Auftraggeber:

Thüringer Aufbaubank

Postfach 900244
99105 Erfurt

Forschungsprojekt:

Wärmenutzung aus natürlichen exothermen Reaktionen im Grundwasser - Projekt BIOGEOTHERMIE

Projektbericht:

Abschlussbericht

Projektnummer: 4954

Struktur:

Verbundforschungsprojekt gefördert mit Mitteln des Freistaates Thüringen und der Europäischen Union
Förderprogramm: Richtlinie zur Förderung von innovativen, technologieorientierten Verbundprojekten, Netzwerken und Clustern (Verbundförderung)
Beihilfe-Nr.: N331/2007
Projekt-Nr.: 2007 FE 0068
Fördergegenstand: Forschung und Entwicklung

Projektpartner: JENA-GEOS®-Ingenieurbüro GmbH
FSU Jena, Institut für Geowissenschaften
FH Schmalkalden, Fachbereich Maschinenbau
BOG Bohr- und Umwelttechnik GmbH

Bearbeiter:
Dipl.-Geol. J. Schmidt/ Dipl.-Geol. Dr. S. Ackermann

Jena, den 06.10.2012

Durch die DAP Deutsches Akkreditierungssystem Prüfwesen GmbH akkreditiertes Ingenieurbüro

Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüf- und Probenahmeverfahren.

Deutscher Akkreditierungs Rat
DAP-PL-2145.00

Sitz der Gesellschaft: Jena
Betriebsstätten in Naumburg. Dresden
Amtsgericht Jena HRB 204170
Geschäftsführer: Andreas Schaubs.
Dr. Kersten Roselt
Telefon: +49 3641 4535-0
E-Mail: info@jena-geos.de

Bankverbindung:
Commerzbank. Filiale Jena
BLZ 820 800 00. Konto 0342 560 500
Deutsche Bank AG. Filiale Jena
BLZ 820 700 00. Konto 3 938 784
Fax: +49 3641 442806
Internet: www.jena-geos.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 2
Tabellenverzeichnis 3
Abbildungsverzeichnis 3
Ausgewählte Arbeitsunterlagen 5
1 Vorwort 7
2 Einleitung 8
3 Aufgabenstellung/ Forschungsansatz 9
4 Standortkriterien 12
4.1 Zusammenstellung wesentlicher Kriterien für die Auswahl der Biogeothermie-Teststandorte 12
4.1.1 Rechtliche Kriterien 12
4.1.2 Wissenschaftliche Kriterien 12
4.1.3 Wirtschaftliche Kriterien 13
4.1.4 Kriterien in Bezug auf die technische Umsetzung 14
4.2 Auswahl der Versuchsstandorte 14
5 Projektbeschreibung 18
5.1 Rositz 18
5.1.1 Vertragliche Rahmenbedingungen 18
5.1.2 Lage, Historie, Geologie, Hydrogeologie 18
5.1.3 Grundwasserbefrachtungen mit organischen Verbindungen am Standort Rositz 20
5.1.4 Untersuchungskonzept am Standort Rositz 20
5.1.4.1 Konzept für Wärmepumpensteuerung 22
5.1.4.2 Messkonzepte 23
5.1.4.3 Wärmetransportmodell 23
5.1.5 Projektentwicklung am Standort Rositz 23
5.2 Krumpa 29
5.2.1 Vertragliche Rahmenbedingungen 29
5.2.2 Lage, Historie, Geologie, Hydrogeologie 29
5.2.3 Grundwasserbefrachtungen mit organischen Verbindungen am Standort Krumpa 32
5.2.4 Untersuchungskonzept am Standort Krumpa 32
5.2.4.1 Konzept für Wärmepumpensteuerung 32
5.2.4.2 Messkonzepte 33
5.2.4.3 Wärmetransportmodell 35
5.2.5 Projektentwicklung am Standort Krumpa 35
6 Untersuchungsergebnisse 40
6.1 Rositz 40
6.2 Krumpa 41

6.3 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse 44
7 Ausblick 45
7.1 Genehmigungsfähigkeit 45
7.2 Wirtschaftlichkeit 45
7.3 Übertragbarkeit der Ergebnisse/ Vermarktung 46

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Geologisches Normalprofil am Standort Rositz 19
Tabelle 2: Normalprofil für den Standortbereich [5] 31

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzipskizze für die thermische Nutzung von durch natürliche exotherme Reaktionen im Grundwasser entstehende Wärmepotenziale 10
Abbildung 2: Standort Nentzelsrode mit Nutzungen (Quelle: Google Earth 2012) 15
Abbildung 3: Standort Rositz (Quelle: Google Earth 2012) 16
Abbildung 4: Standort Krumpa (Quelle: Google Earth 2012) 17
Abbildung 5: Lage des Untersuchungsstandortes am südlichen Rand des Geiseltalsees 18
Abbildung 6: Grundwassermessstellen und vorgesehene Messebenen am Standort Rositz 21
Abbildung 7: Versuchsanordnung Standort Rositz 22
Abbildung 8: Wärmepumpenanlage (Vordergrund: Wärmepumpe; 24
Abbildung 9: Messgruppe/ Wärmesonden WS 01 – WS 03 und GWM 01/09 östlich des Containers 25
Abbildung 10: Messgruppe/ Wärmesonden WS 04 –WS 08 westlich des Containers 26
Abbildung 11: Geometrie der Wärmesonden WS 4/09 – WS 8/09 26
Abbildung 12: Temperaturtiefenprofile von WS 7/07 und WS 8/09 28
Abbildung 13: Lage des Untersuchungsstandortes am südlichen Rand des Geiseltalsees 30

Abbildung 14: Versuchsanordnung am Standort Krumpa - Wärmesonde und Grundwassermessstellen (Messebenen) 34
Abbildung 15: Bohrarbeiten am Standort Krumpa zur Errichtung von 10 GWM und 1 WS 36
Abbildung 16: Versuchsanordnung am Standort Krumpa - Wärmesonde und Grundwassermessstellen, Wetterstation der FSU (links der Bildmitte) 37
Abbildung 17: Messeinrichtung in Krumpa mit neu installiertem Wärmetauscher (links hinten) 37
Abbildung 18: WS 1/11 (links) und GWM 3/11 bis 6/11 38
Abbildung 19: Temperaturtiefenprofile GWM 3/11 bis 6/11 am 26.09.2011 42

Ausgewählte Arbeitsunterlagen

[1] Thüringer Aufbaubank (2008) Antrag auf Gewährung einer Zuwendung gemäß den Richtlinien zur Förderung von innovativen, technologieorientierten Verbundprojekten, Netzwerken und Clustern, Verbundprojekte, Antragsteller JENA-GEOS®-Ingenieurbüro GmbH.

[2] Thüringer Aufbaubank Zuwendungsbescheid zur Gewährung eines Zuschusses aus Landesmitteln und aus Mitteln der des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) OP 2007- 2013 vom 25.03.2009.

[3] Gestattungsvertrag mit der LEG (Landesentwicklungsgesellschaft Thüringen mbH über die Durchführung eines Feldversuches im Rahmen des vom Freistaat Thüringen geförderten Forschungsvorhabens „Wärmenutzung aus exothermen Reaktionen im Grundwasser – Verbundprojekt BIOGEOTHERMIE“ vom 22.06.2009/ 26.06.2009.

[4] Gestattungsvertrag mit der MDSE (Mitteldeutsche Sanierungs- und Entsorgungsgesellschaft mbH) vom 05.11.2010/ 11.11.2010.

[5] ARGE GW (11.05.2011): Grundwasserströmungs- und Schadstofftransportmodellierung, RSP und GWMO am Standort ADDINOL (MK 10.10.1) – Rahmensanierungsplan.

[6] Hofmann T, Baumann T., Bundschuh T., v.d. Kammer F., Leis A., Schmitt D., Schäfer T., Thieme J., Totsche, K. U. & Zänker H. (2003a): Aquatische Kolloide und Partikel I: Definition, Systeme und Relevanz. Das Grundwasser, 4:203-212.

[7] Hofmann T., Baumann T., Bundschuh T., v.d. Kammer F., Leis A., Schmitt D., Schäfer T., Thieme J., Totsche, K. U. & Zänker H. (2003b): Aquatische Kolloide und Partikel II: Probenahme, Probenaufbereitung und Charakterisierung, Das Grundwasser, 4:213-223.

[8] Müller, S., K. U. Totsche and I. Kögel-Knabner (2006): Sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons to mineral surfaces. Europ. J. Soil Science. (In press).

[9] Krah, N.: Potentiale und Modellrechnungen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Landkreis Schmalkalden – Meiningen. fhS-prints 6/2001, Schriftenreihe der Fachhochschule Schmalkalden, ISSN 0949-1767

[10] Krah, N.: Referenzlösungen für energetische und stoffliche Kreisläufe. In: Krah, N.: Tagungsband zur 21. Schmalkalder Fachtagung. Hrsg. FBF Schmalkalden, Bibliothek der FH Schmalkalden unter Tech 1300 0068/06,Schmalkalden, 2005

[11] Krah, N.: Erfassung des Potenzials der Abwärme im Abwasserspülbecken und Planung deren energetischen Nutzung für die Thüringer Waldquell Mineralbrunnen GmbH. Schmalkalden, 1999

[12] Krah, N.: Erfassung des Potenzials der Abwärme und Planung deren Nutzung in der Großschmiede Schmalkalden. Projekt für die Bergbauwerkzeuge Schmalkalden GmbH, Schmalkalden, 2002 (Erteilung eines Thüringer Energiepreises durch das Wirtschaftsministerium für dieses Projekt)

[13] Totsche K. U., I. Kögel-Knabner und Harald Weigand (2002) Modelling contaminant transport in anthropogenic soil: Reconstruction of spatial heterogeneity by analysing the relations of adjacent pedofacies. In: Schulz, H.D. und Teutsch, G. (Hrsg). Geochemical Processes: Conceptual Models for Reactive Transport in Soil and Groundwater. 1-18. Wiley VCH, Weinheim.

[14] Totsche, K. U. (2004). Physikochemische Aspekte des Strofftransports. Handbuch der Bodenkunde. H.-P. Blume, P. Felix-Hennigsen, W. R. Fischer et al. Landsberg/Lech, ecomed Verlag.

[15] Totsche K.U., Jann S, Kögel-Knabner I. (2006): Release of polycyclic aromatic hydrocarbons, dissolved organic carbon, and suspended matter from disturbed NAPL-contaminated gravelly soil material. Vadose Zone Journal 5 (1): 469-479.

[16] Wehrer M, Totsche KU (2005): Determination of effective release rates of polycyclic aromatic hydrocarbons and dissolved organic carbon by column outflow experiments Europ. J. Soil Science 56 (6): 803-813.

[17] Weigand H., Totsche K. U., Mansfeldt T., Kögel-Knabner I. (2001): Slow release and mobility of polycyclic aromatic hydrocarbons and iron-cyanide complexes in contaminated soil. J. Plant Nutr. Soil Sci. 164:643-649.

[18] Weigand H., Totsche K. U., Kögel-Knabner I., Annweiler E., Richnow H.H., Michaelis W. (2002): Fate of anthracene in contaminated soil - transport and biodegradation under unsaturated flow conditions. Eur. J. Soil Sci. 53(1):71-82.

1 Vorwort

Eine forcierte Nutzung erneuerbarer Energien ist seit Jahren fest verankerter Inhalt der Energiepolitik in Deutschland. Wie zahllose Beispiele zeigen, hat sich gerade die oberflächennahe Erdwärmenutzung zur Wärmeversorgung von Wohngebäuden in den letzten Jahren als *eine* wirtschaftliche und ökologische Option zur Energiebedarfsdeckung erwiesen. Die Verwertung dieses technischen Potentials verspricht insbesondere bei oberflächennah erhöhten Temperaturen durch anthropogene Einflüsse unter Nutzung innovativer Technologien hohe wirtschaftliche und ökologische Effekte.

Die JENA-GEOS®-Ingenieurbüro GmbH hat bereits zu Beginn der 90er Jahre im Rahmen der Erkundung, Erforschung und Sanierung von Grundwasserschäden an zahlreichen Standorten die Erkenntnis gewonnen, dass beim natürlichen mikrobiellen Abbau von organischen Schadstoffen unter bestimmten Bedingungen Energie in Form von Wärme im Grundwasser freigesetzt wird – und dies in nicht unerheblichen Maße. Beispielsweise können im Bereich von karbochemischen Standorten durchaus einige hunderttausend Kubikmeter Grundwasser Temperaturerhöhungen regional um mehr als 10 °C aufweisen.

Die sich im Ergebnis massiver Forschungen und Fachdiskussionen zum Thema *‚Natural Attenuation'* im Verlaufe der zurückliegenden 10 Jahre allmählich durchsetzende Erkenntnis, dass diese Abbauprozesse im Grundwasser unter bestimmten Bedingungen als Sanierungsoption genutzt werden können führt dazu, dass die Bereiche spürbar erhöhter Grundwassertemperaturen noch über Jahrzehnte, bzw. teilweise Jahrhunderte, bestehen bleiben werden. Dies wiederum öffnet die Tür zu einer über längere Zeiträume möglichen energetischen Gewinnung aus der Differenz des Temperaturpotenzials im Abstrom des ‚Bio-Reaktors'.

Auf dieser Basis wurde das Verbundprojekt BIOGEOTHERMIE ins Leben gerufen, dessen Gegenstand die wirtschaftliche Nutzung von biologisch bedingten Temperaturanomalien in schadstoffbelasteten Grundwasserhorizonten ist.

Mit dem Verbundprojekt soll in Thüringen die Grundlage zur Nutzung dieses natürlichen Energiepotenzials, das nahezu weltweit verfügbar ist, geschaffen werden. Somit liefert das Forschungsprojekt einen eigenständigen Thüringer Beitrag zum Energiemix der Zukunft.

2 Einleitung

In dem vom Freistaat Thüringen und die EU geförderten Projekt schlossen sich JENA-GEOS®, die Friedrich-Schiller-Universität Jena, die Fachhochschule Schmalkalden und die BOG Bohr- und Umwelttechnik GmbH Anfang des Jahres 2007 auf der Basis eines Kooperationsvertrages zu einem wissenschaftlichen Verbund zusammen.

Mit Schreiben vom 02.04.2007 wurde der Projektantrag BIOGEOTHERMIE zur Förderung des gleichnamigen Verbundprojektes zusammen mit der Vorhabensbeschreibung, dem genannten Kooperationsvertrag sowie den Antragsunterlagen aller 4 Projektpartner bei der Thüringer Aufbaubank eingereicht.

Die JENA-GEOS®-Ingenieurbüro GmbH wurde am 25.03.2009 [1][1] mit der Übergabe des Zuwendungsbescheides des Freistaates Thüringen für das Projekt BIOGEOTHERMIE durch den Staatssekretär des Wirtschaftsministeriums als Koordinator bestätigt.

Die anderen Projektpartner wurden mit separaten Zuwendungsbescheiden durch die Thüringer Aufbaubank beauftragt.

Projektpartner des Verbundprojektes:

JENA-GEOS®-Ingenieurbüro Saalbahnhofstraße 25 c 07743 Jena	
FSU Jena, Institut für Geowissenschaften Burgweg 11 07749 Jena	
FH Schmalkalden, Fachbereich Maschinenbau Blechhammer 98574 Schmalkalden	
BOG Bohr- und Umwelttechnik GmbH Eselsteig 17 07586 Caaschwitz	

3 Aufgabenstellung/ Forschungsansatz

Die wesentliche Aufgabenstellung des Forschungsvorhabens war die Prüfung der möglichen wirtschaftlichen Nutzung von biologisch bedingten Temperaturanomalien in schadstoffbelasteten Grundwasserhorizonten.

In der Vergangenheit führten Stoffeinträge auf karbo- und petrochemischen Industriestandorten oft zu massiven Grundwasserkontaminationen durch Kohlenstoff-organische Verbindungen. In Abhängigkeit von den hydrogeologischen und hydrochemischen Randbedingungen begann an einigen dieser Standorte schon bald nach dem Eintrag ein mikrobiologischer Schadstoffabbau mit exothermen Reaktionen (s. Abbildung 1). Nach der Sanierung der Standorte verblieben meist technologisch bedingt Schadstoffanreicherungen im Grundwasser, die einem natürlichen Abbau unterliegen und von denen keine unmittelbare Gefährdung der Umwelt mehr ausgeht.

Im Unterschied zur klassischen Geothermie sollen im Rahmen des Forschungsprojektes die biologischen Wärmeanomalien einer energetischen Nutzung zugeführt werden. Diese „Bioreaktoren“ können nach derzeitigen Erkenntnissen in Abhängigkeit von den hydrogeologischen Rahmenbedingungen und dem Stoffinventar über Jahrzehnte hinausgehende Zeiträume aktiv sein.

Weiterhin war im Rahmen des Forschungsprojektes zu prüfen, ob das Temperaturpotenzial im Grundwasserabstrom von ehemaligen Industriestandorten und/ oder von Deponien oder Halden durch gezielten Wärmeentzug mittels etablierten Wärmepumpen-Technologien genutzt werden kann, ohne auf die biologischen Abbauprozesse negativen Einfluss zu nehmen.

Nach Abschluss der Feldarbeiten einschließlich Rückbaumaßnahmen im Frühjahr 2012 wurden durch die einzelnen Projektpartner die im Rahmen ihrer Teilprojekte:

1. Teilprojekt JENA-GEOS®: ‚Natural-Attenuation’-Standortbedingungen und pragmatische Umsetzung der BIOGEOTHERMIE
2. Teilprojekt FSU: Hydrogeologische Grundlagen, Monitoring und Modellierung
3. Teilprojekt FH Schmalkalden: Potenzialermittlung und Nutzung von BIOGEOTHERMIE aus natürlichen exothermen Reaktionen im Grundwasser
4. Teilprojekt BOG: Testfeldprojektierung, -errichtung, -betreibung, -optimierung, anlagentechnische Weiterentwicklung

erzielten Untersuchungsergebnisse in separaten fachspezifischen Abschlussberichten dargestellt.

Der vorliegende Bericht führt durch den Werdegang des Verbundprojektes und beleuchtet die erzielten Ergebnisse der Verbundpartner insbesondere im Hinblick auf zukünftige wirtschaftliche Relevanz bzw. Verwertbarkeit.

Der Vorteil des Forschungsansatzes des Verbundprojektes war bzw. ist, dass die Bio-Hot-Spots innerhalb des Grundwasserkörpers weitgehend unabhängig von dem atmosphärischen Temperaturaustausch als kontinuierliche Wärmequelle dienen. Die nachfolgende Abbildung zeigt eine entsprechende Prinzipskizze.

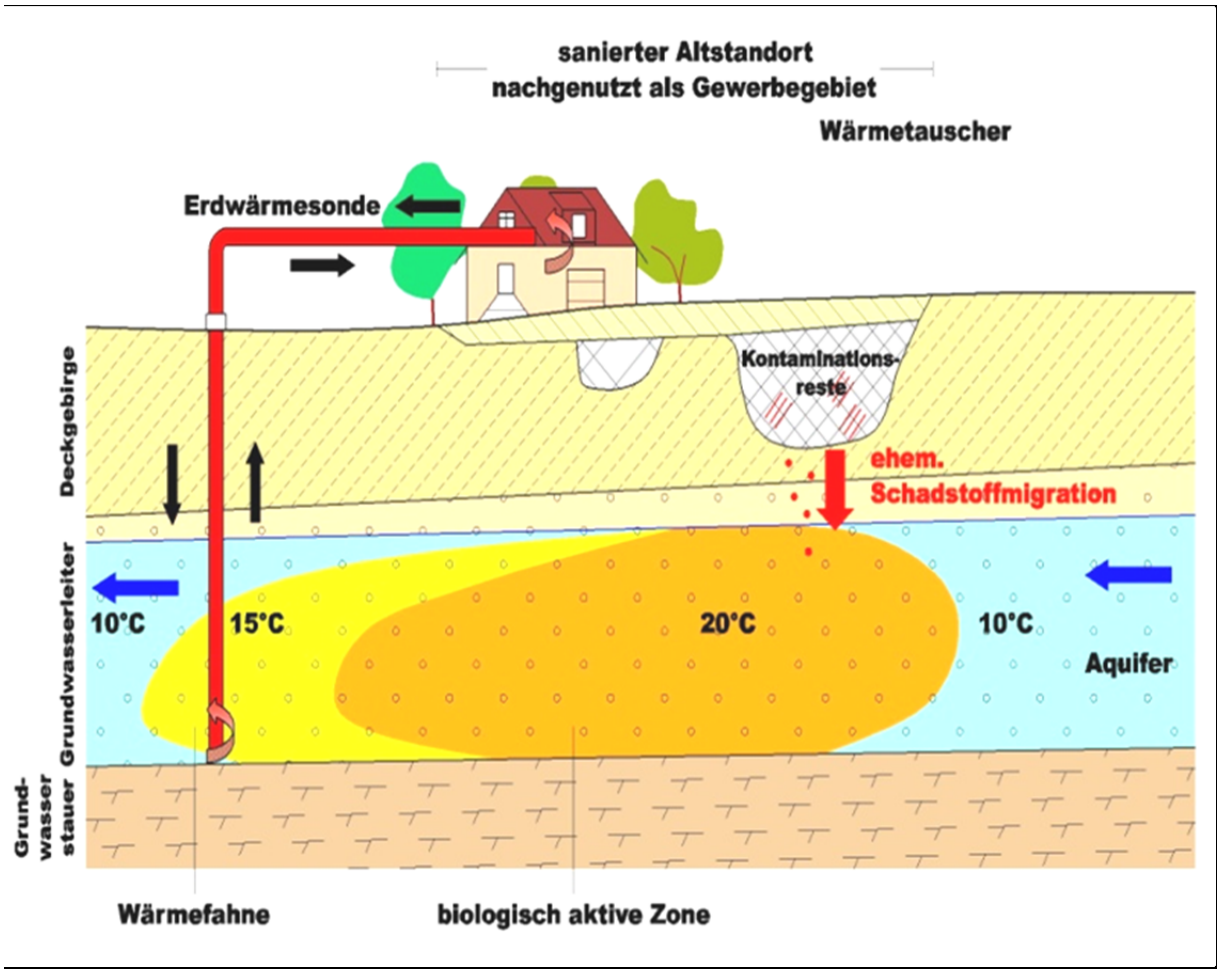

Abbildung 1: Prinzipskizze für die thermische Nutzung von durch natürliche exotherme Reaktionen im Grundwasser entstehende Wärmepotenziale

In Vorbereitung der Auswahl der Biogeothermie-Teststandorte wurden von den Projektbeteiligten aufgabenbezogene Kriterien formuliert.

Entsprechend standen für den Projektkoordinator JENA-GEOS® im Wesentlichen genehmigungsrelevante und planerische Kriterien wie Genehmigungsfähigkeit, Eigentums- und Nutzungsverhältnisse im Vordergrund:

- Genehmigungsfähigkeit (umwelt-, wasserschutz- und emissionsschutzseitige, Einordnung in aktuelles bundesdeutsches Energierecht)

- Wärmebedarf,
- Vorhandene Infrastruktur,
- NA-Milieu,
- Eigentums- und Nutzungsverhältnisse,
- Einhaltung von Sicherheitsvorschriften,
- Wärmetechnische und ökologische Bilanzierung sowie
- Förderfähigkeit

Für die wissenschaftliche Begleitung waren dagegen infrastrukturelle Gegebenheiten wie z. B. Größe und Funktionalität des Messnetzes, ein grundlegendes Orts- und Prozessverständnis sowie die Anwendbarkeit von Untersuchungsmethoden bei der Auswahl eines Teststandortes maßgebend. Im Rahmen der wärmetechnischen und energetischen Untersuchungen und anlagentechnischen Planungen waren dagegen die Verfügbarkeit von Bilanzierungsgrößen wie Temperaturanomalie, Wärmeinhalt des Grundwasserkörpers, Fließgeschwindigkeit des Grundwasser, Kenngrößen des Grundwasserleiters und klimatische Faktoren im Vorfeld einer Biogeothermie-Anlage wesentliche Kriterien. Von Seiten der feldtechnischen Umsetzung und Installation einer Biogeothermie-Versuchsanlage wurden im Wesentlichen Kriterien der Infrastruktur wie Zuwegung, Bohrfreiheit, Entsorgungsmöglichkeiten und Kampfmittelfreiheit sowie grobe Vorstellungen vom geologischen Untergrund aufgeführt.

Da nicht alle Standorte unter Beachtung technischer, ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte gleichermaßen gut geeignet sind, galt es anhand von fachtechnisch untersetzten Kriterien, repräsentative und bewertbare Pilotstandorte in einem Auswahlverfahren zu finden.

Der Prozess der Standortfindung wird in den nachfolgenden Kapiteln geschildert.

4 Standortkriterien

4.1 Zusammenstellung wesentlicher Kriterien für die Auswahl der Biogeothermie-Teststandorte

Die durch Voruntersuchungen bekannten zahlreichen nationalen NA-Standorte wurden hinsichtlich ihrer Charakteristika bewertet. Dazu wurden u. a. Recherchen auf verschiedenen Ebenen (TLUG, MDSE, LMBV, Internet, Literatur etc.) durchgeführt.

Aus den Rechercheergebnissen wurden die nachfolgenden signifikanten rechtlichen, wissenschaftlichen, technischen und wirtschaftlichen Auswahlkriterien, die im Hinblick auf die Auswahl der Biogeothermie-Teststandorte relevant sind, abgeleitet.

4.1.1 Rechtliche Kriterien

Eine Grundvoraussetzung für die Umsetzung eines Biogeothermie-Projektes an einem Teststandort war die Aussicht auf dessen Genehmigungsfähigkeit. Da es sich um einen Eingriff in einen Grundwasserleiter handelt, sind umweltschutz- und wasserschutzrelevante Gesetzlichkeiten zu berücksichtigen. Problematisch im Hinblick auf die Erlangung von Genehmigungen für die Errichtung und das Betreiben einer Biogeothermieversuchsanlage sind auch Standorte, bei denen Gefahrenabwehr- bzw. Sanierungsmaßnahmen geplant oder gerade durchgeführt werden.

Die Errichtung und das Betreiben einer Biogeothermieanlage an einem Teststandort setzt das Einverständnis des Eigentümers und des Nutzers der Liegenschaften voraus und ist, da die Errichtung sowie das Betreiben einer Wärmegewinnungsanlage einen Eingriff über einen längeren Zeitraum in den Untergrund bzw. in die Landschaft darstellt, vertraglich abzusichern.

Beim Errichten sind relevante Sicherheitsvorschriften beim Umgang mit kontaminierten Wässern und Böden bzw. Entsorgungsvorschriften zu beachten und beim Betreiben der Anlage die allgemein bekannten sicherheitstechnischen Standards einzuhalten.

4.1.2 Wissenschaftliche Kriterien

Die Auswahl eines Teststandortes zur Errichtung einer Biogeothermie-Versuchsanlage setzt ein grundlegendes Orts- und Prozessverständnis voraus, das auf vorangegangenen Untersuchungen aufbauen sollte. Für den Standort müssen Basisinformationen zum NA-Milieu vorhanden sein. Ebenso sollten hydrodynamische, hydrochemische und mikrobiologische Milieubedingungen hinreichend charakterisiert bzw. mit geringem Aufwand charakterisierbar sein. Für einen potenziellen Biogeothermie-Standort ist insbesondere die Verfügbarkeit hydrogeologischer, geologischer und meteorologischer Daten zu prüfen. Wesentliche Eingangsparameter stellen der Durchlässigkeitsbeiwert, der hydraulische Gradient, die Porosität des Aquifers, die Wärmekapazität, das Wärmeleitvermögen,

Klimadaten, wie Niederschlag, Lufttemperatur, Sonnenscheinstunden, Globalstrahlung sowie die 3-D-Temperaturverteilung im Aquifer inkl. jahrezeitlicher/täglicher Schwankungen dar.

Können diese Daten nicht beschafft oder mit vertretbarem Aufwand generiert werden, ist der betreffende Standort nicht geeignet.

Der Teststandort sollte im Hinblick auf thermische Modellierungen außerdem einen zum Hangenden abgedichteten GWL aufweisen, um eine thermische Beeinflussung durch Regenwasser möglichst gering zu halten.

Ein weiteres Kriterium ist die Kenntnis der stofflichen Zusammensetzung der Kontamination, von Metaboliten und von Abbauprodukten. Zum Teil ist dies auch sicherheitsrelevant, insbesondere bei Gasemissionen (z. B. von Methan) oder bei giftigen Metaboliten.

4.1.3 Wirtschaftliche Kriterien

Wirtschaftliche Kriterien spielen für einen Teststandort nur eine untergeordnete Rolle. Für eine kommerzielle Nutzung sind zudem als Kriterien die Förderfähigkeit, das Investitionsvolumen, der potenzielle Wärmebedarf bzw. die Möglichkeiten einer Wärmenutzung am Standort, die theoretische Wärmebilanz am Entnahmeprofil, die vorhandene Infrastruktur und eine Langzeitprognose der Wärmebildung im GW aufbauend auf dem vorhandenen Schadstoffinventar maßgebend.

Im Einzelnen sind es folgende Kriterien:

- Förderfähigkeit,
- Investitionsvolumen,
- Potenzieller Wärmebedarf,
- Temperaturanomalie im Aquifer gegenüber dem ungestörten GWL sollte 5 K betragen,
- Grundwasserfließgeschwindigkeit > 10 m/a,
- Mittlere Mächtigkeit des GWL > 3 m, erwärmtes Reservoir mit Ausdehnung von mind. 60 x 60 m,
- Wärmebilanz am Entnahmeprofil,
- Schadstoffvolumen, als anteilige Schadstoffmenge für die Quelle der Infiltration (Altlast) und des entstehenden biologischen Abbaus im gesamten Zustrom ist von mind. 20 t Schadstoffen auszugehen. Die biologische Abbaurate sollte mindestens 1000 kg/a betragen,
- Vorhandene Infrastruktur.

4.1.4 Kriterien in Bezug auf die technische Umsetzung

Für die Auswahl der Teststandorte war die vorhandene Infrastruktur von großer Bedeutung. Wichtig waren nicht nur die Anfahrwege zu den einzelnen Messpunkten, auch die Anbindung an Energie-, Kommunikations- und Entsorgungssysteme (Entsorgung kontaminierter Böden, Einleitung von gereinigten bzw. Entsorgung kontaminierter Wässer) musste gewährleistet sein.

Eine wesentliche technische Voraussetzung für die Planung und zum Betreiben von einer Biogeothermie-Anlage an einem Teststandort war das Vorhandensein eines hinreichend ausgebauten Messnetzes, das den Erfordernissen einer Erkundung und Datenerhebung im Vorfeld und zur Überwachung während der Betriebsphase der Anlage gerecht wurde. Das Messnetz musste geeignet sein, sowohl den Abstrom der geplanten Anlage, den eigentlichen Bioreaktor, in dem die Wärme durch mikrobiellen Schadstoffabbau freigesetzt wird als auch den unbeeinflussten Anstrom hydrodynamisch, hydrochemisch, mikrobiell und thermisch zu überwachen. Da die Installation von neuen Messstellen erhebliche zusätzliche finanzielle Mehraufwendungen erfordert, wurden unter den Gesichtspunkten der Wirtschaftlichkeit solche Standorte zu bevorzugt, die im Rahmen der Altlastenüberwachung genügend Grundwasser-Aufschlüsse besaßen bzw. die mit vertretbarem Aufwand (Errichtung Erdwärmesonden und GWM) auf den erforderlichen Stand gebracht werden konnten.

Im Hinblick auf die Errichtung der Erdwärmesonden waren insbesondere auch Kenntnisse/Genehmigungen über die Leitungsfreiheit, die Kampfmittelfreiheit sowie Kenntnisse des geologischen Untergrundes unentbehrlich.

4.2 Auswahl der Versuchsstandorte

Die in den vorangegangenen Kapiteln aufgestellten Kriterien bildeten die wesentliche Grundlage bei der Auswahl geeigneter Versuchsstandorte für die im Rahmen des Verbundprojektes BIOGEOTHERMIE vorgesehenen Untersuchungen.

Unter Zugrundelegung der Auswahlkriterien wurden mehrere auf der Basis der Recherchen ermittelte Standorte für eingehendere Eignungsbetrachtungen vorausgewählt:

- Rositz (Freistaat Thüringen)
- Nentzelsrode (Freistaat Thüringen)
- Weißandt-Gölzau (Sachsen-Anhalt)
- Böhlen (Freistaat Sachsen)
- Krumpa (Sachsen-Anhalt)

Die Standorte Weißandt-Gölzau und Böhlen kamen auf Grund von Vorbehalten der Standort-Eigentümer im Hinblick auf die Durchführung von Versuchen auf ihren Standorten nicht in die engere Wahl.

Im Ergebnis der Befahrung des potentiellen Standortes Nentzelsrode (siehe nachfolgende Abbildung 2) sowie der Auswertung der durch das Landratsamt Nordhausen zum Standort zur Verfügung gestellten Unterlagen wurde festgestellt, dass dieser Standort als Teststandort für Untersuchungen im Zusammenhang mit dem Projekt BIOGEOTHERMIE nicht geeignet war, da der Grundwasserflurabstand mit teilweise 40 m bis 50 m zu groß für eine ökonomische Errichtung einer Versuchsanlage mit Wärmesonde(n) war und ein hinreichend ausgebautes Messnetz nicht zur Verfügung stand. Darüber hinaus zeigten die zur Verfügung stehenden Grundwassertemperaturen rückläufige Tendenzen seit dem Jahr 2005 (vorher > 18 ˚C, ab 2005 < 8 ˚C).

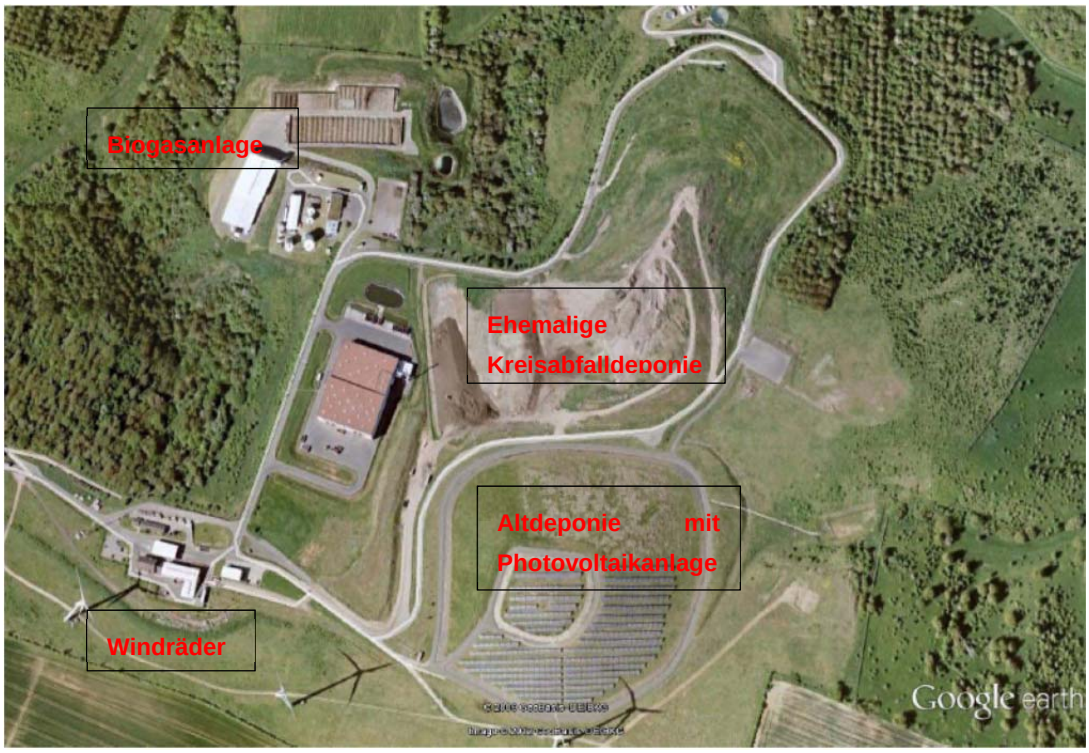

Abbildung 2: Standort Nentzelsrode mit Nutzungen (Quelle: Google Earth 2012)

Unter den geprüften 3 Standorten wurde der Standort Rositz (siehe Abbildung 3 auf Grund seiner Eignung und Verfügbarkeit als Standort für den ersten Pilotversuch im Rahmen des Projektes BIOGEOTHERMIE ausgewählt.

Abbildung 3: Standort Rositz (Quelle: Google Earth 2012)

Der 2. Pilotversuch wurde am Standort Krumpa (siehe Abbildung 4) auf Grund ebenfalls gegebener Eignung und Verfügbarkeit des Standortes ausgeführt. Ein wesentlicher Schwerpunkt der Untersuchungen an diesem Standort war neben der Gewinnung von den Standort charakterisierenden Daten auch die Möglichkeit der Verifizierung der am Standort Rositz erhaltenen Ergebnisse.

Abbildung 4: Standort Krumpa (Quelle: Google Earth 2012)

5 Projektbeschreibung

5.1 Rositz

5.1.1 Vertragliche Rahmenbedingungen

In Vorbereitung des Feldversuches wurden durch JENA-GEOS® mit den verantwortlichen Behörden Abstimmungen durchgeführt und gegebenenfalls die erforderlichen Zustimmungen (z. B. Erlaubnis zur thermischen Nutzung von Wasser) eingeholt.

Mit den Grundstücksbesitzern wurden durch JENA-GEOS® Gestattungsverträge (LEG, Kriebitzscher Agrargenossenschaft e.G.) und Betretungserlaubnisse zur befristeten Nutzung der Liegenschaft bzw. von Grundwassermessstellen abgeschlossen.

5.1.2 Lage, Historie, Geologie, Hydrogeologie

Das Untersuchungsgebiet befand sich im Freistaat Thüringen nordwestlich von Altenburg zwischen den Ortschaften Rositz im Nordwesten und Molbitz im Südosten unmittelbar an der Molbitzer Landstraße. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Lage des Untersuchungsstandortes.

Abbildung 5: Lage des Untersuchungsstandortes am südlichen Rand des Geiseltalsees

Bereits aus dem 17. Jahrhundert liegen Hinweise auf Braunkohleabbau im Raum Rositz vor. Der flächenhafte Abbau des sächsisch-thüringischen Hauptflözes in Tage- und Tiefbauen erfolgte jedoch erst Anfang des 20. Jahrhunderts.

Im Bereich des Teststandortes erfolgte die Kohlegewinnung durch die Altenburger Kohlenwerke im Zeitraum 1909-1912 zunächst im Tagebaubetrieb. Im Jahre 1926 wurde die südlich des Tagebaus verbliebene Braunkohle bis zum natürlichen Kohleausstrich im Tiefbau abgebaut.

Weitere ehemalige Tage- und Tiefbaue befinden sich im Umfeld des Untersuchungsstandortes.

Im Tagebaubereich erfolgte eine vollständige Auskohlung des Flözes. Es verblieb nur eine Restmächtigkeit von 1,3 m (GWM 1/09) über dem Liegendton. Wasseraufbrüche aus dem GWL 52 sind nicht bekannt. Das Grundwasser fließt in nördliche Richtungen.

Regionalgeologisch befindet sich das Untersuchungsgebiet am Südrand des Weißelsterbeckens. Über der Verwitterungszone des prätertiären Untergrundes, der von Gesteinen des Zechsteins und des Unteren Buntsandsteins gebildet wird, kam es im Tertiär und Quartär zur Ablagerung einer komplexen Abfolge von Kiesen, Sanden und Kohleflözen sowie bindigen Zwischenlagen. Die Mächtigkeit und fazielle Ausbildung der einzelnen Schichten wechselt häufig über kurze Distanzen. In Tabelle 1 ist das Normalprofil für den Bereich des Untersuchungsstandortes dargestellt.

Mit dem Braunkohletagebau und Tiefbau wurden die Schichten im Hangenden des Kohleflözes II/III entfernt bzw. wesentlich in ihren Lagerungsverhältnissen gestört.

Tabelle 1: Geologisches Normalprofil am Standort Rositz

Mächtigkeit [m]	**Gestein**	**Hydrogeologie**
0-16	Auffüllung; Sand mit wechselnden Anteilen von Schluff, Ton und Feinkies, untergeordnet Bauschutt,	Grundwasserleiter Kippe
0-6	Auelehm, Gehängelehm Schluff, tonig, feinsandig, zum Teil in Mudde übergehend	Grundwasserstauer
0-6	Weichselkaltzeitliche Flußschotter, sandige Kiese z.T Grobkiese nur lokal verbreitet	Grundwasserleiter GWL 11
0-20	Lößlehm, Geschiebelehm/-mergel mit eingelagerten Schmelzwasser-sanden	Grundwasserstauer
0-3	tertiärer Ton mit Kohlelagen (Flöz IV)	Grundwasserstauer

Mächtigkeit [m]	Gestein	Hydrogeologie
0-5	Tertiäre Sande, Kiese und Sande, lokal auch als Schluff bzw. Ton ausgebildet	Grundwasserleiter GWL 33
0-15	Flöz II/III, Braunkohle	Grundwasserstauer
1-2	Liegendton	Grundwasserstauer
15	Flußsande, kohlig-schluffige Sande und Kiese	Grundwasserleiter GWL 52
	Prätertiäre Zersatzzone	Grundwasserstauer
	Unterer Buntsandstein, Sandsteine mit Lagen von Ton- und Schluffsteinen	Grundwasserleiter

5.1.3 Grundwasserbefrachtungen mit organischen Verbindungen am Standort Rositz

Die für die auf dem mikrobiologischen Schadstoffabbau beruhenden exothermen Reaktionen erforderlichen Stoffe (BTEX, MKW, Phenole, PAK) waren anstromig sowohl durch Stoffeinträge im Bereich des ehemaligen Werksgeländes des Teerverarbeitungswerkes Rositz als auch durch die unmittelbar angrenzende Aschenhalde Fichtenhainichen (z. B. Schwelwasserverrieselung, Produktablagerungen „Teerteiche“) gegeben.

5.1.4 Untersuchungskonzept am Standort Rositz

Das gesamte Untersuchungskonzept bestand aus den Planungen der durch die FSU Jena zur realisierenden hydraulischen, chemischen- und mikrobiologischen Grundwasseruntersuchungen an bereits vorhanden 23 GWM und der neu zu errichtenden GWM 1/09 sowie den Konzepten der FH Schmalkalden hinsichtlich Instrumentierung und Durchführung von Messzyklen am Standort Rositz.

Durch BOG sollten die Wärmesonden sowie die geplante Messstelle GWM 1/09 fachtechnisch korrekt errichtet sowie einzelne Maßnahmen der Projektpartner - wie Aufbau und Einrichtung der Wärmeentzugsanlage - technisch unterstützt werden.

Die Aufgabenstellung von JENA-GEOS® bestand in der fachtechnischen Beratung sowie in der messtechnischen und koordinativen Unterstützung der Projektpartner in den einzelnen Untersuchungsphasen.

Im Einzelnen war vorgesehen, zur Entwicklung und Verifizierung des zu entwickelnden Wärmemodells am Standort Rositz eine Wärmeentzugsanlage zu installieren. Dabei wurden

die Wärmepumpe sowie weitere regel- und messtechnische Einrichtungen in einem Container untergebracht.

Ein weiteres Element der durch die FH Schmalkalden instrumentierten Testanlage war die Errichtung von 2 Versuchsgruppen bestehend aus drei bzw. fünf 30 m tiefen Wärmesonden. In der Mitte der aus 3 Wärmesonden bestehenden Versuchsgruppe sollte die 30 m tiefe 3“-Grundwassermessstelle GWM 1/09 errichtet werden.

In den Wärmesonden sollte zusätzlich ein Messrohr zur Durchführung von Temperaturaufzeichnungen installiert werden.

Abbildung 6: Grundwassermessstellen und vorgesehene Messebenen am Standort Rositz

Nachfolgende Abbildung zeigt die geplante und auch realisierte Anordnung der Wärmesonden und der GWM 1/09 am Versuchsstandort:

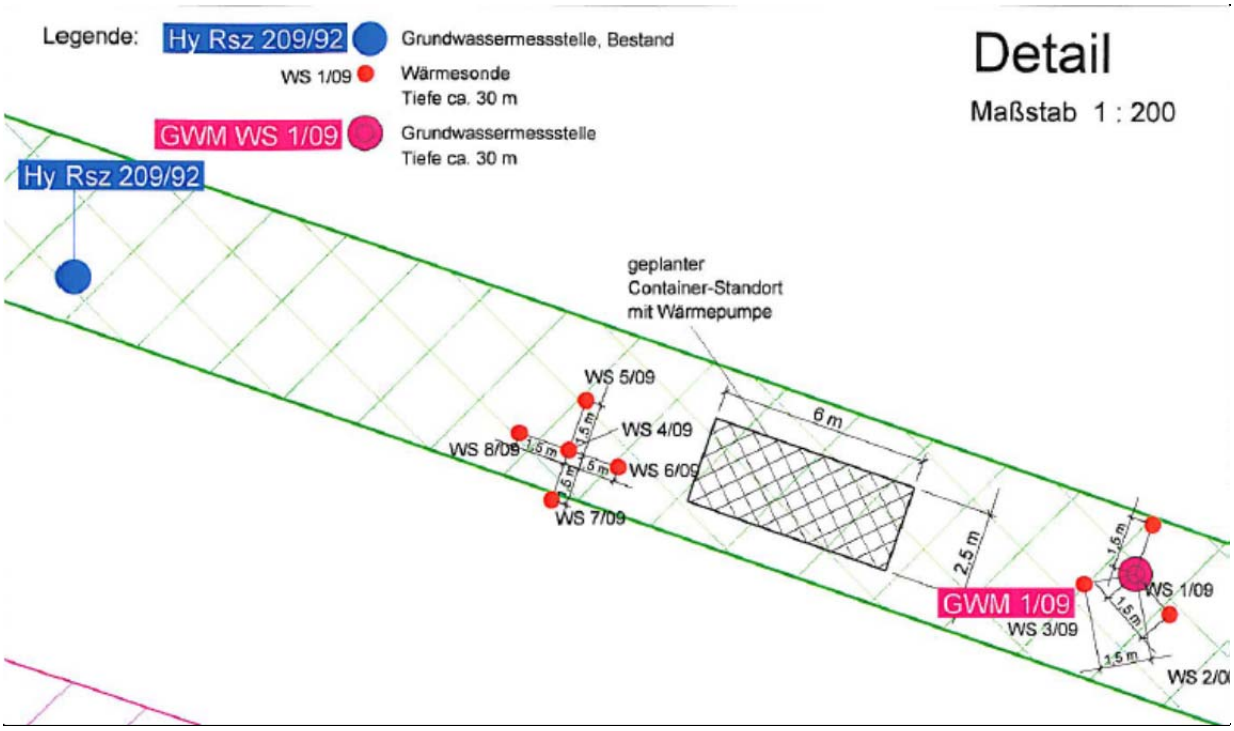

Abbildung 7: Versuchsanordnung Standort Rositz

5.1.4.1 Konzept für Wärmepumpensteuerung

Das Ziel der Messung bestand in der Ermittlung des Wärmeentzugsvermögens im Grundwasserleiter. Dazu sollte ein Wechsel zwischen konstantem Entzug über 1 Tag bis ca. 2 Wochen und einer anschließenden Erholungsphase von ähnlicher Dauer untersucht werden. Es wurde zunächst nur in zwei Sonden Wärme Entzogen. Die Entzugsleistung lag dabei zwischen ca. 60 W/m und 180 W/m (insgesamt also ca. 3,5…10 kW Wärmeentzug). Da die Leistung der Wärmepumpe nicht regelbar war, sollte die Wärmepumpe mittels einer Zeitschaltuhr in Intervallen (ca. Stundenweise) betrieben werden. Als erstes sollte ein mittlerer Wärmeentzug von 60 W/m über eine Woche untersucht werden. Gemäß vorliegenden Simulationsergebnissen war dadurch in 1,5 m Entfernung eine Temperatursenkung um 0,1…0,5 K zu erwarten.

Eine messbare Beeinflussung des ca. 15 m entfernten Pegels Hy Rsz 209/92 war dabei ausgeschlossen.

Basierend auf den Ergebnissen der ersten Entzugs- und Erholungsphase wird die Entzugsleistung für spätere Messungen angepasst.

5.1.4.2 Messkonzepte

Am Standort Rositz waren entsprechend den Planungen zu den Wärmeentzugsmessungen durch die **FH Schmalkalden** insgesamt 9 kombinierte Entzugs- und Messsonden bis zu einer Teufe von jeweils 30 m eingebracht worden, von denen stets 4 Sonden gleichzeitig auf Wärmeentzug geschaltet waren. Davon waren 5 dieser Sonden speziell für Untersuchungen zum Wärmetransportmodell notwendig, 3 weitere dienten dem Wärmeentzug eines Grundwasserpegels für biologisch-hydrogeologische Untersuchungen. Durch diese Konstellation wurde außerdem gesichert, dass die Wärmepumpe mit voller Leistung ohne Begrenzung der Entzugskapazität arbeiten konnte.

Durch Wärmemengenzähler an der Wärmepumpe sollten die Entzugsleistung und die insgesamt entzogene Wärme gemessen werden. Außerdem sollte durch in den Sonden herabgelassene Datenlogger kontinuierlich die Temperatur aufgezeichnet werden, um unter Zuhilfenahme eines speziell entwickelten lokalen Wärmetransportmodells den Wärmetransport im Grundwasserleiter zu erkennen.

Im Messnetz der **FSU Jena** zu den hydraulischen, chemischen- und mikrobiologischen Grundwasseruntersuchungen befanden sich 19 GWM des GWL 52 für Druck-/Temperatur-Monitoring und Beprobung. An 2 GWM der oberen GWL wurden ebenfalls ein p-/T-Monitoring und Beprobungen durchgeführt. Weiterhin wurden 2 Beobachtungsrohre im Haldenmaterial der Aschehalde Fichtenhainichen installiert.

Zur Standortcharakterisierung und in Begleitung des Erdwärmeentzuges der Testanlage, wurde unter Einbeziehung von insgesamt 24 GWM ein Grundwassermonitoring, bestehend aus zeitlich hochaufgelösten Druck-/Temperatur-, Multiparametermessungen und multiplen, ereignisabhängigen Grundwasserprobenahmekampagnen durchgeführt.

Zur Probenahme wurde Tauchmotorpumpen (Typ MP1, Grundfos Holding A/S) mit Steigleitungen aus PE-HD eingesetzt.

5.1.4.3 Wärmetransportmodell

Parallel zu den in 5.1.4.1 und 5.1.4.2 dargelegten Maßnahmen sollte unter Einbeziehung sowohl historischer als auch während des laufenden Projektes erfasster Temperaturmesswerte an den Pegeln für das Gebiet ein Wärmetransportsystem entwickelt bzw. verifiziert werden.

5.1.5 Projektentwicklung am Standort Rositz

Im Oktober 2009 wurde mit den technischen vor Ort Arbeiten am Standort zur Installation von Wärmesonden und einer Grundwassermessstelle begonnen. Bis Anfang Dezember 2009 wurden insgesamt 8 ca. 30 m tiefe Wärmesonden, die in zwei Messgruppen (s. angeordnet sind, sowie eine ebenfalls ca. 30 m tiefe Grundwassermessstelle durch die Fa.

BOG Bohr- und Umwelttechnik GmbH installiert. Die fachtechnische Betreuung der Bohr- und Ausbauarbeiten erfolgte durch JENA-GEOS®.

Mit Beginn des Jahres 2010 wurden zunächst die Arbeiten zur Einrichtung des am Standort aufzustellenden 6 m x 2,5 m großen Containers einschließlich der zu installierenden Wärmepumpe (s. nachfolgende Abbildung) durchgeführt. Witterungsbedingt konnte der Container erst am 02.03.2010 am Versuchsstandort aufgestellt werden. Nach dem Aufstellen des Containers mit eingebauter Wärmepumpe wurden die noch vor Inbetriebnahme der Versuchsanlage auszuführenden Arbeiten

- Aushub der Leitungsgräben,
- unterirdische Verlegungen der Rohrleitungen einschl. oberirdischer Isolierungen,
- Elektroanschluss,
- Einbau Zeitschaltuhr,
- Befüllung der Anlage

im Zeitraum 03.03. - 08.03.2010 im Wesentlichen durch BOG durchgeführt.

Abbildung 8: Wärmepumpenanlage (Vordergrund: Wärmepumpe;

Hintergrund: Wärmetauscher, Ausgleichsbehälter und Anschlüsse der Wärmepumpen)

Abbildung 9: Messgruppe/ Wärmesonden WS 01 – WS 03 und GWM 01/09 östlich des Containers

Abbildung 10: Messgruppe/ Wärmesonden WS 04 –WS 08 westlich des Containers

Im Zuge der Errichtung der Wärmesonden waren an 4 Bohrungen Bohrlochverlaufs- und –temperaturmessungen durch BOG veranlasst und von der Fa. Dr. Lux Geophysikalische Fachberatung GbR durchgeführt worden.

Danach ergab sich folgende Geometrie der Wärmesonden:

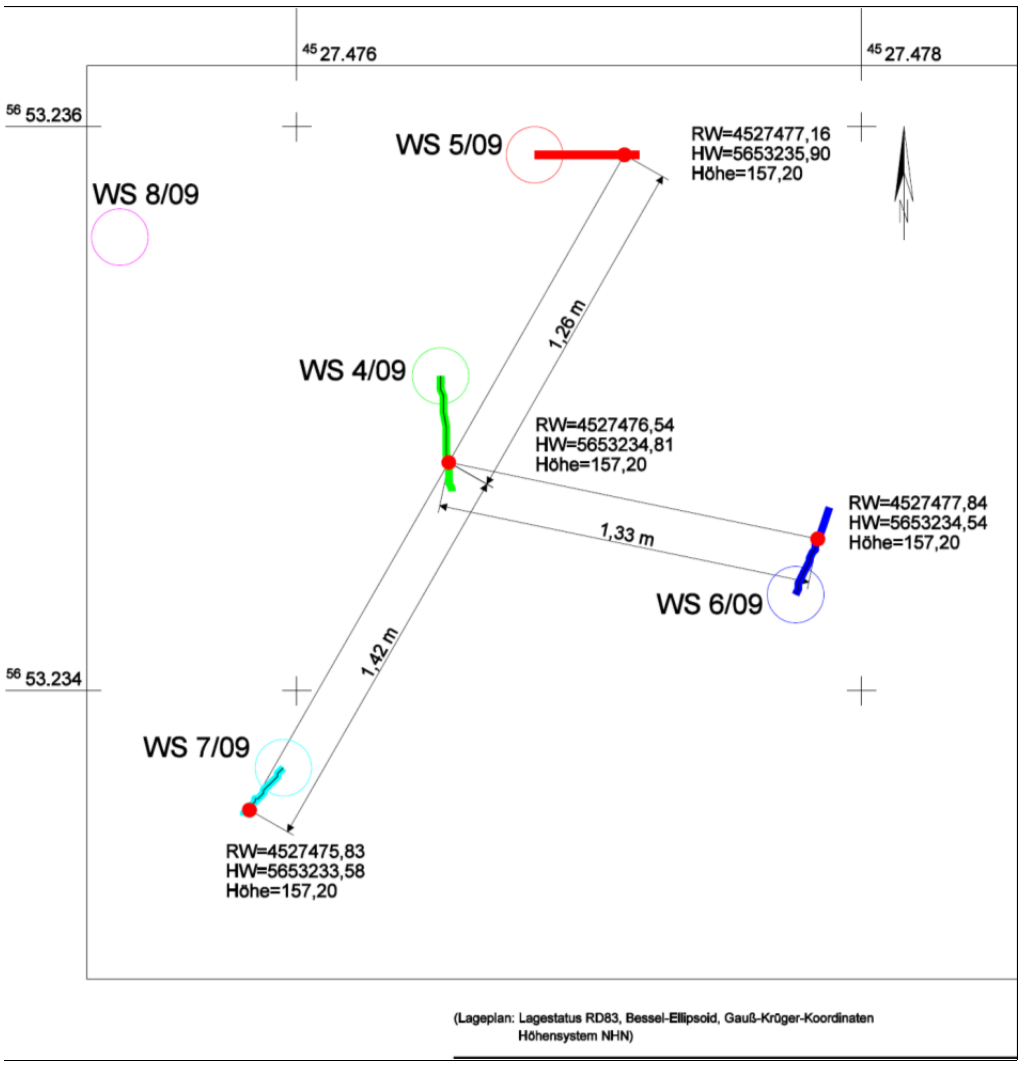

Abbildung 11: Geometrie der Wärmesonden WS 4/09 – WS 8/09

Weiterhin erfolgte im genannten Zeitraum die Ausrüstung der im Rahmen des Projektes mit Datenlogger. Eine erste Beprobung von im Rahmen des Projektes Biogeothermie zu beprobenden Grundwassermessstellen wurde noch im November 2009 vorgenommen.

Nach einem zwischenzeitlichen Probelauf wurde die Wärmepumpenanlage am 11.03.2010 in Betrieb genommen. In den folgenden Monaten wurde die Anlage in 4 verschiedenen Betriebsregimes betrieben:

1. Zyklus vom 24.03.2010 bis 07.04.2010
2. Zyklus vom 10.05.2010 bis 16.06.2010
3. Zyklus vom 20.08.2010 bis 21.09.2010
4. Zyklus vom 19.10.2010 bis 05.11.2010

Dabei erfolgten die Temperaturaufzeichnungen durch die eingebauten Datenlogger zunächst in einer Tiefe von ca. 22,5 m und später 26 m unter ROK.

Auf der Basis der gewonnenen Daten wurde durch die FH Schmalkalden das vorgesehene Wärmeausbreitungsmodell entwickelt. Eine detaillierte Auswertung und Darstellung der erzielten Messergebnisse erfolgt in den entsprechenden Berichten der FH Schmalkalden.

Im Versuchszeitraum März bis November 2010 wurden durch JENA-GEOS® mehrere Temperaturtiefenprofile der WS 1/09 - 8/09 aufgenommen (s. nachfolgende Abbildung) sowie eine lage- und höhenmäßige Vermessung der am Standort errichteten Wärmesonden und der Grundwassermessstelle (GWM) 1/09 durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen wurden den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

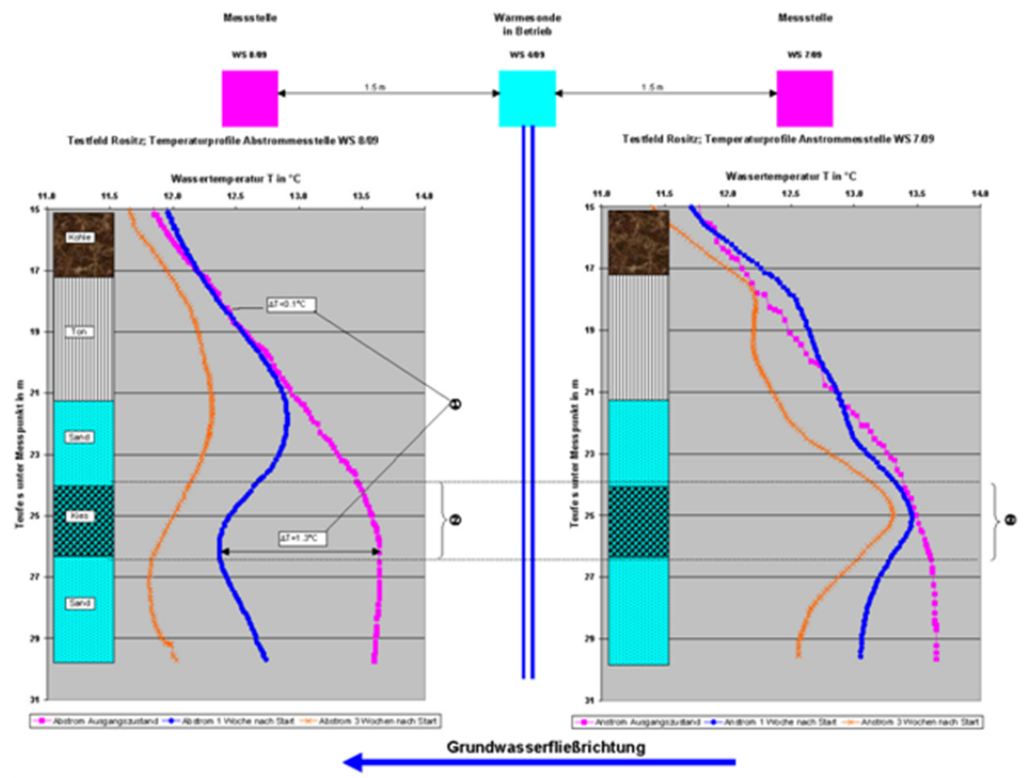

Abbildung 12: Temperaturtiefenprofile von WS 7/07 und WS 8/09

Seitens der FSU wurden in insgesamt 11 Probenahmenkampagnen die GWM des Testfeldes Rositz beprobt. Die Beprobungshäufigkeit der anderen GWM (insgesamt 6 große Kampagnen) variiert, v.a. auf Grund von witterungsbedingter Unzugänglichkeit und der Entsorgungssituation. Nach Beendigung des Wärmeentzugs im November 2010 wurde der bis dahin monatliche Probenahmezyklus umgestellt und mit einer kompletten Probenahmekampagne Ende März 2011 beendet

Die gewonnenen Proben wurden analytisch untersucht und ausgewertet. Die detaillierten Ergebnisse der Untersuchungen sind im Abschlussbericht der FSU dargestellt.

Die Wärmepumpenanlage wurde am Standort Rositz am 05.11.2010 planmäßig abgeschaltet und die bereits laufenden planerischen Arbeiten zur Fortsetzung der Untersuchungen am 2. Versuchsstandort Krumpa fortgesetzt.

5.2 Krumpa

5.2.1 Vertragliche Rahmenbedingungen

Eingehende Recherchen, Standortbegehungen und Probemessungen durch JENA-GEOS® hatten zu dem Ergebnis geführt, dass mit dem Standort Krumpa bei Braunsbedra, Landkreis Saalekreis, ein Versuchsstandort für die 2. Untersuchungsphase gefunden wurde, der die Anforderungen aller Partner des Verbundprojektes BIOGEOTHERMIE erfüllte und durch diese auch bestätigt wurde. Daraufhin wurden durch JENA-GEOS® mit dem Eigentümer der potentiellen Versuchsfläche, der MDSE Mitteldeutsche Sanierungs- und Entsorgungsgesellschaft mbH mit Sitz in 06749 Bitterfeld-Wolfen, Alu-Straße 1, Verhandlungen zur Erzielung eines Gestattungsvertrages durchgeführt. Die der MDSE vorgelegte Untersuchungskonzeption zum Standort Krumpa wurde bestätigt und der Gestattungsvertrag durch die MDSE am 11.11.2010 unterzeichnet.

In Vorbereitung des Feldversuches wurden durch JENA-GEOS® die mit dem Vorhaben verbundenen Maßnahmen bei den Behörden angezeigt (untere Wasserbehörde, Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt) sowie Schachterlaubnisse eingeholt und die Kampfmittelfreigabe erwirkt.

5.2.2 Lage, Historie, Geologie, Hydrogeologie

Das Untersuchungsgebiet befand sich in Sachsen-Anhalt zwischen den Ortschaften Krumpa im Westen und Braunsbedra im Osten. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Lage des Untersuchungsstandortes.

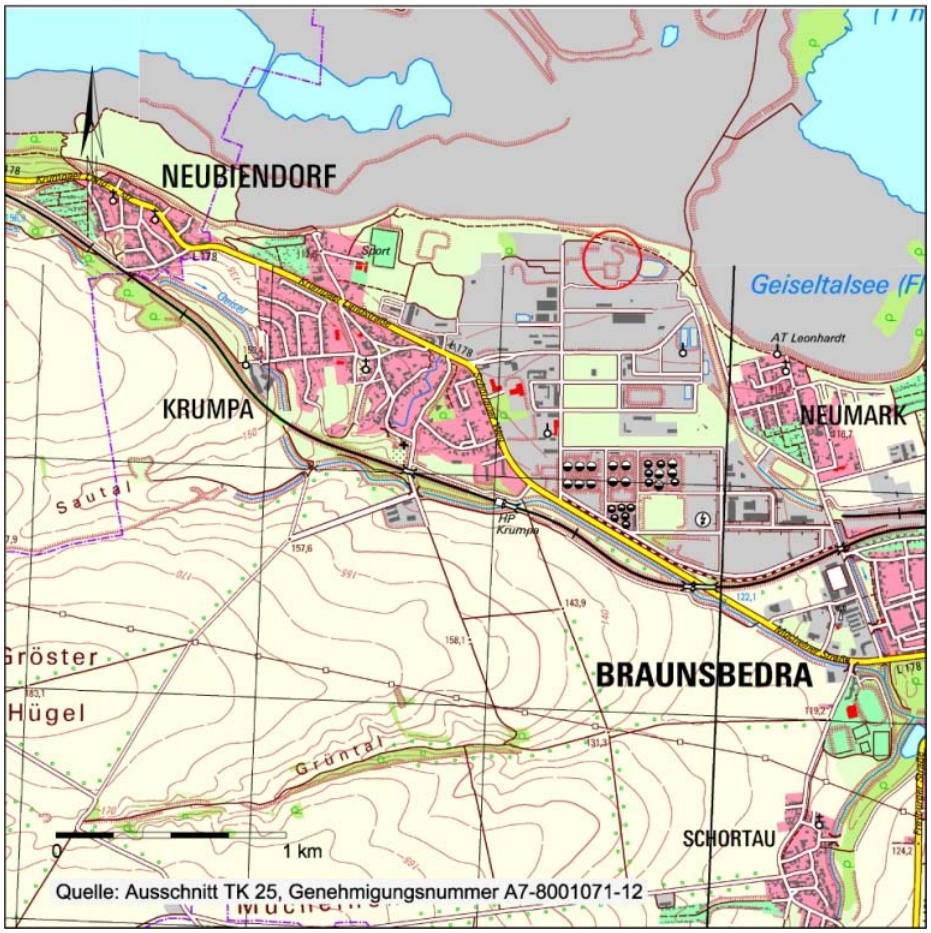

Abbildung 13: Lage des Untersuchungsstandortes am südlichen Rand des Geiseltalsees

Die industrielle Nutzung am Standort begann im Zeitraum mit der Errichtung eines Braunkohlenwerkes bis 1918. Ab 1936 wurde am Standort Treibstoff auf Kohlebasis produziert (Mineralölwerk Lützkendorf). Ein Jahr später folgte die Errichtung von Anlagen zur Produktion erdölstämmiger Schmierstoffe.

Der Untersuchungsstandort liegt im südlichen Randbereich des Geiseltalbeckens, in dem während des Tertiärs mächtige Braunkohleflöze entstanden. Das im Tertiär ausgebildete Geiseltalbecken verläuft von Ost nach West und grenzt im Süden an die Querfurter Mulde und im Norden an den Teutschenthaler Sattel.

Nachfolgende Übersicht gibt einen Überblick zum geologischen Normalprofil im Randbereich des Geiseltals.

Tabelle 2: Normalprofil für den Standortbereich [5]

Stratigrafie	**Lithologie**	**Hydrologie**	
		wesentliche Einheiten / Schichten HGSM 2011 hervorgehoben	
Anthropogen	Auffüllung / Bergbaukippen/ Abschwemmmassen	GWL0/ GWH	**Auffüllung / Kippe**
Holozän	Auelehm	GWH	
	Torfmudde / Beckenschluff		**Holozän**
Weichsel	Löß		
	Fließerde		
	Geiselschotter, lokal, kommuniziert mit GWL2	GWL0	
Eem	Torfmudde, Beckenton, lokal	GWH	
Saale-Komplex	Schmelzwassersande und -kiese	GWL1	**Glazifluviatiler Sand und Kies**
	Geschiebemergel	GWH	
	Bänderton		**Bänderton**
	Geschiebemergel mit Sandlinsen		**Geschiebemergel**
	Bänderton		
	Geisel / Unstrut Schotter mit eingelagerten Mudden und Schluffen	GWL2	**Hauptterrasse**
Eozän	Braunkohle	GWH	**Braunkohle**
	Sand	GWL3	**Kohleliegendsand**
	Ton, Schluff	GWH	**Kohleliegendton**
Trias	Mergelkalk, Dolomitmergel, Tonstein, Gips	GWL4	**Prätertiär**
	Kalkstein		

Die geologischen Verhältnisse und auch die hydrogeologische Situation sind durch die verschiedenen Ablagerungsvorgänge sehr kompliziert. Die Grundwasserfließrichtung ist nach Nordosten zur Vorflut (Geiseltalsee) gerichtet, wobei der Gradient bedingt durch die gegenwärtig betriebene Wasserhaltung nördlich/nördlich des Untersuchungsstandortes von Südwest nach Nordost stark ansteigt.

Die quartären Grundwasserleiter über der Braunkohle sind hydraulisch miteinander verbunden und werden als ein Modellgrundwasserleiter angesehen. Die Körbisdorfer Schichten zeichnen sich, entsprechend ihrer Genese, durch wechselnde Mächtigkeiten und unterschiedliche Zusammensetzung aus.

5.2.3 Grundwasserbefrachtungen mit organischen Verbindungen am Standort Krumpa

Die für die auf dem mikrobiologischen Schadstoffabbau beruhenden exothermen Reaktionen erforderlichen Stoffe (BTEX, MKW, Phenole, PAK) waren anstromig durch Stoffeinträge im Bereich des ehemaligen Mineralölwerkes Lützkendorf des gegeben.

5.2.4 Untersuchungskonzept am Standort Krumpa

Am Versuchsstandort Krumpa sollten die am Versuchsstandort Rositz gewonnenen Kenntnisse erweitert und verifiziert werden.

Der Standort Krumpa wurde unter anderem auf Grund der hohen Grundwasserfließgeschwindigkeit, die einen höheren Wärmeentzug sowie ein schnelleres Erreichen eines stationären Zustandes ermöglicht, sowie des hohen hydraulischen Gefälles ausgewählt. Dieses entsteht durch kontinuierliches Abpumpen des kontaminierten Grundwassers nördlich des Untersuchungsstandortes im Bereich der dort errichteten Dichtwand.

Das Untersuchungskonzept bestand im Wesentlichen aus den Planungen der durch die FSU Jena zur realisierenden hydraulischen, chemischen- und mikrobiologischen Grundwasseruntersuchungen an den neu zu errichtenden 10 GWM sowie an den bereits am Standort vorhandenen sowie den Konzepten der FH Schmalkalden hinsichtlich Instrumentierung und Durchführung von Messzyklen am Standort Krumpa.

Durch BOG sollten die 10 GWM sowie die geplante Wärmesonde fachtechnisch korrekt errichtet sowie einzelne Maßnahmen der Projektpartner - wie Aufbau und Einrichtung der Wärmeentzugsanlage - technisch unterstützt werden.

Die Aufgabenstellung von JENA-GEOS® bestand in der fachtechnischen Beratung sowie in der messtechnischen und koordinativen Unterstützung der Projektpartner in den einzelnen Untersuchungsphasen.

5.2.4.1 Konzept für Wärmepumpensteuerung

Entsprechend den Erfahrungen aus der Versuchsdurchführung am Standort Rositz wurde für den Standort Krumpa ein Konzept zum Betrieb der Wärmepumpe in Verbindung mit nur einer Entzugssonde entwickelt. Das Ziel dieses Konzeptes war es, eine Konfiguration zu finden, die ohne Einschränkung der Entzugs- und Messmöglichkeiten die Installation und den Betrieb der Wärmepumpe mit sehr niedrigen Kosten ermöglicht. Im Gegensatz zum

Standort Rositz war am Standort Krumpa ein Wärmeentzug im unmittelbaren Umfeld von Pegeln zum Erreichen des Untersuchungszieles nicht erforderlich.

Anstelle der am Standort Rositz realisierten 120 m-Gesamtentzugslänge (entspricht 4-Sonden-Parallelbetrieb) sollte nur noch eine Sonde mit etwa 15 m-Teufe betrieben werden. Zur Kompensation der „fehlenden“ 100 m Entzugslänge sollte ein wesentlicher Teil des Wärmeentzuges durch einen Wärmetauscher direkt aus dem Heizkreislauf erfolgen.

Damit jedoch die Wärmepumpe mit nur einer einzelnen Sonde betrieben werden konnte, war es aus technischen Gründen erforderlich, eine zusätzliche Wärmequelle zu schaffen Dazu kam ein zusätzlicher Lüfter zum Einsatz.

5.2.4.2 Messkonzepte

Um die Ausbreitung der Kältefahne im Erdreich messtechnisch durch die **FH Schmalkalden** möglichst genau erfassen zu können, sollte ein umfangreiches Messfeld errichtet. Dieses bestand aus 2 Beobachtungsebenen in Richtung des Grundwasserflusses.

Folgende Festlegungen für das Messfeld wurden daher getroffen:

- Anzahl der in einem ca. 20 m x 40 m großen Messfeld zu errichtenden GWM: 10
  - 2 GWM im Anstrom
  - 4 GWM im 1. Abstromprofil
  - 4 GWM im 2. Abstromprofil
- Ausbau der GWM als 3“ Messstellen
- Verfilterung ausschließlich im GWL-Bereich
- Mindestbohrlochdurchmesser: 178 mm
- Ausbaumaterial: PVC
- Filterkies: SiLibeads-Kugeln
- Gegenfilter: konventionelles Kiesmaterial
- geologisches Bohrziel: Braunkohleflöz
- Anzahl der zu errichtenden Erdwärmesonden: 1

Die nachfolgende Abbildung zeigt die konzipierte und so auch umgesetzte Versuchsanordnung am Standort Krumpa.

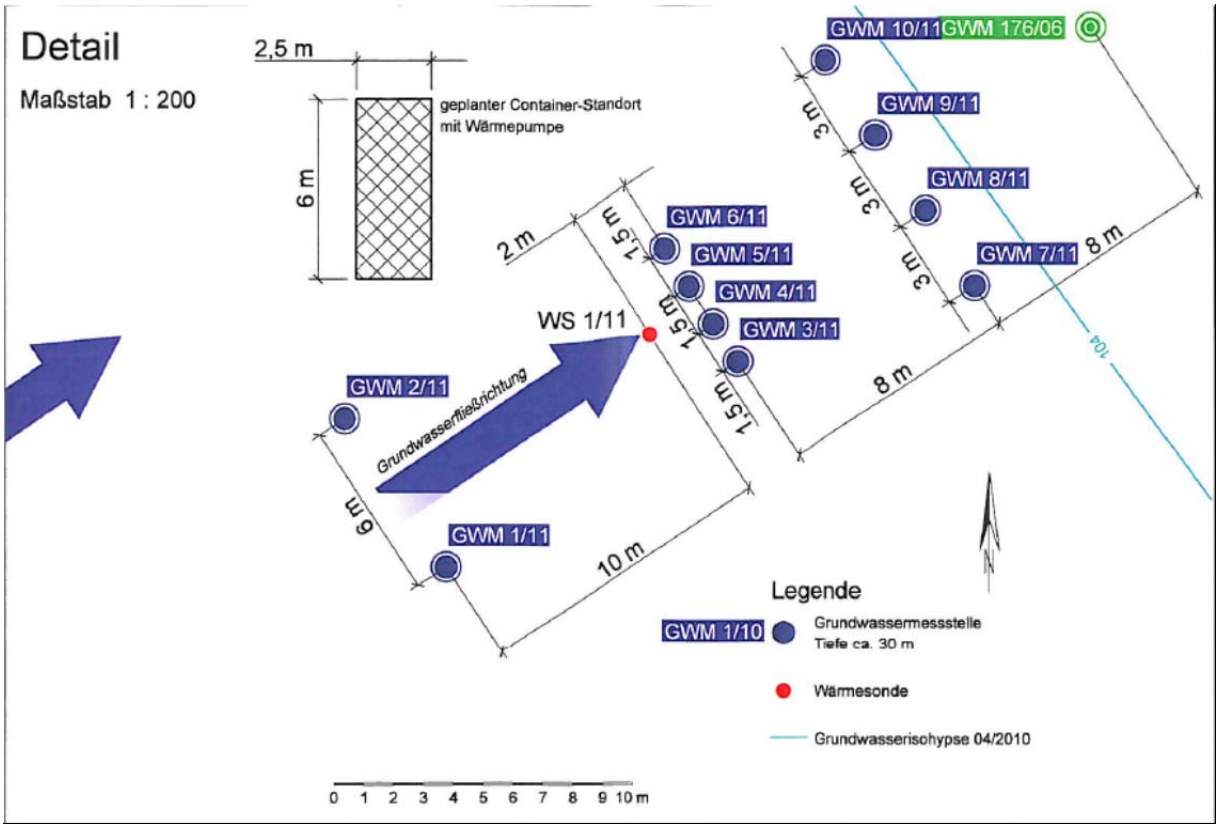

Abbildung 14: Versuchsanordnung am Standort Krumpa - Wärmesonde und Grundwassermessstellen (Messebenen)

Resultierend aus den Erfahrungen am Standort Rositz erfolgte zur Verbesserung der Messgenauigkeit die Messung der Vor-und Rücklauftemperaturen des Solekreises am Versuchsstandort Krumpa am Beginn des Grundwasserleiters 4 m unter der Geländeoberkante. Dazu wurden die PT100-Temperaturfühler direkt in die Sonde eingeführt.

Um den Wärmeentzug auf den Grundwasserbereich zu beschränken bzw. aus den Bodenschichten zu minimieren, wurde über dem Grundwasserspiegel eine Dämmung der Vor-und Rücklaufstränge der Erdwärmesonden durchgeführt.

Analog zum Monitoringprogramm am Standort Rositz, wurden die Testfeld-GWM, sowie Bestandsmessstellen (GWM 176/06, GWM 5/91, GWM 186/06) mit p-, T-Datensammlern durch die **FSU Jena** bestückt. Die GWM 4/11 wurde mit einer „Temperaturmesskette“ aus Absolutdrucksonden überwacht. Zusätzlich zu den Datensammlermessungen wurden regelmäßige Abstichsmessungen per Kabellichtlot durchgeführt.

Um einen trotz Isolierung der Erdwärmesonden möglichen Temperaturentzug aus der ungesättigten Zone quantifizieren zu können, wurden im Nahbereich (Abstand: 15 cm) der Erdwärmesonden sowie in größerem Abstand Bodentemperaturprofilsonden mit Datensammlern installiert. Die Profilsonden erfassten die Bodentemperaturen in 6 verschiedenen Teufen (5, 10, 20, 30, 50, 100 cm u. GOK). Zur standortspezifischen Erfassung der klimatischen Parameter Lufttemperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchte,

Windgeschwindigkeit, Solarstrahlung, wurde eine autarke, solarbetriebene Wetterstation am Versuchsstandort Krumpa errichtet.

5.2.4.3 Wärmetransportmodell

Parallel zu den in 5.1.4.1 und 5.1.4.2 dargelegten Maßnahmen sollte unter Einbeziehung sowohl historischer als auch während des laufenden Projektes erfasster Temperaturmesswerte an den Pegeln für das Gebiet ein Wärmetransportsystem entwickelt bzw. verifiziert werden.

Um genauere Modellaussagen gewinnen zu können, wurde die Versuchsanordnung gegenüber derjenigen vom Standort Rositz derart geändert, dass durch geeignete Platzierung der Vorlauf-und Rücklauftemperatursensoren der Entzug ausschließlich im Grundwasserleiter relativ genau bestimmt werden konnte und im Modell entsprechende Verwendung fand.

5.2.5 Projektentwicklung am Standort Krumpa

Ende Januar 2011 wurden die geplanten Bohrungen am Standort Krumpa verpflockt.
Da die Oberflächensondierung zur Kampfmittelfreigabe umfangreiche Metallablagerungen in der Auffüllung ergab, waren zur Abklärung der Situation Sondierungsbohrungen erforderlich In diesem Zusammenhang wurden neben der Durchführung von Oberflächensondierungsarbeiten 9 ca. 6 m tiefe Sondierungsbohrungen durch den beauftragten Kampfmitteldienst, die sächsische Kampfmittelbeseitigungsdienst GmbH, am Untersuchungsstandort ausgeführt. In deren Ergebnis konnte die Fläche für die geplanten Bohrarbeiten zur Errichtung von 10 GWM und einer WS mit Schreiben vom 10.02.2011 freigegeben werden.
Entsprechend der von JENA-GEOS® angezeigten Kontamination wurde ein sicherheits-technisches Konzept erarbeitet.

Anfang der 12. KW 2011 wurden durch BOG die Baustelle am Versuchsstandort Krumpa eingerichtet und die Bohrarbeiten am 24.03.2011 begonnen.

Da sich am Versuchsstandort Krumpa der Grundwasserleiter in einer Tiefe von ca. 4 m bis 12 m u. GOK befindet, wurde die Wärmesonde auch nur bis 12 m ausgebaut. Darüber hinaus wurde die Wärmesonde ab Geländeoberkante bis zum Grundwasserleiteransatz bestmöglich isoliert, um den Wärmeentzug auf den Grundwasserleiter zu beschränken.

Die fachtechnische Betreuung der Bohr- und Ausbauarbeiten einschließlich der Entnahme repräsentativer Bodenproben erfolgte durch JENA-GEOS®.

Abbildung 15: Bohrarbeiten am Standort Krumpa zur Errichtung von 10 GWM und 1 WS

Am 19.05.2011 wurde die Versuchsanlage in Krumpa durch die FH Schmalkalden in Betrieb genommen. In Krumpa wurde um einen stationären Zustand zu erreichen ein einzelner fortlaufender Wärmeentzug mit nur einer Wärmesonde (Rositz: 4 Wärmesonden mit Wärmeentzugs- und Relaxationsphasen) durchgeführt. Der Wärmeentzug dauerte bis zum 29.09.2011.

Dabei wurde im Rahmen des Versuchs am 08.06.2011 der Wärmeentzug von ca. 25 W/m auf ca. 60 W/m erhöht.

Am 14.06. wurde von der FSU eine Wetterstation am Standort eingerichtet und 2 Bodentemperatursonden (1x am Container, 1x in der Nähe der Wärmesonde) im Boden eingebaut.

Die nachfolgende Abbildung zeigt das fertiggestellte Versuchsfeld mit Container und Lüfter-Aufsatz sowie Wetterstation der FSU:

Abbildung 16: Versuchsanordnung am Standort Krumpa - Wärmesonde und Grundwassermessstellen, Wetterstation der FSU (links der Bildmitte)

Abbildung 17: Messeinrichtung in Krumpa mit neu installiertem Wärmetauscher (links hinten)

Abbildung 18: WS 1/11 (links) und GWM 3/11 bis 6/11

Während der Versuchsphase wurden durch die FSU Jena unregelmäßigen Abständen Stichtagsbeprobungen unter Verwendung eines Kabellichtlotes mit Temperatur- und Leitfähigkeitssensor durchgeführt.

Sowohl auf Grund der Standortbedingungen (Ölphasen, Sediment) als auch zur Vermeidung einer gegenseitigen Beeinflussung (Stoffverschleppung, Temperaturfeldverzerrung) der engen GWM-Messebenen wurde durch die FSU Jena auf die Probenahme mittels Tauchmotorpumpen verzichtet. Die Grundwasserprobenahme erfolgte bei minimaler Absenkung mittels Fußventilpumpen und Feldperistaltikpumpen. Auf diese Weise wurden die GWM im unmittelbaren Testfeld (2/11, 5/11, 4/11 und 9/11) sowie ausgewählte Bestandsmessstellen im An- (GWM 5/91) bzw. Abstrom (GWM 176/06) in das analytische Untersuchungsprogramm integriert.

Nach Beendigung dieser ersten Versuchphase, die mit dem vorläufigen Abschalten der Wärmepumpenanlage am 29.09.2011 endete, wurden die erzielten Messergebnisse simuliert und die sich anschließende Relaxationsphase beobachtet und ausgewertet.

Zur Verifizierung der vorliegenden Ergebnisse wurde es von der FSU für erforderlich erachtet, nach einer Relaxationsphase die Anlage für weitere ca. 4 Wochen erneut in Betrieb zu nehmen.

Die Versuchsanlage in Krumpa wurde daraufhin am 21.11.2011 wieder in Betrieb genommen und am 21.12.2011 planmäßig wieder abgeschaltet.

Durch JENA-GEOS® wurden im gesamten Versuchszeitraum neben Stichtagsmessungen an relevanten Grundwassermessstellen 5 Kampagnen zur Aufnahme von Temperatur-Tiefenprofilen durchgeführt und die Ergebnisse den Verbundpartnern zur Verfügung gestellt.

6 Untersuchungsergebnisse

6.1 Rositz

In dem ehemaligen Braunkohlentagebaugebiet wurden unter etwa 15 m mächtigem Auffüllungsmaterial (überwiegend Schluff, tonig, sandig, kiesig) bei den geologischen Arbeiten zur Errichtung der WS und der GWM 1/09 der für den Wärmeentzug relevante Grundwasserleiter 52 (überwiegend sandiger Kies/ kiesiger Sand) in Tiefen zwischen ca. 19 m u. GOK bis ca. 31 m u. GOK angetroffen. Darunter folgte verwitterter Buntsandstein. Als lokale Grundwasserfließrichtung wurde durch die FH Schmalkalden N30W ermittelt.

Die Grundwassertemperaturen im Untersuchungsgebiet lagen gegenüber Bereichen ohne Temperaturerhöhungen um ca. 4 K höher.

Durch Anfitten von Simulations- an die erzielten Messdaten gelang es der **FH Schmalkalden** die Höhenabhängigkeit der Porosität und der Grundwasserfließgeschwindigkeit sowie eine maximale Grundwasserfließgeschwindigkeit: 75 m/a für den Untersuchungsstandort zu ermitteln.

Auf der Grundlage dieser Basisdaten sowie der weiteren erzielten Messergebnisse wurde durch die FH Schmalkalden für den Standort Rositz ein 3-dimensionales Wärmetransportmodell entwickelt und eine Wärmeentstehungsrate von ca. 0,4 W/m² ermittelt. Dies entspricht einer Leistung von 400 kW pro km². Ein gemäß der aktuellen Forderungen der Energieeinsparverordnung errichtetes Einfamilienhaus, welches mit einer Sole-Wärmepumpe beheizt wird, entzieht während eines Jahres dem Boden ca. 7.000 kWh Wärme. Dies entspricht einer durchschnittlichen Entzugsleistung von ca. 800 W.

Somit entsteht auf einer Fläche von 1 km² kontinuierlich so viel Wärme, wie für die Beheizung von 500 Einfamilienhäusern nötig ist. Diese könnten dann nachhaltig, ohne dass eine starke Abkühlung des Erdreiches um die Entzugssonden erfolgt, beheizt werden.

Da die Grundwassertemperaturen am Standort Rositz gegenüber der normalen Temperatur von ca. 9 °C um 3 bis 4 K erhöht sind, können in Rositz mittels 30 m langer Sonden bei einer Entzugsleistung bis zu 67 W/m entzogen werden. Dies entspricht auf einer Fläche von 1 km² bereits ca. 6 GWh^2. Demgegenüber könnten an einem Vergleichsstandort ohne thermische Anomalie maximal 46 W/m als höchstes Tagesmittel entzogen werden, ohne dass es zur Vereisung der Wärmesonden kommt.

Selbst ohne den andauernden exothermen mikrobiologischen Abbau könnten auf einer Fläche von 1 km² die 500 Einfamilienhäuser damit 16 Jahre beheizt werden. Erst danach wäre die durchschnittliche Grundwassertemperatur auf dem Niveau eines Standortes ohne Temperaturanomalie.

Das am Standort Rositz vermutete erhöhte Wärmeentzugspotenzial mit den kontaminationsbedingt erhöhten Grundwassertemperaturen konnte durch die Untersuchungen der FH Schmalkalden bestätigt und quantifiziert werden.

Die durch die **FSU Jena** durchgeführten Untersuchungen erbrachten das Ergebnis, dass die erzielten Messreihen der Temperaturaufzeichnungen quasi-konstante Werte zeigen. Im GWL 52 sind kaum Dynamik und kein saisonaler Einfluss auf die Grundwassertemperatur feststellbar. Die Wärmeanomalie im-GWL 52 ist als stationär zu betrachten.

Die mikrobiologische Charakterisierung der Testfeld GWM erfolgte an Hand einer Probenahme, jedoch durch aufwendige und leistungsstarke Methoden. Diese Vorgehensweise trug der Erkenntnis Rechnung, das der Messstellen /EWS Bau einen wesentlichen Einfluss auf die Beschaffenheit des Grundwassers hat und dadurch keine vergleichbaren Biozönosen im und außerhalb des Einflussbereiches der thermischen Nutzung beprobt werden konnten.

Der Einfluss des Testbetriebes auf die physikalischen und hydrogeochemischen Eigenschaften des GW wurde durch die FSU Jena mittels Datenloggern und Grundwasserprobenahmen an den GWM 1/09 und GWM 209/92 untersucht.

Im Versuchsverlauf wurden keine Hinweise auf thermisch induzierte Effekte auf DOC, DIC, PAK-und MKW-Summen in der neu errichteten GWM1/09 nachgewiesen.

Durch die im vorgegebenen zeitlichen Rahmen durchgeführten Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die chemisch-physikalischen Grundwasser-beschaffenheitsparameter im Umfeld des Wärmeentzuges vor dem Hintergrund des realisierten Wärmeentzugs keine generellen Auswirkungen auf die Grundwasserbeschaffenheit anzeigten.

6.2 Krumpa

Der für den Wärmeentzug am Versuchsstandort Krumpa relevante Grundwasserleiter (bestehend aus den hydraulisch miteinander verbundenen GWL 1 und GWL 2) wurde bei den Bohrarbeiten zur Errichtung der 10 GWM und der WS 1/11 in einer Tiefe von ca. 4 m (bis 4 m u. GOK Auffüllung) u. GOK bis ca. 12 m u. GOK angetroffen. Darunter folgte Braunkohle Als lokale Grundwasserfließrichtung wurde durch die FH Schmalkalden N75O ermittelt und neben den anderen relevanten geologisch-hydrogeologischen Basisdaten für die Entwicklung/ Simulation des Wärmetransportmodells als Grundlage verwendet.

Die Grundwassertemperaturen im Untersuchungsgebiet lagen gegenüber Bereichen ohne Temperaturerhöhungen um ca. 3 - 3,5 K höher.

Wie bereits für den Standort Rositz konnten durch die FH Schmalkalden mittels Anfitten von Simulations - an die erzielten Messdaten die Höhenabhängigkeit der Porosität und der Grundwasserfließgeschwindigkeit nachgewiesen werden. Für den Standort Krumpa wurde eine maximale Grundwasserfließgeschwindigkeit: von 400 m/a bestimmt.

Am Standort Krumpa zeigte sich deutlich, dass die Entzugsleistung tageszeitlichen Schwankungen unterliegt. Diese Schwankungen sind im Wesentlichen durch die jeweils herrschenden unterschiedlichen Lufttemperaturen bzw. den Versuchsaufbau zu erklären. Je kälter es war, umso weniger Wärme wurde durch die im Container liegenden Rohrsysteme

aufgenommen und umso mehr Wärme dem Boden entzogen. Insgesamt wurde eine mittlere Entzugsleistung von ca. 0,3 kW erzielt.

Die Wärmesondenlänge im Grundwasserleiter am Standort Krumpa beträgt 8 m. Somit wurde in Krumpa eine durchschnittliche Entzugsleistung bezogen auf die Wärmesondenlänge von ca. 35…40 W/m realisiert.

Wie bereits erwähnt wurden durch JENA-GEOS® in mehreren Kampagnen Temperatur-Tiefenprofile von ausgewählten GWM erstellt. Dies geschah auch am Ende (26.09.2011 – siehe Abbildung 19) der vom 19.05.2011 bis 29.09.2011 dauernden Wärme-Entzugsphase.

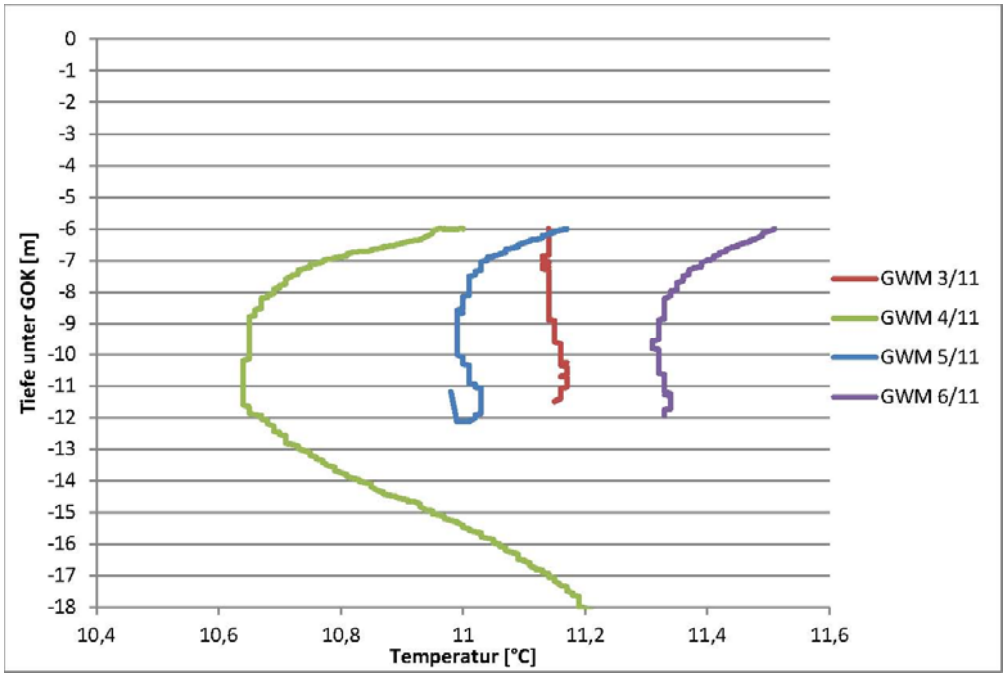

Abbildung 19: Temperaturtiefenprofile GWM 3/11 bis 6/11 am 26.09.2011

Aus den Tiefenprofilen (insbesondere GWM 4/11) lässt sich ablesen, dass die größten Grundwasserfließgeschwindigkeiten im Bereich zwischen 9 m und 11 m unter Geländeoberkante zu verzeichnen waren. Zudem ist die Beeinflussung der Messstelle 4/11 durch die von der WS 1/11 ausgehenden Kältefahne deutlich höher als die der unmittelbar benachbart gelegenen Messstelle 5/11.

Entsprechend den Modellierungen der FH Schmalkalden können im Bereich des Versuchsstandortes Krumpa bei einer zugrunde gelegten mittleren Temperaturüberhöhung des Grundwasserleiters von 3 K mittels 14 m langer Wärmesonden bei üblicher jahreszeitlich abhängiger Entzugsleistung im Grundwasserleiter bis zu 160 W/m gegenüber 120 W/m bei einem Vergleichsstandort ohne thermischer Anomalie als höchstes Tagesmittel entzogen werden. Bei dieser Vorgehensweise sind keine Vereisungen der Wärmesonden zu erwarten.

Am zweiten Projektstandort Krumpa konnten die Teilprojektziele – Testfeld-/Messnetzeinrichtung, Standortcharakterisierung und begleitendes Monitoring erreicht werden. Der methodische Aufwand und das umgesetzte Testfeldkonzept waren prinzipiell geeignet den kleinräumigen Entzug zu erfassen und die zentrale Fragestellung des F+E-Projektes bzgl. des Einflusses der thermischen Nutzung auf die hydrogeochemische und mikrobiologische GwBeschaffenheit am Altstandort, zu beantworten. Im oberflächennahen Ziel-GWL wurde eine instationäre Wärmeanomalie beobachtet, wobei das Testfeld in einem lokalen Minimum einer kontaminationsbedingten Gebietswärmeanomalie errichtet wurde. Bzgl. der angetroffenen Ölphasen und durchteuften Kohleflözen, erwies sich die Standort¬wahl als ungünstig. Die Beobachtungen zeigen, dass der Bau der Testanlage (inkl. Stofffreisetzung, Mobilisierung) am Projektstandort Krumpa einen erheblichen Eingriff in das Öko-und hydrogeo¬chemische System des GWL darstellte. Die Bestimmung der hydrogeochemischen Beschaffenheit war erschwert und aufgrund der angetroffenen Situation nur suboptimal zu realisieren. Unvermeidbare Standortbedingungen wie sinkende Wasserspiegel und saisonale Temperaturschwankungen wirkten sich auf die eindeutige Beobachtbarkeit der Effekte der thermischen Nutzung während des möglichen Versuchs-und Monitoringszeitrahmens aus. Die bewirkte Temperaturveränderung in den Beobachtungsmessstellen (>1 K, GWM 4/11) durch den Wärmeentzug lag unter den natürlichen Temperaturschwankungen im Jahresverlauf. Die chemisch-physikalischen GwBeschaffenheitsparameter zeigten vor dem Hintergrund der infolge Testfeldbaus herbeigeführten Störungen keine eindeutigen Auswirkungen durch die thermische Nutzung. Ein langanhaltender Wärmeentzug konnte im limitierten Projektzeitraum nicht bewerk¬stelligt werden. Der Einfluss langfristiger Temperaturabsenkung auf die hydrogeochemische und mikrobiologische Beschaffenheit konnte nicht überprüft werden. Zur Überwachung der mittel¬fristigen Entwicklung der GwBeschaffenheit in den neu errichteten GWM, deren Bau ebenfalls eine Störung des stofflichen und anaeroben, mikrobiellen Milieus darstellte, sollten die mit inertem Filtermaterial ausgebauten Testfeldmessstellen längerfristig erhalten bleiben. Laut Projekt¬koordinator bestand jedoch seitens des Flächeneigentümers kein Interesse am Erhalt. Die Messstellen wurden durch den Projektpartner zurückgebaut.

6.3 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse

An den Versuchsstandorten in Thüringen (ehemaliges Teerverarbeitungswerk Rositz/ Aschehalde Fichtenhainichen) und Sachsen-Anhalt (ehemaliges Mineralölwerk Lützkendorf Krumpa in Krumpa) konnten im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen an mit organischen Stoffen kontaminierten Grundwasserleitern biogene Wärmeanomalien untersucht werden.

Die sowohl am Standort Rositz als auch am Standort Krumpa erzielten Forschungsergebnisse belegen, dass Gebäude, die auf diesen bzw. analogen kontaminierten Standorten mit thermischer Anomalie und fließendem Grundwasser errichtetet wurden, kostengünstig durch den Einbau von Wärmepumpen in Verbindung mit Wärmeentzugssonden mit Wärme versorgt werden können.

Damit sind neben der Nutzbarmachung des bislang nicht berücksichtigten Energiepotenzials „BIOGEOTHERMIE“ für die standort-autarke Wärmeversorgung sowie z. B. im Zusammenhang mit Revitalisierungsmaßnahmen von industriellen Brachflächen bessere Nutzungsoptionen gegeben, da diese Brachflächen nunmehr effizienter in gewerblich genutzte Flächen umgewandelt werden können. Hinzu kommt, dass die Versiegelung von Grünland vermieden werden kann.

Wie an einem Beispiel durch die FH Schmalkalden ermittelt, könnte in Abhängigkeit von der erreichbaren Jahresarbeitszahl eine CO_2 Einsparung bis zu 9,4 t CO_2/a erreicht werden. Bei einem angenommenen Versorgungsszenario einer Produktionshalle wurde eine Reduzierung der CO2-Emissionen um bis zu 65 kg/MWh prognostiziert.

Obwohl die ursprünglich als Voraussetzung für einen ökonomisch sinnvollen Wärmeentzug anvisierte Temperaturdifferenz von 5 K an beiden Versuchsstandorten nach Aufnahme der Versuchsmessungen nicht bestätigt werden konnte und lediglich bei ca. 3 K – 4 K lag, zeigte es sich doch, dass die maximale Entzugsrate und die Entzugskapazität für Wärmeentzugssonden bei kontaminierten Standorten mit thermischer Anomalie deutlich höher als ohne thermische Anomalie sind. Damit ist die Wärme mit höherer Effizienz über ein Wärmepumpenversorgungssystem nutzbar. Die Hauptursache der Effizienzerhöhung ist die Möglichkeit bei höherer Entzugsleistung die Anzahl der Sonden zu reduzieren. Weiterhin ist in diesem Zusammenhang relevant, dass die Wärmeentzugssonden nachhaltig (ohne Vereisung) betrieben werden können. Damit kann eine Langzeitversorgungssicherheit gewährleistet werden.

Ein weiteres Ergebnis der Untersuchungen ist, dass die Grundwassertemperaturabsenkung im Abstrom im Regelfall auf wenige Kelvin begrenzt werden kann, um den mikrobiologischen Abbauprozess nicht zu gefährden bzw. aufrecht zu erhalten.

Die Auswertung der geochemischen und mikrobiologischen Untersuchungen vor dem Hintergrund der erfassten natürlichen Heterogenität beider Projektstandorte ergab, dass für den jeweils an den Versuchsstandorten realisierten Wärmepumpenbetrieb keine kurzfristigen Veränderungen der hydrogeochemischen und methodisch erfassten mikrobiologischen Beschaffenheit durch die thermische Nutzung ermittelt werden konnten.

7 Ausblick

7.1 Genehmigungsfähigkeit

Entsprechend den Untersuchungsergebnissen wird die Genehmigungsfähigkeit der Biogeothermie-Anlagen in Erfahrung mit vergleichbaren Geothermieprojekten an Altlastenstandorten als gut bis sehr gut eingeschätzt.

Gründe dafür sind:

- Biogeothermie-Anlagen erschließen eine von Witterung und Jahreszeit weitgehend unabhängige und kostengünstige Energiequelle zur Erzeugung von Heizwärme.
- Es erfolgt die Nutzung der ohnehin freiwerdenden Energie bei gleichzeitiger Wiederherstellung normaler Grundwassertemperaturverhältnisse und Verhinderung der weiteren Erwärmung des Grundwassers im Abstrom der mikrobiologisch aktiven Bereiche
- Biogeothermie-Anlagen tragen durch Substitution fossiler Energieträger indirekt zur Reduzierung von CO_2-Emissionen bei.
- Die Energienutzung erfolgt ausschließlich mit geschlossenen Systemen (z.B. Erdsonden) ohne Beeinflussung der hydrodynamischen Verhältnisse.

7.2 Wirtschaftlichkeit

Grundsätzlich sind beim Betrieb einer Wärmepumpe in einem kontaminierten Gebiet mit thermischer Anomalie zwei Betriebsweisen denkbar, um eine erhöhte Wirtschaftlichkeit hinsichtlich des Wärmepreises zu erzielen:

a) Gleiche Entzugsleistung je Sonde bei höherem Temperaturniveau und gleicher Sondenanzahl: Dadurch erhöht sich die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe und es reduzieren sich der Strombedarf und die Stromkosten.
b) Erhöhung der Entzugsleistung pro Sonde durch Ausnutzung der vollen Temperaturspreizung: Dadurch reduzieren sich der Bedarf an Sondenlänge/-anzahl und somit die Investitions-/Kapitalkosten.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für die beiden Untersuchungsstandorte Rositz und Krumpa erbrachten positive Ergebnisse:

So wurden durch die FH Schmalkalden für ein gewerbliches Referenzgebäude von 2000 m² BGF (Bruttogrundfläche) vergleichende Wirtschaftlichkeitsrechnungen durchgeführt. Der wirtschaftliche Vorteil in Bezug auf den erzielbaren Wärmepreis wurde für beide Standorte wie folgt bestimmt:

- Je 1 Kelvin Temperaturerhöhung des Grundwasser senkt den Wärmepreis für gewerbliche Versorgungsobjekte von ca. 2000 m² BGF um ca. 0,3 … 0,4 ct/kWh

Bei kleineren Versorgungsobjekten mit teilweise geänderter Nutzungsstruktur, z.B. ein Einfamilienhaus, reduziert sich der wirtschaftliche Vorteil auf Grund des sinkenden Anteils

des Wärmesondenpreises in Bezug auf die Gesamtkosten der Wärmeversorgungsanlage geringfügig, wie folgt:

- Je 1 Kelvin Temperaturerhöhung des Grundwasser senkt den Wärmepreis für Wohnobjekte von ca. 120 m² BGF um ca. 0,2 … 0,35 ct/kWh

Bei nachhaltigem Betrieb der Wärmesonden, d.h. Vermeidung von Vereisung, bringt die volle Ausnutzung der Temperaturspreizung und damit die Reduzierung der erforderlichen Anzahl von Entzugssonden den größeren wirtschaftlichen Vorteil.

7.3 Übertragbarkeit der Ergebnisse/ Vermarktung

Aus den verschiedenen Bundesländern sind weitere Standorte bekannt, bei denen analog den untersuchten Objekten mit einem hohen biogeothermischen Potenzial zu rechnen ist und gleichzeitig die Randbedingung einer geringen Entfernung zu potenziellen Nutzern von Geothermieenergie vorliegt (z. B. Thüringen: ehemaliger VEB Verfahrenstechnik in Erfurt; MKW-Kontamination im Grundwasser; Grundwassertemperatur bis 14,3 °C).

An anderen Standorten vergleichbare hydrogeologische, anthropogeochemische und infrastrukturelle Randbedingungen sprechen für eine Übertragbarkeit des an den Versuchsstandorten Rositz und Krumpa entwickelnden ingenieurtechnischen Kenntnisstandes zur Nutzung des dortigen biogeothermischen Potenzials.

Für neue bzw. weiterentwickelte Anlagenvarianten werden ebenfalls gute Möglichkeiten der Übertragbarkeit auf folgende Bereiche gesehen:

- Nutzung der Abwärme im Grundwasserabstrom von Hausmülldeponien, Bergehalden, Aschedeponien und anderen als langfristige Wärmequelle wirkenden Ablagerungen (z. B. Steinkohlehalden in Zwickau/Oelsnitz, Halde im Lugau/Oelsnitzer Revier)
- Nutzung der anthropogen bedingten Wärmeanomalien im Grundwasserabstrom größerer Städte (z. B. Leipzig, Dresden, München, Berlin, Köln).
- Möglichkeiten der direkten Nutzung der Wärmeenergie ohne Wärmepumpe

  In Abhängigkeit von den Bedürfnissen des Nutzers der Wärmeenergie ist gegebenenfalls auch eine direkte Wärmenutzung ohne Zwischenschaltung einer Wärmepumpe möglich. Als Beispiele für derartige Anwendungen seien die Frostsicherung technischer Anlagen und die Heizung von Gewächshäusern genannt.
- Hinsichtlich der Vermarktung sind auch Entwicklungen von speziell auf die Ausnutzung von Wärmeanomalien in oberflächennahen Grundwasserleitern ausgelegte Wärmesonden (z. B. Horizontalsonden) denkbar.

Ökonomisch sinnvoll ist die räumliche Nähe zwischen der als Energiequelle genutzten Wärmeanomalie des Grundwassers sowohl bezogen auf das Gewerbegebiet Rositz als auch das am Geiseltalsee in Krumpa angesiedelte Gewerbe als potenzielle Abnehmer der Wärmeenergie. Es handelt sich dabei um einen Standortvorteil der charakteristisch für viele

als Gewerbe.- bzw. Industriegebiet nachgenutzte Standorte der carbochemischen Industrie ist, in deren Untergrund sich durch mikrobiologische Abbauprozesses erwärmte Grundwasser befindet.

Auf Grund des Nachweises der ökonomischen Effizienz der Wärmenutzung auch bei Grundwassertemperaturen, deren Anomalie < 5 K gegenüber den Umgebungstemperaturen ist, kann mit der autarken kostengünstigen Wärmenutzung das jeweilige Grundstück eine Aufwertung erfahren.