vorbereitung und Durchführung einer seismischen Tiefensondierung im Grenzgebiet DDR - CSSR. - Freiburger Forsch.-H. **C 239**: 5-47, 16. Bild., 5 Tab., Leipzig
- KRAFT, M. & G. TISCHENDORF (1960): Die Ergebnisse von Tiefbohrungen im Freiburger Lagerstättenbezirk. - Z. angew. Geol. **6**, 8, 375-338, Berlin
- OELSNER, C. HURDIG, E. (1979): Zur geothermischen Situation im Erzgebirge. - Freiburger Forsch.-H. **C 350**, Freiberg

- PÄLCHEN, W. & WALTER, H. (Hrsg.), (2008): Geologie von Sachsen, Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte. E- Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, (537 S.), Stuttgart
- PASCHEN, H., OERTEL, D., GRÜNWARD, R. (2003): Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland (TAB-Arbeitsbericht Nr. 84)
- RŮŽEK, B. et al. (2007): Inversion of travel times obtained during active seismic refraction experiments CELEBRATION 2000, ALP 2002 and SUDETES 2003. - *Studia Geophysica et Geodaetica*: **51**: 141-164
- RYBACH, L. (2004): EGS - The State of the Art – Tagungsband der 15. Fachtagung der Schweizerischen Vereinigung für Geothermie, Stimulierte geothermische Systeme, 7 S., Basel
- RYBACH, L. (2008): Geothermie weltweit - Stand und Perspektiven. - Kongressband Geothermiekongress Karlsruhe, S. 11-15
- Sächsisches Staatsministerium für Wirtschaft und Arbeit (Hrsg.,2003): Energiebericht 2003 für den Freistaat Sachsen
- STOBER, I.(1995): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges. - Ferdinand Enke Verlag, 191 S., Stuttgart
- STORCH, K. V., JORDAN, H. P., Glässer, W. Abraham, T., Grimm, R., Müller, P. (2000): Mineral- und Thermalwässer in Sachsen. - Geoprofil 9, LfUG Freiberg
- Strategiepapier 2008/2009 des SMUL
- TONNDORF, H. (2008): Zur Metallogenie des Urans im Ostdeutschen Deckgebirge. - Freiburger Forsch.-H. C 527
- WAGNER, ST. (2007): Tiefengeothermie-Studie für einen geologisch-geophysikalisch begründeten Standort in der Beispielregion Gera-Jachymov-Zone in SW-Sachsen und Entwicklung methodischer Schritte für eine Fündigkeitsprognose im sächsischen Grundgebirge. - unveröff. Forschungsbericht Teil I, TU Bergakademie Freiberg, 69 S.
- WAGNER, ST. (2008): Tiefengeothermie-Studie für einen geologisch-geophysikalisch begründeten Standort in der Beispielregion Gera-Jachymov-Zone in SW-Sachsen und Entwicklung methodischer Schritte für eine Fündigkeitsprognose im sächsischen Grundgebirge unter Einbeziehung bisheriger Erfahrungen mit der HDR-Technik im mitteleuropäischen Raum. - unveröff. Forschungsbericht Teil II, TU Bergakademie Freiberg, 45 S.
- WEINLICH, F.H. (2008): Die Stickstoff- und Methangase des sächsischen Erzgebirges und seiner angrenzenden Gebiete - Geochemie und Genese. - ZDGG, Bd. 159, Heft 2, S.317-329.
- ZITZMANN, A. u. a. (2003): Geologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland, 1 : 200 000, Blatt Cottbus, Hannover 2003)

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Strom- und (Nutz-) Wärmepotenzial der kristallinen Gesteine in Deutschland; Bezugsniveau: 3 bis 7 km nach PASCHEN u. a. (2003)*	6
Tab. 2:	Ergebnisse der Potenzialabschätzungen für das Kristallingebiet Sachsens (incl. Störungszonen) nach Angaben des IfE (2003)	7
Tab. 3:	Zuordnung der Gesteinskomplexe zu den Gesteinsgruppen.....	10
Tab. 4:	Optimistische Modellparametrisierung nach iterativer Verbesserung des Parametersatzes (WFD in W/m ² , WLF in W/m-K und RWP in μW/m ³)	14
Tab. 5:	Mineralisation der Wässer in der Bohrung Bad Muskau	17
Tab. 6:	Tiefengeothermisches Projekt Sachsen: Vorläufige Bewertung der Untersuchungsgebiete aus geowissenschaftlicher und technisch-ökonomischer Sicht	26
Tab. 7:	Aufgaben und Arbeitsschritte für das petrothermale Geothermieprojekt in Sachsen (vorläufige Vorstellungen LfULG).....	29

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Prinzipiskizze des europäischen petrothermalen (Hot-Dry-Rock)-Forschungsprojektes Soultz-sous-Forêts (Frankreich).....	5
Abb. 2:	Messwerte der Wärmeleitfähigkeit λ an Standorten in Sachsen und seiner Umgebung bezogen auf die Gruppeneinteilung der Gesteine im geologischen Modell (1 - Lockersedimente, 2 - Schiefer und wenig poröse Sedimentgesteine, 3 - Granodiorit, 4 - Gneis, 5 - ältere und undifferenzierte Granite, 6 - jüngere und hochdifferenzierte Granite) nach BOECK u. a. (2005);.....	11
Abb. 3:	Messwerte der radiogenen Wärmeproduktion A an Gesteinen aus Sachsen und seiner Umgebung bezogen auf die Gruppeneinteilung der Gesteine im geologischen Modell (1 - Lockersedimente, 2 - Schiefer und wenig poröse Sedimentgesteine, 3 - Granodiorit, 4 - Gneis, 5 - ältere und undifferenzierte Granite, 6 - jüngere und hochdifferenzierte Granite) nach BOECK u. a. (2005).....	12
Abb. 4:	Wärmeleitfähigkeit - Parametervorgabe für die oberste Modellebene.....	13
Abb. 5:	radiogene Wärmeproduktion - Parametervorgabe für die oberste Modellebene.....	13
Abb. 6:	Berechnete Temperaturen in 5000 m Teufe, oben links für die optimistische Parametrisierung, oben rechts für die pessimistische	15
Abb. 7:	Geologischer Tiefenschnitt Boxberg-Weißwasser-Bad Muskau-Lausitzer Neiße (BERGER, H.-J. in ZITZMANN, A.: Geologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland, 1 : 200 000, Blatt Cottbus, Hannover 2003).....	16
Abb. 8:	Projektphasen für das Tiefengeothermieprojekt Sachsen in Anlehnung an die Vorgehensweise bei Geothermieprojekten im Oberrheingraben; rote Linie – Tätigkeitsbereich des Forschungsverbundes Tiefengeothermie Sachsen	28

Anlagenverzeichnis

Anl. 1:	Geologisch-tektonische Einheiten in Sachsen, Oberfläche, Maßstab 1 : 400 000
Anl. 2:	Geologisch-tektonische Einheiten in Sachsen, 1000 m unter Gelände, Maßstab 1 : 400 000
Anl. 3:	Geologisch-tektonische Einheiten in Sachsen, 2000 m unter Gelände, Maßstab 1 : 400 000
Anl. 4:	Geologisch-tektonische Einheiten in Sachsen, 3000 m unter Gelände, Maßstab 1 : 400 000
Anl. 5:	Geologisch-tektonische Einheiten in Sachsen, 4000 m unter Gelände, Maßstab 1 : 400 000
Anl. 6:	Geologisch-tektonische Einheiten in Sachsen, 5000 m unter Gelände, Maßstab 1 : 400 000
Anl. 7:	Erdbebenzonen und Epizentren seismischer Ereignisse in Sachsen, Maßstab 1 : 400 000
Anl. 8:	Ausgewählte Schutzgebiete in Sachsen, Maßstab 1 : 400 000
Anl. 9:	Geologische Karte, Vorzugsgebiet Gera-Jáchymov-Zone im Raum Schwarzenberg-Aue-Zwickau, Maßstab 1:100 000
Anl. 10:	Geologische Karte, Vorzugsgebiet NW-SE-Bruchzone im Raum Freiberg-Frauenstein, Maßstab 1:100 000
Anl. 11:	Geologische Karte, Vorzugsgebiet Elbezone im Raum Meißen-Dresden-Pirna, Maßstab 1 : 100 000
Anl. 12:	Tektonische Elemente und Siedlungsgebiete, Gebiet Gera-Jáchymov-Zone im Raum Schwarzenberg-Aue-Zwickau, Maßstab 1 : 100 000
Anl. 13:	Tektonische Elemente und Siedlungsgebiete, Gebiet - NW-SE-Bruchzone im Raum Freiberg-Frauenstein, Maßstab 1 : 100 000
Anl. 14:	Tektonische Elemente und Siedlungsgebiete, Gebiet Elbezone im Raum Meißen-Dresden-Pirna, Maßstab 1 : 100 000
Anl. 15:	Übersicht zu den tiefenseismischen Profilen in Sachsen, Maßstab 1 : 400 000

Abkürzungs- und Begriffsverzeichnis

IfE	Institut für Energetik und Umwelt gGmbH
EGS	Enhanced Geothermal System
GW_{el}	Gigawatt, elektrisch
GW_{th}	Gigawatt, thermisch
Fracking	Erzeugung/Aufweitung von Rissystemen in Gesteinen
λ	Wärmeleitfähigkeit (W/m·K)
WLF	Wärmeleitfähigkeit
A	radiogene Wärmeproduktion ($\mu\text{W}/\text{m}^3$)
RWP	radiogene Wärmeproduktion
C_p	Wärmekapazität (J/(kg·K))
a	Temperaturleitfähigkeit (m^2/s)
Teufe	(bergmänn.) vertikale Tiefe
WFD	Wärmeflussdichte
q_{kond}	Wärmeflussdichte, konduktiver Anteil (W/m^2)
P_{entzug}	spezifische Erdwärmeentzugsleistung (W/m)
ϖ	geothermischer Gradient (K/m)
Zielgebiet	untertägiger Bereich innerhalb eines Erlaubnisfeldes, der für eine geothermische Exploration geeignet ist
PJa	Petajoule, auf einen Zeitraum (hier: Jahr) bezogene Energiemenge
SOBA	Sächsisches Oberbergamt Freiberg
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
SDAG	Sowjetisch-Deutsche Aktiengesellschaft