Ingo Schäfer

Wärmebergbau - Tiefe Geothermie im Ruhrgebiet

Im Untergrund des Ruhrgebietes schlummert ein wertvolles Potenzial: Erdwärme – geothermische Energie. Jeder, der schon mal in ein Steinkohlebergwerk eingefahren ist, konnte die geothermische Wärme mit zunehmender Tiefe am eigenen Körper spüren. Während in den ersten 15 bis 20 Metern Tiefe das Temperaturregime noch abhängig von den Jahreszeiten ist und durch die Sonneneinstrahlung sowie durch Niederschlags- und Grundwasser beeinflusst wird, nimmt darunter die Temperatur kontinuierlich um ca. 3 °C pro 100 m Tiefe zu. Diese Temperaturzunahme mit der Tiefe wird als „geothermischer Gradient“ bezeichnet. Die Metropole Ruhr ist als hochindustrialisierter und sich im Strukturwandel befindlicher Ballungsraum in besonderem Maße auf eine sichere und gleichzeitig umweltfreundliche Energieversorgung angewiesen. Zur Erreichung dieses Ziels können die regenerativen Energien einen bedeutenden Beitrag leisten. Die Geothermie ist schon heute neben „Wind, Sonne, Biomasse“ unverzichtbar. Wo einst Steinkohle gefördert wurde, wird heute bereits Erdwärme gefördert.

Regenerative Energie „Erdwärme“

Die Nutzung der Erdwärme hat eine lange Geschichte, sie gewinnt aber erst in neuerer Zeit aufgrund zunehmender Energieknappheit der fossilen Energieträger an Bedeutung. Im Jahr 1913 gelang es Piero Ginori Conti im toskanischen Ort Larderello erstmals, heißes Wasser aus dem Erdinneren für die Stromerzeugung zu nutzen. Heute steht dort eines der größten Geothermiekraftwerke Europas, welches jährlich ungefähr 700 Megawatt in das italienische Energienetz einspeist. Etwa 99 % unseres Planeten sind heißer als 1000 °C (Abb. 1).

Der Erdkern ist, verschiedenen Schätzungen zufolge, 4800 °C bis 7700 °C heiß. Durch das starke Temperaturgefälle zwischen Erdinnerem und Erdoberfläche wird Erdwärme ständig aus der Tiefe nachgeliefert. Als Ursprung für die geothermische Energie kön-

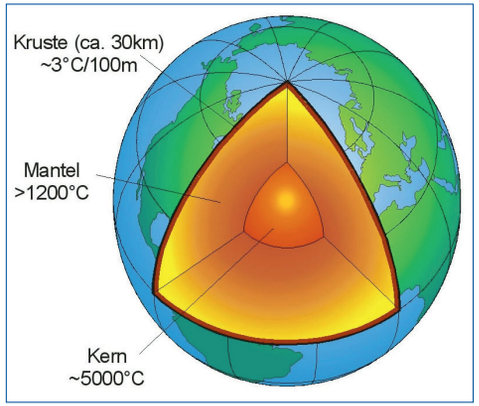

Abb.1: Schnitt durch die Erde
(Quelle: Geologischer Dienst NRW)

nen zwei Hauptquellen ausgemacht werden; zu ca. 30 % stammt die Wärmeenergie aus der Restwärme der Erdentstehung und zu ca.

70 % aus dem Zerfall radioaktiver Elemente.

Diese Zerfallsprozesse werden noch Millionen Jahre lang thermische Energie erzeugen. Damit gehört Erdwärme zu den regenerativen Energiequellen, die im Gegensatz zu den anderen regenerativen Energien fast überall und jederzeit zur Verfügung stehen, unabhängig vom Klima und von der Jahres- und Tageszeit. Dieser geothermische Wärmefluss beträgt im Ruhrgebiet rund 60–80 mW/m². Bezogen auf eine Fläche von der Größe eines Fußballfeldes entspricht dies lediglich dem Energieverbrauch von rund zehn 50-Watt-Glühbirnen. Erschließt man jedoch den Untergrund über Bohrungen und entzieht dem Untergrund aktiv die Wärme, sind die technischen Möglichkeiten der Erdwärmenutzung vielfältig. Sie reichen von der Versorgung einzelner Einfamilienhäuser mittels der oberflächennahen Erdwärme bis hin zur Gewinnung von Temperaturen deutlich über 100 °C aus Tiefen bis 5000 m zur Versorgung großer Energieabnehmer mit Wärme und Strom durch Tiefengeothermie.

Wärmebergbau

Während Erdwärme aus dem oberflächennahen Untergrund bereits vielerorts von Hausbesitzern zur Wärmeversorgung erfolgreich eingesetzt wird, werden die heißen Gesteinsschichten aus großen Tiefen zurzeit noch sehr selten genutzt. Dies hängt unter anderem damit zusammen, dass mit zunehmender Tiefe die Aussagesicherheit über den Untergrund abnimmt und gleichzeitig das Fündigkeits- und Bohrrisiko steigt.

Um Potenziale für eine tiefengeothermische Nutzung nutzbar zu machen, hat der Geologische Dienst NRW für das gesamte Ruhrgebiet ein geologisches 3D-Modell bis zu 5.000 m Tiefe entwickelt. Ferner wurden für das Modell geothermische Parameter erhoben und die Erdwärmetemperaturen berechnet. So werden in 5 km Tiefe Temperaturen bis zu 175 °C erwartet. Die Potenziale zur Tiefengeothermie in NRW sind nicht unerheblich und beinhalten insbesondere auch Bereiche, die in der Zukunft für die Nutzung der Tiefengeothermie geeignet erscheinen.

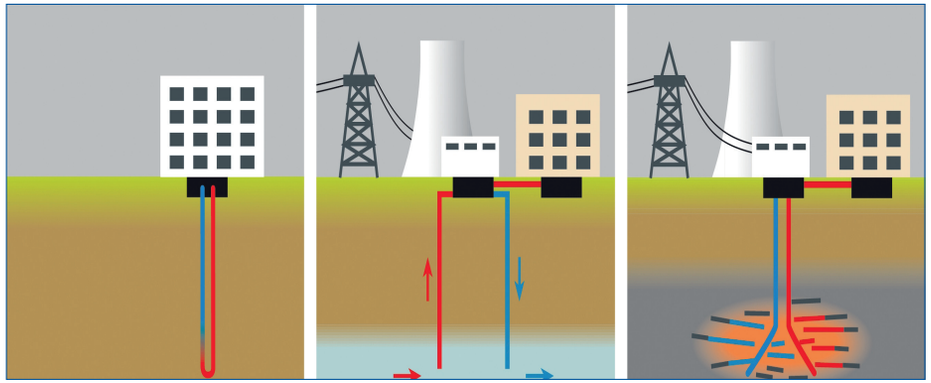

Abb. 2: Nutzung der Geothermie durch petrothermische Systeme (links), hydrothermische Nutzung (Mitte) und EGS (rechts) (Quelle: Geologischer Dienst NRW)

Die kommerzielle tiefengeothermische Energiegewinnung ist in Deutschland derzeit auf Sedimentformationen ausgerichtet, die als „Warm- oder Heißwasseraquifere“ ausreichend hohe Fließraten aufweisen. Regionen, die diese geologischen Bedingungen erfüllen, sind im Oberrheintal, im Süddeutschen Molassebecken sowie im Norddeutschen Becken zu finden. Bei der Gewinnung der Erdwärme können drei geothermische Lagerstättensysteme unterschieden werden, die hier kurz beschrieben werden (Abb. 2).

Hydrothermale Systeme sind Heißwasser führende Schichten (Aquifere) in der Tiefe, die von Natur eine gute Wasserdurchgängigkeit (Permeabilität) aufweisen. Entscheidend für den wirtschaftlichen Betrieb dieser hydrothermalen Systeme ist neben der Temperatur des Aquifers die zu erzielende Förderrate; aus Wirtschaftlichkeitsgründen wird oft eine Heißwasserproduktion von mindestens 100 m³/h gefordert. Während eine bestimmte Temperatur bei einer entsprechenden Bohrtiefe immer zu erreichen ist, schränkt die zweite Bedingung die Zahl möglicher Standorte erheblich ein, da wegen zu niedriger Aquiferdurchlässigkeit eine zu geringe Thermalwasserproduktion stattfindet. Daher birgt die Erschließung solcher Heißwasseraquifere vor allem ein Fündigkeitsrisiko.

Petrothermale Systeme hingegen sind nicht an Wasser führende Formationen im Untergrund gebunden. Neben den Regionen, die für hydrothermale Systeme geeignet sind, ist das gesamte Grundgebirge in Deutschland petrothermal nutzbar. Etwa 95 % des geothermischen Energiepotenzials sind mit dieser Technologie standortunabhängig erschließbar. Die im Gestein vorhandene Wärme, die im Mittel mit 3 °C pro 100 m Tiefe zunimmt, wird über geschlossene oder künstlich geschaffene, offene Systeme erschlossen.

Störungszonen besitzen ein großes Potenzial als geothermische Reservoire, weil sie natürliche Wasserwegsamkeiten bieten können, die in große Tiefen reichen. Störungszonen verbinden auch auf natürliche Weise Aquifere in unterschiedlichen Tiefenlagen miteinander. Bei den bekannten Thermalwasseraustritten, die über Bohrungen bzw. Brunnen gefasst sind und zu balneologischen Zwecken genutzt werden, handelt es sich z. T. um Tiefenwässer, die auf Störungszonen bis zur Erdoberfläche aufsteigen und dort genutzt werden. Auf diesem Gebiet sind Grundlagenarbeiten bei der Vorplanung und der Aussage zu hydraulischen Eigenschaften von Störungssystemen notwendig.

Enhanced-Geothermal-Systems-Technologien (EGS) stellen die Summe der ingenieurtechnischen Maßnahmen dar, die zum Lösen der Wärme und zur Optimierung der Erschließung der geothermischen Lagerstättensysteme erforderlich sein können. Mit Hydraulic-Fracturing sind z.B. Methoden verfügbar, mit denen künstlich eine höhere hydraulische Durchlässigkeit in gering permeablen Gesteinen hergestellt werden können. Der Einsatz dieser Techniken wird weiter erforscht. Große geothermische Ressourcen, die unter derzeitigen technisch-wirtschaftlichen Bedingungen noch nicht kommerziell genutzt werden, denen aber ein großes Potenzial zugesprochen wird, sind in tiefen Kristallingesteinen sowie in Bereichen mit tiefreichenden Störungszonen zu finden.

Geothermisches Modell „Ruhrgebiet“

Voraussetzung für die zukünftige Nutzung geothermischer Energie im Ruhrgebiet ist in jedem Fall eine fundierte Kenntnis über den geologischen Aufbau des Untergrundes und der vorherrschenden Untergrundtemperaturen. Deshalb erarbeitete der Geologische Dienst Nordrhein-Westfalen (GD NRW) im Rahmen der Geothermie-Studie „Ruhrgebiet“ geologische und geothermische Grundlagendaten bis zu einer realistischen Nutzungstiefe von etwa 5.000 m.

Hauptanliegen des Modells ist eine auf einer detaillierten Bewertung des geologischen Untergrundaufbaus basierende Analyse der geothermischen Potenziale für das Ruhrgebiet und Teile des angrenzenden Niederrheins (Abb. 3).

In einem ersten Schritt wurden alle Angaben zu Verbreitung, Tiefenlage und Mächtigkeit der einzelnen geologischen Einheiten sowie zu ihren geothermisch relevanten Eigenschaften gesichtet, bewertet, teilweise neu interpretiert und abschließend einheitlich dargestellt. Bis zu einer Tiefe bis ca. 2.000 m wurde auf Karten, Gutachten unterschiedlichster Herkunft und auf Schichtenverzeichnisse vorhandener Bohrungen zurückgegriffen. Unterhalb von 2000 Metern wurden unter Berücksichtigung der Paläogeografie und der Tektonik neue geologische Modellvorstellungen entwickelt.

In Tab. 1 werden die bis zur realistischen Nutzungstiefe von 5000 m vorkommenden geologischen Formationen dargestellt. Sie reichen vom Quartär bis zum Devon.

Sämtliche geologischen Informationen zu den einzelnen geothermisch relevanten Einheiten wurden aufwändig in einem geologischen 3D-Modell des Ruhrgebietes zusammengeführt (Abb. 4).

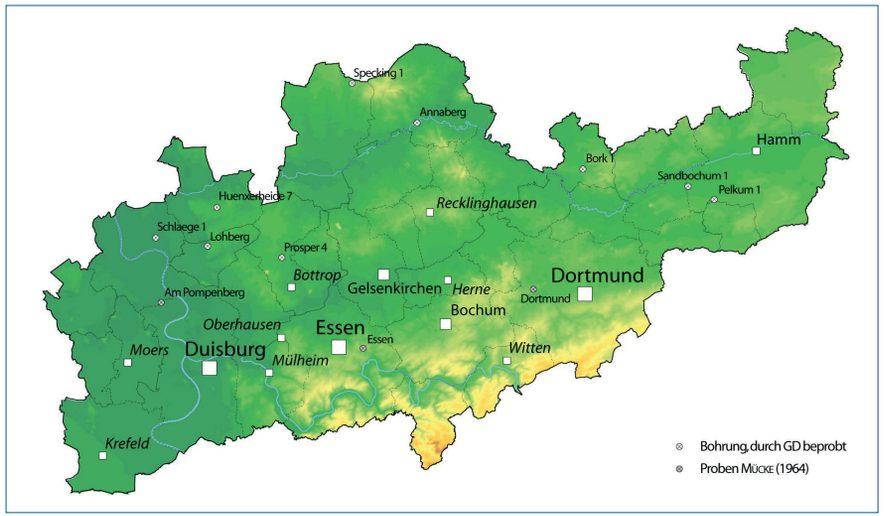

Abb. 3: Projektraum der Studie (Quelle: Geologischer Dienst NRW)

Alter (in Mill. a)	Formation	Verbreitung innerhalb des Projektraumes
0 -2,4	Quartär	flächendeckend
- 65	Tertiär	Niederrhein
- 145	Kreide	Ruhrgebiet / südliches Münsterland
- 204	Jura	südwestliches Münsterland (sehr lokal)
- 245	Trias	Niederrhein /südwestliches Münsterland
- 290	Perm	Niederrhein /südwestliches Münsterland
- 360	Karbon	flächendeckend
- 400	Devon	flächendeckend

Tab. 1: Geothermie-Studie „Ruhrgebiet“ – Im Projektraum verbreitete geologische Formationen (Quelle: Geologischer Dienst NRW)

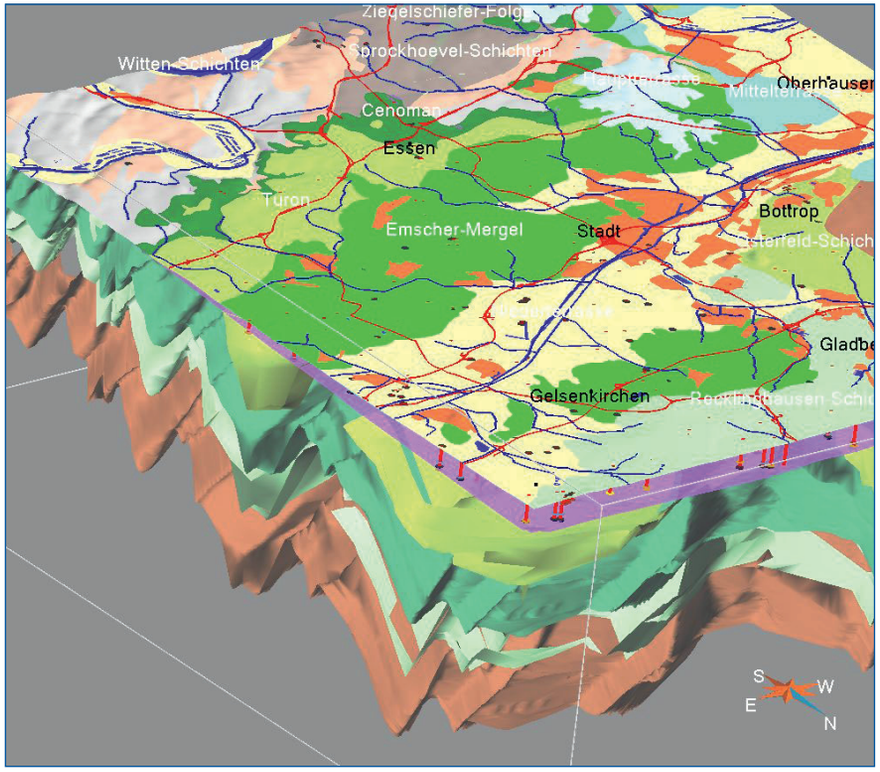

Abb. 4: Ausschnitt aus dem 3D-Modell (Quelle: Geologischer Dienst NRW)

Geophysikalische Messungen an Bohrkernen

Im Rahmen der Geothermie-Studie Ruhrgebiet wurde eine geothermische Gesteinsdatenbank mit allen im Projektraum vorkommenden Gesteinstypen angelegt. Von den stratigrafischen und lithologischen Einheiten wurden die wichtigsten gesteinsphysikalischen und geothermischen Kennwerte bestimmt: Die Wärmeleitfähigkeit, die spez. Wärmekapazität, die Dichte sowie die Porosität. Für die Ermittlung gesteinsphysikalischer Kennwerte wurde auf das umfangreiche Bohrkernmaterial des Geologischen Dienstes NRW zurückgegriffen (Abb. 5). Das Gesteinsmaterial stammt aus wissenschaftlich untersuchten und damit stratigrafisch sicher eingestuften Bohrungen. Insgesamt wurden 143 Proben ausgewählt, aufbereitet und auf die oben genannten Parameter hin analysiert.

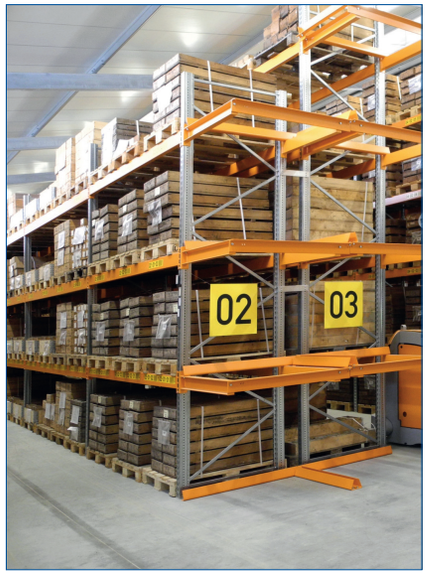

Abb. 5: a) Bohrkernlager
b) Kernkiste
(Quelle: GD NRW)

Im Vergleich der gemessenen Wärmeleitfähigkeiten mit Angaben aus der VDI-Richtlinie 4640 „Thermische Nutzung des Untergrundes“, Blatt 1 (VDI 4640, 2010), ergeben sich deutliche Abweichungen (Tab. 2). So liegen die gemessenen Durchschnittswerte der meisten Gesteinstypen über den VDI-Werten. Ebenfalls ist die Spanne zwischen minimalem und maximalem Wert der gemessenen Daten größer als die der in der VDI-Richtlinie angegebenen Werte. Die Unterschiede zwischen den gemessenen Werten und den Literaturdaten ist auf unterschiedliche regionale Eigenschaften der

untersuchten Proben zurückzuführen. Die VDI-Richtlinie enthält aus ganz Europa zusammengetragene Werte und beinhaltet die verschiedensten Gesteine. Damit werden weder regionale noch stratigrafische Besonderheiten der geothermischen Gesteinsparameter erfasst. Dagegen zeigen die Messungen des Geologischen Dienstes NRW zwar eine größere Varianz der Daten, jedoch auch eine deutliche Abhängigkeit der Werte von der Stratigrafie beziehungsweise der Teufe.

Gestein	Wärmeleitfähigkeit gemessen (GD-Proben)		Wärmeleitfähigkeit - VDI-Richtlinie [W/(m K)] (VDI 4640, Blatt 1)	
	Minimum – Maximum [W/(m K)]	Median [W/(m K)]	Minimum – Maximum [W/(m K)]	typ. Rechenwert [W/(m K)]
Dolomit	1,4 – 3,7	2,3	3,0 – 5,0	3,5
Kalkstein	1,3 – 5,7	3,3	2,0 –3,9	2,7
Mergelstein	1,2 – 4,0	2,3	1,8 – 2,9	2,3
Anhydrit	4,2 – 6,1	5,5	1,5 – 7,7	4,1
Sandstein	0,9 – 6,1	3,4	1,9 – 4,6	2,8
Ton-/Schluff-stein	0,7 – 4,6	2,8	1,1 – 3,4	2,2
Kieselschiefer	2,3 – 2,9	2,7	4,5 – 5,0	4,5

Tab. 2: Vergleich von gemessenen Wärmeleitfähigkeiten der unterschiedlichen Gesteinstypen mit Literaturdaten (Quelle: Geologischer Dienst NRW)

Temperaturmodell

Für das Temperaturmodell des Ruhrgebietes konnte im Wesentlichen auf Temperaturmesswerte der Geothermischen Datenbank des Leibniz-Institutes in Hannover (LIAG) zurückgegriffen werden. Für das Ruhrgebiet standen insgesamt 1035 Temperaturmessungen unterschiedlicher Qualität zur Verfügung. Bei dem Großteil der Daten handelt es sich um direkte Temperaturmessungen in Bergwerken und Schächten oder um Bottom-Hole-Messungen in Explorationsbohrungen der Deutschen Steinkohle AG. Diese decken weitestgehend die im Ruhrgebiet auftretenden stratigrafischen und lithologischen Einheiten ab. Lediglich für das Ober- und Mitteldevon musste für die Temperaturmodellierung auf gemittelte Temperaturmesswerte aus dem südlich angrenzenden Schiefergebirge zurückgegriffen werden.

In einem ersten Schritt wurden die geologischen Untergrunddaten und das Digitale Geländemodell DGM100 im Geoinformationssystem ArcGIS zusammengeführt und visualisiert. Mithilfe der Zusatzmodule Spatial

Analyst beziehungsweise 3D-Analyst wurden danach alle auskartierten Einheiten als Bezugshorizonte für die Temperaturmodellierung erzeugt. Die aus der Anwendung dieses Verfahrens erzeugten virtuellen Profile bilden die Grundlage für die eigentliche Temperaturextrapolation bis –5.000 m NN. Für die Temperaturmodellierung wurde ausschließlich auf Wärmeleitfähigkeitsmessungen an wassergesättigten Proben zurückgegriffen. Sie stellen am ehesten eine Annäherung an die natürlichen Verhältnisse des gebirgsfeuchten Zustandes dar. Für eine flächenhaft räumliche Darstellung der Temperaturen für unterschiedliche Tiefenstufen wurden die berechneten Temperaturen in die Modellierungssoftware FEFLOW als Punktdaten eingeladen und mithilfe des Verfahrens der Akima-Interpolation für das Projektgebiet berechnet (Abb.6).

Danach können die Temperaturen sowohl unter Berücksichtigung des lokalen geothermischen Gradienten als auch unter Berücksichtigung der im Rahmen des Projektes durch das LIAG ermittelten Wärmeleitfähigkeiten für jede gewählte Tiefe ab Geländeoberkante oder auch für einzelne Horizonte in Abhängigkeit von ihrer räumlichen Lage zu berechnet und ausgelesen werden (Abb. 7).

Die Datenbank ist als offenes System im Hinblick auf eine spätere Nutzung durch Anlagenplaner gestaltet. Die auf der Karte dargestellten Temperaturen sind keine gemessenen tatsächlichen, sondern ausschließlich nach dem beschriebenen Modellierverfahren berechnete Werte. Durch Temperaturmessungen an zukünftigen Tiefenbohrungen im Projektgebiet könnten diese Werte kalibriert und stetig den natürlichen Bedingungen angepasst werden.

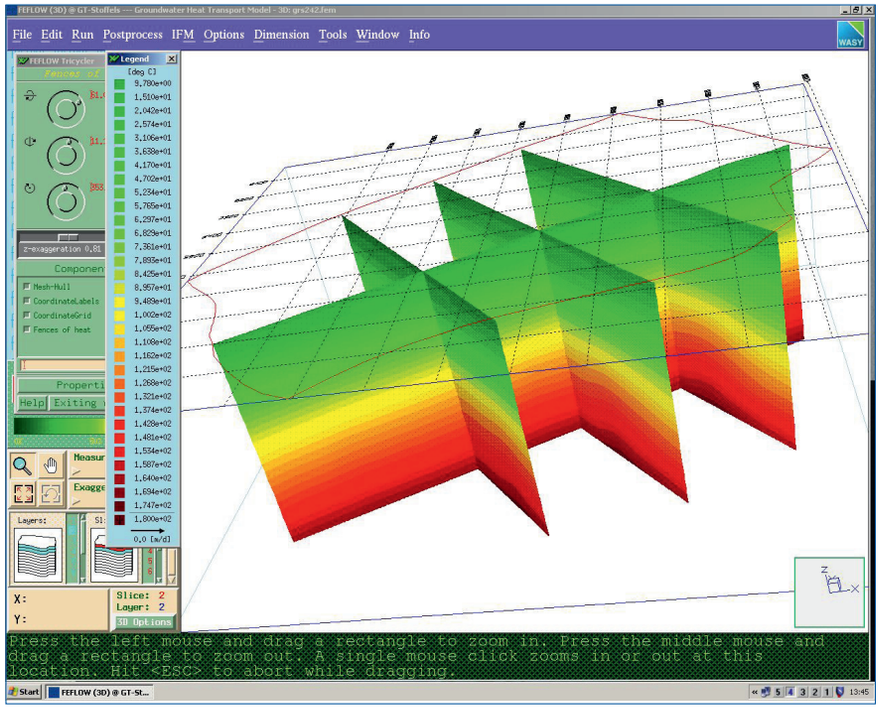

Abb. 6: Screenshot FeFLOW (Quelle: Geologischer Dienst NRW)

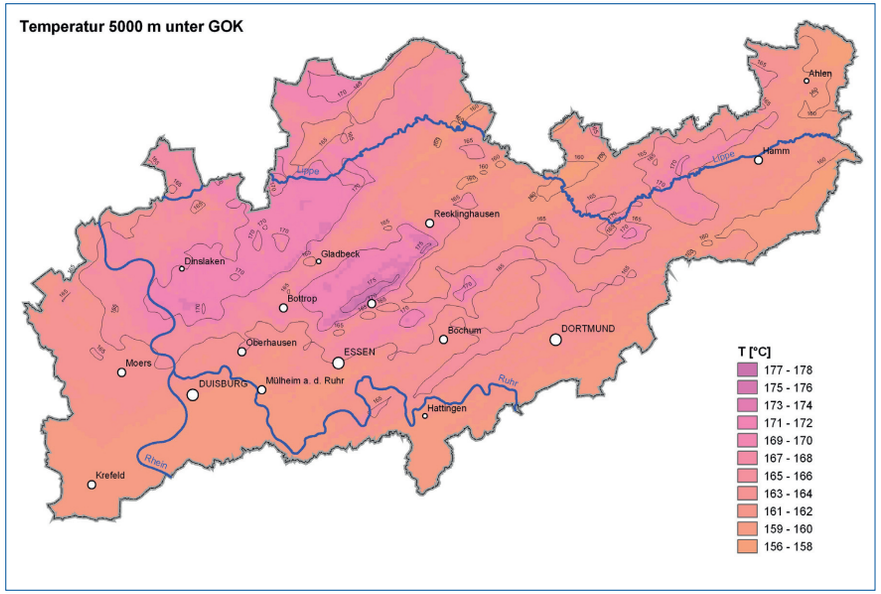

Abb. 7: Temperaturkarte -5.000 m (Quelle: Geologischer Dienst NRW)

Chancen für das Ruhrgebiet

Der Einsatz geothermischer Technologien und die Gewinnung von Erdwärme setzt immer ein enges Zusammenspiel zwischen Ingenieuren, Verfahrenstechnikern und Geowissenschaftlern voraus. Mit zunehmender Tiefe des Nutzhorizontes und damit mit zunehmender Aussageunsicherheit über den Untergrund bzw. steigendem Fündigkeitsrisiko dient die rechnergestützte Modellierung als Schnittstelle zwischen unter- und übertägigen Verfahrenstechniken und der natürlichen geothermischen Lagerstätte. Für das gesamte Ruhrgebiet sowie Teile des angrenzenden Niederrheins und Teile des Münsterlandes steht Planern nun ein Informationssystem in Form eines 3D-Modells zur Verfügung. Mit dem im Projekt durchgeführten Datenmanagement und den zahlreichen Schnittstellen zu diversen Geoinformationssystemen bzw. Modellier- und Simulationswerkzeugen wurde ein Fachinformationssystem geschaffen, mit dem für

den Projektraum Ruhrgebiet flexibel und zeitnah der Betrieb von Anlagen simuliert werden kann. Damit erhalten Planungsfirmen die Möglichkeit, die Machbarkeit und das Langzeitverhalten tiefengeothermischer Anlagen innerhalb kurzer Zeit zu berechnen. Hiermit werden also notwendige Fakten bereitgestellt, um Planungen geothermischer Anlagen zu optimieren, sicherheitsrelevante Fragen zu erörtern, Gefährdungspotenziale im Vorfeld zu bewerten und zeitnahe Genehmigungserteilung zu unterstützen.

Über das Modell lassen sich im Ruhrgebiet Bereiche ermitteln, in denen in 5 km Tiefe Temperaturen von 175 °C erwartet werden. Diese Temperaturen lassen bereits heute eine Stromerzeugung über ein geothermisches Kraftwerk zu. Im Fokus des derzeit laufendes EU-Projektes LOW-BIN steht u.a. die Stromerzeugung in hydro-geothermalen Systemen und zukünftig auch Enhanced Geothermal Systems, also die Stromerzeugung bei niedrigeren Thermalwassertemperaturen von 65 bis 90 °C. Hier werden weitere Chancen für NRW gesehen. Es muss aber nicht immer gleich Strom erzeugt werden, um die Erdwärme sinnvoll zu nutzen. Mit Hilfe des geothermischen Modells "Ruhrgebiet" ist es auch möglich, die Einsatzchancen einer thermischen Untergrundspeicherung oder Erdwärmesondenfelder und einzelne Tiefensonden zur Versorgung von Insellösungen wie Neubaugebieten oder Gewerbe- und Industriekomplexen zu bewerten und zu planen.

Während die oberflächennahe Geothermie bereits ihre Marktreife erreicht hat und einen festen Platz in der Reihe der regenerativen Energien behauptet, kämpft die tiefe Geothermie derzeit noch mit Fragen zur Wirtschaftlichkeit, zum Fündigkeitsrisiko bis hin zur Akzeptanz in der Öffentlichkeit. Neben der geologischen Machbarkeit eines Projektes wird direkt zu Beginn einer Projektidee auch die Frage nach der wirtschaftlichen Machbarkeit gestellt. Das Fündigkeitsrisiko liegt bislang nur bei den Investoren, die sich manchmal nicht in der Lage sehen, fachlich positive Aspekte trotz Risiken in Machbarkeitsszenarien umzusetzen. Da tiefengeothermische Projekte aufgrund der hohen Bohrkosten insbesondere finanzielle Risiken bergen, fördert der Bund tiefengeothermische Projekte durch finanzielle Anreize, wie Bohrkosten- und Risikoübernahmen.

Der Autor:

Dipl.-Geologe Ingo Schäfer
Geologischer Dienst NRW
47803 Krefeld

Quelle:

Schäfer, Ingo (2016): Wärmebergbau – Tiefe Geothermie im Ruhrbergbau. In: Essener Gesellschaft für Geographie und Geologie (Hg.): Mitteilungen der Essener Gesellschaft für Geographie und Geologie. Band 2, Essen, S. 63–72