

Masterarbeit

zum Erwerb des akademischen Grades eines
MSc (Master of Science)
der Studienrichtung Rohstoffgewinnung und Tunnelbau

Thema

„Potentialerhebung zur geothermischen Energiegewinnung auf Basis österreichischer Untertagebauwerke“

eingereicht am
Lehrstuhl für Subsurface Engineering
an der Montanuniversität Leoben

Thomas Auinger

Leoben, im Jänner 2015

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubter Hilfsmittel bedient habe.

(Unterschrift)

Datum

Name

Danksagung

Bei der Anfertigung dieser Arbeit unterstützten mich eine Vielzahl von Menschen, bei denen ich mich bedanken möchte.

Zu Beginn möchte ich mich bei der Montanuniversität am Institut für Subsurface Engineering (Hr. Univ.-Prof. DI Dr. mont. Galler und Hr. DI Lorenz) bedanken, da sie mir im Zuge eines Forschungsauftrags der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft FFG ermöglichten eine Arbeit auf diesem interessanten und zukunftsorientierten Gebiet zu verfassen. Ein großes Dankeschön gebührt auch all jenen, welche mir bei Fragen und fehlenden Informationen immer mit einer fachkundigen Auskunft zur Seite standen. Im Speziellen möchte ich mich bei Hr. DI Weidner (RHI AG) bedanken, welcher wertvolle Stunden seiner Zeit, sowohl vor Ort als auch durch E-Mail Verkehr, opferte. Auch die Firmen Energie Steiermark GmbH (Hr. DI Gruber), Ingenieurbüro Laabmayr (Hr. DI Edlmair), und Asfinag Bau Management GmbH (Hr. Dr. Pischinger, Hr. Bmstr. Ing. Moser) haben durch Beisteuerung projektbezogener Informationen einen wichtigen Beitrag geleistet und ich möchte mich dafür bedanken. Zuletzt möchte ich auch meine Eltern meine Familie und meine Freunde erwähnen, welche mich über die gesamte Studiendauer begleitet und unterstützt haben. Danke vielmals dafür.

Kurzfassung

Im Zuge des Forschungsprojektes MinTherm wird die technische Machbarkeit eines Tiefengeothermiekraftwerks anhand zweier unterschiedlicher österreichischer Untertagebauwerke untersucht. Mit dieser Arbeit wird auf das Nutzungspotential zur Energiegewinnung an bestehenden untertägigen Infrastrukturanlagen eingegangen. Ziel ist die Erfassung der nötigen Infrastruktur, der erforderlichen Sicherheitsanforderungen sowie die Erfassung der notwendigen Betriebs-, und Prozessparameter für zwei österreichische Untertageanlagen. Grundidee ist die Nutzung einer höherwertigen, mit der Teufe ansteigenden geothermischen Tiefenstufe. Diese untertägigen Energiereservoirs sind durch bestehende Tunnel-, und Stollenzugänge bereits erschlossen und ersetzen somit unnötige Bohrmeter und auch die damit verbundenen Kosten. Konkret werden in dieser Arbeit 2 mögliche Projektstandorte untersucht. Der erste Standort (im Folgenden auch Projektstandort A) liegt im Bereich des untertägigen Abbaus der Magnesitlagerstätte Breitenau in der Steiermark. Standort 2 (im Folgenden Projektstudie B) liegt im Projektgebiet des Gleinalmtunnels nahe St. Michael in der Obersteiermark. Die Gebirgsüberlagerung beträgt bei beiden Projektstandorten etwa eintausend Meter. Diese bereits vorhandenen Zugänge ermöglichen einen Bohrbeginn in einer geothermisch höherwertigen Zone, als dies bei einem Bohrstart an der Oberfläche der Fall wäre. Daraus resultiert ein Entfall der gesamten Bohrarbeiten und Bohrkosten bis zu dieser Teufe. Um einen möglichen Projektstandort aufgrund der geologischen Verhältnisse, geographisch nicht zu sehr einzuschränken wird in dieser Arbeit nur auf petrothermale Systeme eingegangen. Anfangs wird für beide Projekte untersucht, welche allgemeinen technischen Anforderungen für eine Projektumsetzung erforderlich sind. Dabei handelt es sich um die geologisch-, geothermischen Voraussetzungen um ein petrothermales System sinnvoll betreiben zu können. Die geomechanischen Verhältnisse wurden speziell im Bereich der geplanten Kavernenerstellung, in welcher eine Errichtung der Bohranlage angedacht ist, untersucht. Für eine Projektumsetzung ist auch die Logistik ein essentieller Faktor und speziell bei einem Projekt mit laufendem Magnesitabbau (Projektstudie B) eine große Herausforderung. Hier sind vor allem die Faktoren Antransport, Abmessungen, erreichbare Bohrtiefe und nötige Betriebsmittel entscheidend. Es wird auch auf mögliche Folgeerscheinungen hinsichtlich Sicherheit und Umwelt eingegangen. Weiters wurde untersucht welche Vorkehrungen für eine Netzeinspeisung zu treffen sind. Für beide Projektstudien wurden die für eine Projektumsetzung relevanten projektbezogenen Parameter und Eigenschaften ermittelt und ausgewertet. Nach umfangreicher Recherche gibt es bisher bei beiden Projekten wenig aufschlussreiches Erkundungsmaterial für Teufen über zweitausend Meter. Bei beiden Projekten wird in einer Zielteufe von etwa sechs Kilometer kristallines Grundgebirge erwartet. Dieses kristalline Gestein wurde auf die geothermisch relevanten Parameter untersucht. Daraus konnte näherungsweise abgeleitet werden, ob sich der Untergrund als „Wärmetauscher“ für ein Tiefengeothermiekraftwerk eignet, beziehungsweise welche technischen Maßnahmen für eine Projektumsetzung getroffen werden müssen.

Am Ende der Arbeit werden die Parameter beider Projektstudien bewertet und die projektbezogenen Chancen und Risiken aufgezeigt. Die Zusammenfassung bildet eine Potenzialbewertung beider Projekte. Als Bewertungskriterien hierfür finden geologische-, geothermische und infrastrukturelle Voraussetzungen Eingang.

Abstract

In the course of the research project MinTherm the technical feasibility of a deep geothermal power plant, based on two different Austrian underground projects, is investigated. This thesis explores the potential to use energy in existing underground infrastructures. The aim is to register the necessary infrastructure, the necessary safety requirements and collecting the necessary operating and process parameters for two Austrian underground projects. The basic idea is the use of a superior geothermal depth level, which increases with the depth. These underground energy reservoirs have been developed by existing tunnel- and gallery entrances. Those circumstances replace unnecessary meters of drilling and the connected costs. Two possible locations are investigated. The first location (hereinafter project study A) is in the area of the underground mining Breitenau in Styria. The second location (hereinafter project study B) is situated in the project area of the Gleinalmtunnel nearby St. Michael also in Styria. The rock overburden in both project studies is around one thousand meters. The existing tunnels allow to start drilling in a superior geothermal area than it would be the case with a drilling start at the surface. This results in an elimination of the whole drilling work and drilling costs up to this depth. In this master thesis the focus is on petrothermal systems. The reason therefor is to avoid a geographically limitation cause of geological conditions. At the beginning of the main part for both projects the general technical requirements for a project realization is carried out. Especially the geological and geothermal conditions to run a petrothermal system are important. The geomechanical conditions were especially in the area of the planned cavern creation investigated. In the cavern it is also being considered to construct the drilling rig. For a project realization logistic is an essential factor and can be a major challenge. Especially if there is a running mining operation like in project study B. The critical factors therefor are transport, dimensions, achievable depth and the necessary operation resources. Also the consequences of a geothermal project concerning safety and environment were part of this thesis. Furthermore, the arrangements for feeding the grid were investigated. The project related relevant parameters and properties were identified and evaluated. After an extensive research, less insightful exploration material for depths above two thousand meters depth has been found. In both project studies, crystalline bedrock is expected at about six kilometers depth. This crystalline rock was tested for geothermal relevant parameters. This makes a statement possible, if the ground is suitable as "heat exchanger" for a deep geothermal power plant and which technical steps are required to realize a project. In the closing part of this thesis the parameters of both project studies are assessed and project-related risks and opportunities identified. The summary forms a potential assessment of both projects. The fundamentals of this assessment are geological, geothermal and infrastructural conditions.

Inhaltsverzeichnis

I	EINLEITUNG	5
1.	AUSGANGSSITUATION UND ZIELE	5
2.	VORGANGSWEISE UND PROJEKTPHASEN	6
2.1.	<i>Grundsätzliches</i>	6
2.2.	<i>Phase 1: Sondierung</i>	6
2.3.	<i>Phase 2: Erweiterte direkte und indirekte Erkundung</i>	7
2.4.	<i>Phase 3 & Phase 4: Erschließungsbohrungen Kavernenerstellung & Anlagenbau</i> ...	7
3.	BEGRIFFE UND DEFINITIONEN.....	7
3.1.	<i>EGS bzw. HDR</i>	7
3.2.	<i>Flash-Systeme</i>	7
3.3.	<i>Geothermisches Potenzial</i>	8
3.4.	<i>Temperaturgradient ∇T (gradT)</i>	8
3.5.	<i>Kristallin</i>	8
3.6.	<i>Kalina Anlage</i>	8
3.7.	<i>ORC-Anlage</i>	8
3.8.	<i>Permeabilität</i>	9
3.9.	<i>Porosität</i>	9
3.10.	<i>Wärmekapazität</i>	9
3.11.	<i>Wärmeleitfähigkeit</i>	9
4.	RECHTLICHE GRUNDLAGEN	9
4.1.	<i>MinroG</i>	9
4.2.	<i>ÖSG 2012</i>	9
4.3.	<i>ÖSET-VO 2012</i>	9
4.4.	<i>TOR</i>	10
4.5.	<i>StWG</i>	10
4.6.	<i>Abfallwirtschaftsgesetz 2002</i>	10
4.7.	<i>Baurestmassentrennungsverordnung</i>	10
4.8.	<i>ASchG</i>	10
5.	BESCHREIBUNG DER NUTZUNGSSYSTEME	10
5.1.	<i>Petrothermale Systeme: Kristallines Grundgebirge (HDR-Technik)</i>	11
5.2.	<i>Petrothermale Systeme: Beliebige Gestein (Tiefe Erdwärmesonde)</i>	12
6.	TECHNISCHE GRUNDLAGEN	14
6.1.	<i>Bohrtechnologie</i>	14
6.1.1	Bohrverfahren.....	14
6.1.2	Bohrstrangsystem.....	14
6.1.3	Bohrwerkzeuge.....	14
6.1.4	Bohrspülung.....	15
6.1.5	Verrohrung und Zementation.....	15
6.1.6	Komplettierung.....	16
6.1.7	Tiefbohranlagen.....	17
6.2.	<i>Geothermisch relevante geophysikalische Verfahren</i>	18
6.2.1	Seismik.....	18
6.2.2	Gravimetrie.....	19
6.2.3	Geomagnetik.....	19
6.2.4	Geoelektrik.....	19
6.2.5	Thermische Verfahren.....	20
6.3.	<i>Parameterbestimmung</i>	21
6.3.1	Probenherstellung.....	22
6.3.2	Thermophysikalische Parameter.....	23
6.3.1	Hydraulische Parameter.....	25
6.4.	<i>Stimulation des Bohrlochs</i>	26
6.4.1	Hydraulische Stimulation.....	26
6.4.2	Chemische Stimulation (Säurestimulation).....	27
6.5.	<i>Stromgewinnungsanlage</i>	27
6.6.	<i>Strom-, und Wärmeleistung</i>	29

7.	BESTEHENDE GEOTHERMISCHE ANLAGEN	29
7.1.	<i>Anlagen in Österreich</i>	29
7.2.	<i>Zeche Heinrich in Essen</i>	29
7.3.	<i>Zeche Robert Müser in Bochum-Werne</i>	30
II	HAUPTTEIL NUTZUNG NATIONALER UNTERTAGEANLAGEN ZUR	
	GEOTHERMISCHEN ENERGIEGEWINNUNG	32
8.	ANFORDERUNGEN NATIONALER UNTERTAGEANLAGEN ZUR GEOTHERMISCHEN	
	ENERGIEGEWINNUNG	32
8.1.	<i>Geophysik</i>	32
8.2.	<i>Geologie</i>	33
8.3.	<i>Geomechanik</i>	35
8.3.1	Tiefenbohrung	35
8.3.2	Bohrkaverne	35
8.4.	<i>Betrieb</i>	35
8.4.1	Wärmereservoir	35
8.4.2	Personal	36
8.4.3	Energieversorgung und Energieeinspeisung.....	36
8.4.4	Energieumwandlung.....	37
8.5.	<i>Ausbruchsquerschnitte und Lasten</i>	37
8.5.1	Kavernenabmessungen für Bohrturm	37
8.6.	<i>Tiefbohranlage</i>	37
8.6.1	Der Bohrplatz	37
8.6.2	Hauptbestandteile Bohrplatzeinrichtungsfläche	37
8.6.3	Der Bohrlochdurchmesser	38
8.7.	<i>Logistik</i>	38
8.7.1	Antransport Bohrturm	39
8.7.2	Infrastruktur.....	39
8.7.3	Einrichtung der Stromgewinnungsanlage	40
8.8.	<i>Sicherheit</i>	40
8.8.1	Betriebssicherheit	40
8.8.2	Anlagensicherheit	40
8.9.	<i>Emissionen</i>	41
8.9.1	Schadstoffemissionen	41
8.9.2	Schallemissionen	41
8.9.3	Luftverschmutzung	41
8.9.4	Begleitgase	41
9.	PROJEKTSTUDIE A: ASFINAG-GLEINALMTUNNEL.....	41
9.1.	<i>Allgemeine Projektdaten</i>	41
9.2.	<i>Projektbezogene geologische Standortbedingungen</i>	42
9.2.1	Hornblendeamphibolit.....	43
9.3.	<i>Projektbezogene geothermische Standortbedingungen</i>	44
9.3.1	Wärmeleitfähigkeit λ [W/m*K].....	44
9.3.2	Wärmestromdichte q [mW/m ²].....	45
9.3.3	Wärmekapazität c [J/kg*K]	46
9.3.4	Dichte[g/cm ³]	46
9.3.5	Radiogene Wärmeproduktion A [μ W/m ³]	47
9.3.6	Gesteinstemperatur T [°C].....	48
9.4.	<i>Projektbezogene Gebirgs-, Betriebs-, und Prozessparameter</i>	48
9.4.1	UCS, E-Modul.....	48
9.4.2	Überlagerung und Gesteinstemperatur	48
9.4.3	Platzbedarf.....	49
9.4.4	Bohrarbeiten	49
9.4.5	Betrieb	49
9.5.	<i>Projektbezogene Infrastruktur</i>	49
9.5.1	Zufahrtsstraßen.....	49
9.5.2	Strom.....	49
9.5.3	Bohrplatzeinrichtungsfläche (BE-Fläche)	50
9.5.4	Wasser	50
9.5.5	Belüftung.....	51
9.6.	<i>Projektbezogene Sicherheitsaspekte</i>	51

9.7.	<i>Projektbezogene Risiken</i>	51
9.7.1	Trink-, Thermal- und Mineralwassergewinnung	51
9.7.2	Geologisch bedingtes Risiko	51
9.7.3	Fündigkeitsrisiko - Qualität und Quantität des Wärmereservoirs	52
9.7.4	Bohrtechnische Risiken	52
9.7.5	Fluchtwege/Bewetterung	52
9.7.6	Gefahr durch Verkehr im Tunnel.....	52
9.7.7	Gefahr durch ev. Gas-, oder Wasserzutritte	52
10.	PROJEKTSTUDIE B: RHI-BREITENAU	52
10.1.	<i>Allgemeine Projektdaten</i>	53
10.2.	<i>Projektbezogene geologische Standortbedingungen</i>	54
10.2.1	Magnesitlagerstätte	54
10.2.2	Hackensteinerformation	56
10.2.1	Kristallin	57
10.3.	<i>Projektbezogene geothermische Standortbedingungen</i>	57
10.4.	<i>Projektbezogene Gebirgs-, Betriebs-, und Prozessparameter</i>	58
10.4.1	UCS, E-Modul	58
10.4.2	Überlagerung und Gesteinstemperatur	60
10.4.3	Platzbedarf	61
10.4.4	Bohrarbeiten.....	62
10.4.5	Betrieb.....	62
10.5.	<i>Projektbezogene Infrastruktur</i>	63
10.5.1	Zufahrtsstraßen.....	63
10.5.2	Stollen-, Wendelsystem.....	63
10.5.3	Strom.....	63
10.5.4	Bohrplatzeinrichtungsfläche.....	64
10.5.5	Wasser.....	64
10.5.6	Bohrspülung.....	64
10.6.	<i>Projektbezogene Sicherheitsaspekte</i>	64
10.7.	<i>Projektbezogene Risiken</i>	64
10.7.1	Fündigkeitsrisiko Qualität und Quantität des Wärmereservoirs	64
10.7.2	Bohrtechnische Risiken	65
10.7.3	Fluchtwege/Bewetterung.....	65
10.7.4	Gefahr durch Betrieb im Stollensystem	65
10.7.5	Gefahr durch ev. Gas-, oder Wasserzutritte bei den Bohrungen	66
III	SCHLUSS	67
11.	AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE	67
11.1.	<i>Verwendung der geothermischen Energie</i>	67
11.2.	<i>Potenzialbewertung</i>	67
11.3.	<i>Geothermisches Modell</i>	69
12.	CHANCEN UND RISIKEN	69
12.1.	<i>Chancen</i>	69
12.1.1	Allgemein.....	69
12.1.2	Projektstudie A.....	69
12.1.3	Projektstudie B.....	69
12.2.	<i>Risiken</i>	70
12.2.1	Allgemein.....	70
12.2.2	Projektstudie A.....	70
12.2.3	Projektstudie B.....	70
13.	SCHLUSSBEMERKUNGEN	71
IV	TABELLENVERZEICHNIS	73
V	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	74
VI	QUELLENVERZEICHNIS	76
1.	BÜCHER	76
2.	INTERNETQUELLEN	76
3.	SONSTIGE.....	78
VII	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	79

VIII ANHANG 80

I Einleitung

Der Weltenergieverbrauch ist in den letzten Jahrzehnten stark angestiegen. Analog dazu stieg auch die Weltbevölkerung kontinuierlich an. Um eine zukünftige Versorgungssicherheit für nachfolgende Generationen zu gewährleisten ist einerseits ein sparsamerer Umgang mit Ressourcen notwendig und andererseits sind Systeme und Wege zu fördern, welche eine echte Alternative zu Kohlenwasserstoffen bieten. Auch bei einem ressourcenschonenden Umgang werden Kohle, Erdöl, und Erdgas mittelfristig verknappen. Alleine in den nächsten 50 Jahren wird mit einem Weltbevölkerungsanstieg auf etwa 10 Mrd. Menschen gerechnet. Durch den steigenden Lebensstandard speziell in den östlichen Ländern der Erde wie Indien, China, etc. wird mit einer Verdreifachung der notwendigen Energiemenge in den nächsten 50 Jahren gerechnet. Um diese enormen Energiemengen kompensieren zu können und dabei die bereits sichtbaren Umweltauswirkungen wie beispielsweise den Treibhauseffekt durch CO₂-Ausstoß in Grenzen zu halten sind regenerative Energiesysteme wie Geothermie zu fördern. Die Geothermie als grundlastfähige, erneuerbare, theoretisch überall verfügbare Energiequelle hat das Potenzial fossile Energieträger teilweise zu ersetzen. Dies verringert auch den Ausstoß von CO₂ in die Atmosphäre deutlich und trägt somit wesentlich zum Klimaschutz bei. Das theoretisch nutzbare geothermische Potenzial in Österreich übertrifft den Energieinhalt aller konventionellen Energieformen um ein Vielfaches. Durch die Nutzung der Tiefen Geothermie kann dieses Potenzial in elektrische und thermische Energie umgewandelt werden.

1. Ausgangssituation und Ziele

Gundlage dieser Arbeit bildet das Forschungsprojekt MinTherm. Das Forschungsprojekt untersucht das Nutzungspotential von tiefen Geothermiekraftwerken für untertägige Infrastrukturen wie Tunnelbauwerke und aktive oder auch stillgelegte Bergbaustrukturen.

Ein Schwerpunkt bildet die Untersuchung ob Bohrungen zur geothermischen Stromerzeugung aus einer bestimmten Anfangsteufe durchführbar sind, welche Gebirgsanforderungen und Ausbruchsquerschnitte dafür notwendig sind und welche Vor- und Nachteile dieses Konzept mit sich bringt.

Ein weiterer Schwerpunkt in dieser Arbeit bildet die Ermittlung der nötigen Infrastruktur samt Strom- und Wasserversorgung.

Anhand von unterschiedlichen Kartenwerken wie der Wärmestromdichtekarten wurden Gebiete mit möglichst hohen Wärmeanomalien ins Auge gefasst und mit den Standorten vorhandener untertägiger Bauwerke verglichen.

Vorrangige Priorität hatten jedoch untertägige Bauwerke mit möglichst großer Überlagerung und möglichst hohem Erkundungsgrad. Es sind daher bestimmte geologische Formationen und die damit verbundenen geothermischen Parameter von großer Bedeutung. Diese Parameter entscheiden über die technische Machbarkeit und beeinflussen in großem Maß den wirtschaftlich sinnvollen Betrieb eines Geothermiekraftwerks. Aus diesem Grund wurde entnommenes Probenmaterial auf die wichtigsten geothermischen Parameter untersucht und ausgewertet.

Durch eine untertägige Bohrkavernensituierung fallen weniger Bohrmeter an und dadurch muss weniger Borequipment und Ausrüstung zum Bohrplatz transportiert und in weiterer Folge eingebaut werden. Dies birgt auch einen entscheidenden finanziellen Vorteil, da auf Grund der Bohrmetersparnis der Kostenfaktor erheblich reduziert werden kann. All diese Erkenntnisse tragen entscheidend für eine geeignete Standortwahl der Tiefbohranlage bei. Für Projekte mit hohem Potenzial wird projektbezogen auf die Gegebenheiten hinsichtlich Geologie, geothermische Bedingungen, Infrastruktur, Betrieb, Einspeisung, Verwendung, Sicherheitsaspekte und Risiken eingegangen. Das Ergebnis stellt eine Projektbewertung dar, welche die Vor- und Nachteile der beiden Standorte abwägt und bewertet.

Unter Miteinbezug der projektbezogenen Aspekte wird in dieser Arbeit ein geeigneter Standort für eine untertägige Kaverne festgelegt. Untersucht werden nur petrothermale Systeme (tiefe Erdwärmesonden und EGS¹), welche keine wasserführenden Schichten voraussetzen und praktisch überall ausführbar sind.

¹ EGS: Enhanced Geothermal Systems

2. Vorgangsweise und Projektphasen

Bei der der Planung und Umsetzung eines Geothermieprojekts in einem bestehenden untertägigen Bauwerk gibt es im Wesentlichen 5 Phasen.

Phase 1: Sondierung

Phase 2: Erweiterte direkte und indirekte Erkundung

Phase 3: Erschließungsbohrungen

Phase 4: Kavernenerstellung & Anlagenbau

2.1. Grundsätzliches

Bei einem Geothermiekraftwerk kann im Gegensatz zu einem konventionellen Kraftwerksprojekt vorab nicht genau definiert werden, wie groß dessen Leistung nach Fertigstellung ist. Tiefe Geothermie ist überall vorhanden, ist aber nur unter bestimmten Voraussetzungen wirtschaftlich gewinnbar und nutzbar. Das Aufsuchen der Wärmeressourcen erfolgt analog zu Erdöl- und Erdgasvorkommen. Vor der eigentlichen Bauphase steht eine sogenannte Erkundungsphase, deren Ausgang unbekannt ist. Ausnahmen bilden hier durch die Erdöl-, und Erdgasindustrie bereits erkundete Gebiete. Konkret sind die Bereiche der geplanten Kavernensituierung, welche in weiterer Folge als Ausgangspunkt der Tiefenbohrung fungiert, bei Untertagebauwerken bereits sehr gut erkundet. Dies resultiert aus den bereits errichteten untertägigen Bauwerken und aufgefahrenen Lagerstätten. Generell bietet die Errichtung und der untertägige Betrieb der Tiefengeothermieanlage einige Vorteile gegenüber einem Projekt auf der „Grünen Wiese“. Der Projektfortschritt (Phase 1-4) geht einher mit einem Kostenanstieg und jede Phase ist mit Risiko behaftet. Ein großer Erkenntnisgewinn (Geologie, Störzonen, Hydrogeologie,...) und eine große Risikominimierung erfolgt nach Abschluss der Erkundungsbohrungen (Phase 2). Ein Zusammenhang zwischen Projektfortschritt, finanzieller Aufwand und Risiko ist in der folgenden Abbildung dargestellt. [29]

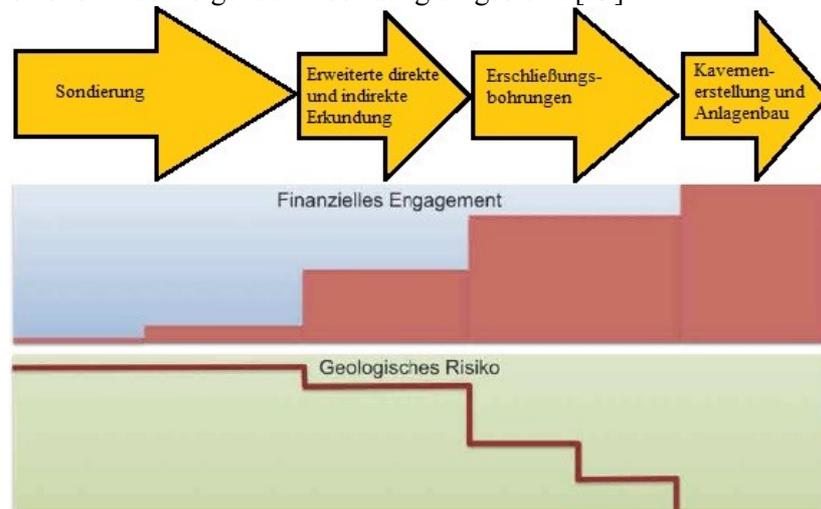


Abbildung 1: Projektphasen für die Erstellung eines Geothermiekraftwerks [29]

2.2. Phase 1: Sondierung

In der Sondierungsphase wird das Potential zur Nutzung von tiefen Geothermiekraftwerken für untertägige Infrastrukturen wie Tunnelbauwerke und aktive oder auch stillgelegte Bergbauanlagen erhoben. Es werden die geologischen und geothermischen Standortbedingungen für zwei Projekte (Projektstudie A und Projektstudie B) analysiert und ausgewertet. Des Weiteren findet die notwendige Bohrtechnologie und die erforderliche Infrastrukturen zum Abteufen von Tiefenbohrungen Eingang. Anhand von Gesteinsproben werden auch die projektspezifischen Gebirgs-, Betriebs- und Prozessparameter und die damit einhergehenden notwendigen Sicherheitsaspekte ermittelt und ausgewertet.

Die Bewertungsmatrix, die sich aus den erhobenen Daten ergibt, stellt eine Zusammenfassung der wichtigsten projektrelevanten Parameter dar. Diese Phase liefert die Planungsgrundlagen für die Phasen 2 bis 4.

2.3. Phase 2: Erweiterte direkte und indirekte Erkundung

Die Ausarbeitung bis zur Teufe der Bohrkaverne wurde bei beiden, in dieser Arbeit untersuchten, Projekte durchgeführt. Zur Erweiterung des geologischen Kenntnisstandes bis in die Zielteufe von etwa 6,0 [km] sind sowohl bei Projektstudie A als auch bei Projektstudie B weitere Erkundungsmaßnahmen notwendig.

Es sind für die erwähnten Projektstudien seismische Messungen mit Fokus auf >1000 [m] zur indirekten Erkundung und Bohrkerne zur direkten Erkundung angedacht. Genauere Aussagen über Schichtgrenzen, Wasserführungen, Geologie, Störungszonen,... sind erst bei Abteufen einer Tiefenbohrung auf Zielniveau möglich. Erst nach Abteufen der ersten Bohrung kann das Risiko drastisch gesenkt werden. Vor Beginn einer solchen Bohrung werden felsmechanische, geologische, geophysikalische und geochemische Modelle erstellt, um das beste Gebiet für die Bohrung auszukundschaften. Da eine Erkundung bis zur Teufe der geplanten Bohrkaverne bereits vorhanden ist können erste Näherungen über die geologischen und geothermischen Verhältnisse in der Zielteufe bereits gemacht werden und verringern den Erkundungsaufwand. Für den geplanten Zugang zur Bohrkaverne und die Bohrkavernenerstellung selbst entfallen bei beiden Projektstudien die indirekte und direkte Erkundung beinahe zur Gänze. Man benötigt für die Planung einer solchen Erkundungsbohrung meist ein Jahr. Eine 3-D Seismikuntersuchung als indirekte Vorerkundung und zur Risikominimierung der betroffenen Region wird mit etwa 4-6 Monaten je Standort beziffert. Für die Tiefbohrung selbst (exklusive Bohrplatzkavernenerrichtung) wird mit einem halben Jahr gerechnet. Werden vorab Erkundungsbohrungen abgeteuft kann durch den Informationsgewinn, bereits eine Kostensenkung von etwa 10 [%] – 30 [%] erreicht werden. [29]

2.4. Phase 3 & Phase 4: Erschließungsbohrungen Kavernenerstellung & Anlagenbau

Die Risiken bezüglich Produktionsraten, Leistungsfähigkeit des geothermischen Systems und Geologie können erst nach Fertigstellung der Förder-, und Injektionsbohrung eliminiert werden. kann mit dem Anlagenbau (Kühltürme, Transformatoren, Generatoren, Turbinen, etc.) begonnen werden. Hierfür muss, aufgrund der bereits gewonnenen Kenntnisse über den Untergrund und dessen Eigenschaften, kein Risikokapital mehr zur Verfügung gestellt werden. Da bei beiden Projektstudien ein großer Teil der Anlage Untertage erstellt wird, ist hier mit höherem Aufwand und daraus resultierenden höheren Kosten zu rechnen.

3. Begriffe und Definitionen

In diesem Kapitel werden die bedeutendsten projektrelevanten Fachbegriffe und Definitionen erklärt und beschrieben.

3.1. EGS bzw. HDR

Enhanced Geothermal Systems = Verbesserte bzw. stimulierte geothermische Systeme. Erdwärme wird mit Wasser oder Dampf an die Oberfläche gefördert. Ist die Durchlässigkeit des Gesteins zur gering wird mit hohen Drücken und Wasser (teilweise auch mit Sand versetzt) oder mittels Säuren versucht die vorhandenen Klüfte auf zu weiten. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von sogenannten HDR-Systemen (HDR = Hot Dry Rock). Um die Grundwasserbilanz aufrecht zu erhalten wird das Wasser nach dem Entziehen der Wärme an der Oberfläche wieder in den Untergrund zurück injeziert. All diese Vorgänge gemeinsam resultieren in einem verbesserten künstlichen Wärmetauscher. [28]

3.2. Flash-Systeme

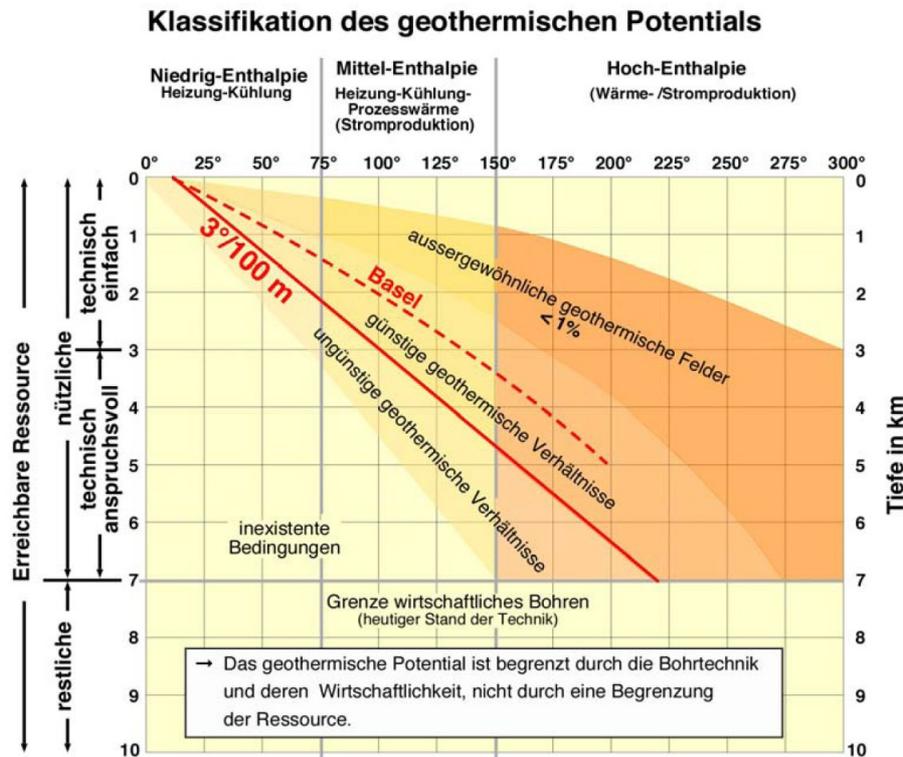
Weniger heiße ($T = \text{ca. } 150^\circ\text{C}$) Förderwässer wandeln sich bei Ausdehnung nicht mehr vollständig in Dampf um, sondern es entsteht ein Gemisch aus Dampf und Wasser. Dieser Dampf wird in der Energietechnik auch Nassdampf genannt. Da die Wasserteilchen die Turbinenschaufeln angreifen würden, wird der Turbine ein Separator vorgeschaltet. [28]

Ein solches System ist daher mit Trockendampf erst bei Temperaturen $>180^\circ\text{C}$ sinnvoll (siehe 8.7.3). Bei der Förderung des Wassers vom Wärmereservoir Richtung Oberfläche wird der Druck reduziert, das heiße Wasser wird zum Dampf und treibt die Turbinen an. Das nicht zum Dampf umgewandelte Wasser läuft in den Untergrundspeicher zurück.

3.3. Geothermisches Potenzial

Ein geothermisches Potential ist die Möglichkeit Energie aus der Erde zu gewinnen.

Für eine Abschätzung und Klassifizierung des geothermischen Potentials ist eine Bohrtiefe von etwa 7 [km] sinnvoll.



3.4. Temperaturgradient ∇T (gradT)

Ist die Temperaturänderung mit zunehmender Tiefe und ist abhängig von der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins. Ein typischer Temperaturgradient für unsere Breiten (Österreich) ist $3 [^{\circ}\text{C}]/100 [\text{m}]$. [28]

Bei beiden in dieser Arbeit betrachteten Projekten ist aufgrund der eingeschränkten Datenmenge für Teufen $> 2000[\text{m}]$ keine Aussage über den regionalen vertikalen Temperaturverlauf (gradT) möglich und wird daher mit dem für diese Breiten üblichen Wert $3 [^{\circ}\text{C}] / 100 [\text{m}]$ angenommen.

3.5. Kristallin

Gesteine welche aus einem langsamen Erstarrungsprozess einer Gesteinsschmelze entstanden sind (Amphibolit, Gneis, Glimmerschiefer, etc.). Das in der Zielteufe vorhandene Kristallingestein fungiert bei EGS Projekten als Wärmetauscher. Das dichte Kristallingestein in Teufen von 5-6 [km] weist eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit auf und ermöglicht eine schnelle und effiziente Wärmeübertragung vom Gebirge auf das Wärmeträgermedium. [28]

3.6. Kalina Anlage

Diese Anlage ist eine Weiterentwicklung der ORC Anlage. Das Medium ist ein Ammoniak-Wasser Gemisch wodurch ein besseres Wärmeübertragungsverhältnis geschaffen wird und dadurch der Wirkungsgrad gesteigert wird. Diese Methode ermöglicht eine Stromproduktion bei Temperaturen ab 100°C . Beispiele dafür sind das Kraftwerk von Husavik (Island) und Unterhaching (Deutschland). [28]

3.7. ORC-Anlage

Organic Rankine Cycle

Ist ein Verfahren zum Betrieb einer Dampfturbine mit einem anderen Arbeitsmittel als Wasser. In der Regel werden Flüssigkeiten mit einem niedrigerem Siedepunkt verwendet um auch aus Temperaturen von ca. 100°C Strom erzeugen zu können. Der Name geht auf den Erfinder William J.M. Rankine zurück.[28]

3.8. Permeabilität

Bezeichnet die Durchlässigkeit eines Gesteins für Gase und Flüssigkeiten. Die Durchlässigkeit wird über das Darcy Gesetz bestimmt.[28]

3.9. Porosität

Ist definiert durch das Verhältnis aller Hohlräume im Festgestein zum gesamten Volumen. Ist für die Geothermie von großer Bedeutung, da nur bei einer bestimmten Porosität im Gestein das Wärmeträgermedium fließen kann. Permeabilität und Porosität nehmen generell mit der Tiefe ab.[28]

3.10. Wärmekapazität

Die Wärmekapazität bildet gemeinsam mit der Wärmeleitfähigkeit eine der wichtigsten und wesentlichsten thermischen Eigenschaften für petrothermale Systeme wie sie in beiden Projektstudien angedacht sind. Sie beschreibt inwieweit das kristallinen Grundgebirge Wärme speichern zu vermag. Sie ist außerdem sehr bedeutsam für die Charakterisierung der zeitlichen Wärmeveränderung im Zielhorizont.

3.11. Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit ist einer der wichtigsten thermischen Eigenschaften bei tiefen Geothermieprojekten. Sie beschreibt das Vermögen eines Stoffes thermische Energie in Form von Wärme zu transportieren.

4. Rechtliche Grundlagen

Primäre und wichtigste Rechtsgrundlage für das Aufsuchen, Gewinnen und Aufbereiten von Erdwärme ist das Mineralrohstoffgesetz (MinroG). Für österreichische Geothermieprojekte sind auch das österreichische Wasserrecht, das Forst- und Naturschutzrecht, das Ökostromgesetz, Ökostrom-Einspeisetarifverordnung 2012,, Starkstromwegegesetz, ASchG, Baurestmassentrennungsverordnung, TOR und auch das Gewerberecht von Bedeutung.

4.1. MinroG

Mineralrohstoffgesetz

Da Erdwärme ein bergfreier Rohstoff ist findet das Mineralrohstoffgesetz Anwendung. Im Speziellen der §119 zur Bewilligung von Bergbauanlagen. Zur Herstellung (Errichtung) von obertägigen Bergbauanlagen sowie von Zwecken des Bergbaus dienenden von der Oberfläche ausgehende Stollen, Schächten, Bohrungen mit Bohrlöchern ab 300 m Tiefe und Sonden ab 300 m Tiefe ist eine Bewilligung der Behörde einzuholen.

4.2. ÖSG 2012

Ökostromgesetz 2012

Am 27. Oktober 2001 trat die EU-Richtlinie 2001/77/EG zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen im Elektrizitätsbinnenmarkt in Kraft. Die Richtlinie hatte den Zweck, den Anteil an erneuerbaren Energieträgern zur Stromerzeugung in der EU zu forcieren und die Grundlage für einen künftigen Gemeinschaftsrahmen zu bilden. Der Anteil Erneuerbarer Energieträger an der Stromerzeugung sollte bis 2010 im EU-Mittel von 13 [%] auf 22 [%] gesteigert werden. Zur Umsetzung der EU-Richtlinie wurde vom österreichischen Nationalrat 2002 das ÖSG verabschiedet.

Prinzipiell besagt das Gesetz, dass jeder, der Ökostrom erzeugt, diesen auch in das Stromnetz einspeisen darf. Im Gesetzestext spricht man dabei von der sogenannten Kontrahierungspflicht. Dafür wird ein gesetzlich geregelter Tarif pro Kilowattstunde abgeboten.

4.3. ÖSET-VO 2012

Ökostrom-Einspeisetarifverordnung 2012

Darin sind die Einspeisetarife in Cent/kWh für die unterschiedlichen erneuerbaren Energieträger angeführt.

Die Einspeisetarife für Ökostrom aus Geothermie werden darin wie folgt definiert:

1. bei Antragstellung bis Ende 2012 7,50 Cent/kWh,

2. bei Antragstellung im Jahr 2013 7,43 Cent/kWh.

4.4. TOR

Technische und Organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen. Die TOR besteht aus 4 Hauptabschnitten (D1-D4) und regelt technische Sonderthemen, welche für eine zuverlässige Betriebsführung der Stromverteilernetze von Bedeutung sind. Die aktuellen Fassungen werden auf der Website www.e-control.at zur Verfügung gestellt. Für diese Arbeit sind die Hauptteile D2 und D4 in der TOR von Bedeutung. Der Hauptabschnitt D2 definiert die Richtlinien zur Beurteilung von Netzurückwirkungen. Im Hauptabschnitt D4 der TOR (Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen mit Verteilernetzen) werden grundsätzliche technische Details bezüglich Anschluss von Erzeugungsanlagen aller Art und sicherheitstechnische Problemstellungen des Netzbetriebes im Zusammenhang mit dem Betrieb von Erzeugungsanlagen erläutert.

4.5. StWG

Starkstromwegegesetz

Gesetz über die Errichtung und den Betrieb elektrischer Leitungsanlagen (Starkstrom) und wie diese richtig verlegt werden.

Das Gesetz gilt:

für Leitungsanlagen, die ausschließlich dem Betrieb von Eisenbahnen oder Bergbauanlagen sowie der Luftfahrt, der Schifffahrt, den technischen Einrichtungen der Post, der militärischen Landesverteidigung oder Fernmeldezwecken dienen.

Da die Geothermie in das MinroG fällt und daher die errichteten Bauwerke wie beispielsweise die Bohrkavernen und die Bohrlöcher als Bergbauanlagen definiert werden, findet das Gesetz Anwendung.

4.6. Abfallwirtschaftsgesetz 2002

Das Abfallwirtschaftsgesetz legt die allgemeinen Grundsätzen der Abfallwirtschaft (Vermeidung – Verwertung – Beseitigung) fest und formuliert ein eigenes Verwertungsgebot für Abfälle, die im Zuge von Bautätigkeiten anfallen.

4.7. Baurestmassentrennungsverordnung

Die Baurestmassentrennungsverordnung regelt die getrennte Sammlung und Verwertung der verwertbaren Baurestmassen. Demzufolge ist der Bauherr verpflichtet, die Trennungs- und Verwertungspflichten einzuhalten. Wenn im Zuge der Bautätigkeiten Mengenschwellen überschritten werden, sind jene Stoffgruppen zu trennen, bei denen die Mengenschwelle überschritten ist. Konkret betrifft dies die Mengenschwellen für Bodenaushub im Bereich der Kavernenzugänge und der Kavernenerrichtung. Die Grenze liegt hier bei 20 Tonnen Bodenaushubmaterial.

4.8. ASchG

Das Arbeitnehmerschutzgesetz gibt Aufschluss über Unterweisungen, Pflichten der Arbeitnehmer, Aufzeichnungen und Berichte über Arbeitsunfälle, Instandhaltung, Reinigung, Prüfung, Ermittlung und Beurteilung der Gefahren, Festlegung von Maßnahmen, Sicherheits- und Gesundheitsschutzdokumente, Einsatz der Arbeitnehmer, Grundsätze der Gefahrenverhütung, Koordination, Persönliche Schutzausrüstung, Umgang mit gefährlichen Arbeitsmitteln und Arbeitsstoffen, Gesundheitsüberwachung, Verantwortlichkeit Arbeitnehmerschutz, Präventivmaßnahmen, Arbeitsstätten im Freien, Arbeitsstätten in Gebäuden, Brand- und Explosionsschutz, Erste Hilfe.

5. Beschreibung der Nutzungssysteme

Bei petrothermalen Systemen wird grundsätzlich zwischen dem HDR Verfahren und der tiefen Erdwärmesonde unterschieden.

Die Erschließung der Energieressource erfolgt über einen in der Kaverne situierten Bohrturm. Nach Einrichtung und Anschluss des Bohrturms (siehe Abbildung 3) wird das erste Bohrloch (Injektionsbohrung) auf eine Tiefe von ca. 6000 [m] mit dem sogenannten Rotary Bohrverfahren abgeteuft.

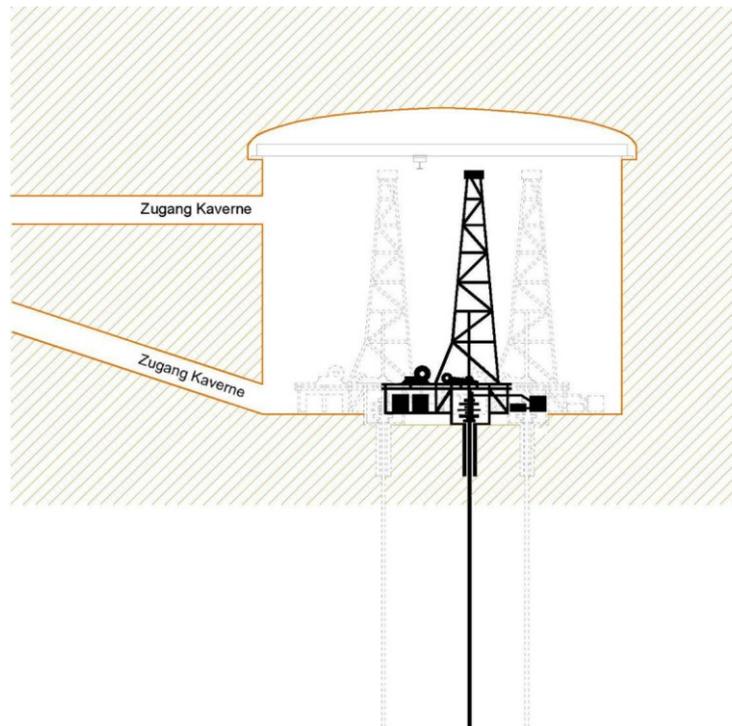


Abbildung 3: Startkaverne Bohrturm

Bei einer Überlagerung von etwa 1000 [m] würde dies eine Bohrlänge von 6 [km] erfordern um eine Gesteinstemperatur in der Zielteufe von etwa 200 [°C] zu erreichen und so Energie mittels der im Folgenden beschriebenen beiden petrothermaler Nutzungssysteme gewinnen zu können. Beim HDR System ist zur Aktivierung des „Wärmetauschers“ mindestens eine weitere Bohrung (Förderbohrung) notwendig. Bei der Installation einer tiefen Erdwärmesonde fungiert das umliegende Gebirge alleine als Wärmetauscher. Beide Systeme werden im Folgenden für beide Projektstudien genauer beschrieben und unter Abwägung der Vor- und Nachteile bewertet. .

5.1. Petrothermale Systeme: Kristallines Grundgebirge (HDR-Technik)

Hot-Dry-Rock (HDR) Systeme, auch Enhanced Geothermal Systems (EGS) oder Hot-Fractured-Rock (HFR) Systeme sind Nutzungssysteme mit Temperaturen von > 150-200 [°C] sowie Tiefen um 5000 [m]. Die Förderung der geothermischen Energie erfolgt ohne Vorhandensein wasserführender Horizonte. Um beim HDR System im Untergrund große Wärmetauscher-Oberflächen zu erzeugen, presst man Wasser mit hohem Druck in ein Bohrloch, dass sich Klüfte aufweiten oder neu bilden. Im Betriebszustand erhitzt sich das eingeleitete kalte Wasser am heißen Gestein und dient so als Energieträgermedium. Das heiße Wasser wird in weiteren Bohrungen gefördert. An der Oberfläche wird ihm die Wärmeenergie wieder entzogen. Diese Energie wird primär zur Stromerzeugung genutzt. Für die Umwandlung von Erdwärme in Strom gibt es verschiedenste Systeme. Prinzipiell wird bei jedem System ein Arbeitsmedium durch die im Untergrund herrschende Temperatur erhitzt. Der Dampf der dabei entsteht treibt eine Turbine an, welche mit einem Generator verbunden ist und dieser erzeugt dann elektrische Energie. Für Temperaturen >100 [°C] wird der sogenannte Kalina Prozess oder ein Flash System (Single Flash, Double Flash) angewandt und für Temperaturen <100 [°C] der ORC.

Das HDR-Verfahren hat vorwiegend das Ziel Strom zu erzeugen. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wird aber bei den meisten Projekten eine Kombination aus Strom und Wärme durchgeführt. Zielreservoirs sind überwiegend kristalline Gesteine wie beispielsweise Gneise und Granite des Grundgebirges. Das HDR-Verfahren nutzt die Methode des Hydraulic-Fracturing (aus der Erdöl- und Erdgasindustrie) zur Generierung eines großen unterirdischen Wärmetauschers. Dies ist ein entscheidender Vorteil des HDR-Systems gegenüber der tiefen Erdwärmesonde, da durch die große Wärmetauschfläche die entziehbaren Energiemengen viel Größer sind. Dabei werden Wassermengen

bis zu 100 [l/s] unter hohem Druck verpresst, wodurch im Gestein bestehende Risse vergrößert und neue Risse generiert werden.

Da EGS Systeme theoretisch überall einsetzbar sind, wird in ihnen das größte Potenzial für die geothermische Nutzung gesehen. Für HDR-Systeme werden jedoch derzeit Standorte mit einem höheren geothermischen Gradient und Gebiete mit Wärmeanomalien bevorzugt.

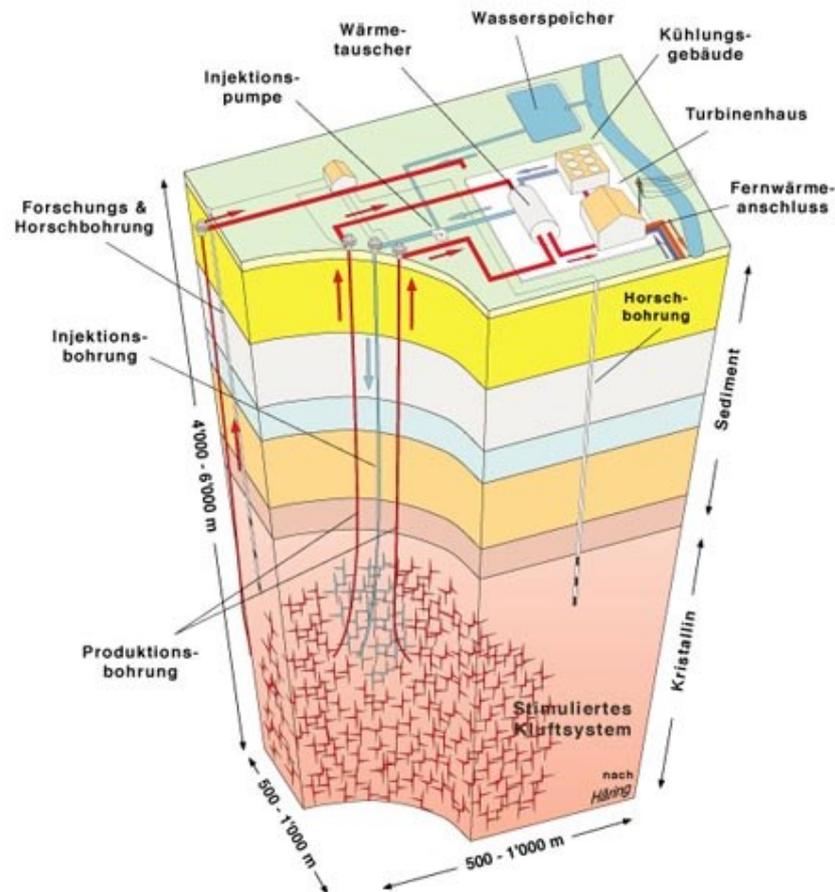


Abbildung 4: Funktionsprinzip HDR[26]

Die Mehrheit der modernen geothermischen Kraftwerke verwenden ein Flash System (siehe auch 3.2).

5.2. Petrothermale Systeme: Beliebige Gestein (Tiefe Erdwärmesonde)

Hier wird die Energie nur indirekt genutzt. Es werden zwei oder mehr Bohrungen abgeteuft in denen ein Wärmeträgermedium zirkuliert und so die Wärme aus dem Gestein aufnimmt und an die Oberfläche transportiert. Ein Nachteil dieses Systems ist, dass die Wärmeüberträgerfläche (Mantelfläche) sehr gering ist und so die Energieausbeute einen Bruchteil von HDR Systemen beträgt. Geologisch-, sicherheits-, und umwelttechnisch hat die Verwendung tiefer Erdwärmesonden aufgrund des Nichteinsatzes von Fracking große Vorteile.[18]

Das Funktionsprinzip tiefer Erdwärmesonden ist das gleiche wie bei Sonden zur Nutzung oberflächennaher Erdwärme. Im einfachsten Fall wird ein koaxiales Rohr eingebaut. Dabei wird das Wärmeträgermedium (Wasser) über den Ringraum zwischen Tübbingstrang und Verrohrung der Bohrung in die Tiefe gepumpt. Ja nach geothermischen Gradienten wird das Medium auf dem Weg Richtung Endteufe immer weiter erwärmt, und entzieht dabei dem umliegenden Gebirge über die Mantelfläche Energie. Über den Tübbingstrang (Steigleitung) wird das erwärmte Medium nach oben

seismische Risiko praktisch völlig ausgeschaltet. Da ein geschlossenes System Anwendung findet, kann keine Verstopfung der Bohrung durch Ausfällungen eintreten. Der dritte Vorteil ist, dass es kein Risiko für das Auffinden geeigneter geologischer Formationen für Fracking gibt, da das umliegende Gestein als Wärmeüberträger fungiert. [31].

6. Technische Grundlagen

In diesem Kapitel werden sämtliche technischen Maßnahmen beschrieben welche für ein Geothermiekraftwerk Untertage relevant sind. Besonderes Augenmerk liegt auf dem zurzeit umsetzbaren Stand der Bohrtechnik.

6.1. Bohrtechnologie

Das für die tiefe Geothermie am besten geeignete Verfahren ist das Rotary Bohrverfahren. Es ermöglicht Bohrungen bis 10 [km] Teufe. [1]

Die angestrebten Bohrteufen erfordern abhängig von Geologie, Kosten und Energieausbeute beim HDR Verfahren und bei der tiefen Erdwärmesonde unterschiedliche Durchmesser.

Allgemein benötigten tiefe Erdwärmesonden größere Durchmesser, da der Durchmesser direkt die Größe der Wärmetausfläche bestimmt. Beim HDR Verfahren sind kleinere Bohrlochdurchmesser ausreichend. Die Größenordnung beim HDR- Verfahren ist gleich wie bei der Erdöl- und Erdgasförderung.

6.1.1 Bohrverfahren

Beim Rotary Bohrverfahren wird der Bohrmeißel unter ständiger Andruckkraft gedreht um das Bohrklein zu lösen. Das gelöste Bohrklein wird unter Verwendung einer Bohrspülung nach über Tage transportiert. Zusätzlich hat die Bohrspülung auch die Aufgabe das Bohrloch zu stützen und das gesamte System zu kühlen. Die Drehung des Bohrgestänges erfolgt bei modernen Bohranlagen über einen Top-Drive direkt auf den Bohrstrang und wird über das Gestänge direkt auf den Bohrmeißel übertragen.[1] Als Bohrkronen werden neben Diamantbohr- und Kernbohrwerkzeugen Großteils Dreikegel-Rollenmeißel eingesetzt. Gesichert wird das Bohrloch durch das Einbringen und Zementieren von sogenannten Futterrohren. Beim Ein- und Ausbau der schweren Rohre wird ein Hebesystem mit Flaschenzug eingesetzt. Aufgrund der großen Abgasmengen einer dieselpbetriebenen Anlage und der daraus resultierenden großen notwendigen Frischluftzufuhr, ist für Untertageprojekte ein Elektromotor als Antrieb vorzusehen. Auslegungskriterien einer Tiefbohranlage sind der Bohrlochdurchmesser und die Endteufe. Nach Beendigung der Bohrung, Komplettierung und Adaptierung der Anlage auf den Förderbetrieb kann die Anlage auf einem anderen Standort eingesetzt werden bzw. für die zweite Bohrung vorbereitet werden. [5]

6.1.2 Bohrstrangsystem

Das Bohrstrangsystem setzt sich aus den Komponenten Bohrstrang und Bohrwerkzeug zusammen wobei sich der Bohrstrang aus Mitnehmerstange (Kelly), Bohrgestänge, Schwerstangen und Bohrstrangelemente (Stabilisatoren, Stoßdämpfer, Schlagschere) zusammensetzt. Den Hauptteil des Bohrstranges bildet das Bohrgestänge mit den jeweils 9 [m] langen Stahlrohren, welche miteinander verschraubt werden. Materialauswahl und Dimensionierung der Rohre sind vom API (American Petroleum Institute) genormt und vorgegeben. Die im Bohrstrang enthaltenen Stabilisatoren führen diesen mit möglichst geringer Richtungsabweichung in die Tiefe. Die eingebaute unmagnetische Schwerstange dient zur Richtungskontrolle der Bohrung. Die Stoßdämpfer sollen auftretende Schläge auf den Bohrstrang dämpfen. Die eingebaute Schlagschere soll einen festgesetzten Schwerstangenstrang wieder lösen. Stoßdämpfer und Schlagschere sind spezielle Werkzeuge die bei Geothermiebohrungen vor allem hinsichtlich der erhöhten Temperaturen ausgelegt werden müssen.[5]

6.1.3 Bohrwerkzeuge

Das Bohrwerkzeug ist ein Verschleißteil und muss besonders auf die Gesteinseigenschaften und die Bohrlochumgebungsbedingungen abgestimmt werden, da bei einem Wechsel der gesamte Bohrstrang ausgebaut und wieder eingebaut werden muss.

Beim Rotary Bohrverfahren werden hauptsächlich 3-Kegel-Rollenmeißel mit gehärteten Stahlzähnen oder Wolframkarbideinsätzen als Warzenmeißel eingesetzt. Maximaltemperaturen für den Einsatz von Rollenwarzenmeißel liegen bei 200 – 250 [°C]. Werden die Temperaturen noch höher resultiert dies in einem erhöhten Verschleiß der Stahlzähne, Lager und der Wolframkarbideinsätze. Bei Temperaturen ab ca. 200 [°C] werden speziell entwickelte Metalledichtungen empfohlen, welche die Lagerwärme schneller an die Bohrspülung abgeben.

Ein entscheidender Vorteil bei der Verwendung von Diamantbohrwerkzeugen ist der problemlose Einsatz bis Temperaturen von 500 [°C]. Jedoch liefert dieser einen beträchtlich geringeren Bohrfortschritt. Da Diamantenmeißel einen geringeren Verschleiß haben und daher länger eingesetzt werden können, werden diese mit zunehmender Tiefe immer wirtschaftlicher.[5]

6.1.4 Bohrspülung

Bei Standardbohrverfahren wird für die Bohrlochsohlenreinigung eine umlaufende Flüssigspülung aus Bentonit und Wasser benötigt. Eine ausgezeichnete Alternative zur Flüssigspülung bietet eine gasförmige Bohrspülung. Bohrvortrieb mit Luft- oder Gasspülung bietet für trockene kristalline Gesteine hervorragende Voraussetzungen. Mit Luftspülung kann eine drei bis vierfach höhere Bohrgeschwindigkeit erreicht werden. Ein weiterer positiver Effekt der Luftspülung ist, dass sich die Verschleißzeit des Meißels halbiert. Untergrundanforderungen für eine Anwendung der Luftspülung sind allerdings trockene und dichte Gesteinsformationen bzw. Bohrlochwandungen. Da das Gebirge in den wenigsten Fällen über Teufen von 5 bis 6 [km] völlig trocken ist und dies für die beiden in dieser Arbeit betrachteten Standorte auch nicht erwartet wird, besteht die Möglichkeit in den feuchteren Gebieten die Flüssigspülung und in den trockenen Zonen die Luftspülung einzusetzen.[5]

6.1.5 Verrohrung und Zementation

Um ein Geothermiebohrloch funktionsfähig und auf ihre gesamte Nutzungsdauer offen halten zu können, ist das Setzen der Verrohrung (Stahlrohre als Ausbau) und eine darauffolgende Zementation unbedingt erforderlich. Mit dem Einbau der Verrohrung wird das Bohrloch gestützt, der Zutritt von wasserführenden Schichten verhindert, der Verlust von Spülmedium auf ein Minimum herab gesetzt und es ermöglicht einen leichten späteren Einbau technischer Hilfsmittel im Bohrloch. Es stehen Verrohrungsaußendurchmesser von 4,5 Inch bis 20 Inch zur Verfügung. Der Einbau erfolgt bereits teilweise während der Bohrtätigkeit. Der notwendige Enddurchmesser der abgeteuften Geothermiebohrung ist das Dimensionierungskriterium für die Bohrlochkonstruktion. Aufbauend auf den Enddurchmesser werden die weiteren Durchmesser der Rohrtouren, welche je nach Einbaubereich eine bestimmte Bezeichnung tragen, festgelegt. Das Standrohr, welches das Bohrloch gegen verwittertes gelockertes Material nahe der Oberfläche bzw. im Bereich der Bohrkavernensole absichert, kann bei tiefem Grundwasserspiegel bis zu 30 [m] Meter Teufe eingebracht werden. Darauf folgt die Ankerrohrtour (Abbildung 6).[1]

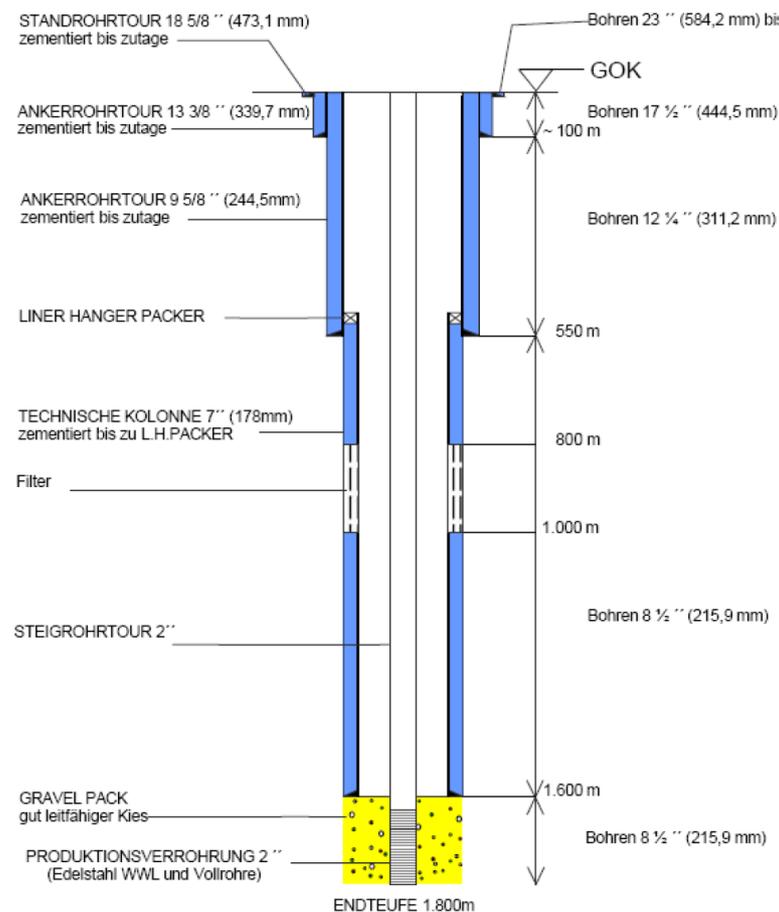


Abbildung 6: Prinzipieller Aufbau einer Tiefbohrung [21]

Um die Wirtschaftlichkeit des Geothermieprojekts zu gewährleisten sind hohe Produktionsraten notwendig. Um diese zu erreichen werden diese Bohrungen oft Steigrohrlos komplettiert. Die Förderung der heißen Medien erfolgt somit direkt über die Verrohrung. Die Verrohrung selbst ist eine Vielzahl von Beanspruchungen (Eigengewicht, Gebirgsdruck, thermische Einwirkung,...) ausgesetzt. Der Großteil der Schäden an Verrohrungen treten allgemein durch thermische Spannungen, Korrosion, Materialfehler und Ablagerungen (Scaling) auf. Bei Projekten mit Zieltemperaturen von etwa 200 [°C] liegt der Schwerpunkt bei der thermischen Beanspruchung. Bei Anwendung eines offenen Systems wie der HDR-Technik kann es im Laufe der Zeit aufgrund von Ausfällungen auch zu Ablagerungen in den Förderbohrungen kommen. Korrosion und Materialfehler können bei einer zeitgerechten und projektorientierten Materialauswahl weitgehend ausgeschlossen werden. In der Zementierung eingeschlossene Wassertaschen, welche sich bei Wärmeeinwirkung ausdehnen und so die Verrohrungswandung einbäulen, können auch zu einem Verrohrungsschaden führen.

Ein Problem bei der Zementation sind die herabgesetzte Endfestigkeit und die größere Durchlässigkeit bei Temperaturen >110 [°C]. Für die Zementation von Geothermiebohrungen eignen sich spezielle mit Kieselerde stabilisierte Portlandzemente.[5]

6.1.6 Komplettierung

Unter Komplettierung ist der Ausbau des Bohrloches für die Gesamtlebensdauer sowie Ausrüstung eines Bohrloches mit allen zur Instandhaltung und zur Förderung nötigen technischen Installationen zu verstehen wie der Verrohrung einschließlich der Zementation, dem Förderrohrstrang (Tubing), der Bohrlochsohlausrüstung und den Erschließungstechniken in der Lagerstätte.[5]

Bei Produktionssonden im geothermischen Bereich wird mit einer Lebensdauer von etwa 30 Jahren gerechnet. Die Fördermengen bei einem HDR System betragen zwischen 50-200 [m³/h]. Das geschlossene System muss gegen Ein- und Austritt von Flüssigkeiten oder Gasen dicht und gegen

Korrosionsangriffe beständig sein. Bei der Komplettierung wird zwischen „Open Hole Komplettierung“ und „Cased Hole Komplettierung“ unterschieden.

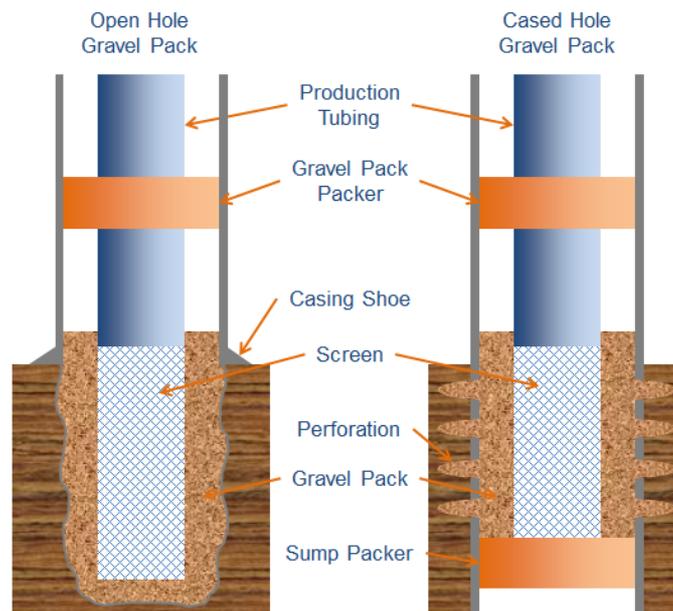


Abbildung 7: Open Hole vs. Cased Hole Komplettierung [33]

Open Hole Komplettierung wird nur in standfestem Gebirge ausgeführt und die Speicherschicht bleibt offen. Bei der „Cased Hole Komplettierung“ wird die Speicherschicht mit einem Filterrohr verrohrt und danach der Bereich mit Filterkies aufgefüllt. Man spricht hier vom sogenannten Gravel Pack Verfahren.[5]

6.1.7 Tiefbohranlagen

Aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse unter Tage, wird bei den ausgewählten Projekten (Projektstudie A und Projektstudie B) besonderes Augenmerk auf die Auswahl der Tiefbohranlage gelegt. Tiefbohranlage samt Bohrplatzeinrichtungsfläche sollte möglichst kompakt und auf engem Raum problemlos betrieben werden können. Um die gesamte Ausrüstung und das Bohrequipment zur Bohrkaverne zu transportieren ist es erforderlich die Ausrüstung in 20 [ft] (1 [ft]= 0,3048 [m]) Standardschiffscontainer transportieren zu können. Diese Container besitzen eine Länge von etwa 6 [m] eine Höhe von 2,5 [m] und eine Breite von rund 2,5 [m]. Dies ist für eine technisch und wirtschaftlich vernünftige Projektdurchführung notwendig.

Die gesamte Anlage muss resistent gegen thermische Spannungen und mineralhaltigen aggressiven Gasen und Flüssigkeiten sein. Vor allem die Dichtmaterialien werden durch die hohen Temperaturen und durch Korrosion stark beansprucht. Bohrspülung und die für Verrohrungsarbeiten notwendigen Zemente müssen auf die entsprechenden Gebirgsverhältnisse (hohe Temperaturen und Drücke) ausgelegt und abgestimmt werden.

Die Bohrtätigkeit für Erdwärme basiert grundlegend auf den gleichen technischen Anforderungen, wie Bohrungen in der Erdöl- und Erdgasindustrie. Einige Unterschiede werden im Folgenden angeführt:

- Vergleichsweise geringer Gebirgsdruck im Gegensatz zu Erdöl- und Erdgasbohrungen
- Meist höhere Gesteinstemperaturen bei gleicher Teufe, da oft die geologischen Wärmeanomalien ausgenutzt werden.
- Auftreten von mineralhaltige und aggressive Dämpfe und Flüssigkeiten[5]

Hersteller für solche speziell auf geothermische Anforderungen ausgelegten Anlagen sind RAG AG, Bentec, Herrenknecht Vertical GmbH, Bauer AG, und Streicher GmbH. Diese entwickelten völlig neue Konzepte und erreichen Bohrtiefen bis 7000 [m]

Bentec Euro Rig 350t

Die Bohranlage der Fa. Bentec ist speziell für Geothermiebohrungen ausgelegt und benötigt eine gesamte Grundrissfläche von 43,00 [m] x 68,50 [m]. Dies würde einen gesamten Flächenbedarf von etwa 3000 [m²] erfordern.

RAG Bohranlage E200/202

Die Tiefbohranlage der RAG AG benötigt einen Gesamtplatzbedarf von 43,00 [m] x 85,00 [m]. Die Bohrmasthöhe inklusive Unterbau fällt mit knapp 41,00 [m] vergleichsweise gering aus und stellt für eine möglichst geringe Kavernenabmessung die besten Voraussetzungen dar. Um die Kavernenabmessungen und somit die Kosten in Grenzen zu halten werden sämtliche Bohrplatzeinrichtungen, mit Ausnahme auf den Bohrturm, auf andere untertägige Hohlräume ausgelagert. Es ist ein Mindestflächenbedarf für die untertägige Bohranlage von etwa 30 [m] x 30 [m] einzuplanen. Um eine Überschreitung der lt. ASchG vorgeschriebenen MAK (Maximale Arbeitsplatzkonzentration)-Werte zu verhindern, wird die Anlage anstelle der dieselbetriebenen Stromaggregate an das öffentliche Stromnetz angeschlossen. Ein Baustelleneinrichtungsplan der Anlage ist im Anhang in Abbildung 51 dargestellt.

Herrenknecht Hot Rock 1

Diese von der Fa. Herrenknecht Vertical GmbH speziell auf Tiefengeothermieprojekte ausgelegte Anlage hat den großen Vorteil geringer Lärmemission. Dies ist vor allem für überörtliche Anlageneinrichtung von Bedeutung und spielt für die Projektstudie A und Projektstudie B nur eine nebensächliche Rolle. Die nötige Grundfläche für diese Anlage beträgt 30,00 [m] x 80,00 [m]. Der Höhenbedarf ist mit 53,00 [m] größer als bei den vorherigen Anlagen. Diese Anlage ist somit eher ungeeignet für eine untertägige Bohrplatzerrichtung.

Streicher Tiefbohranlage VDD370

Mit einer Gesamthöhe von nur 31 [m] weist diese Anlage die mit Abstand geringste Bauhöhe auf. Auch der Platzbedarf von nur 1224 [m²] ist sehr gering und ist somit ein erheblicher Vorteil. Der Umstand, dass die Anlage jedoch nur bis max. 5000 [m] Bohren kann, schließt die Verwendung der Anlage für die in dieser Arbeit betrachteten Studien aus, da bei beiden Projekten Bohrtiefen > 5000 [m] notwendig sind.

6.2. Geothermisch relevante geophysikalische Verfahren

Geophysik hat die Aufgabe geothermische Ressourcen zu beleuchten, potentielle Energiequellen zu lokalisieren und geothermisch relevanten Parametern wie Porosität, Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Temperatur, etc. zu bestimmen.

Eine zeitgerechte geologisch-geophysikalische Erkundung der geothermischen Lagerstätte erfordert ein Zusammenspiel der Daten aus Seismik, Geomagnetik, Geoelektrik, Gravimetrie und Geothermie unter Miteinbeziehung von geologischen und petrologischen Daten. All diese Daten zusammen ermöglichen die Erstellung eines dreidimensionalen Modells, das Ausgangspunkt für Bohransatzpunkt, Bohrpfad und Bohrtiefe einer geothermischen Bohrung ist.[1]

6.2.1 Seismik

Die Seismik gehört zur Gruppe der Laufzeitverfahren und ist unbestritten das aussagekräftigste Instrument der Geophysik bei der Tiefenexploration im Bereich der Geothermie. Es ist jedoch auch ein sehr teures Verfahren und liefert nicht immer alle nötigen Parameter (strukturelle und petrophysikalische). Für die Erkundung in große Teufen wird ausschließlich die Reflexionsseismik angewandt. Es wird ein, über Vibratoren ausgesandtes, seismisches Signal (Wellen) in den Untergrund geleitet. Dieses wird an geologischen Grenzen gebrochen bzw. reflektiert und an die Oberfläche zurückgesandt. Das Signal wird an der Oberfläche von sogenannten Geophonen eingefangen und in Form von Seismogrammen ausgewertet. Geophone agieren dabei wie sehr empfindliche Mikrofone. Gemessen wird die Laufzeit der Welle. Die Anordnung der Geophone erfolgt entlang von Linien (liefert ein 2D Modell) oder erfolgt flächenhaft (3D-Modell).

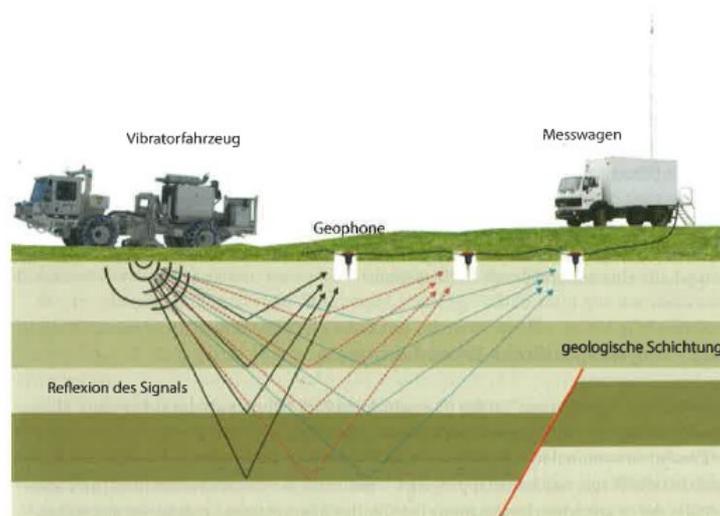


Abbildung 8: Prinzip der Reflexionsseismik[1]

Die Gesteine im Untergrund unterscheiden sich sehr stark durch die unterschiedlichen seismischen Wellengeschwindigkeiten. Die bereits vorhandenen projektrelevanten seismischen Profile beschränken sich leider auf eine Teufe, welche nur Aussagen über den Bereich der angedachten Bohrkaverne zulassen. Aussagen über den kristallinen Zielhorizont in 6 [km] Teufe sind daraus leider nicht abzuleiten. [1]

6.2.2 Gravimetrie

Die Gravimetrie beruht auf dem Gravitationspotential und bestimmender Parameter ist die Gesteinsdichte. Es kann ohne große Genehmigungsverfahren überall ausgeführt werden. Die geophysikalische Einheit ist das Milligal ($100 \text{ [Gal]} = 1 \text{ [m/s}^2\text{]}$). Hauptunterschied von Seismik und Gravimetrie ist, dass in der Gravimetrie keine Information über den Untergrund bei Böden mit horizontal gleichbleibenden Dichten gewonnen werden kann. Da die Dichteunterschiede in den für die tiefe Geothermie bedeutenden Teufen ($> 5 \text{ [km]}$) weitgehend gering sind, ist diese Verfahren für eine indirekte Erkundung der Projektstudien A und B ungeeignet. [1]

6.2.3 Geomagnetik

und die Geomagnetik hat mit der Gravimetrie große Ähnlichkeit hinsichtlich geophysikalischen Hintergrund und Messmethodik. Dieses Verfahren ist daher bei geringen Dichteunterschieden im Gestein kein geeignetes Werkzeug für eine indirekte Vorerkundung. [1] Messgröße in der Geomagnetik ist hier das Nano Tesla [nT]. Geomagnetik wird dort eingesetzt wo die Seismik kein auslangen mehr findet oder findet Anwendung als Ergänzung zur Seismik.

6.2.4 Geoelektrik

Im Gegensatz zu allen anderen geophysikalischen Methoden bietet die Geoelektrik eine Vielzahl an geophysikalisch sehr unterschiedlichen Verfahren. Aus physikalischer Sicht nimmt die Geoelektrik eine Zwischenstellung von Seismik und Geomagnetik bzw. Gravimetrie ein. Man unterscheidet in der Geoelektrik zwischen Verfahren, welche mit Gleichstrom arbeiten (Widerstandsverfahren) und Verfahren die mit Wechselstrom bzw. mit Impulsen arbeiten (Induktionsverfahren). Ein großer Vorteil der Geoelektrik ist, dass sie lithofaziell zwischen den Gesteinsschichten differenziert. Das bedeutet, dass sie zwischen gut leitenden Gesteinen (Tonstein, Mergelstein, Erze, Graphit) und elektrisch schlecht leitenden Gesteinen (Kalkstein, Sandstein, Dolomit, Gneis, Amphibolit) unterscheidet. Die beiden projektspezifisch untersuchten Gesteine Amphibolit und Gneis lieferten Werte im Bereich von $100 \text{ [}\Omega\text{m]} \pm 50 \text{ [}\Omega\text{m]}$ (siehe Tabelle 1). Auch ist der elektrische Widerstand sehr stark Temperaturabhängig und nimmt exponentiell mit der Temperatur ab. Eine Steigerung der Gesteinstemperatur um etwa $40 \text{ [}^\circ\text{C]}$ bewirkt eine Senkung des Widerstandes um etwa die Hälfte. Die untersuchten Gesteine (Amphibolit und Gneis) zeigten elektrische Widerstände von $2200 \text{ [}\Omega\text{]} \text{ bis } 6200 \text{ [}\Omega\text{]}$ (siehe Tabelle 1). Bei einer Steigerung der Temperatur um etwa $200 \text{ [}^\circ\text{C]}$ würde dies den Widerstand in unseren beiden Fällen auf ein Zehntel der angegebenen Werte reduzieren.

Nr.	Gestein	ρ_0	R
[-]	[-]	[Ohmm]	[Ohm]
1	Gneis	142,65	6153,00
2	Gneis	125,49	5556,50
3	Gneis	49,86	2215,00
4	Gneis	75,93	3589,00
5	Gneis	59,92	2672,00
6	Gneis	50,16	2209,00
7	Gneis	65,70	2897,00
8	Amphibolit	99,95	4404,00
9	Amphibolit	137,00	5984,50
10	Amphibolit	98,98	4399,50
11	Amphibolit	115,37	5040,50
12	Amphibolit	94,07	4187,50
13	Amphibolit	109,97	4625,00
14	Amphibolit	79,07	3536,50
15	Amphibolit	109,94	4919,00
16	Amphibolit	82,58	3693,00
17	Amphibolit	97,16	4256,50
18	Amphibolit	66,02	2914,50
19	Amphibolit	108,50	4802,50
20	Amphibolit	67,85	2957,50
21	Amphibolit	58,30	2532,00
22	Amphibolit	58,22	2540,50
23	Amphibolit	53,23	2359,50
24	Amphibolit	76,13	3340,00

Tabelle 1: Gemessene elektrische Eigenschaften der projektrelevanten Tiefengesteine

Nennenswert hinsichtlich der tiefen Geothermie ist hier die Magnetotellurik² welche Eindringtiefen bis mehrere Kilometer erreicht. Aufgrund der langperiodischen Schwankungen diese Felder sind Eindringtiefen bis in den oberen Erdmantel erzielbar (Skinneffekt). Ziel der Geoelektrik ist die Ermittlung der Verteilung der elektrischen Widerstände im Gestein. Da dieses Verfahren sehr kostengünstig ist, wird es in allen geophysikalischen Bereichen verwendet und ist als indirekte Erkundungsmethode zur untertägigen Erschließung von Projekten mit hohem geothermischen Potenzial hervorragend geeignet. [1] Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass die Seismik auf der einen und Magnetik/Geoelektrik/Gravimetrie auf der anderen Seite steht, da beide einen unterschiedlichen methodischen Ansatz haben. Magnetik/Geoelektrik/Gravimetrie sind kostengünstige Explorationsmaßnahmen und geben Auskunft über Hauptstörungen, Streichrichtung und lithologische Änderungen im Untergrund. Sie geben auch Hilfestellung bei der Auswahl von neuen 2D-Seismik Profilen.[1]

6.2.5 Thermische Verfahren

Dazu zählen beispielsweise die Temperaturmessung an der Erdoberfläche oder in flachen Bohrungen wie sie beispielsweise bei Projektstudie B im Revier VI durchgeführt wurde. In weiterer Folge auch die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit (stationär) und die Temperaturleitfähigkeit (instationär). Daten der

² Magnetotellurik (die eigentliche Magnetotellurik, MT, und die Audiomagnetotellurik, AMT) sind natürliche, elektromagnetische Felder, die aus der Ionosphäre und den Gewittergürteln der Tropen gespeist werden.

thermische Verfahren liefern die Grundlage für Temperaturverteilungskarten.[1] Die Bedeutung der Ergebnisse aus thermischen Verfahren ist in Tabelle 2 veranschaulicht.

6.3. Parameterbestimmung

Für die tiefe Geothermie sind abhängig von der Nutzung unterschiedliche Parameter relevant. Bei einer hydrothermalen Nutzung sind die hydraulischen Eigenschaften des Untergrunds relevanter als beispielsweise für petrothermale Systeme. sind hingegen Für hydrothermale Systeme hingegen sind thermophysikalische Gesteinseigenschaften bedeutungslos. Die Flüssigkeitseigenschaften des Wärmeträgermediums sind essentiell für HDR und hydrothermale Systeme. Eine Übersicht liefert die nachfolgende Tabelle.[7]

	Hydrothermale Nutzung	HDR	Erdwärmesonde
Temperatur	1	1	1
Wärmestromdichte	2	2	2
hydraulische Parameter			
Permeabilität/Durchlässigkeit	1	2	3
Transmissivität/Transmissibilität	1	3	3
Porosität	1	3	3
Speicherkoeffizient	2	3	4
Produktivitätsindex	1	3	4
hydraulische Tests	1	1	4
thermophysikalische Gesteinseigenschaften			
Wärmeleitfähigkeit	3	2	1
Gesteinsdichte	3	2	1
Wärmekapazität	3	2	1
Fluideigenschaften			
Dichte, Viskosität, Kompressibilität	1	2	4
pH, Temperatur	1	1	3
Gase, Gasanalyse	1	1	2
Gesamtkonzentration (TDS)	1	1	3
Anionen - Kationen (Ca, Mg, Na, K, Cl, HCO ₃ , SO ₄ ,...)	1	1	3
Undissoziierte Stoffe	1	1	4
Problemstoffe (z.B. As, radioaktive Inhaltsstoffe)	2	2	3
geologische Eigenschaften			
Störungen, Spannungsfeld	2	1	3
Petrographie/Gesteinsart	1	1	2
Geometrie des Aquifers/ Wärmeaustauschfläche	1	1	4

<i>Legende:</i>
1 - sehr wichtig
2 - relevant

3 - geringe Bedeutung
4 - keine Bedeutung

Tabelle 2: Parameterrelevanz unterschiedlicher Nutzungssysteme

6.3.1 Probenherstellung

Für die Messung der thermophysikalischen Parameter wurden im Labor des Institutes für Subsurface Engineering an der Montanuniversität Proben hergestellt. Für die ausgewählten Projekte (Projektstudie A und Projektstudie B) wird in der Zielteufe Kristallingestein erwartet. Die genaueste, unverwitterte und repräsentativste Erkundung dieses Kristallingesteins liegt im Bereich des Gleinalmtunnels vor. Aus diesem Grund wurde dieses Material als am besten geeignet eingestuft und für beide Projekte herangezogen. Nach Rücksprache mit Fr. Ass. Prof. Nina Gegenhuber wurde eine Probenserie mit etwa 15 [cm] x 15 [cm] x 3 [cm] hergestellt.

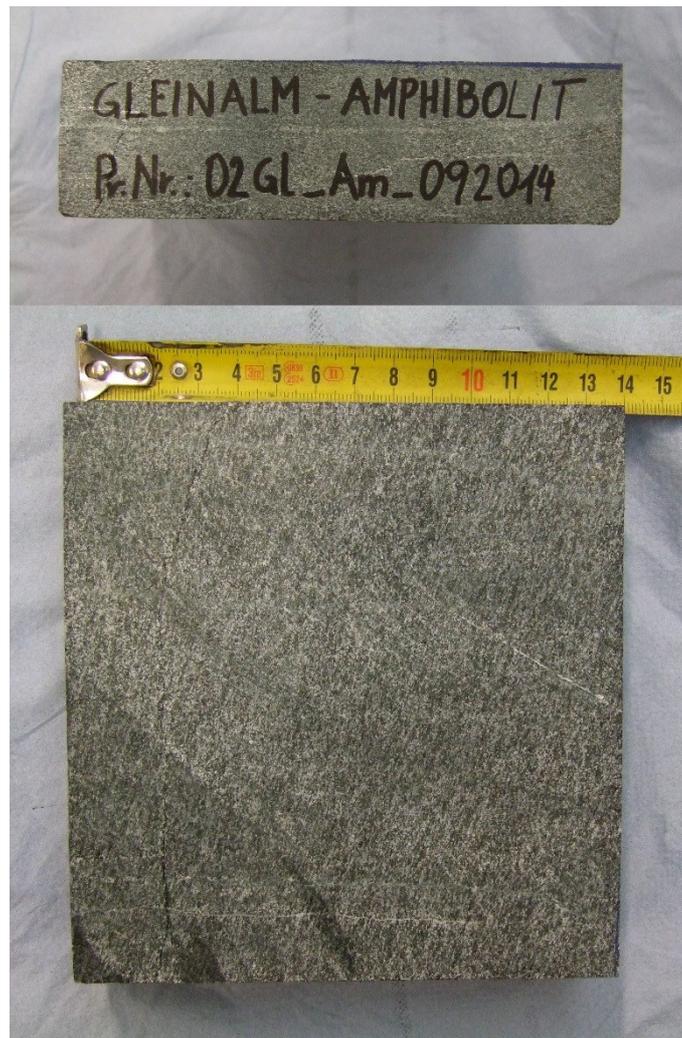


Abbildung 9: Abmessungen der Proben aus dem Kristallingestein

Die Beschaffenheit der Probenoberfläche sollte eben und sägerauh sein. Für eine aussagekräftige Untersuchung wurde darauf geachtet, dass die entnommenen Proben wenig zerklüftet und möglichst kompakt sind. Für eine richtungsabhängige Beprobung wurde eine zweite Probenserie (Würfel) mit

einer Kantenlänge von 15 [cm] aus dem Probematerial geschnitten. Es musste darauf geachtet werden, dass allenfalls vorhandene Klüfte und Schieferungen parallel zur Würfelkante sind.



Abbildung 10: Schnittführung bei der Probenherstellung

6.3.2 Thermophysikalische Parameter

Alle nachfolgend beschriebenen Versuche zur Bestimmung der geothermisch relevanten Gesteinsparameter wurden an der Montanuniversität Leoben durchgeführt und ausgewertet.

Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]

Für die Wärmeleitfähigkeitsmessungen wird das Wärmeleitfähigkeitsmessgerät Tk04 der Firma TeKa (Berlin) verwendet (Abbildung 11).



Abbildung 11: Tk04 Wärmeleitfähigkeitsmessgerät TeKa, Berlin

Die Halbraumsonde ist eine Nadelsonde, die in einen Zylinder aus Plexiglas eingelassen ist. Die Nadel dient als Wärmequelle mit definierter Energie. Ein Temperatursensor in der Mitte misst die Temperatur als Funktion der Zeit. Nadel und Zylinder werden mit konstantem Druck (15 [bar]) auf die Probe gepresst. Für einen optimalen Wärmefluss, wird ein Kontaktmittel zwischen Probe und Sonde aufgebracht. Um ein Temperaturgleichgewicht vor der Messung zu erreichen werden die Proben einen Tag im Labor gelagert. Während des Messvorganges wird die Halbraumsonde mit definierter Heizleistung (3 [Wm⁻¹]) erwärmt. Der Zeitraum der Aufheizung beträgt 80 Sekunden. Der daraus resultierende Aufheizzyklus wird aufgenommen und analysiert. Die Wärmeleitfähigkeit wird danach aus der Aufheizkurve berechnet. Es werden 10 Messungen pro Probe durchgeführt, wobei nach 5 Messungen die Nadel um 45 [°] gedreht wird, um so einen Anisotropie-Effekt zu erkennen. Die Reproduzierbarkeit liegt bei ±1.5 [%] in Relation zur Wärmeleitfähigkeit. Ein gewichtetes Mittel sowie die Standardabweichung wird aus den Messungen berechnet. [37]

Wärmekapazität c [J/kg*K]

Das verwendete Messgerät ist ein selbstgebautes Flüssigkeitskalorimeter (Abbildung 12).



Abbildung 12: Selbstgebautes Flüssigkeitskalorimeter

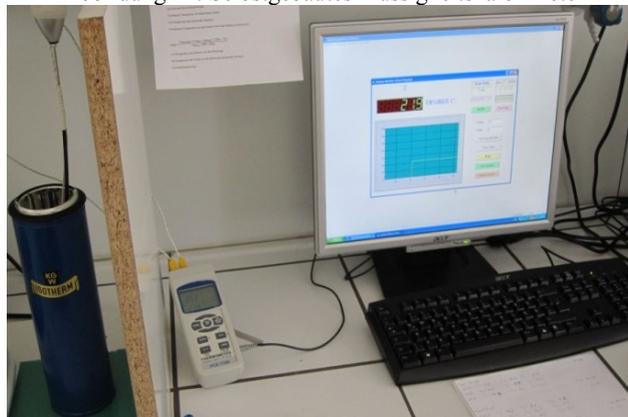


Abbildung 13: Dewar Gefäß und Datenübertragung auf PC

Die Probe wird in kochendem Wasser aufgeheizt. Nach einer halben Stunde wird die aufgeheizte Probe in eine Dewar Gefäß, mit definierter Menge (200ml) an destillierten kaltem Wasser, gegeben. Die Probe gibt eine bestimmte Menge an Wärme an das Wasser ab und führt zu einem Temperaturanstieg im Dewar Gefäß. Über den Temperaturanstieg, die Masse der Probe (m_{sample}), die Masse des Wassers (m_{water}), die Wärmekapazität des Wassers (c_{water}) und des Kalorimeters ($c_{\text{calorimeter}} = 43,4 \text{ [Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}]$), kann die Wärmekapazität (c_{sample}) berechnet werden:

$$c_{\text{sample}} = \frac{(c_{\text{calorimeter}} + c_{\text{water}} * m_{\text{water}}) * (T_m - T_1)}{m_{\text{sample}} * (T_2 - T_m)}$$

T_1 ... Temperatur im Dewar Gefäß vorm Einbringen der Probe

T_2 ... Temperatur der heißen Probe

T_m ... Temperatur im Dewar Gefäß nach Einbringen der Probe [37]

Wärmestromdichte q [W/m²]

Sie entspricht dem Wärmestrom pro Fläche und wird aus der Wärmeleitfähigkeit und dem Temperaturgradienten ($\text{grad}T$) berechnet. Der Temperaturgradient gibt an um wieviel die Temperatur mit der Tiefe zunimmt.

$$q = \lambda * \nabla T$$

Gesteinsdichte ρ [kg/m³]

Die Dichte wurde über das Gesamtvolumen der Probe und deren Masse bestimmt.

$$\rho = \text{Masse}[\text{kg}] / \text{Volumen}[\text{m}^3]$$

Radiogene Wärmeproduktion A [cal/cm³]*Allgemeines:*

Beim GS-256 der Firma Geofyzika Brno handelt es sich um ein tragbares Gammaskpektrometer mit 256 Kanälen, die gleichmäßig über das gesamte Gammaskpektrum verteilt sind. Die Detektoreinheit setzt sich aus einem Natriumjodid-Szintillationsdetektor in Verbindung mit einem Photomultiplier und einem Signal-Vorverstärker zusammen, die von einem stoßfesten, thermisch isolierten Aluminiumzylinder umgeben sind. Zur Stabilisierung und Energiekalibrierung ist eine austauschbare ¹³⁷Cs-Referenzquelle im Boden der Detektoreinheit untergebracht. Durch Einstellen des ¹³⁷Cs-Peaks (662 [keV]) auf Kanal 55, ergibt sich eine Energiekalibrierung von 12 [keV] pro Kanal. Um Spektrenbereiche von Interesse zu untersuchen, stehen insgesamt acht Energiefenster (regions of interest, ROI) zur Verfügung, die frei gewählt werden können. Die wichtigsten ROIs sind:

- 1) alle Impulse registriert über die gesamten Messzeit,
- 2) K (Peak bei 1.46 [MeV]),
- 3) U (Peak bei 1.76 [MeV]) und
- 4) Th (Peak bei 2.62 [MeV]).

Messung:

Als Probengeometrie kommen Würfel und Quader, aber auch Bohrkerne in Frage. Eine Bleiummantelung als Abschirmung während der Messung und wiederholte Hintergrundmessungen gewährleisten ein bestmögliches Ergebnis. Je nach Probengröße und -beschaffenheit wird die Messdauer zwischen 300 und 600 s und die Anzahl der Wiederholungen festgelegt. Reproduzierbarkeit: 3 bis 4 % Abweichung, in seltenen Ausnahmen können jedoch auch 10 % erreicht werden.

Auswertung:

Für die Auswertung werden die in den ROIs registrierten Werte des Hintergrunds und der unkorrigierten Messungen mit Probe in eine Excel-Tabelle aufgenommen. Aus den um den Hintergrund korrigierten Probenwerten wird ein Mittelwert der Anzahl der Impulse pro Minute berechnet. Sensitivitätsfaktoren, die an chemisch analysierten Proben unterschiedlicher Geometrie bestimmt wurden und die Probengeometrie berücksichtigen, dienen zur Ermittlung der unbekanntten Gehalte an K [%], U [ppm] und Th [ppm]. Aus diesen kann zusätzlich die radiogene Wärmeproduktion nach der Formel von Rybach (1976) berechnet werden.

$$A = 0.317 * \rho * (0.718 * c_U + 0.193 * c_{Th} + 0.262 * c_K)$$

wobei A die radiogene Wärmeproduktion $HGU=10^{-13}$ [cal/cm³], ρ die Dichte [g/cm³] ist und c_U , c_{Th} sowie c_K die Konzentrationen von Uran, Thorium und Kalium sind. [37]

6.3.1 Hydraulische ParameterPermeabilität/Durchlässigkeit [m/s]

Die Permeabilität wird definiert als die Fähigkeit eines Gesteins Fluide/Gase hindurchströmen zu lassen. Es wurde für die Messungen ein steady-state Gaspermeameter (Gas = Stickstoff) der Firma VinciTechnologies (France) verwendet. Die Probe wird, nach dem Trocknen, im Probenhalter mit einem Druck von 200 [psi] eingespannt. Somit ist kein Gasfluss entlang des Probenrandes möglich. Anschließend wird ein Gasfluss durch die Probe geleitet. Wenn dieser konstant ist, erfolgt die Messung bei Raumtemperatur. Es wird direkt von einem Programm (über das Darcy Gesetz) die Permeabilität berechnet und ausgegeben.[37]

Porosität[%]

Für die Porositätsberechnung wurde das Prinzip von Archimedes (Masse trocken, Masse gesättigt und Masse unter Auftrieb) verwendet.

Es werden zwei Porositäten unterschieden: die totale (verbundene und unverbundene Poren) und die effektive Porosität (nur verbundene Poren). Die effektive Porosität wird mit dem Prinzip von Archimedes bestimmt. Hierzu werden die Proben trocken, gesättigt und unter Auftrieb gemessen und daraus die Porosität berechnet. Für die totale Porosität werden die Messungen von einem Heliumpyknometer herangezogen. Hierbei wird die Korndichte bestimmt. Über diese und die Gesamtdichte kann dann die totale Porosität berechnet werden. [37]

Es besteht ein empirischer Zusammenhang zwischen Porosität [%] und Permeabilität [m/s] in einer bestimmten Gesteinsformation. Geringe Änderungen der Porosität wirken sich demnach sehr stark auf die Permeabilität in kristallinen Gesteinsformationen aus. Durch die kontinuierliche Wasserförderung bei beiden Projekten(System: HDR) besteht das Risiko, dass durch Zusetzen der Klüfte, die Permeabilität im Laufe der Nutzungsdauer abnimmt. Dieses Langzeitverhalten konnte jedoch noch nicht bestätigt werden.

6.4. Stimulation des Bohrlochs

Im Falle eines HDR Systems bestimmt die hydraulische Durchlässigkeit des Gesteins die Leistungsfähigkeit des erschlossenen geothermischen Reservoirs in hohem Maße. Wesentlichen Einfluss auf den Stimulationserfolg nehmen auch Injektionsmenge und -rate, Injektionsdruck bzw. Druckgradient sowie die hydrochemischen Eigenschaften des Injektionsfluids. Als Festigkeit ist für Stimmationsmaßnahmen die hydraulische Zugfestigkeit maßgebend. Sie wird mittels Frac-Versuche bestimmt. Bei kristallinen Gesteinstypen wie sie bei Projektstudie A und B erwartet werden, liegen die Werte für die hydraulische Zugfestigkeit p_{c0} im Bereich von 20-40 [MPa]. Die Abhängigkeit des Frac-Drucks p_c vom Manteldruck p_m kann mit folgender Gleichung beschrieben werden:

$$p_c = p_{c0} + k \cdot p_m$$

Der Wert k ist in dieser Gleichung der sogenannte Frac-Koeffizient und weist in kristallinem Gestein etwa Werte um 1,0 auf. k definiert somit die Wirkung von Mikrorissen infolge hydraulischer Stimulation. Zur Rissweiterung des Gesteins gibt es 2 unterschiedliche Methoden, welche im Zusammenhang mit den beiden untersuchten Projektstudien im Folgenden genauer beschrieben werden. Rummel entwickelte 1987 erste Bruchmechanismen für eine hydraulische Rissbildung im Gestein. Hier finden Größen wie die Risslänge des Mikrorisses, die Bruchzähigkeit und die wirksamen in-situ Hauptspannungen Eingang.[27][39]

6.4.1 Hydraulische Stimulation

Hier wird durch Einpressen unter hohen Fließraten Druck im Bohrloch erzeugt bis sich vorhandene Risse aufweiten. Das Stimulationsfluid kann Frischwasser oder zuvor gefördertes Formationsfluid sein. Es können mit diesem Verfahren auch derart hohe Drücke erzeugt werden, dass sich neue Risse öffnen. Die horizontale Permeabilität im Gestein kann so auf mehrere hundert Meter Länge erhöht werden. Die Öffnungsweite der Risse beschränkt sich auf wenige Millimeter bis Zentimeter. Durch die Versatzbewegung der Klufflächen beim Aufreißen wird ein exaktes Wiederverschließen verhindert und so ein Rissystem, ohne Einbringung von Stützmittel, geschaffen. Dieser Effekt ist als „self propping Effekt“ bekannt. Durch die Stimulationsmaßnahmen kann es zu einer Beeinträchtigung und Veränderung der natürlichen Seismizität kommen. Das Auftreten von induzierter Seismizität hängt vom geologischen Untergrund (kristalline Gesteine oder Sedimente), den tektonischen Spannungen, Injektionsdrücken

bzw. Fließraten des Injektionsmediums und auch von der Größe des stimulierten Kluftsystems ab. Nach Ende der Stimulationsmaßnahme verbleiben hoch permeable Rissflächen, die zu einer Steigerung der Förderraten führen. Große Entwicklungen hinsichtlich hydraulischer Stimulation konnten hier vor allem bei dem Forschungsprojekt Soultz-sous-Forêts (Frankreich) erzielt werden. Es wurde gezeigt, dass im kristallinen Gestein hochpermeable Risse geschaffen werden können, die später als Verbindung zwischen den Tiefenbohrungen fungieren. Für Fließraten $<150 \text{ [l s}^{-1}\text{]}$ wurden hier Drücke im Bohrlochkopf, je nach geologischen Bedingungen und Fließraten, von bis zu 400 [bar] erzeugt. Diese Erzeugung von Rissen ist jedoch nur möglich, wenn das Gestein eine hohe Scherspannung aufweist. Ist dies nicht der Fall sind Stützmittel wie beschichtete Sande oder hochfeste Keramiken nötig um die Risse aufrecht zu erhalten. Das Stützmittel wird in das Rissystem verpresst, verteilt sich im Riss und verhindert so eine Schließung der erzeugten Klüfte.[15]

Basierend auf den mechanischen und hydraulischen Eigenschaften des Gesteins wird der Stimulationsprozess im Vorfeld mit Modellrechnungen simuliert. Damit kann die konkrete Durchführung der Stimulationsmaßnahme vorausschauend geplant werden. Die Fluidausbreitung wird während der Stimulationsmaßnahme kontinuierlich (durch Druckanalyse und mikroseismisches Monitoring) überwacht. Während durch die Dimensionierung der Stimulationsmaßnahme, das bedeutet Viskosität, Fließrate und Volumina des Fluids, der Öffnungsprozess hinsichtlich seiner Ausdehnung gesteuert wird, ist die Richtung der Fluidausbreitung durch die natürlich vorhandenen Gebirgsspannungen vorgegeben.[15]

Die variierenden Eigenschaften des Untergrundes machen die Ausdehnung der Stimulationsbehandlung jedoch nicht vollständig im Voraus berechenbar. Eine Vermessung während des Vorgangs mit beispielsweise seismo-akustischen Verfahren (d.h. die Ortung und Aufzeichnung einzelner Bruchstellen im Gestein) ist deshalb sehr hilfreich. So wird z.B. auch die optimale Position für ein weiteres Bohrloch bestimmt, falls dies für das gewählte Nutzungsverfahren nötig ist.[15]

Bis zum heutigen Zeitpunkt ist die hydraulische Stimulation die einzige Möglichkeit mit der in einem großen Gebiet um das Bohrloch Wegigkeiten erweitert bzw. neu geschaffen werden können.

6.4.2 Chemische Stimulation (Säurestimulation)

Unter dem Begriff der chemischen Stimulation versteht man das Einleiten von Säure in die geothermische Zielformation, was zu einer Auflösung bestimmter mineralischer Komponenten, z.B. Karbonate, führt und so die Wegsamkeiten im Gestein erhöht.[15]

Anders als bei der hydraulischen Stimulation ermöglicht die chemische Stimulation nur eine Reaktion im direkten Umfeld (einige Meter) des Bohrlochs. Grund dafür ist dass die Säure durch die Reaktion und die hohen Temperaturen im Gestein rasch abgebaut wird. Ausnahme sind Karbonatgesteine, wo Wegigkeiten auch in größerer Entfernung erweitert werden können. Da im projektrelevanten Gebiet bei beiden Projektstudien kein Karbonatgestein auftritt wird diese Möglichkeit zur Risserweiterung ausgeschlossen.

6.5. Stromgewinnungsanlage

Sind die Temperaturen $<150 \text{ [}^\circ\text{C]}$ wird mit Hilfe des Kalina-Prozesses oder mit einer ORC Anlage die Wärme in Strom umgewandelt. Sind die Temperaturen höher kommen Flash Systeme oder Dry Steam Anlagen zum Einsatz. Bei moderneren Anlagen finden aufgrund des höheren Wirkungsgrades fast ausschließlich Flash Systeme Anwendung

Bei Temperaturen ab $150 \text{ [}^\circ\text{C]}$ können Flash Systeme Anwendung finden. Double Flash Systeme haben ab Temperaturen von etwa $160 \text{ [}^\circ\text{C]}$ einen höheren Wirkungsgrad als Single Flash Systeme da sie eine zweite Entspannungsstufe besitzen und finden daher bei den in dieser Arbeit beleuchteten Projekten (Projektstudie A und Projektstudie B) Anwendung.

Diese einfach gebaute Anlage weist geringe Wartungs-, und Instandsetzungskosten auf und produziert das nötige Kühlwasser für den Kühlturm selbst.[6]

Ein Beispiel für die Anwendung einer solchen Anlage, liefert die französische Anlage in La Bouillante auf Guadeloupe. Sie liefert seit 1986 Strom aus Erdwärme.[20]

Generell sind die beschriebenen Stromgewinnungsanlagen für geschlossene als auch für offene Systeme anwendbar.

In Anbetracht auf die beiden untersuchten petrothermalen Systeme ist eine Errichtung jedoch nur bei Fördermengen von >35 [m³/h] Dampf wirtschaftlich zu betreiben. Solche Förderleistungen sind bei tiefen Erdwärmesonden ($D_{\text{Koaxial}} = 46$ [mm]) aufgrund der geringeren Wärmeaustauschfläche des Rohrmantels und der daraus resultierenden geringen Zirkulationsgeschwindigkeiten (< 65 [m/min]) nur mit 5-6 Sonden möglich.[21][25]

6.6. Strom-, und Wärmeleistung

Bei der Verwendung tiefer Erdwärmesonden können dem Erdreich etwa 200 [W/m] entzogen werden. Damit eine gegenseitige Beeinflussung vermieden wird muss ein Mindestabstand von 100 [m] eingehalten werden.[5] Bei HDR Systemen für kristalline Tiefengesteine unter Anwendung von Dubletten (Bohrlochpaar) oder Tripletten (2 Förderbohrungen und 1 Injektionsbohrung) werden für Bohrlochtiefen von 6 [km] Leistungen von 50-100 [MW]_{th} und 5-10 [MW]_{el} angestrebt. Hierfür sind jedoch Zirkulationsfließraten von 50 bis 100 [l/s] nötig.[6]

All diese Angaben sind Richtwerte und sind Gegenstand von weiteren Untersuchungen.

7. Bestehende geothermische Anlagen

Vorweg wird angemerkt, dass bereits bestehende Untertageanlagen zur Energiegewinnung eingesetzt werden. Vorrangig werden diese jedoch zur Wärmeversorgung umliegender Gebäude genutzt. Beispiele sind die Nachnutzung stillgelegter Erdöl- und Erdgasbohrungen oder die Verwendung sogenannter Energietübbinge im Tunnelbau. Im Hochbau werden vor allem Keller oder Pfähle (Energiepfähle) geothermisch genützt um die im Erdinneren vorhandene Wärme- oder Kälteenergie an die Oberfläche zu fördern und anschließend zu nutzen. Im Bergbau werden bisher vor allem stillgelegte unterirdische Systeme (Strecken und Kavernen) als Wärmetauscher eingesetzt, welche im Sommer vorwiegend auch zur Kühlung umliegender Gebäude eingesetzt werden.

7.1. Anlagen in Österreich

Im Jahr 2010 waren in Österreich 17 Geothermieanlagen in Betrieb, welche eine Wärmeleistung von 93 [MW] lieferten. Die Anlagen sind vor allem in den geothermisch günstigen Regionen Oberösterreich und der Steiermark situiert. Mit dieser Leistung können etwa 238 [GWh] thermische Arbeit generiert werden, wovon etwa 63 [%] in Fernwärmenetze eingespeist werden. Zwei der 17 Geothermieanlagen produzieren neben Wärme auch Strom. Mit der installierten elektrischen Leistung von 0,92 [MW]_{el} konnten 2010 1,4 [GWh]_{el} Strom produziert werden. Der Geothermie wird in Zukunft das stärkste Entwicklungspotenzial im Energiemix der erneuerbaren Energien zugerechnet. Zukunftsperspektiven ergeben sich auch durch neue technologische Ansätze, wie beispielsweise die Nutzung geothermaler Wärmequellen in Tunnelbauwerken mittels Wärmepumpentechnologie und die Nutzung von HDR Systeme.[30] Da beide Projektstudien in dem geothermisch höherwertigen Bundesland Steiermark liegen wird hier auch kurz auf die Situation der tiefen Geothermie in der Steiermark eingegangen. Es wurden in den letzten Jahren in der Steiermark keine neuen Anlagen errichtet. Die ersten Bohrungen für Thermalbadprojekte wurden in den 70er Jahren begonnen. Seither wurden in der Steiermark 12 Anlagen mit einer thermischen Leistung von rund 41,5 [MW] errichtet. Die bisher einzige Kraftwärmekopplung entstand in Blumau. Die elektrische Nutzung erfolgt über eine luftgekühlte 250 [kW]-ORC-Anlage. Eine Wärmeversorgung erfolgt für den gesamte Thermen- und Hotelanlagenbereich sowie für einen Badeteich.

7.2. Zeche Heinrich in Essen

Bei diesem Projekt wird ein stillgelegtes Bergwerk seit 1984 als unterirdischer Wärmetauscher genützt und versorgt ein naheliegendes Seniorenheim mit Wärme. Die Überlagerung beträgt 350-500 [m] und das Wasser als Wärmeüberträger wird mit 22 [°C] der Wärmepumpe, welche die Wärmemengen auf ein

verwendbares Temperaturniveau anhebt, zugeführt. Der Volumenstrom des Wassers bei diesem Projekt beträgt 20 [m³/h] mit einem Wärmestrom von 350 [KW]. [8]

Anbei eine Übersicht in Betrieb befindlicher Grubenwasserprojekte zum Heizen und Kühlen in Deutschland:

	Teufe	T_{Zul}	T_{Abl}	Volumenstrom	Wärmestrom
	[m]	[°C]	[°C]	[m ³ /h]	[kW]
Freiberg: Reiche Zeche	228	18	14	56	260
Marienberg: Schacht 302	107	12,4	7,4	120	690
Ehrenfriedersdorf: Zinnerzgrube	110	10	4	22	100
Reden: Gewerbegebiet	900	30	k.A.	k.A.	450
Essen: Zeche Heinrich 3	335 - 480	22	k.A.	20	354
Springhill/Kanada: Kohlengrube	140	18	13	240	k.A.

Tabelle 3: Überblick bestehender Geothermieranlagen mit Nutzung von Grubenwässern [8]

7.3. Zeche Robert Müser in Bochum-Werne

Das Unternehmen RAG AG pumpt etwa 10 Mio. [m³] Wasser pro Jahr zur Erhaltung der Bodenstabilität aus der Tiefe. Dieses bis zu 50 [°C] heiße Wasser wird seit 2012 zur Wärmeversorgung von einer Grundschule, einer Gesamtschule mit Mensa und Schwimmbad und der Hauptfeuerwache Bochum genutzt. Durch dieses Gemeinschaftsprojekt konnten bereits im ersten Jahr 100 [t] Kohlendioxid vermieden werden. Ein Wärmetauscher an der Schachanlage überträgt die Wärme des aus 570 Metern Tiefe geförderten Grubenwassers an einen mit Wasser betriebenen Heizkreislauf. Das Grubenwasser weist einen erhöhten Salzgehalt auf. Über den Zwischenkreislauf wird nur die Wärme aus dem Grubenwasser übertragen. Das Wärmepotenzial des Grubenwassers ist noch nicht ausausgelastet. Bei zukünftiger Ansiedelung weiterer Betriebe am Industriegebiet in Werne, ist eine Anbindung dieser neuen Gebäude durchaus möglich und wünschenswert. [9]

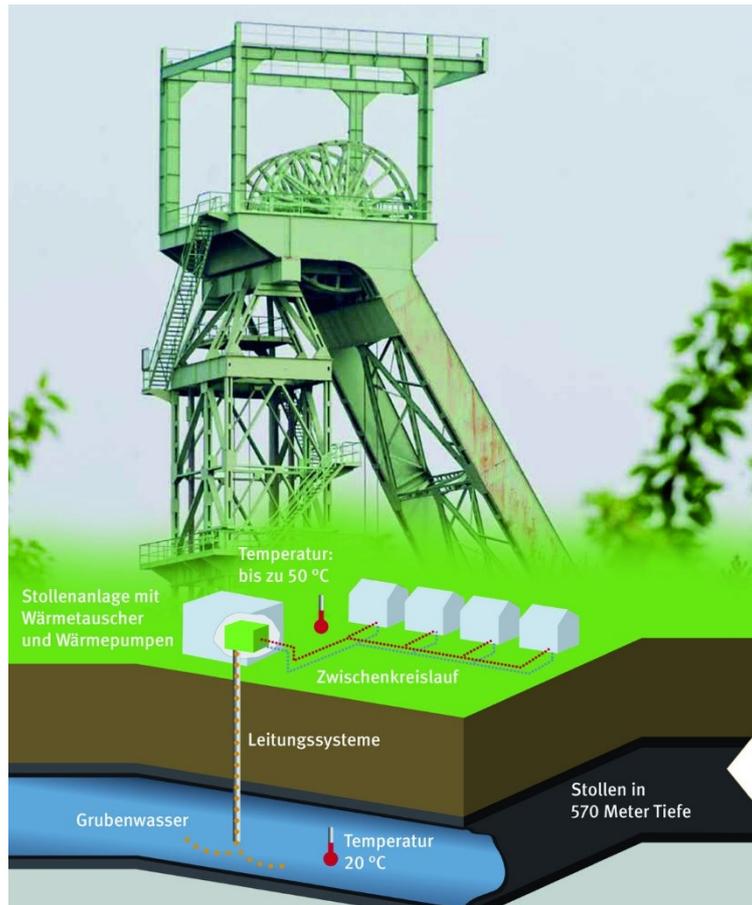


Abbildung 16: Anlagenaufbau zur Wärmenutzung des Grubenwassers[9]

II Hauptteil Nutzung nationaler Untertageanlagen zur geothermischen Energiegewinnung

In diesem Abschnitt wird konkret auf zwei österreichische Untertageeinrichtungen eingegangen, welche sich zur geothermischen Energiegewinnung aufgrund einer bereits vorhandener Überlagerung, einer überwiegend vorhandenen Infrastruktur (Wasser, Strom, Straßen), geologisch geeigneten Formationen (Kristallin) und aufgrund der geothermischen Anomalien sehr gut eignen. Projektstudie A befasst sich mit einem bestehenden Straßentunnel der Asfinag Bau Management GmbH in der Steiermark, welcher speziell aufgrund der vorherrschenden Überlagerungshöhe (etwa 1000[m]) und der geologisch/geothermischen Verhältnisse (Gleinalmkristallin) ausgewählt wurde. Diese Studie liefert die Basis hinsichtlich technischer Anforderungen und ist an jedem anderen Tunnel mit ähnlichen Voraussetzungen anwendbar.

In Studie B wird auf ein bestehendes Magnesitbergwerk in der Steiermark eingegangen. Die Gegebenheiten hinsichtlich Überlagerungshöhe und geologischer Zielformation sind ähnlich der Projektstudie A. Logistisch ist die Herausforderung bei dem durch eine Wendel zugänglichen und tiefliegenden Bergwerk jedoch größer. Herausragend in der Projektstudie B ist der Umstand, dass man die anfallenden Spülwässer als Pumpversatz direkt in die Abbaukammern des Magnesitbergwerks Breitenau leiten kann. Dies würde die Erstellung einer kostenintensiven Aufbereitungsanlage und weiterführende Entsorgungsmaßnahmen vollständig vermeiden.

Da am Standort Breitenau (Projektstudie B) die Magnesitlagerstätte schräg einfällt und die Strecken bereits bis auf Teufen von 1000 [m] unter der Oberfläche durch ein Stollen- und Wendelsystem aufgefahren wurden, bietet auch dieses Projekt aufgrund der Überlagerung und der darunterliegenden kristallinen Gesteinsschicht gute Voraussetzungen für ein Tiefengeothermieprojekt.

Generell kann für Untertageanlagen zur geothermischen Energiegewinnung folgendes festgehalten werden: Je tiefer die Bohrkaverne im Untergrund errichtet wird, oder je höher die Wärmeanomalien in oberflächennahen Schichten sind, desto mehr Bohraufwand und damit auch Kosten können eingespart werden.

Bevor auf die projektspezifischen Eigenschaften der beiden Studien eingegangen wird, werden in Kapitel 8 die nötigen Anforderungen für eine erfolgreiche Projektumsetzung angeführt und erläutert.

8. Anforderungen nationaler Untertageanlagen zur geothermischen Energiegewinnung

Um ein geothermisches Reservoir erfolgreich zu erschließen, bedarf es einer guten und zielgerichteten Vorerkundung. Bei Projektstudie A und Projektstudie B werden vorzugsweise heiße und standfeste Tiefengesteine erschlossen. Da es sich rechtlich gesehen bei Erdwärme um einen Bodenschatz handelt, benötigt man für die Tiefenbohrung eine bergrechtliche Genehmigung (MinroG) und genehmigte Betriebspläne zur Errichtung eines Bohrplatzes und der Baustelleneinrichtungsfläche. Es sind Genehmigungen für das Abteufen der eigentlichen Bohrung und für die Bohrlochtests nötig. Im Folgenden werden die technischen Anforderungen, unter Miteinbezug der projektspezifischen Randbedingungen, aufgezeigt und näher beschrieben.

8.1. Geophysik

Bei Vorerkundungsmaßnahmen im Bereich der Tiefengeothermie kommt aufgrund der großen Eindringtiefe und der geringen Kosten der Geoelektrik eine große Bedeutung zu. Für die Stromversorgung einer solchen Widerstandssondierung werden Kabellängen von 10 x Eindringtiefe benötigt. Bei einer Bohrung von 6 [km] Teufe fallen daher 60 [km] Kabel an um die geoelektrische Vorerkundung durchzuführen. Des Weiteren müssen unter Tage keine Bewilligungen der jeweiligen Grundstücksbesitzer und Eigentümer für die Vorerkundung eingeholt werden. [1] Bisher wurden an keinem der beiden Standorte geoelektrischen Messungen

Gesteinen wie Graniten und Gneisen, sogenannte heiße trockene Gesteine, das größte geothermische Potenzial zur petrothermalen Nutzung. [2] Eine der wichtigsten Faktoren für eine erfolgreiche und wirtschaftliche Stromproduktion aus HDR Projekten ist die Permeabilität der tiefen nutzbaren Festgesteine. Da in unseren beiden Fällen wenig durchlässig kristalline Gesteine vorhanden sind, muss durch Injektion von Wasser unter Anwendung großer Drücke das Gestein aufgerissen werden.[6] Nach umfangreicher Literaturrecherche wie geologische Karten (Abbildung 18), Berichten, Plänen und Gesprächen mit den zuständigen Geologen für Projektstudie A (Hr. Dr. Pischinger) sowie für Projektstudie B (Hr. DI Weidner) wurde die Vermutung über das Vorhandensein von kristallinem Gestein in Teufen von 5-6 [km] bestätigt. Jedoch kann aufgrund der Nichterkundung in Teufen >2-3 [km] keine genaue Aussage über die Schichtenabfolge und die darin enthaltenen Minerale gemacht werden.

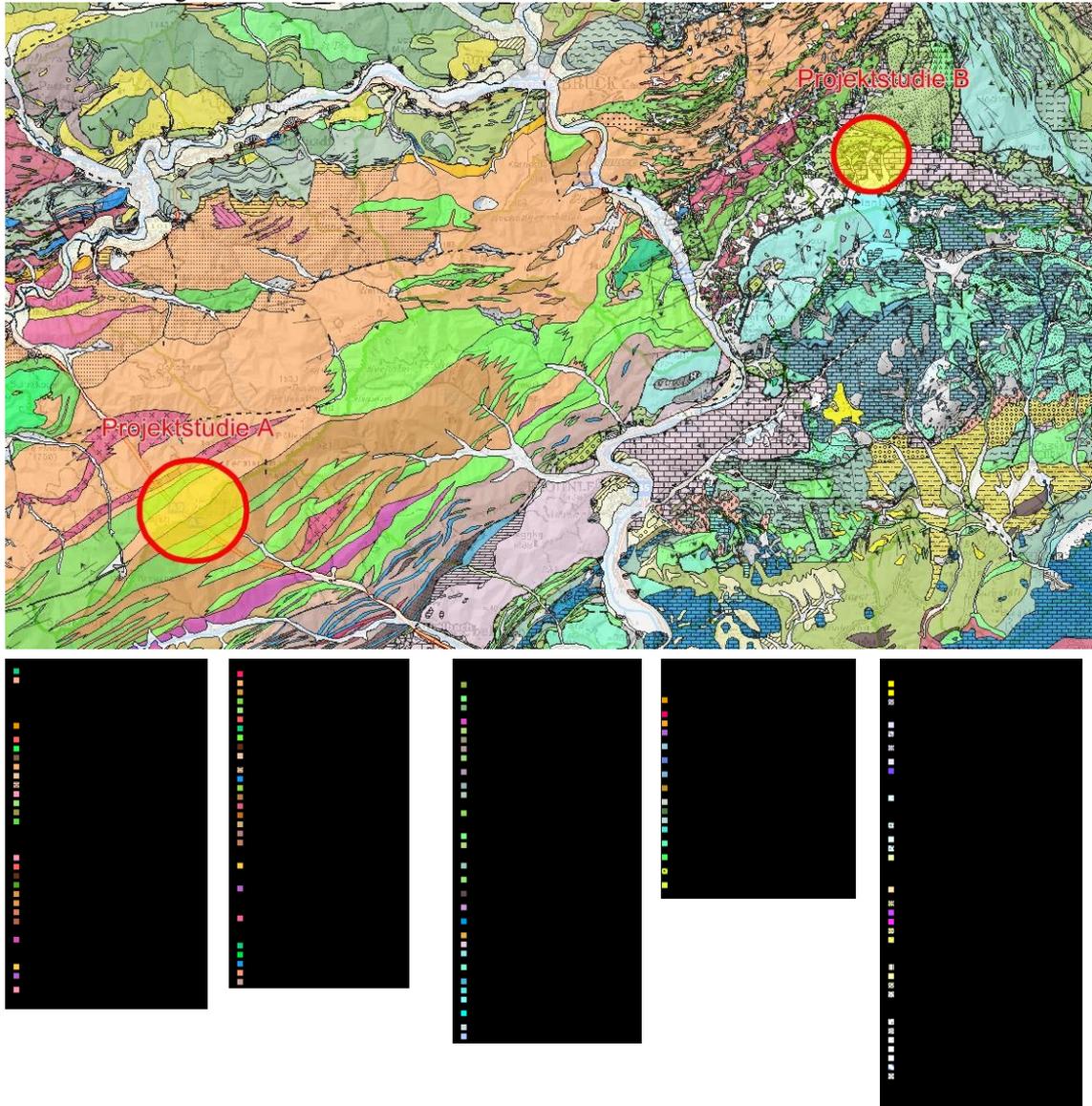


Abbildung 18: Geologie im Bereich der beiden Projektstudien[36]

Auch Wasser- und Gaszutritte können speziell bei der Herstellung der Tiefenbohrung nicht ausgeschlossen werden. In der Projektstudie A wurden bei der Erstellung des Erkundungsstollens für die 1. Röhre maximale Wasserzutritte von <7 [l/s] festgestellt. Danach wurden keine größeren Werte mehr gemessen. Das Wasser wurde im Labor untersucht und es wurde festgestellt, dass das weiche Wasser weder Beton noch Eisen angreift.[41] Bei beiden Projektstudien dass hochmineralisierte, saline Wässer gefördert werden. Dies ist bereits bei der Planung der

Anlagenteile miteinzubeziehen um spätere Beschädigungen an Stahlrohren und anderen Materialien zu vermeiden.

8.3. Geomechanik

8.3.1 Tiefenbohrung

Die geomechanische Bedeutung bei petrothermalen Systemen liegt vorrangig auf dem Spannungsfeld in den Gesteinen, welche einerseits natürlich vorherrschen und andererseits durch die Erzeugung einer unterirdischen Wärmetauschfläche (Fracking) verändert wird. Auch das Offenbleiben der geschaffenen untertägigen Wärmetauschfläche durch Einspülung feiner Sandpartikel ist hinsichtlich Geomechanik von Bedeutung. Bei tiefen Erdwärmesonden ist ein geomechanischer Gesichtspunkt die Stabilisierung der Bohrlochwandung mit Stahlausbau. Speziell in tieferen Bereichen, da hier die Gebirgsdrücke aufgrund der Überlagerung immer größer werden, spielt dies eine wesentliche Rolle. Hier kann es zu ähnlichen Versagensformen wie beim tiefen Schachtbau kommen (Bergschlag).

8.3.2 Bohrkaverne

In Anbetracht der gegebenen Voraussetzungen hinsichtlich Hohlraumquerschnitt ist für beide Projekte ein Hohlraum im Ausmaß von etwa 40.000 [m³] (30 [m] x 30 [m] x 45 [m]) für die Errichtung des Bohrturms vorzusehen. Auch sind Bohrplatzeinrichtungsflächen, möglichst nahe der Bohrturmkaverne, von insgesamt etwa 1 000 [m²] zu errichten. Bei Ausbruchsquerschnitte dieser Größenordnung sind auch bei vorherrschendem überwiegend standfestem Gebirge Sicherungsmaßnahmen notwendig und für ein standsicheres Bauwerk unbedingt erforderlich. Ein Ausbau der Kaverne erfolgt bei beiden Kavernen durch Spritzbeton Gebirgsanker und einer 2-lagigen Bewehrung. Der für beide Projekte zum Lastentransport (Bohrgestänge,...) in der Kaverne vorgesehene Schienenkran (siehe Abbildung 3) muss die Lasten in das Gebirge einleiten und erfordert verstärkte bauliche Maßnahmen wie Konsolen und lange Gebirgsanker. Als Ausbruchssicherung der Kavernenzentrale wird für die Kalotte eine systematische Ankerung mit SN-Ankern (Nennlast 300-400 kN, L=10÷12 m) und 40 [cm] Spritzbeton vorgeschlagen. Als Sicherung der etwa 30 [m] hohen vertikale Wände werden SN-Anker (Nennlast 200-300 kN, L= 6÷10 m) und 25 [cm] Spritzbeton angedacht. Die Schutterung erfolgt über 2 Zugänge. Der Ausbruch der Kalotte wird in 3 Teilausbrüche unterteilt und das Abteufen der 45 [m] hohen Kaverne erfolgt über mehrere Etappen mit Höhen von etwa 4-5 [m].

8.4. Betrieb

Um einen reibungslosen Betrieb der gesamten Anlage gewährleisten zu können, sind im Vorfeld die für den Betrieb nötigen Leistungen und Anforderungen zu definieren. Bereits in der Planungsphase sind die nötigen Leitungen für die Stromversorgung, Anforderungen für die Energieumwandlung, Energieeinspeisung, Personalressourcen, Art und Verwendung des Wärmeträgermediums, etc. dem Planer bekannt zu geben und in das Projekt zu implementieren. Diese Anforderungen werden projektspezifisch in den Kapiteln 9 und 10 behandelt. Für die genaue Auslegung und Bemessung der Aggregate (Transformator, Generator, etc.) ist es unerlässlich in der Planungsphase einen erfahrenen Verfahrenstechniker (im besten Fall aus dem Bereich der Geothermie) beizuziehen.

8.4.1 Wärmereservoir

Nach Auskunft von Hr. Dr. Ladislaus Rybach am Workshop für Geothermie in Leoben (01.07.2014) wird bei Anwendung der HDR-Technik eine Kluftfläche im Kristallingestein von ca. 2x10⁶ [m²] benötigt um Wärme wirtschaftlich und auf Dauer gewinnen zu können. Die entspricht einer Fläche von 2,0 [km] x 1 [km]. Diese Fläche gilt als Bezugsgröße für sämtliche EGS-Projekte und sollte sowohl für Projektstudie A, als auch für Projektstudie B erreicht werden. Das dafür nötige Gesteinsvolumen des Wärmespeichers ist 2x10⁸ [m³]. Dies entspricht etwa den

Abmessungen von 2 [km] x 1 [km] x 0,1 [km]. Der Fließwiderstand für eine wirtschaftliche Wärmeförderung aus dem kristallinen Reservoir sollte $< 0,1$ [MPa/kg*s] nicht übersteigen. Dieser Widerstand und die nötigen Fördermengen sind aber leider erst bei den ersten Fördertest ausreichend genau zu quantifizieren, was bis dorthin ein großes unvermeidbares Risiko darstellt.[10]

8.4.2 Personal

Für die Errichtung und den Betrieb der Tiefbohranlage mit Bohrteufen bis 6 [km], wie sie für beide Projektstudien angestrebt wird, ist eine Mannschaft von etwa 15 Personen nötig. Dies gilt nur für den Bohrturm samt Bohrplatzeinrichtung. Für die Herstellung von Tiefbohrlöchern durch Großbohranlagen kann gesamt mit etwa 40 Personen während der Tagschicht und etwa 20 Personen in der Nachtschicht gerechnet werden. Hier können jedoch durch Einsatz von Robotern, welche das Bohrgestänge beim Ein- und Ausbau automatisch zu- oder wegführen beziehungsweise automatisch verschrauben und entschrauben, noch Personalressourcen und damit Kosten eingespart werden. [28] Personalressourcen für die Errichtung der Bohrkaverne (etwa 6 Mann je Schicht) sind hier noch nicht miteingerechnet. Bei einem Dreischichtbetrieb würd dies einen zusätzlichen Personalbedarf von 18 Personen bedeuten. Für Wartungs- und Servicearbeiten an der gesamten Anlage während des Betriebs sind weitere Personalressourcen notwendig.

8.4.3 Energieversorgung und Energieeinspeisung

Bei obertägigen Anlagen, bei denen eine neue Stromtrassenerrichtung erfolgen muss, wird die Umweltbehörde (bmlfuw) unter Umständen eine standortbezogene UVP anordnen. Die Schwerpunkte hierbei liegen auf Vegetationszerstörung (Flora und Fauna) sowie die erhebliche Veränderung des Landschaftsbildes. Bei den untertägigen Anlagen Breitenau (Projektstudie B) und Gleinalm (Projektstudie A) entfällt ein Teil des Aufwands, da die Strombereitstellung teilweise bereits vor Projektstart gesichert ist. Bei einer Bohrtiefe von etwa 6 [km] und der Installation von 3 Stück Erdwärmesonden würde dies bei einer Entzugsleistung von 200 [W_{th}/m] eine Leistung von etwa 3,6 [MW_{th}] bedeuten. Für den Betrieb der Bohranlage während der Herstellung der Sonde sind Großbohranlagen mit etwa 3-4 [MW_{el}] Leistung erforderlich. Für eine dauerhafte wirtschaftliche Nutzung zur Stromgewinnung sind die erzielbaren Leistungen von Erdwärmesonden auch bei hohen Temperaturen unzureichend. Tiefe Erdwärmesonden werden aufgrund der zurzeit noch hohen Kosten daher in unseren Breiten zur Stromproduktion kaum eingesetzt. Im Gegensatz zu Erdwärmesonden ist bei HDR Projekten bei Zieltemperaturen > 200 [$^{\circ}C$] mit einer elektrischen Leistungen von etwa 5-10 [MW_{el}] zu rechnen. Nach Rücksprache mit der Energie Steiermark (Hr. DI Gruber) ist für die Energie Zu-, und Ableitung ein Kabel notwendig. Für den Anschluss der Bohranlage bzw. in späterer Folge des Generators wird ein Transformator zur Spannungswandlung eingesetzt. Auf Grund der Leitungslängen von der Oberfläche bis zum Bohrpunkt ist zur Begrenzung von Leitungsverlusten für die geplanten Leistungen im Bereich von 5 [MW_{el}] eine Spannung von 20 [kV] für das Zuleitungskabel ausreichend. Am Bohrpunkt ist dann auf die von der Bohranlage vorgegebene Spannung (Je nach Bohranlagenhersteller unterschiedlich) mittels Transformator umzuspannen. Dieselbe Vorgehensweise gilt auch für die Einspeisung durch einen Generator. Ein durchschnittlicher österreichischer Haushalt weist pro Jahr einen Stromverbrauch von etwa 5.000 [kWh/a] auf. Der Energieaufwand für Heizen beträgt je nach Haustyp im Mittel etwa 15.000 [kWh/a]. Mit einer 5[MW_{el}] HDR Anlage können bei ganzjährigem Betrieb etwa 9.000 Haushalte mit Strom versorgt werden. Die verfügbare thermische Leistung wird dabei mit etwa 50 [MW_{th}] abgeschätzt und würde etwa 30.000 Haushalte mit Wärme versorgen. Da die Siedlungsdichte bei beiden Projekten nicht sehr hoch ist, wird ein großer Teil der Industrie zugeführt. Bei Projektstudie A könnte ein Teil der Elektrizität der gesamten Tunnelelektrizität (Beleuchtung, Belüftung,...) und Heizung diverser Betriebsgebäude zugeführt werden. Bei Projektstudie B kann die gewonnenen Energie der Aufbereitungsanlagen wie Brecher, Siebe, Mühlen,... zugeführt werden.

8.4.4 Energieumwandlung

Bei sogenannten EGS Projekten werden durch den heißen Dampf aus der Tiefe Turbinen angetrieben. Durch Generatoren wird die dadurch bereit gestellte mechanische Arbeit in elektrische Energie umgewandelt. Die Generatorausgangsspannung ist aber meist nicht mit der Netzspannung kompatibel und daher gleichen Transformatoren diese Spannungsunterschiede aus. Um einen möglichst hohen Wirkungsgrad der gesamten Tiefengeothermieanlage zu gewährleisten, ist es sinnvoll den Wasserdampf möglichst unweit des Bohrturms in Strom umzuwandeln. Je nach ausgewähltem Turbinen- und Generatortyp sind hierfür Spezialtransporte notwendig. Ob die Energieumwandlung unter Tage oder über Tage erfolgt, ist je nach Projektstandort und Überlagerung projektspezifisch festzulegen. Erfolgt eine Situierung unter Tage sind hierfür auch entsprechend gesicherte Hohlräume inklusive Schwerlastkräne zu errichten.

8.5. Ausbruchsquerschnitte und Lasten

8.5.1 Kavernenabmessungen für Bohrturm

Für das Errichten, Anschließen und den Betrieb der Bohranlage sind wie vorhin erwähnt entsprechende Lagerflächen vorzusehen. Um die Kavernenabmessungen in Grenzen zu halten können Lagerflächen, Spülflüssigkeitstanks, Aufbereitungsanlage der Spülflüssigkeit, etc. in (bestehende) unterirdische naheliegende Hohlräume ausgelagert werden. Da aktive untertägige Bauwerke in dieser Größenordnung meist einem bestimmten Zweck dienen (Flucht-, Wetterschächte), wird eine völlige Neuerstellung der Bohrkaverne samt Zugangsstollen sowohl bei Projektstudie A als auch bei Projektstudie B unumgänglich sein.

8.6. Tiefbohranlage

Die Tiefbohranlage ist die zentrale Anlage des gesamten Systems. Und macht das Wärmereservoir zugänglich. Auch die mit der Tiefbohranlage angelieferte Bohrtechnik, Ausrüstung, Bohrplatzausrüstung ist projektspezifisch auszulegen und trägt wesentlich zu den Gesamtkosten bei.

8.6.1 Der Bohrplatz

Nach Auswahl des Standortes der Bohrtätigkeit sind erste Maßnahmen zum Einrichten des Bohrplatzes zu treffen. Dies beinhaltet auch den untertägigen Anschluss der Tiefbohranlage an die vorhandene Infrastruktur (Zufahrtswege und Anschluss an Wasser und Energie). Der Bohrplatz benötigt eine Fläche von etwa 2000 [m²] und erfordert einen 30cm mächtigen Kiesunterbau. Um das Eindringen von kontaminierter Bohrspülflüssigkeit in den Untergrund zu vermeiden wird die gesamte Bohrplatzfläche versiegelt. [5]

Die Bohrplatzfläche muss statisch so dimensioniert werden damit die hohen Lasten gleichmäßig, mit geringen und gleichmäßigen Setzungen in den Untergrund abgetragen werden können. Eventuell anfallendes Sickerwasser muss durch eine Drainage abgeleitet werden. Die Dauer der Bohrplatzeinrichtung beträgt etwa 4-6 Monate.[1]

Die erforderliche Straße zur Anlieferung des Materials muss min. 5[m] breit sein und davon müssen min 3,5[m] geteert sein. Für den Aufbau des Bohrturms sind zum Teil mehrere Meter mächtige Fundamente nötig. Die genaue bauliche Dimensionierung ist von einem Baustatiker durchzuführen. Die wesentlichen Bestandteile einer Tiefbohranlage sind im Anhang in Abbildung 51 dargestellt. Die eingesetzte Bohrspülung wird im Kreislauf geführt und auf ihre Qualität und Quantität kontrolliert. Zement und etwaige Additive zur Spülung werden in Silos am Bohrplatz gelagert und durch Pumpen zugeführt. Das anfallende Bohrklein und die zu entsorgende Bohrspülung werden aufbereitet und umweltgerecht entsorgt.[5]

8.6.2 Hauptbestandteile Bohrplatzeinrichtungsfläche

Zu den Hauptbestandteilen des Bohrplatzes zählen der etwa 40 [m] hohe Bohrmast, das Hebesystem, der Drehtisch, die Spülungspumpen, der Spülungskreislauf und der Blow Out

Preventer, Hebesystem, Drehtisch, Spülpumpen und Nebenaggregate sind die größten Energieverbraucher auf der Tiefbohranlage und werden über das öffentliche Stromnetz versorgt.

Bohrmast:

Eine Masthöhe von etwa 40 [m] ermöglicht es gleichzeitig 3 Bohrstangen mit jeweils 9 [m] Länge zu ziehen, zu entschauben und diese am Bohrturm abzustellen. Die Höhe des Unterbaus des Bohrgestütes ist etwa 12-14 [m] (je nach Größe des BOP). Er dient als Bohrlochkopfsicherung und bildet das oberste Element der Verrohrung.

Hebesystem:

Bohrhaken, Flaschenzug, Kronenblock und Hebewerk sind die Bestandteile des auf die schwerste Verrohrung ausgelegten Hebesystems. Der Antrieb erfolgt elektrisch und die Leistung des Antriebes steigt mit zunehmender Teufe.

Drehtisch:

Bei Bohrarbeiten im harten Kristallingestein treten Vibrationen, Stöße und Drehmomentenschwankungen auf. Alle mechanischen Einrichtungen wie Ketten, Zahnräder, Wellen und Kupplungen müssen auf diese Beanspruchungen dimensioniert werden. Zur Aufnahme der Meißelstöße kann eine Flüssigkeitskupplung oder ein unabhängiger Drehtischantrieb zwischen Antrieb und Drehtisch eingebaut werden.

Spülpumpen:

Die Spülflüssigkeit wird über eine Kolbenpumpe über das Bohrgestänge zum Bohrmeißel befördert. An den Öffnungen im Bohrmeißel tritt es mit großer Geschwindigkeit aus und fördert das gelöste Bohrklein im Ringraum nach oben. An der Oberfläche wird das Bohrklein durch Siebe, Desander und Desilter von der Bohrspülung abgeschieden. Der große Durchmesser und die hohen Spülungstemperaturen können zu Problemen bei den Pumpen führen. Um eine zu große Erhitzung der Spülung zu vermeiden werden große leistungsstarke Spülpumpen eingesetzt, welche eine hohe Spülgeschwindigkeit garantieren.

Spülungskreislauf:

Die Spülpumpen fördern, nach erfolgreicher Abscheidung des Bohrkleins in die Schlammteiche, die Bohrspülung über Steigleitung wieder in das Bohrgestänge Richtung Bohrmeißel nach unten. Die Geschwindigkeit der Bohrspülung beläuft sich zwischen 20-40 [m/s] und erfährt den größten Druckabfall beim Austritt aus dem Bohrmeißel.

BOP:

Diese Einrichtung soll ein unerwartetes Austreten von Gasen oder Flüssigkeiten unter hohem Druck verhindern. Mit dieser Einrichtung, welches aus mindestens 3 Schließeinrichtungen besteht, kann das Bohrloch in jeder Betriebsphase geschlossen werden.

Die für Tiefengeothermieanlagen eingesetzten BOP sollen hohe Fließraten garantieren, resistent gegen korrosive und abrasive Flüssigkeiten sein und sollen weiters gegen hohe Temperaturen beständig sein, falls heiße Spülflüssigkeit oder Dampf austritt.[5]

8.6.3 Der Bohrl Lochdurchmesser

Dieser ist speziell in Hinsicht auf die zukünftigen Förderraten von großer Bedeutung. Ein zu kleiner Durchmesser resultiert in einem zu großen Widerstand bei der Aufwärtsströmung und liefert Verluste in den Produktionsraten. Ist der Durchmesser zu groß widerspiegelt sich dies in den höheren Kosten und stellt ein höheres finanzielles Risiko dar. Der Durchmesser der obersten Verrohrung für eine Bohranlage, welche etwa auf 6 [km] Teufe bohrt, wurde seitens des Petroleum Engineering Institutes mit 36 Inch abgeschätzt.[5]

8.7. Logistik

Erfolgt ein Teil des Antransports, der gesamte Aufbau und die Einrichtung unter Tage, stellt dies eine besondere logistische Herausforderung dar. Speziell in der Projektstudie B werden aufgrund der Wendelradien mit etwa 30 [m] und der Wendelneigungen von <12 [%] hohe logistische Herausforderungen gestellt.

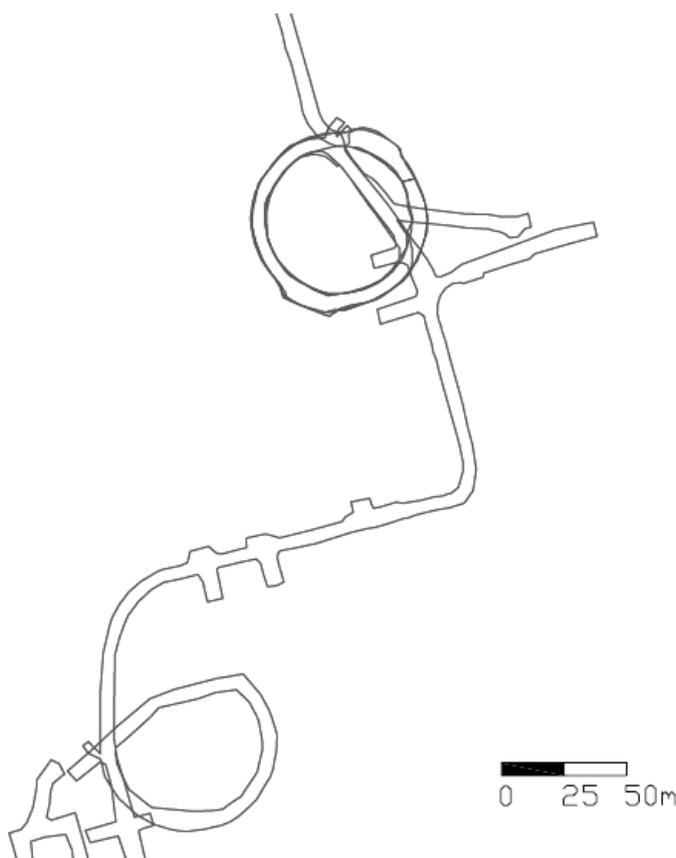


Abbildung 19: Ausschnitt aus dem Wendelgrundriss bei Projektstudie B

Dies erfordert eine detaillierte Planung und ein gutes Zusammenspiel zwischen allen Projektbeteiligten. Aufgrund des technischen Fortschritts der letzten Jahrzehnte im Bereich der Bohrtechnik sind fast alle Komponenten der Bohranlage in 20 Fuß Containern zu transportieren und ermöglichen dadurch auch ein Projekt mit besonderen logistischen Herausforderungen. Aufgrund der vorhandenen niedrigen Durchfahrthöhen (Projektstudie B: 3,20m) ist als Zugfahrzeug eine Sattelzugmaschine (SZM) mit niedriger Kabine angedacht. Aufgrund der Fahrbahnneigungen und der teilweise schwierigen Fahrbahnverhältnisse (Schotter) ist eine SZM mit Allradantrieb vorteilhaft. Um die Transporthöhe nicht zu überschreiten werden die Container auf einem Tieflader mit 80 [cm] Ladefläche transportiert. Die Abmessung der Fahrzeugkombination bei 2-Achs SZM und 3-Achs Tieflader sollten aufgrund der Wendelradien 16,50 [m] (je nach Aufliegertyp) nicht überschreiten. Das Gesamtgewicht bei 22 [t] Nutzlast für den Containertransport liegt bei ca. 40 [t]. [43] Somit ergeben sich für beide Projektstudien keine logistischen Engpässe oder große Zusatzaufwändungen.

8.7.1 Antransport Bohrturm

Der Anlieferung der gesamten Bohranlage und der dafür notwendigen Ausrüstung erfolgt aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse bei beiden Projektstudien auf Tiefladern mit 20 Fuß Standardschiffscontainer. Engstellen wie sie beispielsweise bei Projektstudie B auftreten sind bei Bedarf aufzuweiten, um einen Antransport zu ermöglichen.

8.7.2 Infrastruktur

Erforderliche Zufahrtsstraßen für den Antransport der Bohranlage sind bei beiden Projekten vorhanden und können für die das Geothermieprojekt nach Absprache mit dem Betreibern (RHI AG und Asfinag Bau Management GmbH) genutzt werden.

Die Anlage muss für den Betrieb mit Strom, Wasser und einer entsprechenden Belüftung versorgt werden. Eine ausreichende Wasser- und Luftversorgung ist bei beiden Projekten erforderlich. Die Leitungen dafür müssen bei beiden Projekten erweitert bzw. neu verlegt werden, da die

Bestandsleitungen unzureichende Mengen liefern. Die Stromversorgung der Tiefbohranlage (Anforderung: 4x CAT 3512B mit 4x 1500 [KW]) über Dieselaggregate würde die Emissionswerte und zulässigen MAK-Werte³ überschreiten. Die erforderliche Energieversorgung wird über eine externe elektrische Zuleitung (Leistungsbedarf: etwa 3 [MW]) sichergestellt.

Bei beiden Projekten muss sichergestellt sein, dass für jeden untertägig beschäftigten Arbeiter mindestens 2 [m³ Frischluft/min] zur Verfügung stehen. Bei Einsatz von dieselbetriebenen Geräten (Projektstudie A: PKW, LKW, S-LKW und Projektstudie B: Trafo, Muldenfahrzeuge,...) sind weitere 4 [m³ Frischluft/KW*min] erforderlich. Zur Abschätzung der Luftmenge und des Gesamtdrucks am Ventilator wurden für die Bauphase 2 Dumper (je 280 [KW]), 6 Mitarbeiter unter Tage, eine Lutzenlänge von 4000 [m], ein Luttendurchmesser von 1,5 [m] und eine Lutzenkategorie A (geringe Verluste) angenommen. Daraus resultiert eine erforderliche Ventilationssaugleistung von 58,13 [m³/sec.] und ein Gesamtdruck am Ventilator von 4838 [Pa]. Projektspezifische Informationen über den Anschluss bzw. die Anbindung der Infrastruktur werden in 9.5 und 10.5 genauer erläutert.

8.7.3 *Einrichtung der Stromgewinnungsanlage*

Die aus der Tiefe gewonnene Energie wird vorrangig in Form von Strom in das öffentliche Netz der Energie Steiermark eingespeist. Das Nebenprodukt in Form von Fernwärme wird für die Versorgung umliegender Gebäude (Tunnelportal, Betriebsgebäude, Aufbereitungsanlage, Heizen private Haushalte,...) verwendet.

8.8. **Sicherheit**

Das Hauptziel bzw. die Hauptanforderungen hinsichtlich Sicherheit bei einem Geothermiekraftwerk, ist die Anlage sicherheitstechnisch so herzustellen, dass ein sicherer und ökonomischer Betrieb des Geothermiekraftwerks möglich ist.

Eine unsachgemäße Durchführung der Bohrtätigkeit während des Bohrbetriebs stellt ein großes und schwer kalkulierbares Umweltrisiko dar. Leckagen und Unfälle beim Transportieren von Brauchwasser, Schlämme und Betriebsstoffen zählen ebenso dazu, wie unvorhergesehene Gasfreisetzungen (CH₄, H₂S und CO₂) aus dem Untergrund. Erhebliche Gefahr besteht auch bei der Herstellung und der Wartung der für die Anlage nötigen Stromkabel. Speziell die Bereiche Anschlusspunkt zur Bohrkaverne und die Umspannebenen (Transformatoren) bieten eine besondere Gefahrenquelle. Um für die Sicherheit auf der Baustelle Sorge zu tragen sind die Bestimmungen im ASchG einzuhalten.

8.8.1 *Betriebssicherheit*

Die Energienetze Steiermark GmbH weisen darauf hin, dass die in 9.5 und 10.5 beschriebenen und für den Betrieb notwendigen 20-[kV] bzw. 30-[kV] Kabelleitungen zur Stromversorgung der Bohranlage nach Fertigstellung Eigentum der Netzkunden sind. Somit sind alle relevanten Sicherheitsbestimmungen und die Bestimmungen hinsichtlich Verlegung und Personenschutz vom Netzkunden einzuhalten. Am Anschlusspunkt (Bohrkaverne) der beiden Projektstudien gelten die Festlegungen der TOR (Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen). Insbesondere der Teil D2 (Richtlinie für die Beurteilung von Netzurückwirkungen) und der Teil D4 (Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen mit Verteilernetzen) sind projektrelevant und einzuhalten.

8.8.2 *Anlagensicherheit*

Ein auf der Tiefbohranlage situierter BOP stellt sicher, dass unerwartete Gas- oder Wasservorkommen, welche oft unter großen Drücken stehen, nicht freigesetzt werden. Diese technische Einrichtung ist direkt über dem Bohrloch situiert und ist das zentrale Sicherheitselement bei Tiefenbohrungen.

³ MAK-Werte: Maximale Arbeitsplatzkonzentration (siehe ASchG)

8.9. Emissionen

Eine Tiefbohranlage benötigt erhebliche Mengen an Energie und Ressourcen wie Wasser und Luft. Daher fallen auch große Mengen an Abgasen und anderen Emissionen (Wärme, Luft, Schall, Staub, Flüssigkeiten, Gase,...) an. Die bei den Bauarbeiten anfallenden Bauschuttmassen und Bodenaushubmassen sind in den Regelwerken AWG 2002 und der Baurestmassentrennungsverordnung geregelt.

8.9.1 Schadstoffemissionen

Aus Grundwasserschutzmaßnahmen werden die Bohrplätze (Kaverne und Bohrplatzeinrichtungsflächen) versiegelt, anfallende Flüssigkeiten (Bohrspülung, Öle, Benzin, Schmierstoffe,...) werden gesammelt und ordnungsgemäß entsorgt. Regelwerke über Entsorgungsmaßnahmen bei den Bautätigkeiten sind in Kapitel 4.6 und Kapitel 4.7 angeführt.

8.9.2 Schallemissionen

Da bei beiden Projektstudien große Anlagenteile (Bohrturm) unter Tage errichtet und betrieben werden, sind keine großen Lärmbelastigungen für die Anrainer zu erwarten und verkürzt somit Genehmigungsprozesse.

8.9.3 Luftverschmutzung

Durch die elektrische Stromversorgung der Anlage fallen keine Abgasemissionen durch die Diesellaggregate an. Beim Antransport der Container ist auf eine ausreichende Belüftung des Stollensystems zu achten, da hier durch die Transportfahrzeuge (Tiefelader, LKW) mit größeren Abgasmengen zu rechnen ist. Speziell im Zuge der Bohrkavernenherstellung bei Projektstudie B, wo keine natürliche Bewetterung in den tieferliegenden Ebenen (Revier VI) gegeben ist, muss dies berücksichtigt werden. Bei Projektstudie A ist durch eine natürliche Belüftung (Kolbenwirkung durch Fahrzeuge) die Luftverschmutzung von untergeordneter Bedeutung. Luftemissionen im Bereich des Querschlags EQ4 (Projektstudie A) und im Bereich Revier VI (Projektstudie B) in denen die natürliche Belüftung nicht gegeben ist (Zugangstollen, Kavernen) können durch Installation einer saugenden Bewetterung abtransportiert werden.

8.9.4 Begleitgase

Bei tiefen Bohrungen können Begleitgase wie H_2S (Schwefelwasserstoff) und CO_2 (Kohlendioxid) anfallen. Diese Gase müssen über separate Leitungen bis an die Oberfläche transportiert werden und dort fachgerecht entsorgt werden. Bei Auftreten von CO_2 wird angedacht dieses zu verflüssigen und anschließend zu lagern. Dieses Gas kann an die Industrie verkauft werden und findet Anwendung in verschiedensten Bereichen. Es kann in der Badewasseraufbereitung zur PH-Wert Regulierung verwendet werden oder an die Getränkebranche zur Kühlung verkauft werden. An beiden Standorten wird aufgrund der vorherrschenden kristallinen Gesteinsformationen nicht mit dem Auffinden von Schwefelwasserstoff gerechnet. Falls dieses brennbare H_2S wieder Erwartens in geringen Mengen auftritt, wird es an der Oberfläche abgefackelt.

Die im Bohrplatzeinrichtungsplan dargestellte Anlagenfackel wird, aus Gründen der Sicherheit, bei beiden Projektstudien über Tage situiert.

9. Projektstudie A: ASFINAG-Gleinalmtunnel

9.1. Allgemeine Projektdaten

Der Tunnel liegt auf der A9 Pyhrn Autobahn und verbindet überregional Süddeutschland mit den Balkanstaaten.

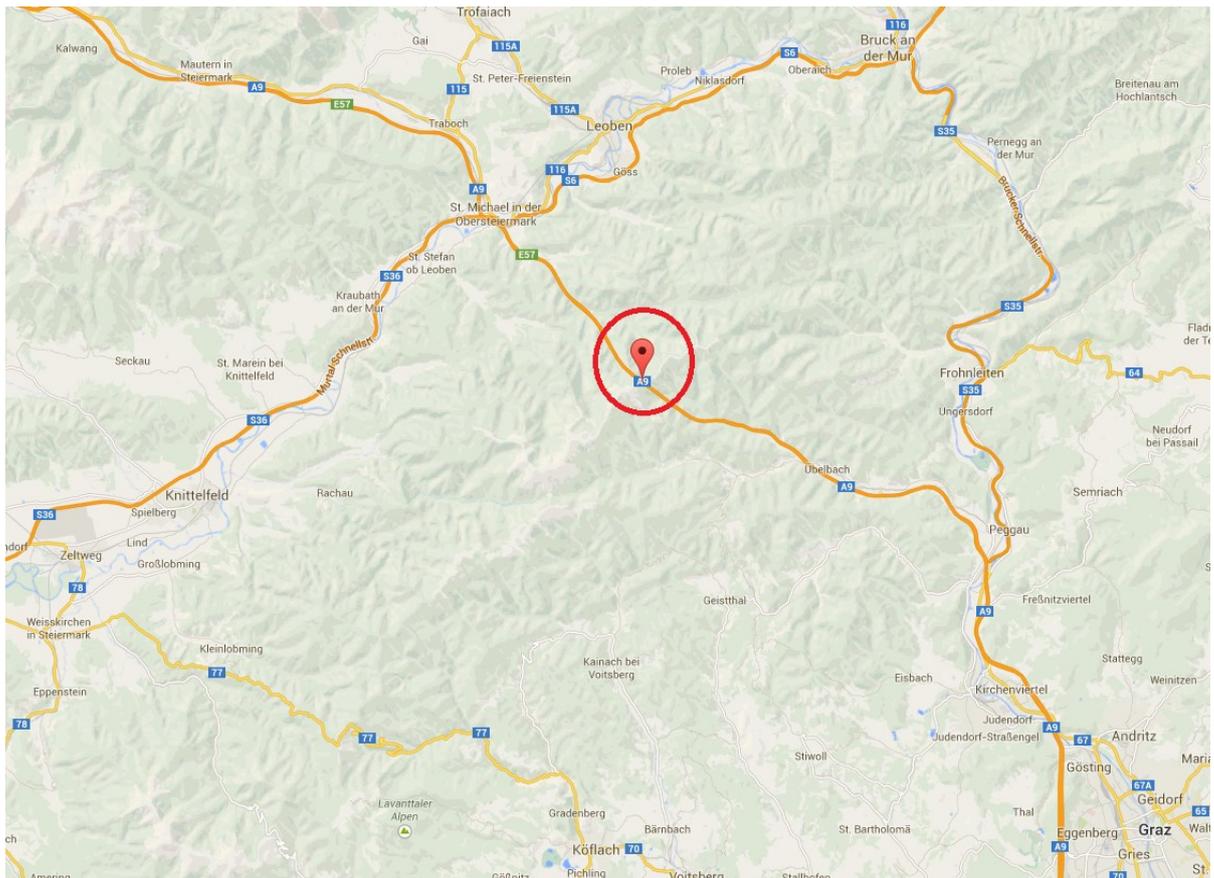


Abbildung 20: Geografische Lage des Gleinalmtunnels in der Steiermark

Der Tunnel hat eine Länge von 8320 [m] und eine maximale Überlagerungshöhe von ca. 900 [m]. Der Vollausbau der zweiten Röhre ist seit 09/2013 im Gang und wird noch bis Ende 2017 andauern. Im Anschluss daran wird die erste Röhre saniert und hinsichtlich Sicherheit auf den Stand der Technik gebracht. Im Jahr 2019 sollen beide Röhren im Richtungsverkehr betrieben werden können.

9.2. Projektbezogene geologische Standortbedingungen

Der von Nordost nach Südwest streichende Gebirgszug der Gleinalpe ist durch kristallines Gestein geprägt und bildet eine Art Fundament für die nachfolgende Sedimentdecke des sogenannten Grazer Paläozoikums. Der Gleinalmtunnel durchörtert vorwiegend Gneise, Amphibolite und Schiefer des Gleinalmkristallins, die in massiger bis schiefrieger Ausbildung auftreten.

Eine Einteilung in Gebirgsgüteklassen erfolgt auf Basis der ÖNorm B2203 (1978) bzw. nach Pacher, Rabcewicz, Golser (1973). Die Gebirgsgüteklasse 1 (standfestes bis nachbrüchiges Gebirge) ist auf 69 [%] des 8,3 [km] langen Gleinalmtunnels vorzufinden. 25 [%] der Tunnellänge sind Gebirgsklasse 2 (stark nachbrüchiges bis leicht gebräches Gebirge) und die restlichen 6 [%] sind Gebirgsklasse 3 (gebräches Gebirge).

Nahezu alle auftretenden Gesteine sind sehr dunkel, was durch das Auftreten von Biotit und Hornblende begründet wird. Außerdem ist durchgehend eine deutliche Schichtung im Gebirge vorhanden. Dies ist deutlich an der vor Ort entnommenen Probe in Abbildung 21 sichtbar



Abbildung 21: Geologisches Profil Gleinalmkristallins

Die unterschiedlichen Gesteinstypen können an ihren Schichtgrenzen nicht genau getrennt werden, weil diese oft sehr verschwommen sind. Die Begründung dafür ist, dass die beiden Hauptgesteine Amphibolit (Abbildung 21) und Gneis nahezu überall auftreten und entweder nur in sich variieren oder aufgrund ihres unterschiedlichen Nebengesteins eine andere Gruppenzugehörigkeit bedürfen.[41]

9.2.1 Hornblendeamphibolit

Dieser Gesteinstypus übernimmt den mit Abstand größten Teil des Profils ein. Etwa 5,5 [km] Tunnel liegen in diesem Gesteinstyp. Charakteristisch ist sein dunkles, dickbankiges, massiges bis plattiges Auftreten. Beim Überwiegen der dunklen Bestandteile ist er als Amphibolit zu bezeichnen ansonsten als Hornblendegneis. Die bestimmenden Minerale im Amphibolit sind in Tabelle 4 dargestellt.

Mineral	[Vol. %]
Quarz	12-16
Plagioklas	36-43
Kalifeldspat	3-4
Amphibol	12-19
Biotit	15-24

Tabelle 4: Mineralogische Zusammensetzung Amphibolit [24]

Der Glimmerschiefer ist in diesem Bereich nebensächlich. Die Festigkeitseigenschaften dieses standfesten Gebirges sind sehr gut (siehe Tabelle 5). [41] Dies wirkt sich auf die Herstellung der nötigen Zugänge und der Kaverne sehr günstig aus, da mit geringem Stützmittelaufwand gerechnet wird.



Abbildung 22: Ungestörter Hornblendeamphibolit aus dem Gleinalmkristallin

Die in Abbildung 22 dargestellte ungestörte Amphibolitprobe (Proben Nr.:02Gl_Am_092014) wurde aus der in Abbildung 21 dargestellten Schichtenabfolge entnommen und hinsichtlich geothermischer Parameter untersucht.

Zur Veranschaulichung der bestimmenden Gesteine entlang des Gleinalmtunnels ist ein geologischer Längenschnitt des Gleinalmtunnels im Anhang (Abbildung 46) beigefügt. Bis zur Tiefe des Tunnels (< 1 [km]) ist das Gebirge sehr gut erkundet und beinhaltet vorwiegend Gneise und Amphibolite. In größeren Teufen (3-4 km unter GOK) gibt es bisher noch keine Erkundungen. Für den Standort der Projektstudie A wird, nach Aussagen von Hr. Dr. Pischinger (Geologe-Gleinalmtunnel) vermutet, dass die auftretende Kristalline Zone mehrere (zehner)-Kilometer mächtig ist.

9.3. Projektbezogene geothermische Standortbedingungen

Für die erfolgreiche Umsetzung eines Geothermiekraftwerks auf Basis der in Kapitel 5 erwähnten Gewinnungsmethoden sind bestimmte geothermische Verhältnisse von Nöten. Diese unterscheiden sich je nach eingesetztem System in ihrer Relevanz. Einen Überblick über die Relevanz der thermophysikalischen Eigenschaften für die petrothermale Nutzung liefert die Tabelle 2. Auf dieser Grundlage werden im Folgenden die wichtigsten, auf die Projektstudie bezogenen, Parameter beschrieben.

9.3.1 Wärmeleitfähigkeit λ [W/m*K]

Sie beschreibt konkret die Leitfähigkeit der voraussichtlich im Zielhorizont auftretenden Amphibolit- und Gneisformationen. Die Wärmeleitfähigkeit schwankt im Festgestein zwischen 2 und 6 [W/m*K], während die Wärmeleitfähigkeit von Wasser bei 20 [°C] nur 0,598 [W/m*K] beträgt. Bei den untersuchten Proben des Gleinalmkristallins wurden Werte zwischen 2,33 [W/m*K] und 4,56 [W/m*K] gemessen.

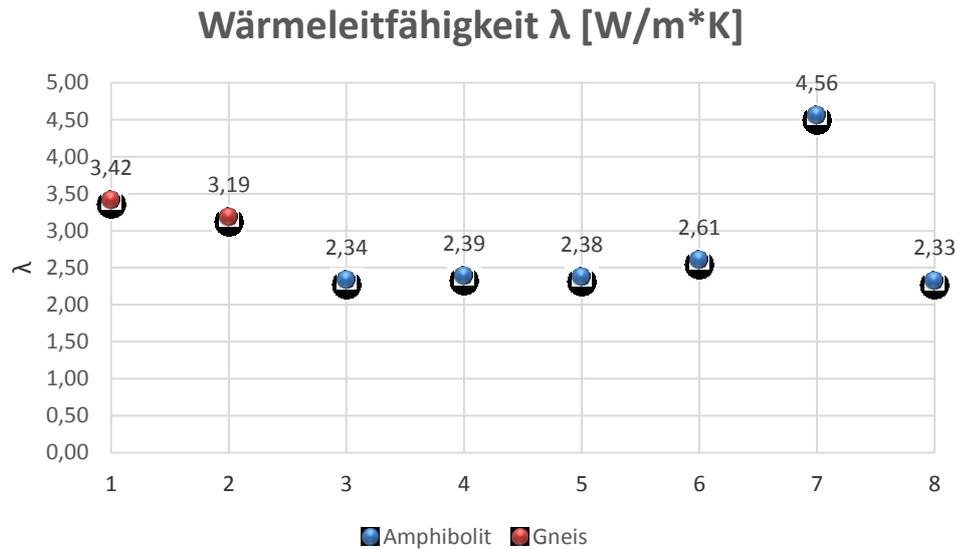


Abbildung 23: Auswertung Wärmeleitfähigkeit

Der Mittelwert aus 8 Proben unter Miteinbezug der Richtungsabhängigkeit lieferte eine Wärmeleitfähigkeit von 2,90 [W/m*K]. Bei einem Temperaturgradienten von 30 [°C/1 km] resultiert daraus eine Wärmestromdichte von 87,08 [mW/m²]. Der Maximalwert der berechneten Wärmestromdichte liegt bei 136,8 [mW/m²]. Basierend auf der in Abbildung 17 dargestellten Verteilung sind diese Werte für die Region überdurchschnittlich hoch. Dies macht eine geothermische Nutzung in diesem Gebiet besonders interessant. Dieser Wert dient auch als Grundlage für eine dreidimensionale geothermische Modellierung.

9.3.2 Wärmestromdichte q [mW/m²]

Im Hinblick auf die Wärmestromdichte von Gneisen und Amphiboliten des Grundgebirges stellt sich dasselbe Bild wie bereits bei der Auswertung der Wärmeleitfähigkeit dar. Diese Werte sind hier nur ergänzend angeführt.

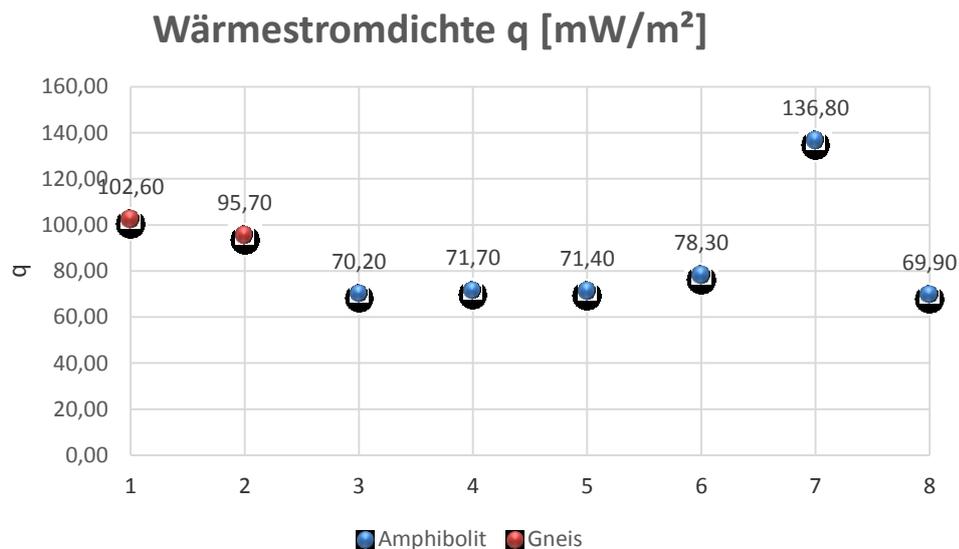


Abbildung 24: Auswertung Wärmestromdichte

Der bereits erwähnte überdurchschnittlich hohe Mittelwert beträgt 87,08 [mW/m²].

9.3.3 Wärmekapazität c [J/kg*K]

Die spezifische Wärmekapazität c liegt für Festgesteine zwischen 750 und 850 [J/kg*K]. Die Auswertung der 8 untersuchten Proben lieferte eine Bandbreite von 609 [J/kg*K] bis 820 [J/kg*K].

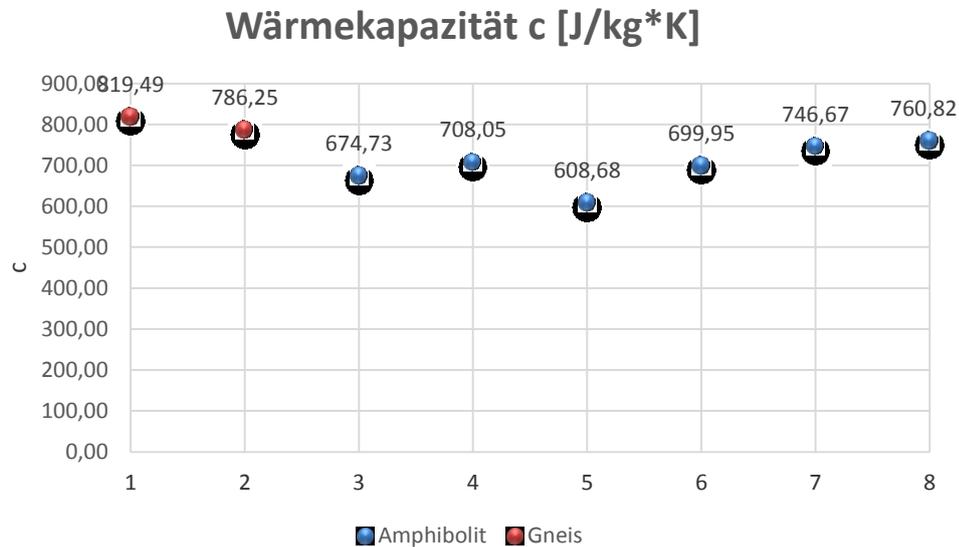


Abbildung 25: Auswertung Wärmekapazität

Aus den 8 Messwerten resultiert eine mittlere Wärmekapazität von 726 [J/kg*K].

Die spezifische Wärmekapazität von Wasser ist mit 4187 [J/kg K] bedeutend höher. Aufgrund der großen Teufen (>6[km]) entstehen bis zur Stromgewinnungsanlage (Turbine) große Förderwege der Wärmeträgermedien. Diese projektbezogenen Umstände verdeutlichen nochmals den Vorteil der Verwendung von Wasser als Wärmeträgermedium.

9.3.4 Dichte [g/cm³]

Bei den untersuchten Amphibolit- und Gneisproben sind keine wesentlichen Dichteunterschiede festzustellen. Alle Gesteinsproben lieferten Werte zwischen 2,60 [g/cm³] und 3,01 [g/cm³].

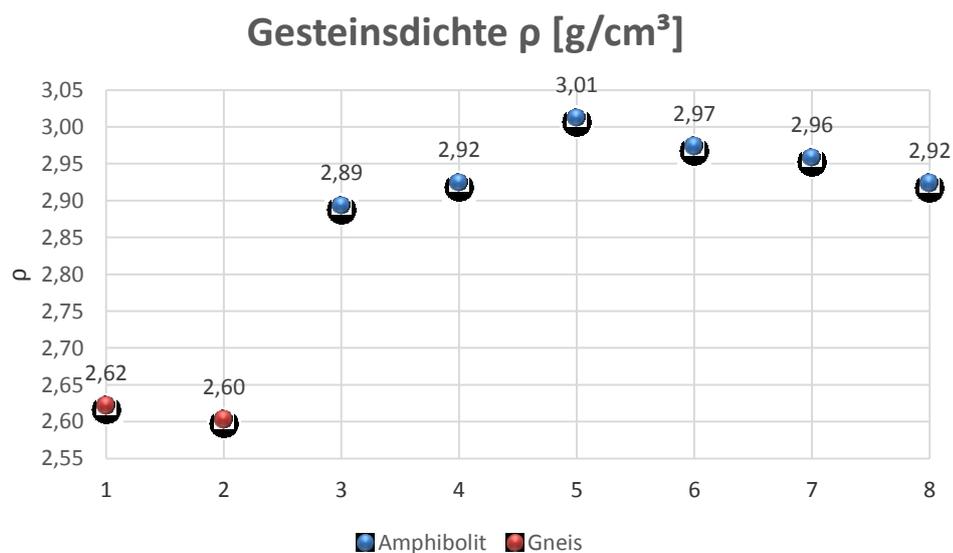


Abbildung 26: Auswertung Gesteinsdichte

Im unteren Bereich waren eher die Gneisproben und im oberen Bereich überwiegend die Amphibolitproben angesiedelt. Im Durchschnitt liegt die Dichte des kristallinen Grundgebirges bei $2,86 \text{ [g/cm}^3]$. Da die Proben bei einer Überlagerung von etwa 1000 [m] entnommen wurden und die Gesteinsdichte über die Tiefe zunimmt ist davon auszugehen, dass das in etwa 6 [km] anzutreffende Kristallingestein eine noch höhere Dichte und eine geringere Porosität aufweist. Dieser Wert ist charakteristisch für metamorphes Grundgebirge wie es in beiden Projektstudien auftritt.

Da es keine direkte Erkundung in den Zielhorizont gibt kann keine genaue Aussage über das Vorhandensein natürlich gegebener Kluftsysteme getroffen werden. Einziger Anhaltspunkt sind die im Folgenden dargestellten Durchlässigkeiten im kristallinen Grundgebirge bei vorhandenen europäischen Tiefengeothermieprojekten.

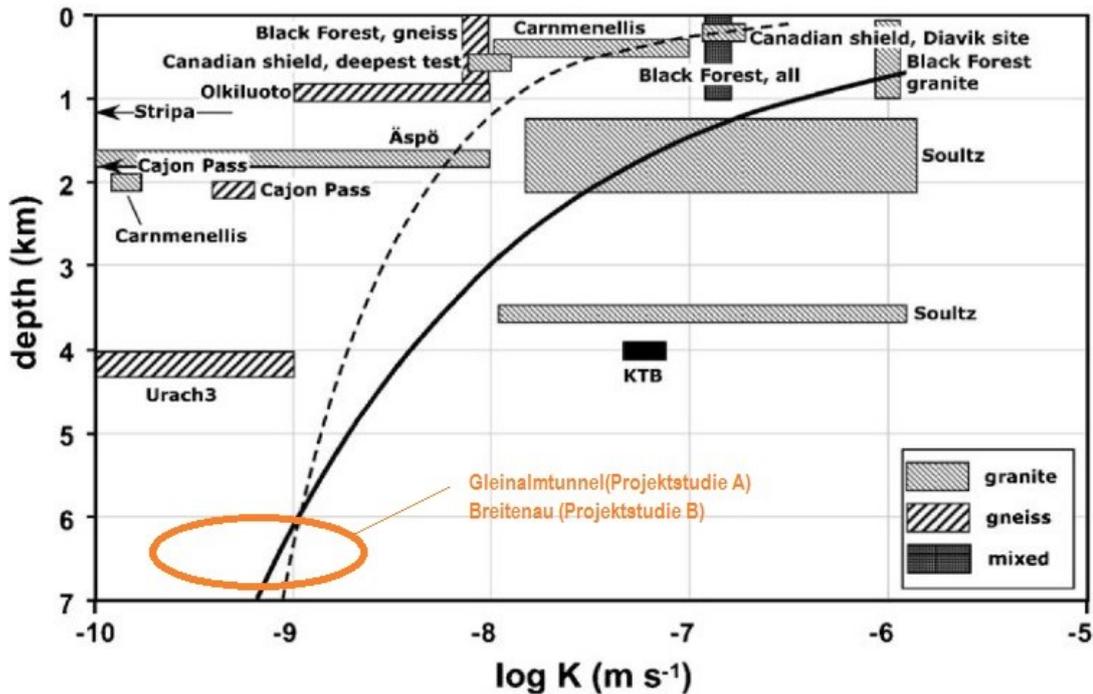


Abbildung 27: Erwartete hydraulischer Durchlässigkeit des kristallinen Grundgebirges [39]

Die gestrichelte Linie in Abbildung 27 zeigt eine Extrapolation des Zusammenhangs zwischen Tiefe und der logarithmierten Durchlässigkeit. Dies lässt auf eine natürliche Klüftung von $< 10^{-9} \text{ [m/s]}$ sowohl bei Projektstudie A als auch bei Projektstudie B schließen.

9.3.5 Radiogene Wärmeproduktion A [$\mu\text{W/m}^3$]

Zwischen den beprobten Gesteinen unterschiedlichen Metamorphosegrades und teilweise unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung bestehen vergleichsweise geringfügige Unterschiede in der radiogenen Wärmeproduktion. Die Streuung der Einzelwerte ist ebenfalls sehr gering. So weist die Mehrzahl dieser metamorphen Gesteine A-Werte im Intervall $0,36 - 1,13 \text{ [}\mu\text{W/m}^3]$ auf.

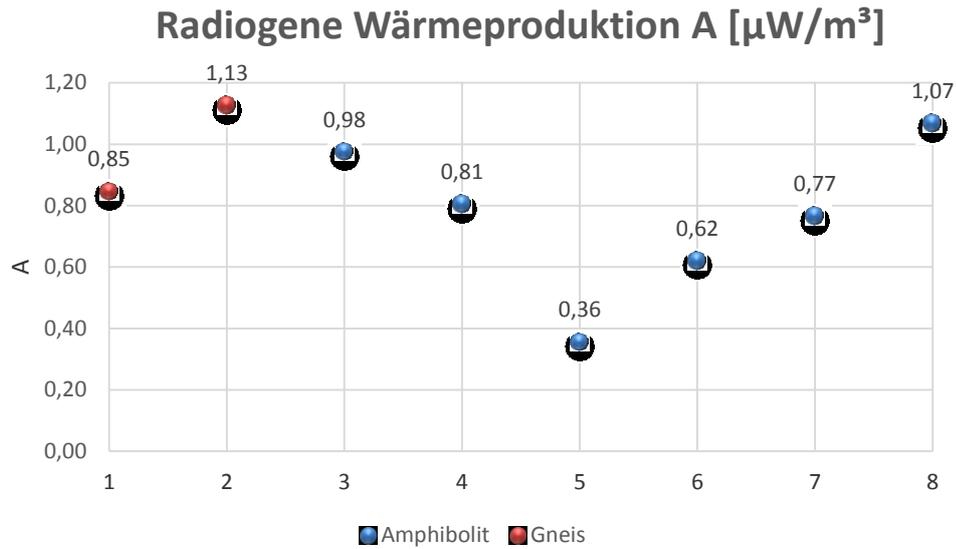


Abbildung 28: Auswertung radiogene Wärmeproduktion

9.3.6 Gesteinstemperatur T [°C]

Die Gesteinstemperatur in eine Zielteufe von etwa 6,7 [km] wurde über den mittleren geothermischen Gradienten von 3 [°C/100m] errechnet und ergab eine zu erwartende Gesteinstemperatur von etwa 200 [°C]. Eine genaue Gesteinstemperaturangabe kann erst nach Abteufen der Ersten Bohrung gemacht werden.

9.4. Projektbezogene Gebirgs-, Betriebs-, und Prozessparameter

9.4.1 UCS, E-Modul

Die Kavernererstellung ist bei Kilometrierung 143.600 [m] in einer homogenen und kompakten Amphibolitschicht angedacht. Als Abzweigung und Zugang zur Bohrkaverne wird hier der Bereich der Pannenbucht beim Querschlag EQ4 vorgeschlagen (Siehe Anhang Abbildung 49). Bei Gesteinsfestigkeiten bis zu 279 [MPa] können die Aufwendungen für den Ausbau minimiert werden.

UCS			E _s	SPZ		
Mittelwert	Min	Max		Mittelwert	Min	Max
[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Gpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
169	92	279	43	15	7	26

Tabelle 5: Auswertung Gesteinsparameter Amphibolit und Gneis

Diese hohen Festigkeiten bringen vor allem geomechanische Vorteile mit sich. Einerseits können bei der Kavernerherstellung größere Abschlagsleistungen erreicht werden, was wiederum zu einer großen Zeitersparnis führt. Andererseits führen die hohen Festigkeiten des Gesteins dazu, dass geringe Verformungen zu erwarten sind und nur mit geringen Ausbaumengen zu rechnen ist. Im Bereich von Klüften und Störzonen sind jedoch lange Gebirgsanker anzuordnen, um bei der Spannungsumlagerung das Ausbrechen oder Abgleiten von Klötzen und Keilen zu verhindern.

9.4.2 Überlagerung und Gesteinstemperatur

Die Bohrkavernensituierung ist bei Kilometrierung 143.600 [m] in einer homogenen und kompakten Amphibolitschicht angedacht. Die Überlagerung liegt hierbei etwa 850 [m]. Bei einem mittleren geothermischen Gradienten von 3 [°C] je 100 [m] ist mit einer Gebirgstemperatur im Bereich der Bohrkaverne von 26 [°C] zu rechnen. Auch das zugeführte Spülwasser weist somit

diese Anfangstemperatur auf. Bei gleichbleibenden geothermischen Gradienten sind im Bereich der Zielteufe von 6,7 [km] Reservoir-Temperaturen von 200 [°C] zu erwarten.

9.4.3 Platzbedarf

Die notwendige Bohrkavernenabmessung wurde bereits beschrieben und ist aus den Plänen in Abbildung 41 ersichtlich. Diese Angaben beruhen auf den Plandarstellungen der Fa. RAG im Anhang in Abbildung 51. In Abstimmung mit dem Planungsbüro Laabmayr (Hr. DI Edlmair) wurde ein Anschluss- bzw. Abzweigungspunkt im Bereich der Pannenbucht bei Querschlag EQ 4 (Kilometer 143 647,911 [m]) festgelegt. Die genaue Lage kann aus dem im Anhang beigefügten Abbildungen (Abbildung 47, Abbildung 48, Abbildung 49) entnommen werden.

9.4.4 Bohrarbeiten

Die Tiefbohrarbeiten beginnen nach erfolgreicher Bohrkavernenerstellung und Aufbau der Bohranlage auf Tunnelniveau (siehe dazu Abbildung 46). In diesem Bereich tritt vorrangig (Auftrittswahrscheinlichkeit 80 [%]) GVT 1(standfest) auf. Aufgrund der hohen Gesteinsfestigkeiten dieses GVT ist ein drehend-schlagendes Bohrverfahren angedacht. Als Bohrwerkzeug wird in Abstimmung mit der Bohrfirma (RAG) für Festgestein (Gneis und Amphibolit) die Verwendung eines Rollenmeißels angedacht. Die längere Bohrzeit, welche aus der Geologie (gesamter Bohrfad im Festgestein) resultiert und der größere technische Aufwand (Bohrwerkzeugverschleiß), werden sich auch auf die Bohrkosten auswirken. Dies kann aber partiell durch eine geringere Sicherung/Stützung der stabilen Bohrlochwandung kompensiert werden.

9.4.5 Betrieb

Es wird wie auch bei Projektstudie B auf knapp 7 [km] Zielteufe gebohrt, was eine Gesteinstemperatur von 200 [°C] zur Folge hat. Um einen reibungslosen Betrieb der Anlage zu ermöglichen ist ein Zusammenspiel aller beteiligten Organisationen von Nöten. Das für den Kraftwerksbetrieb notwendige Betriebsgebäude wird an das vor dem Tunnel bereits vorhandene Gebäude angebaut bzw. integriert. Die genaue Vorgangsweise ist in der Planungsphase mit der Asfinag Bau Management GmbH abzustimmen.

9.5. Projektbezogene Infrastruktur

9.5.1 Zufahrtsstraßen

Da die Bohrplatzeinrichtungsfläche direkt an der A9 situiert ist (Abbildung 29), sind hier nur Baustraßen für einen problemlosen An- und Abtransport der Betriebsmittel herzustellen. Um die Bohranlage in der Bohrkaverne bei Kilometer 143.600 [m] (Siehe dazu Abbildung 47 und Abbildung 48) herstellen und versorgen zu können, ist es hier erforderlich einen Zugangstollen mit einem Ausbruchsquerschnitt von rund 80 [m²] herzustellen. Die Abzweigung des Zugangstollens ist in der Pannenbucht (Querschlag EQ 4) der Oströhre vorgesehen (Abbildung 49)

9.5.2 Strom

Nach Prüfung durch die Energie Steiermark (Hr. DI Gruber) im September 2014 wurden die technisch geeignetsten Anschlusspunkt an der 30-[kV] Sammelschiene der 110/30-[kV] Umspannwerke Leoben/West oder Hessenberg ausgewählt. Die Entscheidung, welcher der beiden Anschlusspunkte ausgewählt wird, wird im Rahmen einer möglichen Projektumsetzung von der Energienetze Steiermark GmbH getroffen. Die Errichtung eines 30 [kV] Abzweiges in den 110/30 [kV] Umspannwerken Leoben/West oder Hessenberg und die Installation einer rund 20 [km] langen 30 [kV] Kabelleitung mit dem Querschnitt 240 [mm²] (Material: Aluminium) vom technisch geeigneten Anschlusspunkt zur Kaverne Gleinalmtunnel/Nord sind für die Herstellung des 30 [kV] Netzanschlusses als Maßnahmen erforderlich. Für die vorhandenen

9.5.5 Belüftung

Temperaturerschwernisse infolge der Wärmeabgabe der Bohranlage werden durch Anschluss an das Belüftungssystem des Tunnels beseitigt. Das Lüftungssystem in der Neubauröhre des Tunnels ist eine Halbquerlüftung mit jeweils 4 Lüftungsabschnitten. Die Abwärme/Abluft aus der Bohrkaverne kann in dieses System eingebunden werden. Die Frischluftzufuhr erfolgt über die beiden Tunnelportale.

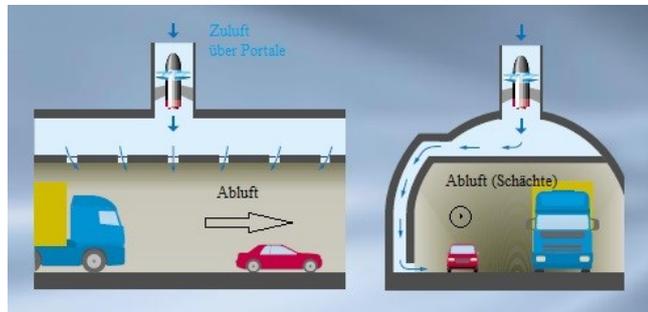


Abbildung 30: Prinzip Luftführung Neubauröhre Gleinalmtunnel [35]

Die Abluft wird direkt über die beiden vorhandenen Lüftungsschächte am Nord- und Südportal an die Oberfläche geführt. Nach Fertigstellung des Tunnelbauwerks erfolgt eine natürliche Belüftung der Tunnelröhren. Die Belüftung in beiden Röhren wird auf den Brandfall bemessen (Absaugung). In den vorhandenen Kavernen an den Portalen herrscht Überdruck um die Abluft und die Schadstoffe ohne Lüftung abzuhalten. Dieses Lüftungskonzept ist auch für die Bohrkaverne angedacht.

9.6. Projektbezogene Sicherheitsaspekte

Im Falle eines Unfalls oder eines Brandes im Tunnel ist durch Brandabschnitte und ein speziell auf das Projekt ausgelegtes Belüftungssystem sicher zu stellen, dass die Flammen nicht auf die Bohrkaverne übergreifen. Auswirkungen durch Vibrationen bei den Bohrtätigkeiten auf das umliegende Gebirge sind bei geologischen Formationen wie sie im Bereich der Gleinalpe auftreten, keine zu erwarten und stellen somit keine Sicherheitsbedenken dar. Begleitgase wie H_2S und CO_2 werden hier in größeren Mengen nicht erwartet und stellen ebenfalls keine Bedenken dar.

9.7. Projektbezogene Risiken

9.7.1 Trink-, Thermal- und Mineralwassergewinnung

Bei den Bohrarbeiten, Bohrerweiterungen aber auch bei der Entnahme von Grundwasser zur späteren Anlagenkühlung muss darauf geachtet werden, dass dies die Umgebungsbedingungen (Setzungen,...) beeinflussen kann. Auch Fließsysteme und Aufstiegssysteme von Thermal-/Mineralwassergewinnung sind oft nur unzureichend bekannt und können durch Geothermiebohrungen beeinflusst werden.[18]

9.7.2 Geologisch bedingtes Risiko

Durch den hohen Quarzanteil einiger Gneistypen in diesem Gebirge und die daraus resultierenden höheren Abnutzung des Bohrwerkzeuges, wird beim Bohren mit erhöhtem Bohrstahlverbrauch gerechnet. In der nördlichen sowie in der südlichen Tunnelhälfte streichen die Schichtflächen unter spitzem Winkel zur Tunnelachse. Dieser Umstand kann einerseits zum Klemmen der Bohrhämmer führen und andererseits kann dies auch zu vorbeugenden Sicherungsmaßnahmen im Bereich der Ulmen und Firsten führen. Bei den bisherigen Vortriebsarbeiten im Tunnel konnten jedoch, nach Rücksprache mit dem zuständigen keine dieser Befürchtungen bestätigt werden. Da das Gebirgsgefüge über die Tiefe eher dichter und kompakter wird, kann davon ausgegangen werden, dass die geologischen Risiken hinsichtlich Bohrlochstabilität über die Teufe abnehmen.

9.7.3 Fündigkeitsrisiko - Qualität und Quantität des Wärmereservoirs

Ein Fündigkeitsrisiko am Standort Gleinalmtunnel und die damit verbundene Förderraten der Wärmequelle können vor Beginn der tiefen Geothermiebohrung nicht ausgeschlossen werden. Bei diesem Risiko handelt es sich vor allem um das Antreffen der erwarteten Temperaturen. Wärmeträgermedium und notwendige Kluftflächen werden extern zugeführt bzw. wird die Lagerstätte durch hohe Drücke stimuliert. Das Risiko für die notwendigen Umlaufgeschwindigkeiten des Wärmeträgermediums kann jedoch erst nach den ersten Fördertests (Fertigstellung der Bohrarbeiten und erfolgreiche Stimulation) ausgeschaltet werden.

9.7.4 Bohrtechnische Risiken

Da bereits im Bereich der geplanten Bohrkaverne kompaktes, wenig zerklüftetes und hochfestes Kristallin ansteht, kann in den ersten 1-2 [km] Bohrtiefe mit kontinuierlichem Bohrfortschritt ohne großen Wasserzutritten gerechnet werden (<1 [l/s]). Für die Teufen von 2 [km] bis etwa 6 [km] kann aufgrund der fehlenden geologischen Daten keine genauen Aussagen über auftretende Risiken gemacht werden. Auf Basis der verfügbaren Daten wird angenommen, dass sich das Gleinalmkristallin gleichbleibend über die Teufe fortsetzt und somit keine größeren bohrtechnischen Risiken, durch große Störzonen, zu erwarten sind. Nach Auskunft des Planers (Geoconsult) am Gleinalmtunnel gab es im gesamten Tunnelbereich (Neubau Oströhre) bei den Bohrarbeiten (Stabilität der Bohrlochwandung) keine Zwischenfälle. Bohrmeißelwahl und Bohrverhalten im Kristallin sind in Absprache mit den Erfahrungen der ausführende Firmen am Gleinalmtunnel zu tätigen.

9.7.5 Fluchtwege/Bewetterung

Im Falle eines Brandes im Tunnel sind Brandabschnitte, Notbelüftungen (4 Lüftungsabschnitte) und Fluchtwege vorgesehen um die im Tunnel befindlichen Personen in Sicherheit zu bringen. Der Bereich der Bohrkaverne wird in das vorhandene Tunnelbelüftungskonzept (Halbquerlüftung) eingebunden um im Falle eines Brandes das Absaugen der giftigen Gase zu gewährleisten. Auch die Erstellung eines Fluchtwegs ist zu untersuchen. Da im Tunnel ein ausgereiftes Fluchtwegkonzept vorhanden ist, werden die Flächen für die Tiefbohranlage in dieses integriert. Dies stellt einen weiteren Vorteil für den Standort dar.

9.7.6 Gefahr durch Verkehr im Tunnel

Bei der Herstellung der in 9.5 beschriebenen Infrastruktur, wird es nötig sein den Verkehr temporär durch eine Tunnelröhre zu leiten. Diese Verkehrsumleitung wird auch für die Bohrkavernenerstellung nötig sein, um das Ausbruchsmaterial aus dem Tunnel zu transportieren. In dieser Zeit sind besondere Vorkehrungen zu treffen um bei der Errichtung des Bohrplatzes (inklusive Bohrkavernenerstellung) nicht den Straßenverkehr zu gefährden. Größtes Augenmerk gilt hier der Bereitstellung eines Fluchtweges in der 2.Röhre im Falle eines Brandes in Röhre 1.

9.7.7 Gefahr durch ev. Gas-, oder Wasserzutritte

Aufgrund der Erfahrungen bei der Herstellung des Tunnels (Weströhre), mit maximalen Wasserzutritten von 7 [l/s], ist mit besonderen Risiken hinsichtlich Wasserzutritte nicht zu rechnen. Auch ist das Wasser in diesem Bereich sehr weich und greift weder Beton noch Eisen (Bohrwerkzeug) an. Unerwartete Flüssigkeits- oder Gaszutritte sind oft mit hohen Drücken verbunden und können mit Hilfe eines Preventers kontrolliert werden. Dieser kann über mehrere hydraulisch angesteuerte Sperrventile das Bohrloch versperren und somit unerwünschte Gas- und Flüssigkeitszutritte verhindern. Nach aktueller Auskunft im September 2014 durch den Planer wurden bei der Herstellung der 2. Röhre bisher sowohl im Nord- als auch im Südvortrieb in Summe jeweils < 1 [l/s] angetroffen.

10. Projektstudie B: RHI-Breitenau

Dieses Projekt bietet hinsichtlich der Errichtung eines Geothermiekraftwerks sehr gute Voraussetzungen. Es besteht eine gute verkehrstechnische Anbindung aufgrund des täglichen

Abtransportes des Rohstoffes Magnesit. Sämtliche Leitungen und alle Straßen können ohne große Veränderungen verwendet werden und stellen somit einen positiven wirtschaftlichen Aspekt dar.

10.1. Allgemeine Projektdaten

Die Magnesitlagerstätte Breitenau liegt in der Obersteiermark im Hochlantsch und befindet sich etwa 30 Autominuten von Leoben entfernt.

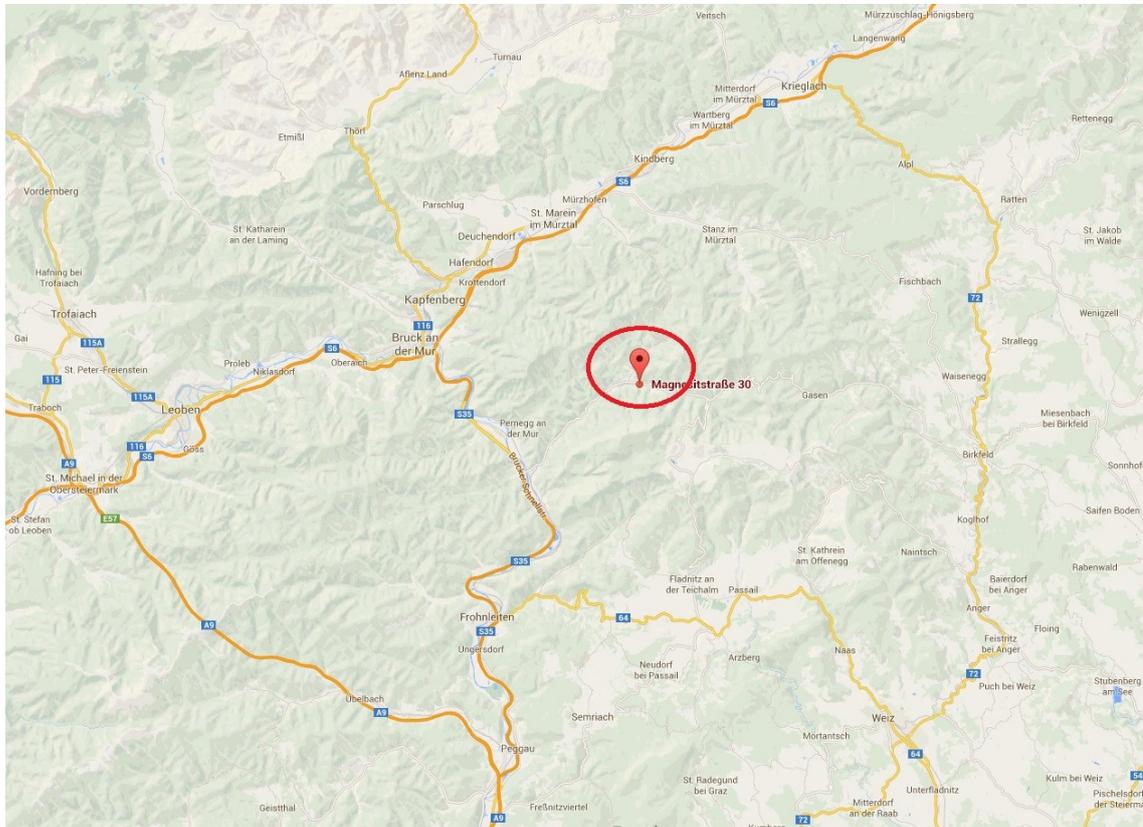


Abbildung 31: Geografische Lage des Magnesitbergbaus der RHI in Breitenau

Die untertägige Erschließung der Magnesitlagerstätte begann erstmals 1967 und wurde seither ständig vorangetrieben.



Abbildung 32: Luftbild der Magnesitproduktion Breitenau

Der Standort Breitenau beschäftigt etwa 190 Personen und liefert seit über 100 Jahren Magnesit für die Feuerfestindustrie. Er zählt zu den größten Untertagebergbauen Österreichs. Die

untertägige Lagerstätte ist mit einem 4,5 [km] langen und bis zu 12 [%] geneigten Schrägstrecken- und Wendelsystem erschlossen. Die Überlagerung beträgt derzeit etwa 1000 [m], wobei eine Fortsetzung der Gewinnung in die Tiefe sehr wahrscheinlich ist. 80 [%] der gesamten Rohstoffe am Standort Breitenau werden unter Tage gewonnen.

10.2. Projektbezogene geologische Standortbedingungen

Der Hochlantsch wurde von der geologischen Epoche sehr stark vom Paläozoikum geprägt. Zum Hochlantsch gehören die Hochlantschgruppe, die Laufnitzdorfgruppe und die Kalkschieferfolge. Die Magnesitlagerstätte selbst ist in die Hackensteinerformation eingebettet, welche zur Laufnitzdorfgruppe gehört.[17]

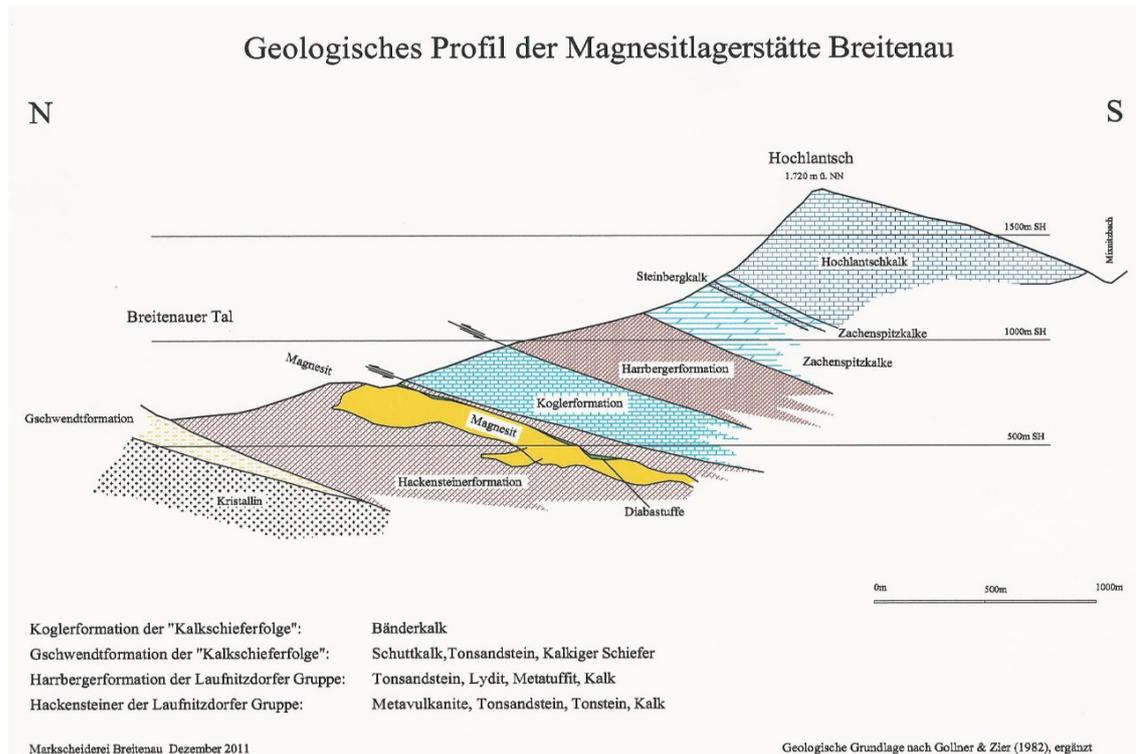


Abbildung 33: NS Profil der Magnesitlagerstätte Breitenau[38]

Eine vergrößerte Darstellung befindet sich im Anhang in Abbildung 50.

In Projektstudie B wird angedacht die Bohrung beginnend aus Revier VI abzuteufen. Es sind geologisch nur die Hackensteinerformation und die darunter liegende Kristallinformation von Bedeutung und werden im Folgenden genauer beschrieben.

10.2.1 Magnesitlagerstätte

Die Magnesitlagerstätte selbst fällt mit etwa 20-25 [°] nach Süd-Südost ein. Die Streichrichtung ist Ost – West und die Lagerstätte ist auf eine Länge von etwa 2 [km] von 800 [m] über NN (Tagbau) bis in eine Teufe von 240 [m] über NN nachzuweisen. Im Hangenden wird der Magnesitkörper von Metatuffit und kohlenstoffreicher, lyditführenden, phyllitischen Schiefen dominiert. Dieser weist bedeutend höhere Festigkeiten (< 90 [MPa]) als das Gestein im Liegenden (< 10 [MPa]) auf.



Abbildung 34: Metatuffit im Hangenden der Magnesitlagerstätte Breitenau

Das Liegende bilden 30-80 [m] mächtige schwarze Tonsteine und feinblättrige Tonschiefer, in welchen vorrangig Sandsteine, Lydite und Vulkanite vorzufinden sind. Die Lyditeinlagen (siehe Abbildung 35) sind wenige Zentimeter mächtig und sehr hart.



Abbildung 35: Lyditeinlagen im schwarzen Tonschiefer

Werden diese Schichten bei Bohrarbeiten angetroffen, wird das Bohrwerkzeug sehr stark abgenutzt, da dieser Lydit ähnliche Eigenschaften wie Quarz aufweist und sehr abrasiv ist. Der Kontakt des im liegenden anzutreffenden Schiefers zum hangenden Magnesit ist tektonisch.[38]

10.2.2 Hackensteinerformation

Diese tritt zwischen St Jakob (Nordost) und Gams/Rothleiten (Südwest) auf. Die Schichten dieser Formation fallen mit etwa 30 [°] nach Süden bis Südosten ein. Die Schieferung der Gesteine verläuft schichtparallel. Der mittlere Bereich der Hackensteinerformation ist von schwarzen bis dunkelgrauen, teilweise geschieferten Ton- und Siltsteinen geprägt. Teilweise sind in diesen schwarze Lydite, Vulkanite, feldspatreiche Sandsteine sowie rötlichbraune, stark verkieselte, dünn gebankte Dolomite eingelagert. Im Anschluss daran sind 15 [m] mächtige Vulkanite anzutreffen. Die Mächtigkeit bei Laufnitzdorf ist 70 bis 120 [m].

Der obere Anteil besitzt eine Mächtigkeit von ca. 46 [m] und ist von dezimeter- bis meter-großen gebankten, orthocrenführenden Kalken mit millimeterdicken tonigen Zwischenlagen geprägt. Das Liegende der Magnesitbasis sind einige Zehnermeter mächtige Tonschiefer, Sandsteine, Diabasmandelsteine und Tuffite.[38]



Abbildung 36: Bohrkerne aus dem Liegenden der Magnesitlagerstätte Breitenau

Die Festigkeit dieser Tonsteine liegt <10 [MPa]. Auch sind oft Lagen mit sehr breiiger Konsistenz anzutreffen (Abbildung 36). Aufgrund der schwierigen geologischen Bedingungen im Liegenden wird die Kaverne im standfesteren Grünschiefer (Hangendes) errichtet.

10.2.1 Kristallin

Die für die Geothermiebohrung relevanteste Zone ist die kristalline Gesteinsschicht, da diese später als Wärmetauscher fungiert. Da es keine direkte und auch keine indirekte (Seismik) Erkundung bis zur kristallinen Zone in Bergwerk Breitenau gibt, wurde die Schicht auf Basis der vorhandenen geologischen Schnitte in Richtung Oberfläche verfolgt. Somit konnten mögliche Bereiche zur Probenahme der kristallinen Zone definiert werden. Eine geeignete Probenstelle wurde an der Tunnelkette Bruck definiert. Das im Querstollen vorgefundene, sehr stark zerklüftete Ausbruchsmaterial (hoher Verwitterungsgrad) wurde ungeeignet für eine qualitative Aussage über das tiefe Kristallin in der Breitenau eingestuft und wurde daher nicht beprobt. Für eine qualitative Interpretation des Kristallingesteins in der Breitenau wurde Probenmaterial am Gleinalmtunnel untersucht und ausgewertet. Dieses Material wurde hinsichtlich geothermischer Parameter bereits in Projektstudie A getestet. Da es sich bei beiden Projektstudien um die gleiche geologische Zone handelt kann die geothermische Auswertung aus Projektstudie A auch für Projektstudie B übernommen werden.

10.3. Projektbezogene geothermische Standortbedingungen

Die Wärmestromdichte von $60-70$ [mW/m²] (Abbildung 17) am Standort der Projektstudie B, welche von der BAG (Bundesanstalt für Geologie) ermittelt wurde, sind brauchbare geothermische Voraussetzungen. Diese Werte wurden nach einer Probenahme teilweise beträchtlich überschritten (siehe Kapitel 9.3.2) und bestätigen den Standort als Vorzugsgebiet für ein österreichisches Geothermiekraftwerk. Die im Förderantrag angeführte Temperaturanomalie mit $30-35$ [°C] im Bereich von Revier VI konnten jedoch nach der durchgeführten Temperaturmessung seitens der RHI AG nicht bestätigt werden (Siehe dazu 10.4.2). Sämtliche

thermophysikalischen Parameter wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Wärmestromdichte, etc. sind analog zu Projektstudie A und sind in Kapitel 0 erläutert und ausgewertet.

10.4. Projektbezogene Gebirgs-, Betriebs-, und Prozessparameter

10.4.1 UCS, E-Modul

Im Jahr 2007 wurde von der RHI AG Proben aus dem Hangenden im Bereich der geplante Bohrkavernenherstellung und aus dem Liegenden entnommen und auf einaxiale Druckfestigkeit getestet. Im Liegenden konnte der Tonschiefer normal zur Schieferung eine Druckfestigkeit von 136,4 [MPa] (99,2 [MPa]) erreichen. Die Klammerwerte sind dabei die Minimalwerte. Parallel zur Schieferung waren die Werte deutlich niedriger und erreichten 74,9 [MPa] bzw. (68,2 [MPa]). Im Bereich der Bohrkavernenerstellung (Abbildung 41) würden im Falle einer Umsetzung etwa 80 [%] der Bohrkaverne im grünen Tonschiefer (überwiegend Metatuffit) errichtet werden. Diese Einschätzung beruht auf den geologischen Kartenwerk, Literatur und Gesprächen mit der RHI AG. Der teilweise sehr stark zerklüftete Grün- und Schwarzschiefer am Standort Breitenau weist nach Auskunft der RHI AG teilweise Festigkeiten <10 [MPa] auf und erfordert enorme Ausbaumaßnahmen um die Gebirgsdrücke und Lasten durch die Bohranlage aufnehmen zu können. Aufgrund der stark variierenden Gebirgseigenschaften im Bereich der geplanten Kavernenerstellung wurde bei der Projektstudie B Gesteinsproben (Probe 1, Probe 2) aus dem Revier VI entnommen und auf ihre Festigkeit untersucht. Aufgrund der Schieferung und der vorhandenen Klüfte sind bei der Probenherstellung einige Proben zerstört geworden. Bei Projektstudie B erfolgt die Kavernenherstellung über einen Zugang aus Revier VI ins Hangende da hier aufgrund der geologischen Erkundung damit gerechnet werden kann, dass etwa 80 [%] der Kaverne im Bereich des stabileren Metatuffit liegen. Die einaxialen Druckversuche der Proben 1, 2 konnten diese Festigkeitswerte mit Maximalwerten bis zu 118 [MPa] bestätigen (Tabelle 7).



Abbildung 37: Kernbohrung: Probe 1 aus dem Hangenden der Magnesitlagerstätte



Abbildung 38: Schieferung Metatuffit

Bei Probe 1 wurde eine Probe mit möglichst hohem Zerklüftungsanteil und vielen Störfächen ausgewählt um die „Worst Case“ Bedingungen hinsichtlich Festigkeit im Bereich der Kaverne ausfindig zu machen.

Proben Nr.	Dichte	UCS	E _s
[-]	[g/cm ³]	[Mpa]	[Gpa]
MT_1_1	2,72	59,12	13,77
MT_1_2	2,73	45,66	11,07
MT_1_3	2,72	53,90	7,57
Mittelwert	2,72	52,90	10,80

Tabelle 6: Gesteinsparameter Probe 1

Die Auswertung bestätigten die Vermutungen und lieferten eine um etwa 50 [%] geringere einaxiale Druckfestigkeit als in der nachfolgenden Probe 2.



Abbildung 39: Probe 2 aus dem Hangenden der Magnesitlagerstätte

Bei der Probennahme (Probe 2) wurde darauf geachtet eine Probe mit möglichst wenig Fehlstellen (Schieferung, Zerklüftung) auszuwählen um auf die maximalen Festigkeiten („Best Case“) des Gebirges schließen zu können. Dies soll in weiterer Folge auch Aussagen über den notwendigen Stützmitteleinbau zulassen.

Proben Nr.	Dichte	UCS	E _s
[-]	[g/cm ³]	[MPa]	[GPa]
MT 2_1	2,72	100,15	9,3
MT 2_2	2,71	118,62	17,07
Mittelwert	2,72	109,4	13,2

Tabelle 7: Gesteinsparameter Probe 2

Die Auswertung in Tabelle 7 zeigt deutlich höhere Festigkeitswerte der Probe 2 gegenüber der Probe 1. Dies ist durch eine geringe Zerklüftung und das Vorhandensein von Lyditeinlagen zu erklären. Die Situierung der Kaverne wurde im Hangenden definiert, da hier überwiegend der standfeste Metatuffit auftritt (Festigkeiten siehe Tabelle 7 und Tabelle 6). Im Liegenden der Lagerstätte dominiert ausschließlich der schwarze, stark brüchige Tonschiefer mit Festigkeiten < 10 [MPa]. Aufgrund der besseren Gebirgseigenschaften kann bei der Kavernenerstellung die Ausbaumenge reduziert und die Abschlagslängen erhöht werden. Dies bringt wiederum einen Kostenvorteil und trägt positiv zu einer möglichen Projektumsetzung bei.

10.4.2 Überlagerung und Gesteinstemperatur

Im Bergwerk Breitenau wurde im November 2012 über eine Dauer von 6 Tagen eine Temperaturmessung in einem bestehenden Kernbohrloch in Revier VI durchgeführt.

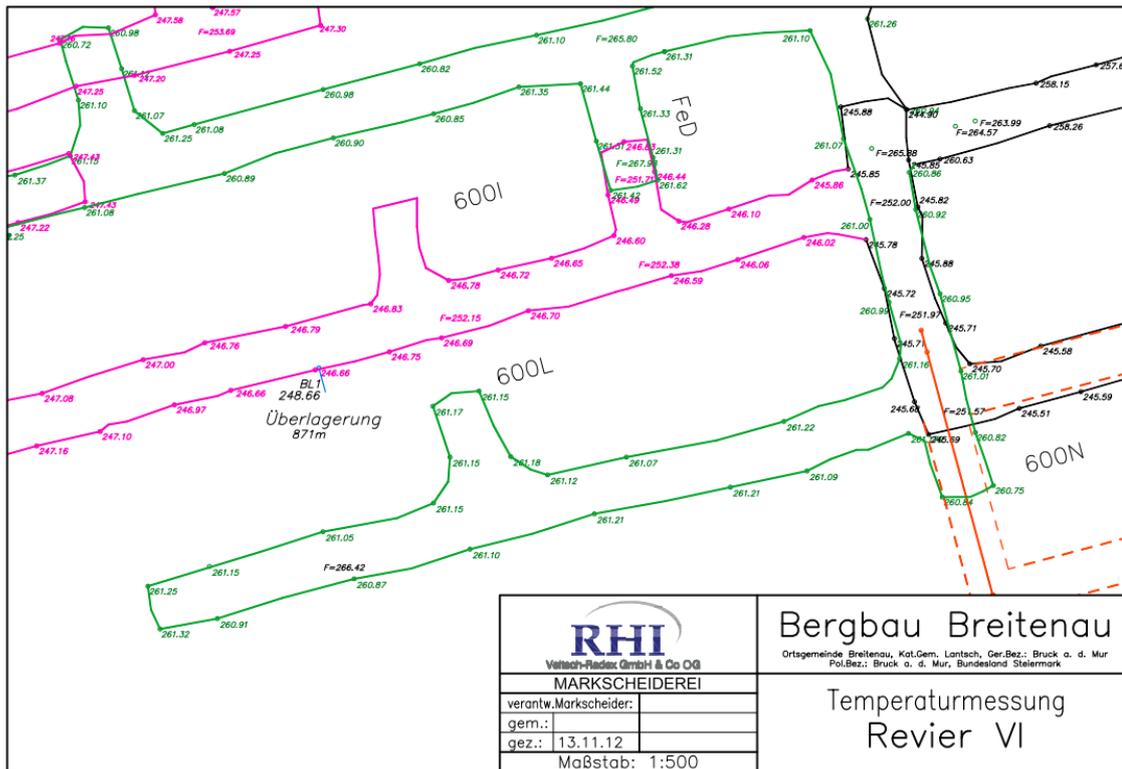


Abbildung 40: Messposition Temperaturmessung[40]

Die Messung wurde in jener Teufe (248,66 [m] über NN) durchgeführt, in der eine mögliche Situierung des Bohrplatzes angedacht ist. Die Überlagerung betrug 871 [m]. Der Bereich wurde in diesem Zeitraum von Arbeitsmaschinen hinsichtlich Temperatur nicht beeinflusst. Das Ergebnis war eine konstante Temperatur von 23,0 [°C]. [40]

Die Messung liegt 3 [°C] unter dem Wert welcher in dieser Teufe bei einem Wärmegradienten von 3 [°C] je 100 [m] zu erwarten wäre. Der zu erwartende Wert würde bei einer Überlagerung von 871 [m] 26,13 [°C] betragen.

10.4.3 Platzbedarf

Für die in Abbildung 3 und in Abbildung 41 dargestellte Bohrkaverne ist ein minimale Grundfläche von 30 [m] x 30 [m] herzustellen, um den Betrieb der Bohranlage möglich zu machen. Die erforderliche Höhe der Kaverne wird bei einer Bohrmasthöhe von ca. 40 [m] mit etwa 45,00 [m] angedacht.

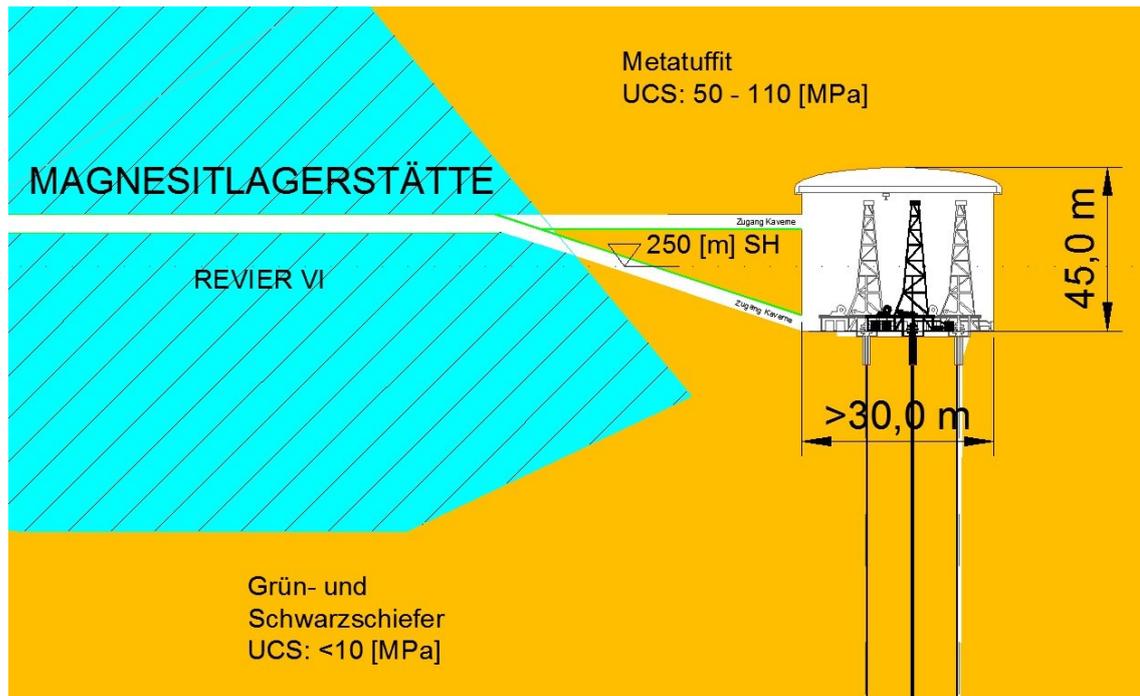


Abbildung 41: Bohrkavernensituierung Projektstudie B im Bereich Revier VI

Für die gesamte Bohrplatzeinrichtung (Spülmaterialecontainer, Zementsilos, Mannschaftscontainer, Stromaggregate,...) sind Hohlräume möglichst nahe der Bohrkaverne auf Revier VI herzustellen. Hier können auch bereits vorhandene Hohlräume, welche für Abbautätigkeiten der RHI AG nicht mehr erforderlich sind, als Nutzflächen verwendet werden. Inwieweit diese Flächen tatsächlich für die BE-Fläche der Geothermiebohrung genutzt werden können ist mit der Abbaufirma RHI noch abzustimmen.

10.4.4 Bohrarbeiten

Die Bohrarbeiten beginnen in Revier VI bei einer Teufe von 250 [m] über NN. Zu Beginn wird hier der im Hangenden vorliegende Metatuffit angetroffen. Dieser besitzt eine Festigkeit von etwa 90 [MPa] (normal zur Schieferung) und etwa 40 [MPa] längs zur Schieferung und ist gut bohrbar. Die darauffolgende Hackensteinerformation weist mit den auftretenden Gesteinen Schwarzschiefer und Tonschiefer Gebirgsfestigkeiten von nur rund 10 [MPa] auf und erfordert einen stabilen und durchgängigen Ausbau der Bohrlochwandung. In diesen Bereichen kann es durch teilweise eingelagerte Lyditlagen zu geringen Bohrfortschritt und großem Verschleiß des Bohrwerkzeugs kommen. In Bereichen mit vermehrtem Vorkommen dieser Lyditlagen sollte der Einsatz einer diamantbestückten Bohrkronen angedacht werden. Auch der Übergang zwischen Schwarzschiefer und Kristallin stellt nach Auskunft der RHI AG eine große Herausforderung hinsichtlich Bohrlochstabilität dar. Nach dem Eintritt in die kristalline Zone ist mit sehr homogenen und wenig zerklüfteten Material zu rechnen. Daraus resultiert auch ein kontinuierlicher Bohrfortschritt in diesem Bereich. Diese Zone wird bei einer Bohrteufe von etwa 0,5 [km]-1,5 [km] erwartet.

10.4.5 Betrieb

Da im Bergwerk Breitenau auf etwa 6 [km] Zielteufe gebohrt wird, ist mit Temperaturen um 200 [°C] zu rechnen und es ist eine „Flash“ Anlage zur Energieumwandlung von Wärme auf Strom vorgesehen. Das für ein Geothermiekraftwerk notwendige Betriebsgebäude ist im Zentralbüro der RHI am Standort Breitenau außerhalb des Stollensystems vorgesehen. Die genaue Situierung und Ausrüstung mit Geräten ist in Abstimmung mit dem Betreiber des Geothermiekraftwerks und der RHI Breitenau festzulegen.

10.5. Projektbezogene Infrastruktur

10.5.1 Zufahrtsstraßen

Im Zuge einer Betriebsbefahrung wurde neben der Probenahme unterschiedlicher Gesteine im Hangenden und im Liegenden auch auf eventuell auftretende logistische Erschwernisse beim Antransport der Bohranlage geachtet. Die Zufahrt von der Autobahnabfahrt Mixnitz bis zum Mundloch des Bergwerks Breitenau ist kurvenreich, aber sehr gut ausgebaut und stellt für den Antransport der Bohranlage über Standardschiffscontainer und Tieflader kein Problem dar. Lediglich die Zufahrtsstollen für die Bohrkaverne müssen neu aufgefahren werden.

10.5.2 Stollen-,Wendelsystem

Auch die Fahrbahn des 4,5 [km] langen und bis zu 12 [%] geneigten Stollen- und Wendelsystems ist größten Teils asphaltiert und stellt bis auf eine Engstelle ein geringes Problem dar. Da auf Revier VI bereits ein Mannschaftscontainer transportiert wurde, ist der Antransport mittels 20 [ft] Container technisch durchführbar. Die Schlüsselstelle ist ein Wendelquerschnitt mit den Abmessungen von 3,20 [m] Höhe und 3,90 [m] Breite. Hier ist vor Beginn des Antransports und bei Bekanntsein der genauen Abmessungen zu untersuchen ob Querschnittsaufweitungen notwendig sind. Die Wendelradien stellen mit etwa 30,00 [m] keine Hürde für den An- und Abtransport des Bohrgerätes und der Materialien dar. Einen hohen Aufwand, sowohl technisch als auch finanziell, stellt die Erhaltung des Stollen und Wendelsystems dar. Das stark druckhafte Gebirge verursacht ständig große Schäden (Abplatzungen) am Ausbau (Spritzbeton und SN-Anker). In Bereichen wo Nebengestein angetroffen wurde, ist mit Stahlbögen ausgebaut worden. Würden die ständig notwendigen Erhaltungsarbeiten über 12 Monate ausfallen, wäre Revier IV mit Fahrzeugen nicht mehr passierbar. Im Zuge einer Projektumsetzung ist somit auch speziell auf den Erhalt und Betrieb des untertägigen Stollensystems einzugehen.

10.5.3 Strom

Die Stromversorgung bis auf die tiefste Sohle (Revier VI) erfolgt zurzeit über eine 440 [V] Leitung.



Abbildung 42: Installierte Stromversorgung auf Revier VI

Diese dient im Bergwerk zur Stromversorgung bei Kernbohrungen und kann in das Geothermieprojekt nicht eingebunden werden. Es ist somit eine Neuinstallation der Stromleitungen (Versorgung einer 4 [MW] Tiefbohranlage) bis auf Revier VI unumgänglich. Um eine Verlegung der Leitungen über die gesamten 4,5 [km] des Stollensystems zu vermeiden, ist eine Leitungsführung über den Wetterschacht angedacht. Diese kürzeren Wege werden zurzeit auch teilweise für die Pumpversatzleitungen genutzt. Nach Prüfung durch die Energie Steiermark im September 2014 wurde der technisch geeignete Anschlusspunkt an der 20 [kV]

Sammelschiene des 110/20 [kV] Umspannwerks Pernegg/Wasser definiert. Die Errichtung eines 20 [kV] Doppelsammelschienenabzweiges im 110/20 [kV] Umspannwerk Pernegg/Wasser und die Errichtung einer rund 14 [km] langen 20 [kV] Kabelleitung aus Aluminium mit dem Querschnitt 300 [mm²] vom technisch geeigneten Anschlusspunkt zur Kaverne Breitenau sind für die Herstellung des 20 [kV] Netzanschlusses als Maßnahmen notwendig.

10.5.4 Bohrplatzeinrichtungsfläche

Die bestehenden Hohlräume aus dem Firstenabbauverfahren mit einer Länge von 17,00 [m] einer Breite von 7,00 [m] und einer Höhe von 21,00 [m] genügend Platz für Equipment der Bohranlage. Die minimal nötige Bohrplatzfläche von etwa 30,00 [m] x 30,00 [m] erfordert jedoch eine separate Kavernenerstellung im Hangenden der Magnesitlagerstätte. Die gesamten notwendigen Geräte und Lagerflächen sind im Bohrplatzeinrichtungsplan eingetragen. (siehe Anhang Abbildung 51)

10.5.5 Wasser

Die zurzeit installierte Frischwasserleitung liefert Wassermengen bis 10 [l/s] und genügt den Anforderungen einer Tiefbohranlage nicht. Falls das Wärmeträgermedium (Wasser) wie geplant im Kreislauf geführt wird, treten Sickerverluste >10 [l/s] auf. Somit ist eine Neuinstallation/Erweiterung der Wasserzuleitungen unumgänglich. Für den Brandfall ist eine Löschwasserleitung entlang des 4,5 [km] langen Stollensystems anzudenken.

10.5.6 Bohrspülung

Jene Bohrspülung die nicht mehr für den Bohrprozess verwendet werden kann, kann als Spülversatz für die offenen Kammern im Bergwerk Breitenau weiterverwendet werden. Dies erspart den gesamten Entsorgungsaufwand inklusive Abfordern und Aufbereiten. Diese Tatsache bietet einen großen Kostenvorteil gegenüber anderen Standorten.

10.6. Projektbezogene Sicherheitsaspekte

Im Falle eines Unfalls oder eines Brandes im Stollensystem ist durch Brandabschnitte und ein speziell auf das Projekt ausgelegtes Belüftungssystem sicher zu stellen, dass die Flammen nicht auf die Bohrkaverne über greifen. Der bestehende Fluchtweg in der untertägigen Magnesitlagerstätte kann auch als Fluchtweg während der Anlagenerrichtung und des Betriebs verwendet werden. Vibrationen bei den Bohrtätigkeiten im Bereich der Bohrkaverne können aufgrund der geologischen Bedingungen zu großen Schäden (Material und Personal) führen. Um ein Versagen zu verhindern ist in geomechanisch instabilen und brüchigen Bereichen ausreichend Ausbau einzuplanen. Dieser Ausbau enthält Spritzbeton (2-lagig), Bewehrungsmatten, Bewehrungsstäbe und SN-Mörtelanker. Allenfalls bei den Bohrarbeiten auftretende Begleitgase (H₂S, CO₂) werden über Leitungen etwa 1,40 [km] bis zum Lüftungsschacht Nord geführt, nach oben transportiert und danach abgefackelt. Beim Auffinden größerer Mengen können diese Gase Aufbereitet und zur industriellen Weiterverwendung genutzt werden. Da es sich beim Projektstandort nicht um geologische Formationen handelt, welche auf große Gasvorkommen schließen lassen, wird das Auffinden großer Gasmengen und die damit verbundenen sicherheitstechnischen Bedenken nicht erwartet. Temperaturerhöhungen auf Personal und Maschinen aufgrund der großen Teufen und der Maschinenabwärme sind durch das Belüftungssystem zu kompensieren.

10.7. Projektbezogene Risiken

10.7.1 Fündigkeitsrisiko Qualität und Quantität des Wärmereservoirs

Ob das Wärmereservoir und das damit verbundene Wärmeträgermedium in ausreichender Qualität und Quantität vorliegt, kann vor Beginn der Bohrung nicht genau bestimmt werden. Die Zieltemperatur kann aufgrund des angenommenen geothermischen Gradienten vorsichtig abgeschätzt werden. Auch über die für ein HDR Projekt sehr entscheidenden Aussagen über

vorhandene Riss- und Störsysteme kann vorab keine exakte Aussage gemacht werden. Erst nach Beendigung der Stimulationsmaßnahmen entfallen beide Risiken. Nach Fertigstellung der Stimulationsmaßnahme verbleibt noch ein Risiko über die Erfüllung der notwendigen Förderraten im Gesamtsystem. Aufgrund von Forschungsprojekten wie bei dem Geothermiekraftwerk Soultz-Sous-Forêts (Frankreich) wurde dieses Risiko stark minimiert. Ein formelmäßiger Zusammenhang wird in Kapitel 6.4 beschrieben.

10.7.2 Bohrtechnische Risiken

Im Gegensatz zu Projektstudie A wird am Standort Breitenau das heiße trockene kristalline Tiefengestein (Hot Dry Rock) erst ab etwa 0,5 bis 1,0 Bohrkilometer erwartet. Besonders in den ersten 2-3 [km] Tiefe ist, aufgrund der teilweise sehr brüchigen und wenig standfesten Geologischen Bereiche (< 10 [MPa]), auf die Stabilität der Bohrlochwandung zu achten. Ist die kristalline Zone erreicht, ist mit keinen großen bohrtechnischen Risiken mehr zu rechnen.

10.7.3 Fluchtwege/Bewetterung

Die Abführung der Wetter in der Magnesitlagerstätte Breitenau erfolgt saugend. Nur in den oberen Revieren ist eine natürliche Bewetterung gegeben. Die Reviere V und VI werden über einen zentralen Ventilator, der auf SH 276 [m] situiert ist, versorgt. Die verschmutzten Wetter werden bis auf eine Seehöhe von 770 [m] über ein Stollen- und Schachtsystem geführt und anschließend abgeführt. Unterhalb der SH 261 [m] werden je nach Abbau Sonderbewetterungen installiert. Für die Be-, und Entlüftung der vorgesehenen Bohrkaverne ist ein Anschluss an das bestehende System angedacht.

10.7.4 Gefahr durch Betrieb im Stollensystem

Die Magnesitförderung am Standort Breitenau erfolgt durch Muldenkipper (Abbildung 43). Durch die Beladung und den begrenzten Platzverhältnissen im Stollenquerschnitt (Engstelle mit 3,2 [m] x 3,9 [m]) können im Stollenquerschnitt verlegte Leitungen (Strom, Wasser, Lüftung, Begleitgase) beschädigt werden und dadurch zu einer Bohrunterbrechung führen.



Abbildung 43: Muldenkipper vor der Zufahrt zum Stollensystem in der Breitenau



Abbildung 44: Leitungsführung Breitenau

Um eine Bohrunterbrechung und die damit verbunden Mehrkosten und Mehraufwendungen zu verhindern müssen im Stollensystem geführte Leitungen und Rohre durch eine mechanische Einrichtung (starke abnehmbare Schutzgitter) geschützt werden. Großes Augenmerk gilt hier den anfallenden Begleitgasen (H_2S). Falls diese beschädigt werden können sich die Gase frei in der gesamten Grube ausbreiten. Schwefelwasserstoff sammelt sich durch seine hohe Dichte vorwiegend am Boden an und kann in größeren Mengen zu einer Schwefelwasserstoffvergiftung führen. Bereits Konzentrationen ab etwa 550 [ppm] führen zu Krämpfen und Bewusstlosigkeit. Alternativ dazu können die Leitungen auch über eine neu zu errichtende Querschnittsaufweitung im Bereich der Ulmen geführt werden. Dies würde die Gefahr zur Gänze beseitigen.

10.7.5 Gefahr durch ev. Gas-, oder Wasserzutritte bei den Bohrungen

Im Zeitraum 2003 bis 2008 wurde ein hydrogeologisches Beobachtungsprogramm im Bergwerk Breitenau durchgeführt. Die Schlussfolgerung war ein konstantes hydrogeologisches Abflussverhalten. Es konnte auf eine Vermischung der Wässer aus dem Tagebau und den tieferen Revieren (Revier V und Revier VI) geschlossen werden. [38]

III Schluss

Im Schlussteil werden die in dieser Arbeit gewonnen Ergebnisse zusammengefasst, die Chancen und Risiken für beide Projektstandorte aufgezeigt und Möglichkeiten zur Energieverwendung werden aufgezeigt. Alle ermittelten Erkenntnisse fließen projektbezogen in eine Potenzialbewertungstabelle ein. Die ermittelten geothermischen Parameter finden in weiterer Folge Eingang in eine thermische Modellierung. Zusammen bilden diese die Grundlage für weitere Entscheidungen im Projekt MinTherm und fördern damit die Erweiterung einer nationalen, umweltschonenden und grundlastfähigen Energiequelle.

11. Auswertung der Ergebnisse

Hier wird erläutert welchen Nutzen man aus beiden Projektstudien zieht, welcher Verwendung die Energiegewinne zugeführt werden, auf welcher Grundlage beide Projekte bewertet werden und welches Resultat die Bewertungskriterien liefern.

11.1. Verwendung der geothermischen Energie

Beide Projekte liegen in einem Gebiet mit einer geringen Siedlungsdichte. Dies schließt die überwiegende Versorgung umliegender Gebäude durch die Wärmeverluste über eine Fernwärmeleitung weitgehend aus. Vorrangiges Ziel ist somit eine Stromproduktion an beiden Standorten. Dieser kann bei der Projektstudie A teilweise direkt für Beleuchtung, Belüftung und Aufrechterhaltung des Tunnelbetriebs verwendet werden. In der Projektstudie B sind die Strommengen im Untertägigen Bergwerk eher gering. Eine Versorgung der Bürogebäude und der am Standort Breitenau vorhandenen Geräte wie Brecher, Mühlen, etc. zur Aufbereitung des Rohmagnesits ist vorgesehen. Der Energiebedarf zur Heizung und Stromversorgung des gesamten Betriebes am Standort Breitenau ist seitens der RHI AG zu definieren. Der überwiegende Teil der geothermischen Energie wird bei beiden Projektstudien in das öffentliche Stromnetz eingespeist.

11.2. Potenzialbewertung

Für beide Projektstudien wurde eine eigens entwickelte Bewertungstabelle erstellt. Die relevanten Kriterien für die Bewertung der beiden Studien beschränken sich weitgehend auf die Gesteinstemperatur in der entsprechenden Zieltiefe, die geotechnische Einschätzung der Gesteine bezüglich ihres geologischen Kenntnisstands und der logistischen Gegebenheiten für eine zukünftige Umsetzung.

Beide Studien wurden in 3 Bewertungsgebiete unterteilt:

- Das Bewertungsgebiet „*Geologische Voraussetzungen*“ beinhaltet den geologischen Kenntnisstand, das Vorhandensein von tieferreichender Störungssysteme und die geomechanischen Bedingungen in der Zielteufe und im Bereich der geplanten Kavernenerstellung
- Das Bewertungsgebiet „*Geothermische Voraussetzungen*“ beinhaltet die zu erwartende Gebirgs-temperatur in Zielteufe sowie die thermophysikalischen Parameter wie Wärmeleitfähigkeit, Gesteinsdichte und Wärmekapazität.
- Im dritten Bewertungsgebiet „*Infrastrukturelle Voraussetzungen*“ finden die vorhandenen Strom-, Wasser-, Luft- und Verkehrsanbindungen sowie die sicherheitsrelevanten Aspekte wie Rettungsschächte, Fluchtwege, etc. Eingang.

Tabelle 8 fasst die in den 3 Gebieten genannten Kriterien zusammen und gibt eine Gesamtbewertung der beiden Projektstudien ab.

Studie	Geologische Voraussetzungen					Geothermische Voraussetzungen				Infrastrukturelle Voraussetzungen					Gesamt- bewertung
	Gesteinsart ¹	Geologisch-geotechnischer Kenntnisstand ²	Vorhandensein von tiefreichender Störungssysteme ³	Geomechanische Bedingungen Bereich: Zielhorizont	Geomechanische Bedingungen Bereich: Bohrkaverne	Erwartete Gebirgstemperatur in Zielteufe (in °C) ⁴	Wärmeleitfähigkeit in (W/m*K)	Gesteinsdichte in (g/cm ³)	Wärmekapazität in (J/kg*K)	Vorhandene Straßenanbindung	Vorhandene Stromversorgung	Vorhandene Wasserversorgung	Vorhandene Bewitterung	Vorhandene Sicherheits-einrichtungen	
Projektstudie A	Gneis/Amphibolit	mäßig	ausgeprägt	sehr gut	sehr gut	200	2,95	2,9	710	sehr gut	gut	gut	sehr gut	sehr gut	gut
Projektstudie B	Gneis/Amphibolit	gut	ausgeprägt	sehr gut	mäßig	200	2,95	2,9	710	mäßig	mäßig	mäßig	gut	mäßig	mäßig

¹ Unter Gesteinsart wird das in 7 km u. GOK zu erwartende Hauptgestein genannt

² Darunter werden der geologische Aufschlussgrad, die Teufe der geologischen Aufschlüsse und das Vorhandensein bzw. die Qualität geotechnischer Informationen verstanden.

³ Unter Störungssysteme wird der bruchtektonische Deformationsgrad des Gebietes und das Vorhandensein tiefreichender Störungssysteme verstanden

⁴ Hier wird die zu erwartende Gesteinstemperatur im Zielhorizont angegeben. Grundlage dafür ist der Geothermische Gradient welcher für beide Projekte mit 3 (°C/100m) angenommen wurde

Tabelle 8: Gesamtbewertung Projektstudie A und Projektstudie B

11.3. Geothermisches Modell

Im Rahmen einer zweiten Diplomarbeit durch Hr. DI Simon Brinkmann wird unter Zuhilfenahme des Programms Abaqus ein geothermisches 3D Modell erstellt. Eingangsparameter für die geologischen Schichten im Modell sind die Wärmeleitfähigkeit, die Wärmekapazität und die Gesteinsdichte. Diese Werte wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Geophysik im Zuge dieser Arbeit ermittelt und ausgewertet. Auf Basis dieser Parameter und der gegebenen Wärmeentzugsleistung der Gesteine simuliert das Programm den Energie- bzw. den Wärmeentzug im Umfeld des Bohrlochs über eine definierte Zeitspanne. Beide Diplomarbeiten sollen den Grundstock für die Entscheidung über eine weitere Vorgangsweise im Projekt MinTherm liefern.

12. Chancen und Risiken

12.1. Chancen

12.1.1 Allgemein

- Nachhaltigkeit: Durch eine riesige Energieressource im Untergrund kommt es zu keiner Verknappung für nachfolgende Generationen
- Regional: Geothermie ist überall vorhanden und ist somit keinen grenzüberschreitenden Energiehandel und den damit verbundenen politischen Interessenskonflikten unterworfen.
- Kombinierte Strom und Wärmeproduktion: Die angestrebten Temperaturen von 200[°C] ermöglichen über eine Turbine die Stromproduktion. Als Nebenprodukt wird Wärme für das Heizen der Betriebsgebäude und der Tunnelportale genutzt.
- Umweltschonend: Die Wärmeherzeugung aus Geothermie selbst verursacht keine CO₂ Produktion und trägt somit mit „grüner“ Energie zur Klimaschonung bei.
- Grundlastfähig: Geothermie ist gegenüber anderen alternativen Energiequellen wie Wind oder Sonne keinen witterungsbedingten Schwankungen unterworfen und kann daher kontinuierlich gewonnen werden.
- Geringer Platzbedarf: Bei gleicher elektrischer Nennleistung benötigt ein Geothermiekraftwerk deutlich weniger Platz als eine Wasser-, Solar- oder Windkraftwerk.
- Keine optische Beeinträchtigung: Durch den Umstand, dass nur ein Teil der Anlage ober Tage situiert ist, wurde die optische Beeinträchtigung auf einem Minimum reduziert. Dies hat auch verkürzte Genehmigungsprozesse aufgrund der geringen Geräuschbelastung zur Folge.

12.1.2 Projektstudie A

- Sehr gute vorhandene Infrastruktur aufgrund der beiden Tunnelröhren
- Sehr gute geologische Bedingungen sowohl für die Kavernenherstellung als auch für die Tiefbohrarbeiten→Großer Bohrfortschritt mit geringem Sicherungsaufwand

12.1.3 Projektstudie B

- Verwendung des Spülmediums als Versatz→Keine Aufbereitung und Entsorgung nötig

12.2. Risiken

12.2.1 Allgemein

- Fündigkeitsrisiko: Auffinden einer unzureichenden Lagerstättentemperatur
- Systemrisiko: Die Leistungsfähigkeit des Kraftwerks kann nicht im Vorhinein berechnet werden. Werden die notwendigen Förderraten im Gesamtsystem nicht erreicht, ist der wirtschaftliche Betrieb in Frage gestellt. Dieses Risiko kann jedoch erst bei den Fördertests nach Abteufen der zweiten Bohrung ausgeschaltet werden. Um das Risiko vor Projektbeginn für jeden einzelnen Projektpartner zu verkleinern ist empfehlenswert das Risiko zu verteilen und nach Projektpartnern zu suchen.
- Seismisches Risiko: Starke Erschütterungen in tektonisch stark beanspruchten Gebieten durch „Hydraulic Fracturing“
- Bohrtechnische Risiken
- Kraftwerksbetriebsrisiko
- Wirtschaftliche Risiken: Hängen rein vom Fündigkeitsrisiko ab
- Umweltrisiko: Verschmutzung von Boden und Wasser
- Politisches Risiko: Projektumsetzungen sind momentan noch von Förderungen abhängig. Durch technische Weiterentwicklungen und durch Preissteigerung der konventionellen Energieproduktion soll das politische Risiko in Zukunft ausgeschaltet werden

12.2.2 Projektstudie A

- Einschränkung Verkehrsbetrieb → Im Falle einer Projektumsetzung muss zumindest eine Tunnelröhre für die Kavernenherstellung gesperrt werden

12.2.3 Projektstudie B

- Hohe Stollen- und Wendelerhaltungsmaßnahmen nötig
- Hoher technischer und finanzieller Aufwand zur Sicherstellung der notwendigen Strom und Wasserversorgung
- Schichtgrenze zwischen Schiefer und Kristallin unbekannt → kann zu Bohrproblemen führen

13. Schlussbemerkungen

Die Möglichkeit der Stromerzeugung durch Aufschlüsse bis in 7 [km] Tiefe für den Betrieb eines geothermischen Kraftwerks ist bei beiden Projektstudien gegeben. Es zeigt sich, dass die petrothermalen Potenziale beider Projektstudien durch diese Arbeit und das in weiterer Folge entstehende geothermische Modell gut erfasst werden können. Genauere Beurteilungen der tiefegeothermischen Potenziale können nur auf Basis zukünftiger Explorationstätigkeiten (Bohrungen, Seismik, Gravimetrie, Magnetik u.v.m.) erfolgen. Diese ermöglichen einen Einblick in den strukturellen geologischen Aufbau und die lithofazielle Gliederung des tieferen Untergrundes. Diese Kenntnisse können in Kombination mit den im Rahmen des Projektes MinTherm ermittelten umfangreichen Daten zu thermophysikalischen Eigenschaften der Gesteine zur genaueren Bestimmung der tiefegeothermischen Potenziale in Regionen des Gneismkristallins dienen.

Die teils sehr guten geologischen und geothermischen Verhältnisse in beiden Regionen (Projektstudie A und Projektstudie B) rechtfertigen eine weiterführende Erkundung (Erkundungsbohrungen) der geothermischen Ressourcen. Das Risiko des Auffindens der kristallinen Zone kann, nach umfangreicher Literaturrecherche und Rücksprache mit den fachkundigen Personen vor Ort, bei beiden Projekten auf ein Minimum gesenkt werden. Jedoch gibt es im Falle der Verwendung eines HDR-Systems vorab keine Garantie, dass der Untergrund für einen wirtschaftlichen Betrieb ausreichend stimuliert werden kann. Dieses mit hohen Kosten behaftete Risiko würde bei der Anwendung von tiefen Erdwärmesonden entfallen. Jedoch sind die förderbaren Energiemengen von tiefen Erdwärmesonden nicht vergleichbar mit einem HDR-System. Da das Hauptaugenmerk auf der Stromproduktion liegt schließt dies somit die Weiterverfolgung tiefer Erdwärmesonden zur Stromgewinnung aus.

Mit dem gewonnenen und derzeitigen Kenntnisstand hinsichtlich Geologie und der ermittelten geophysikalischen Parameter in den genannten Zielteufen, steht bei der Fokussierung eines petrothermalen Systems (HDR) die Stromproduktion im Vordergrund. Die anfallende Wärme würde als Nebenprodukt auftreten. Diese anfallende Wärme kann für das Beheizen naheliegender Wohnhäuser (Projektstudie A und B), Betriebsgebäude (Projektstudie A und B) und zur Enteisung der Fahrbahn (Projektstudie A) im Bereich der Tunnelportale genutzt werden.

Zur Senkung der Energiekosten aus petrothermalen-(HDR)-Systemen ist Forschung und Weiterentwicklung auf dem Gebiet der Bohr- und Stimulationstechnik erforderlich. Vor allem auf dem Gebiet der Bohrtechnik laufen zurzeit viele Forschungsprojekte und Weiterentwicklungen. Es wird nicht nur versucht bestehende Systeme zu verbessern, sondern es wird auch gezielt nach neuen Techniken gesucht. Insbesondere für poröses kristallines Gestein zeichnet sich eine Alternative zum Rotary Bohrverfahren ab. [5]

Das sogenannte Schmelzbohren wurde speziell für HDR Projekte entwickelt, muss jedoch erst auf die technische Umsetzung erprobt werden. Diese plötzlichen extremen Hitzeeinwirkungen (Abgasstrahl eines Raketentriebwerks) von etwa 2000 [°C] führen dabei im Gestein zu so hohen Spannungen, dass diese schmelzen. Dabei können Bohrgeschwindigkeiten von 30 - 90 [m/h] erreicht werden.[32]

Große Erwartungen werden auch an das kurz vor der Markteinführung stehende EPB (Elektro Pulse Boring) Bohrverfahren gestellt. Es ist am weitesten entwickelt und man rechnet mit tiefenunabhängigen Bohrkosten von nur 100 [€/lfm] bei einem Bohrdurchmesser von 20 Zoll. Ein Hochspannungs-Puls in Form eines Blitzes mit 740 [kV] erzeugt einen Hitzeschock im Gestein. Dieser Energieimpuls führt zu einem Absprengen des Gesteins im Bereich der Bohrlochsohle.

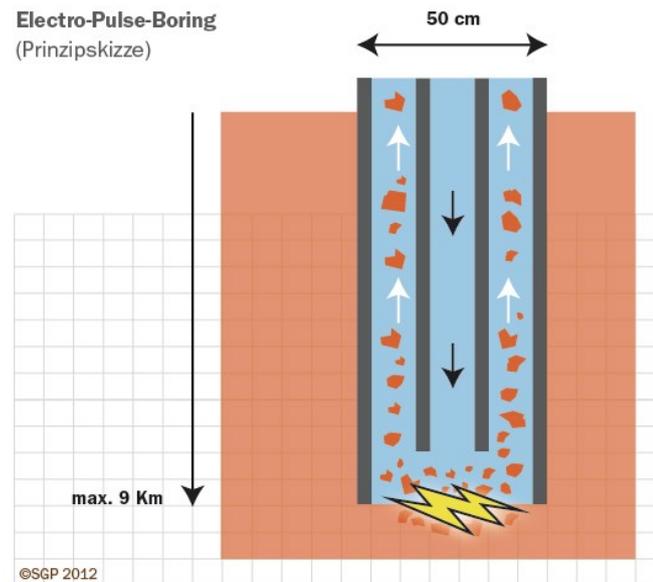


Abbildung 45: Prinzip des EPB Verfahrens [31]

Es wurden bereits mehrere hundert Meter im kristallinen Gestein abgeteuft und ein Nachweis über die Machbarkeit des EPB wurde bereits erbracht.[31] Weiterentwicklungen sind auch in den Bereichen Förderpumpen, Korrosionsschutz, Kraft-Wärme-Kopplung(optimale Energieumwandlung), Gesteins-Fluid Wechselwirkung und im Bereich der Mikroseismik notwendig.

IV Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: GEMESSENE ELEKTRISCHE EIGENSCHAFTEN DER PROJEKTRELEVANTEN TIEFENGESTEINE	20
TABELLE 2: PARAMETERRELEVANZ UNTERSCHIEDLICHER NUTZUNGSSYSTEME	22
TABELLE 3: ÜBERBLICK BESTEHENDER GEOTHERMIEANLAGEN MIT NUTZUNG VON GRUBENWÄSSERN [8]	30
TABELLE 4: MINERALOGISCHE ZUSAMMENSETZUNG AMPHIBOLIT [24]	43
TABELLE 5: AUSWERTUNG GESTEINSPARAMETER AMPHIBOLIT UND GNEIS.....	48
TABELLE 6: GESTEINSPARAMETER PROBE 1	59
TABELLE 7: GESTEINSPARAMETER PROBE 2	60
TABELLE 8: GESAMTBEWERTUNG PROJEKTSTUDIE A UND PROJEKTSTUDIE B.....	68

V Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: PROJEKTPHASEN FÜR DIE ERSTELLUNG EINES GEOTHERMIEKRAFTWERKS [29]	6
ABBILDUNG 2: EINTEILUNG DES GEOTHERMISCHEN POTENTIALS[28]	8
ABBILDUNG 3: STARTKAVERNE BOHRTURM	11
ABBILDUNG 4: FUNKTIONSPRINZIP HDR[26]	12
ABBILDUNG 5: FUNKTIONSSCHEMA UND LEISTUNG TIEFE ERDWÄRMESONDE[31]	13
ABBILDUNG 6: PRINZIPIELLER AUFBAU EINER TIEFBOHRUNG [21]	16
ABBILDUNG 7: OPEN HOLE VS. CASED HOLE KOMPLETTIERUNG [33]	17
ABBILDUNG 8: PRINZIP DER REFLEXIONSSEISMIK[1]	19
ABBILDUNG 9: ABMESSUNGEN DER PROBEN AUS DEM KRISTALLINGESTEIN	22
ABBILDUNG 10: SCHNITTFÜHRUNG BEI DER PROBENHERSTELLUNG	23
ABBILDUNG 11: Tk04 WÄRMELEITFÄHIGKEITSMESSGERÄT TeKA, BERLIN	23
ABBILDUNG 12: SELBSTGEBAUTES FLÜSSIGKEITSKALORIMETER	24
ABBILDUNG 13: DEWAR GEFÄß UND DATENÜBERTRAGUNG AUF PC	24
ABBILDUNG 14: SCHEMA DOUBLE FLASH SYSTEM [20]	28
ABBILDUNG 15: DOUBLE FLASH SYSTEM IM T-S DIAGRAMM [20]	28
ABBILDUNG 16: ANLAGENAUFBAU ZUR WÄRMENUTZUNG DES GRUBENWASSERS[9]	31
ABBILDUNG 17: VERTEILUNG DER WÄRMESTROMDICHTEN IN ÖSTERREICH [12]	33
ABBILDUNG 18: GEOLOGIE IM BEREICH DER BEIDEN PROJEKTSTUDIEN[36]	34
ABBILDUNG 19: AUSSCHNITT AUS DEM WENDELGRUNDRISS BEI PROJEKTSTUDIE B	39
ABBILDUNG 20: GEOGRAFISCHE LAGE DES GLEINALMTUNNELS IN DER STEIERMARK	42
ABBILDUNG 21: GEOLOGISCHES PROFIL GLEINALMKRISTALLINS	43
ABBILDUNG 22: UNGESTÖRTER HORNBLENDEAMPHIBOLIT AUS DEM GLEINALMKRISTALLIN	44
ABBILDUNG 23: AUSWERTUNG WÄRMELEITFÄHIGKEIT	45
ABBILDUNG 24: AUSWERTUNG WÄRMESTROMDICHTEN	45
ABBILDUNG 25: AUSWERTUNG WÄRMEKAPAZITÄT	46
ABBILDUNG 26: AUSWERTUNG GESTEINSDICHTE	46
ABBILDUNG 27: ERWARTETE HYDRAULISCHE DURCHLÄSSIGKEIT DES KRISTALLINEN GRUNDGEBIRGES [39]	47
ABBILDUNG 28: AUSWERTUNG RADIOGENE WÄRMEPRODUKTION	48
ABBILDUNG 29: VORRAUSSICHTLICHE SITUIERUNG BOHRPLATZEINRICHTUNGSFLÄCHE NORDPORTAL GLEINALMTUNNEL[23]	50
ABBILDUNG 30: PRINZIP LUFTFÜHRUNG NEUBAURÖHRE GLEINALMTUNNEL [35]	51
ABBILDUNG 31: GEOGRAFISCHE LAGE DES MAGNESITBERGBAUS DER RHI IN BREITENAU	53
ABBILDUNG 32: LUFTBILD DER MAGNESITPRODUKTION BREITENAU	53
ABBILDUNG 33: NS PROFIL DER MAGNESITLAGERSTÄTTE BREITENAU[38]	54
ABBILDUNG 34: METATUFFIT IM HANGENDEN DER MAGNESITLAGERSTÄTTE BREITENAU	55
ABBILDUNG 35: LYDITEINLAGEN IM SCHWARZEN TONSCHIEFER	56
ABBILDUNG 36: BOHRKERN AUS DEM LIEGENDEN DER MAGNESITLAGERSTÄTTE BREITENAU	57
ABBILDUNG 37: KERNBOHRUNG: PROBE 1 AUS DEM HANGENDEN DER MAGNESITLAGERSTÄTTE	58
ABBILDUNG 38: SCHIEFERUNG METATUFFIT	59
ABBILDUNG 39: PROBE 2 AUS DEM HANGENDEN DER MAGNESITLAGERSTÄTTE	60
ABBILDUNG 40: MESSPOSITION TEMPERATURMESSUNG[40]	61
ABBILDUNG 41: BOHRKAVERNENSITUIERUNG PROJEKTSTUDIE B IM BEREICH REVIER VI	62
ABBILDUNG 42: INSTALLIERTE STROMVERSORGUNG AUF REVIER VI	63
ABBILDUNG 43: MULDENKIPPER VOR DER ZUFAHRT ZUM STOLLENSYSTEM IN DER BREITENAU	65
ABBILDUNG 44: LEITUNGSFÜHRUNG BREITENAU	66
ABBILDUNG 45: PRINZIP DES EPB VERFAHRENS [31]	72

ABBILDUNG 46: GEOLOGISCHES N-S PROFIL GLEINALMTUNNEL.....	80
ABBILDUNG 47: ÜBERSICHTSPLAN GLEINALMTUNNEL KAVERNENSITUIERUNG.....	81
ABBILDUNG 48: BAUTECHNISCHER LÄNGENSCHNITT GLEINALMTUNNEL INKLUSIVE KAVERNENSITUIERUNG	82
ABBILDUNG 49: GLEINALMTUNNEL GEPLANTER ZUGANG ZUR BOHRKAVERNE IN DER OSTRÖHRE	83
ABBILDUNG 50: GEOLOGISCHES PROFIL BREITENAU.....	84
ABBILDUNG 51: BOHRPLATZEINRICHTUNG RAG E200/E202	85

VI Quellenverzeichnis

1. Bücher

- [1] Bauer M., Freedon W., Jacobi H., Neu T.: Handbuch Tiefe Geothermie, Prospektion, Exploration, Realisierung, Nutzung; Springer Spektrum; 2014
- [2] Bußmann W.: Geothermie, Energie aus dem Innern der Erde, Fraunhofer IRB Verlag,
- [3] FFG.: Sondierung zur geothermischen Nutzung des Überlagerungspotenzials in unterirdischen Infrastrukturen für tiefe Geothermie,
- [4] Lassnig K., Verwendung von Tunnelausbruchmaterial-Geologische und Geotechnische Aspekte, unveröffentlichte Dissertation, 2012
- [5] Kaltschmitt M.; Energie aus Erdwärme, Verlag für Grundstoffindustrie, 1999
- [6] Kaltschmitt M.; Erneuerbare Energien, Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, 3. Auflage, Springer Verlag, 2003

2. Internetquellen

- [7] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Tiefe Geothermie, Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland, http://www.geoenergy-celle.de/tl_files/gec/downloads/Tiefengeothermie/Tiefengeothermie_BMU.pdf, (31.07.2014)
- [8] Grab T., Storch T., Kleutges J., Geothermieanlage zur Grubenwassernutzung für Heizung und Kühlung, 17.-19. November 2010, http://tu-freiberg.de/fakult4/iwtt/ttd/publikationen-ma/2010-Grab_et_al-Grubenwassernutzung-TU-Bergakademie-Freiberg-DGK2010.pdf (22.07.2014)
- [9] Stadtwerke Bochum, Heizwärme aus Grubenwasser, 13/2013, <http://www.bine.info/themen/erneuerbare-energien/geothermie/publikation/heizwaerme-aus-grubenwasser> (22.07.2014)
- [10] BLA-GEO, Nutzungen der geothermischen Energie aus dem tiefen Untergrund (Tiefe Geothermie), Arbeitshilfe für Geologische Dienste, http://www.lgb-rlp.de/fileadmin/internet/pdf/tiefe_geothermie_arbeitshilfe_01.pdf (22.07.2014)
- [11] Geolexikon, Das Lexikon der Erde, <http://www.geodsz.com/>, (24.07.2014)
- [12] Götzl G.: Das geothermische Regime in Österreich mit Fokus auf Wärmefluss Untersuchungen im inneralpinen Raum, Workshop Tiefengeothermie Leoben, 01.07.2014
- [13] Geologische Bundesanstalt; Aeromagnetische Karte Österreich; <http://www.geologie.ac.at/typo3temp/pics/2c5f7c09ea.png> (25.07.2014)
- [14] Sanner B.: Der Geothermiekongress 2010 Karlsruhe, RES-Directive, SET-Plan, NER300 etc. – Wie beeinflusst die Energiepolitik der EU die Geothermie?, http://www.geothermie.de/fileadmin/useruploads/aktuelles/Geothermiekongress/2010/Vortraege_DGK_2010/F2_Sanner_EGEC_karlsruhe_171110.pdf (31.07.2014)
- [15] GtV Bundesverband Geothermie, Hintergrundpapier zur Stimulation geothermischer Reservoirs, http://www.geothermie.de/fileadmin/useruploads/Service/Publicationen/Hintergrundpapier_Stimulation_GtV-BV.pdf, (04.08.2014)
- [16] Weiss H., Baugeologische Aspekte und Probleme im Tunnelbau der Steiermark, Graz 1990, http://www.landesmuseum.at/pdf_frei_remote/MittNatVerSt_120_0053-0072.pdf, (05.08.2014)

- [17] Gollner J.: Zur Geologie des Hochlantsch (Grazer Paläozoikum, Steiermark), Band 128, Heft 1, http://www.landesmuseum.at/pdf_frei_remote/JbGeolReichsanst_128_0043.pdf
- [18] Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie; Nutzung tiefer Geothermie in Hessen, http://www.hlug.de/fileadmin/dokumente/geologie/erdwaerme/nutzung_tiefer_geothermie_hessen.pdf (31.08.2014)
- [19] Amberg F.; Risiken beim Bau von Kavernen -Beispiele von Beles und Ponte de Pedra, http://www.tunnel.ethz.ch/events/hs07_amberg., (31.08.2014)
- [20] Köhler S.; Möglichkeiten und Perspektiven der geothermischen Stromerzeugung, <http://bib.gfz-potsdam.de/pub/str0023/0023-1.pdf>, (12.09.2014)
- [21] Kruck C.; Nutzung der Tiefengeothermie in Stuttgart, Durchführung von Wirtschaftlichkeitsberechnungen, 11/2009, http://www.zfes.uni-stuttgart.de/deutsch/downloads/Endbericht_zum_Projekt_Nutzung_der_Tiefengeothermie_in_Stuttgart.pdf, (14.09.2014)
- [22] Arnhold T., Energie aus der Tiefe der Erde, Explosionsschutz bei moderner Tiefbohrtechnik, <http://www.stahl.de/fileadmin/Dateien/exzeitschrift/2007/de/05tiefbohrtechnik.pdf>, (14.09.2014)
- [23] IL – Ingenieurbüro Laabmayr; Vollausbau Gleialmtunnel, <http://www.laabmayr.at/tunnelbau/alpin/gleialmtunnel/>, (15.09.2014)
- [24] Neubauer F.; Bau und Entwicklungsgeschichte des Rennfeld-Mugel und des Gleinalm Kristallins (Ostalpen), www.landesmuseum.at/pdf_frei_remote/AbhGeolBA_42_0001-0137.pdf, (16.09.2014)
- [25] GtV-Bundesverband Geothermie (GtV-BV), Wissenswelt, <http://www.geothermie.de/wissenswelt/geothermie/einstieg-in-die-geothermie/risiken.html>, (16.09.2014)
- [26] Häring M.; Funktionsprinzip eines stimulierten, geothermischen Systems im tiefen Kristallingestein, http://www.geothermie.ch/index.php?p=keyfacts_stimul_geoth_syst, (23.09.2014)
- [27] Rummel F.; Gesteinsphysik im europäischen HDR-Projekt Soultz-Sous-Forêts, 30.09.2005, <http://www.worldcat.org/wcpa/oclc/836287283?page=frame&url=http%3A%2F%2Ffedok01.tib.uni-hannover.de%2Fedoks%2Fe01fb06%2F511861389.pdf%26checksum%3D0501f514836dabab0fb04e07c62acd07&title=&linktype=digitalObject&detail=>, (27.09.2014)
- [28] Häring M.: Geothermische Stromproduktion aus Enhanced Geothermal Systems (EGS), Stand der Technik, Geothermal Explorers Ltd, CH-4133 Pratteln : <http://www.geothermal.ch/fileadmin/docs/downloads/egs061207.pdf>, (13.09.2012)
- [29] ARGE Geothermie Espace Bern; Grundlagenstudie Tiefengeothermie Espace Bern, Entscheidungsgrundlage zur Entwicklung der Tiefengeothermie in Bern, <http://www.ewb.ch/de/uploads/media/GrundlagenstudieTiefengeothermieEspaceBern.pdf>, (30.09.2014)
- [30] Umweltbundesamt GmbH; Daten und Fakten, <http://www.umwelttechnik.at/de/erneuerbare-energie-technologie/waermepumpe-geothermie/daten-fakten/>, (09.10.2014)
- [31] Swiss Geopower, Super tiefe Erdwärmesonden, <http://www.swissgeopower.com/unser-produkt/geschlossene-petro-geothermie/>, (08.11.2014)
- [32] Bielecki R.; Vertikale Teufen im Festgestein mit der Schmelzbohrtechnik, <http://www.bau-abc->

rostrup.de/de/index.php?section=media2&act=download&path=%2Fmedia%2Farchive2%2F&file=10_30_Bielecki_Vertikale%20Teufen%20im%20Festgestein_Bielecki%20aus%20Tagungsband.pdf, (10.11.2014)

- [33] Dune Front; <http://www.dunefront.com/resources.aspx>, (10.11.2014)
- [34] Lothar P.; Technologien zur Nutzung der Erdwärme zur Stromerzeugung, Entwicklungsstand und Perspektiven, www.hessenenergie.de/Downloads/Dl-Nach/dln.../VortrProf.Petry.pdf, (13.11.2014)
- [35] Howden, Luft für die Verkehrsadern unter der Erde, www.howden.com/Resources/Industry_Brochures/IND05_Tunnel_ventilation_DE.pdf, (17.11.2014)
- [36] GIS Steiermark, Digitaler Atlas Steiermark, <http://gis2.stmk.gv.at/atlas/%28S%28zmgfavt5j1nuaa5efbps2jqa%29%29/init.aspx?karte=erdwiss&ks=das&cms=da&massstab=800000&t=635567716749414900>, (13.01.2015)

3. Sonstige

- [37] Gegenhuber N., Lehrstuhl für Angewandte Geophysik(Leoben), Notizen, Kurzzusammenfassungen, Erklärungen
- [38] Schenkl M., Technische und wirtschaftliche Prüfung eines zweiten Tagaufschlusses der Reviere V & VI (VII) des Bergbaues Breitenau, Diplomarbeit 10/2013
- [39] Bär K., Untersuchung der tiefengeothermischen Potenziale von Hessen, Dissertation 05/2012
- [40] Garber B.; RHI Breitenau, Memo Temperaturmessung Bergbau Breitenau, 15.11.2012
- [41] Demmer; Gleinalm Autobahn AG, Gleinalm Tunnel Weströhre, Geologisches Gutachten, Detailprojekt 73, November 1973
- [42] Keglovic P.; Ökologische & ökonomische Bewertung eines konkreten Geothermieprojektes in Gmunden, Diplomarbeit 10/2010
- [43] Obermair A.; Telefonische Auskunft, Obermair Transporte-Erdbau GmbH, Schwanenstadt, 23.01.2015

VII Abkürzungsverzeichnis

BOP	Blow Out Preventer
GVT	Gebirgsverhaltentyp
EGS	Enhanced Geothermal Systems
HDR	Hot Dry Rock
ORC	Organic Rankine Cycle
gradT	Temperaturgradient
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
MinroG	Mineralrohstoffgesetz
TOR	Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen
Mio.	Millionen
z.B.	Zum Beispiel
ASchG	Arbeitnehmerschutzgesetz

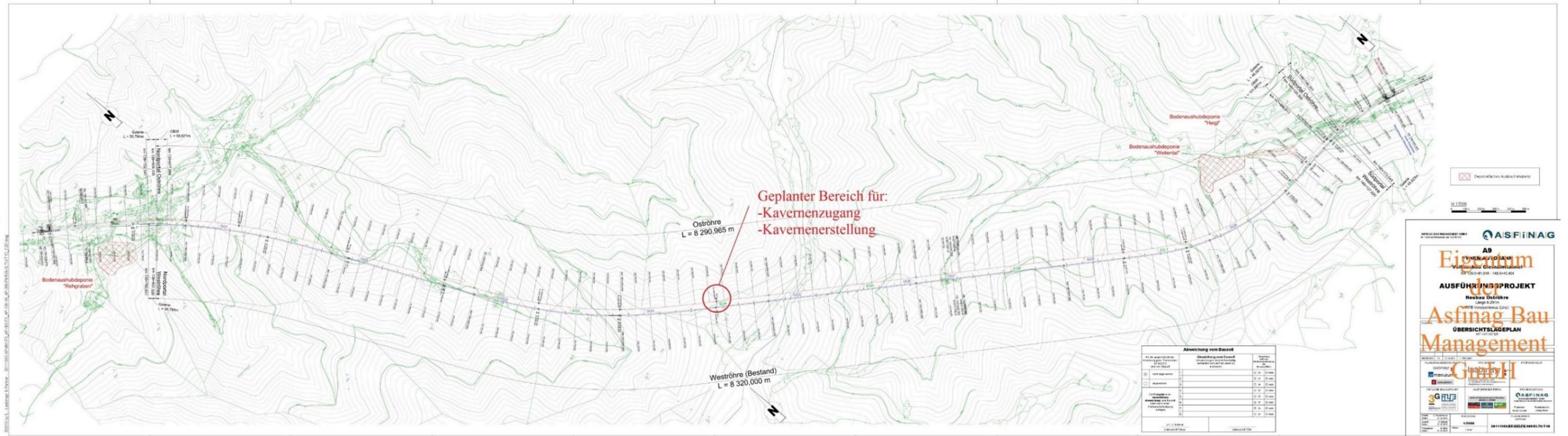
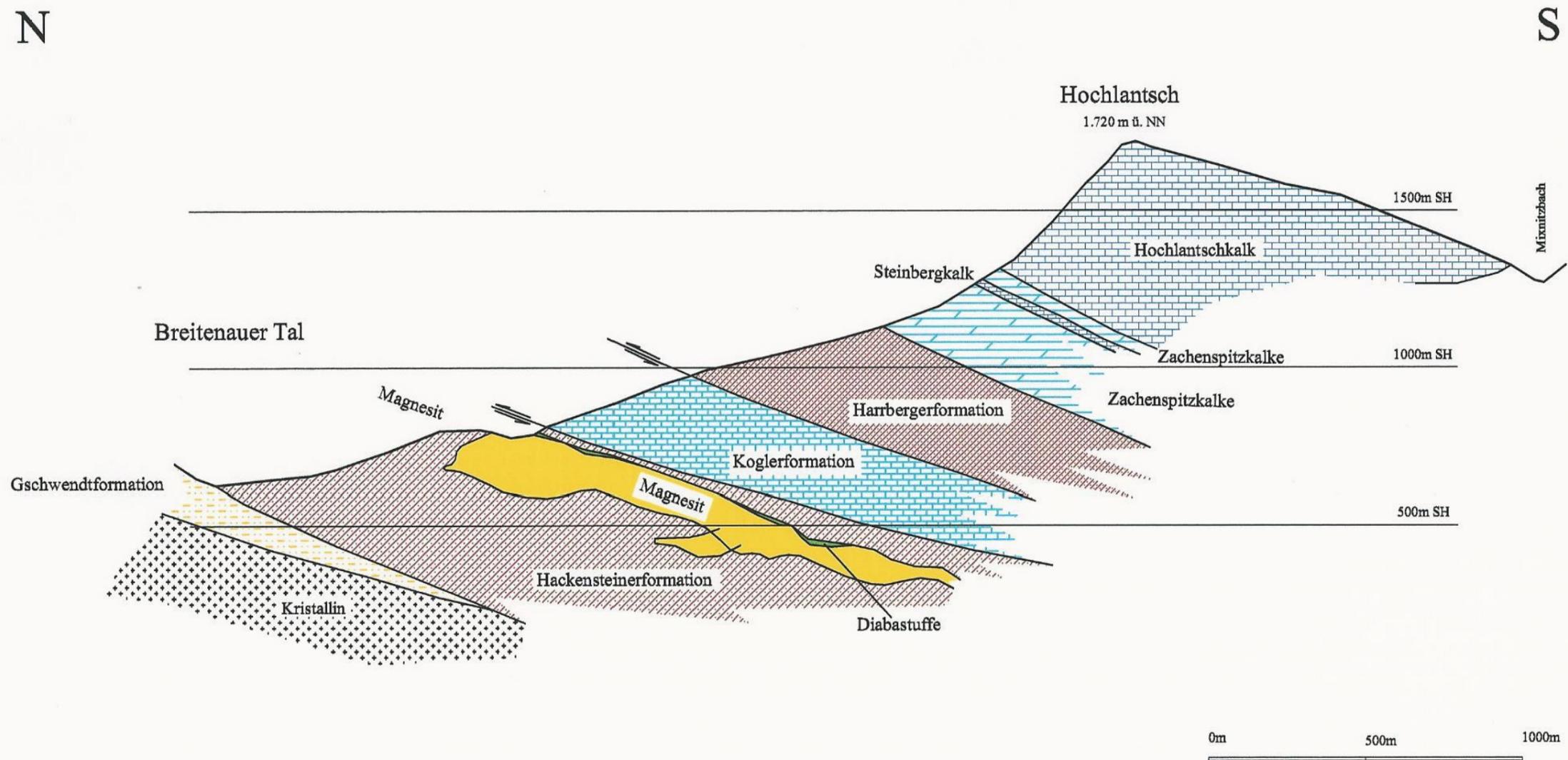


Abbildung 47: Übersichtsplan Gleinalmtunnel Kavernensituierung

Geologisches Profil der Magnesitlagerstätte Breitenau



- | | |
|--|---|
| Koglerformation der "Kalkschieferfolge": | Bänderkalk |
| Gschwendtformation der "Kalkschieferfolge": | Schuttkalk, Tonsandstein, Kalkiger Schiefer |
| Harrbergerformation der Laufnitzdorfer Gruppe: | Tonsandstein, Lydit, Metatuffit, Kalk |
| Hackensteiner der Laufnitzdorfer Gruppe: | Metavulkanite, Tonsandstein, Tonstein, Kalk |

Markscheiderei Breitenau Dezember 2011

Geologische Grundlage nach Gollner & Zier (1982), ergänzt

Abbildung 50: Geologisches Profil Breitenau

