

Überwachung der Bohrungsintegrität – Voraussetzung für die sichere und effiziente Nutzung geothermischer Energie

Thomas Reinsch und Jan Henniges
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Geothermal energy can play a major role within the future energy supply. For a safe and sustainable provision of geothermal energy, the structural wellbore integrity is an important issue. In order to monitor processes affecting the wellbore integrity, a fibre optic cable has been permanently installed behind the anchor casing of a geothermal well in Iceland. Distributed temperature sensing data has been recorded during the cementation of that casing as well as during the onset of a flow test. Together with numerical studies, temperature data from the cementation could be used to investigate the cement quality behind casing and evaluate the success of the cementation process. Data from the flow testing period could be used to identify a fracture evolution within the cemented annulus during the production of high temperature geothermal fluid. A process influencing the isolation of the cemented annulus, therefore, could be monitored on-line. The application of the distributed temperature sensing technique together with numerical studies proved to be successful in identifying processes affecting the wellbore integrity of a geothermal well.



Die geothermische Energiebereitstellung kann einen signifikanten Beitrag zum Energiemix der Zukunft leisten. Das weltweit technisch verfügbare Potenzial wurde in dem im Mai 2011 erschienenen Special Report Renewable Energy Sources (SRREN) des Weltklimarats IPCC deutlich höher eingeschätzt, als der weltweite Bedarf an Wärme und elektrischer Energie zusammen (Goldstein *et al.*, 2011). Zur Nutzung dieser Ressource muss ein geothermisches Reservoir in der Regel durch eine Bohrung erschlossen werden. Eine nachhaltige und sichere Bewirtschaftung eines Untergrundreservoirs setzt eine hohe Lebensdauer der Bohrung voraus, wobei die hydraulische Isolation verschiedener geologischer Horizonte, insbesondere gegenüber Trinkwasserleitern, gewährleistet sein muss.

Zu diesem Zweck wird eine Bohrung verrohrt und der Ringraum zwischen Verrohrung und Gebirge mit Zement abgedichtet. Der Zement ist ein essentielles Strukturelement um die Langzeitstabilität einer Bohrung und die Isolation zwischen verschiedenen geologischen Horizonten zu gewährleisten. Der Prozess der Ringraumzementierung ist daher eine der wichtigsten Arbeitsschritte beim Niederbringen einer Bohrung. Nicht nur die Zementierung selbst, sondern auch der spätere Betrieb einer Bohrung stellen besondere Anforderungen an die Qualität der durchgeführten Arbeiten. Besonders bei tiefen geothermischen Bohrungen kann es während des Betriebs zu starken Temperatur- und Druckschwankungen kommen, die eine Belastung für die Bohrungsintegrität, vor allem für den Zement darstellen (z.B. Goodwin und Crook, 1992). Auch chemische Prozesse können die Integrität beeinflussen. Daten aus der Erdöl- und Erdgasindustrie von Tiefbohrungen im Golf von Mexiko zeigen beispielsweise, dass die Anzahl der Bohrungen mit einem anhaltenden Ringraumdruck mit zunehmendem Alter der Bohrungen stark ansteigt (Nelson, 2006). Ein anhaltender Ringraumdruck ist ein Indiz für eine hydraulische Verbindung zwischen tiefer gelegenen Schichten und der Erdoberfläche. Eine solche Verbindung kann entlang des Ringraums, insbesondere an der Grenzfläche zwischen Zement und Verrohrung, sowie zwischen Zement und Formation oder durch Risse im Zement selbst hervorgerufen werden. Neben der Integrität der Ringraumzementierung können auch Leckagen in der Verrohrung oder eine Fluidmigration in der Auflockerungszone im unmittelbar an die Bohrung angrenzenden Gebirge für einen anhaltenden Ringraumdruck verantwortlich sein (Abb. 1). Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass eine hyd-

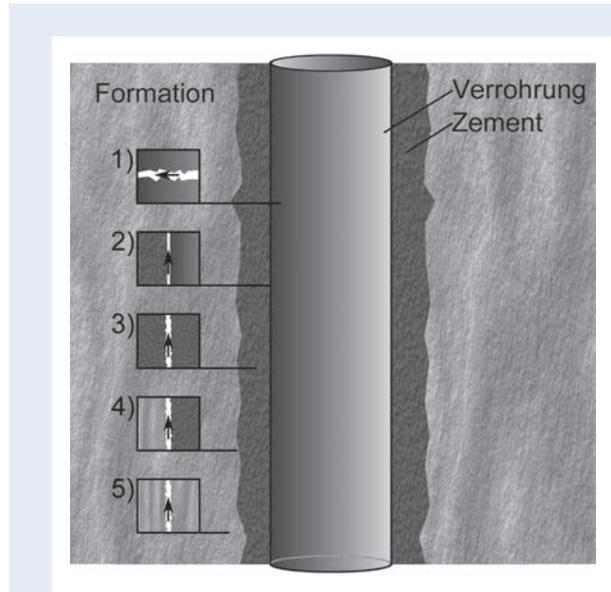


Abb. 1: Mögliche Migrationswege für Fluide entlang des Bohrpfad (verändert nach Gasda *et al.* 2004):

- 1) durch die Verrohrung,
- 2) zwischen Verrohrung und Zement,
- 3) durch den Zement,
- 4) zwischen Zement und Formation und
- 5) durch die Formation.

Fig. 1: Possible leakage pathways for wellbore fluids (modified from Gasda *et al.* 2004):

- 1) through the casing,
- 2) between casing and cement,
- 3) through the cement,
- 4) between cement and formation and
- 5) through the formation.

raulische Verbindung nicht gleichzeitig einer hohen Leckagerate entlang dieser Verbindung entspricht. Um jedoch einen nachhaltigen, sicheren und wirtschaftlichen Betrieb einer Tiefbohrung zu gewährleisten, ist die Überwachung der Zementierung sowie der Langzeitintegrität der Bohrung von großer Bedeutung.

Neben der Messung von Ringraumdrücken wird die Integrität der Ringraumzementierung sowie auch der einzelnen Verrohrungen in der Regel direkt im Anschluss an deren Einbau mit Hilfe akustischer Bohrlochmessverfahren überprüft. Weiterhin können Drucktests eine Aussage über die technische Dichtigkeit der Verrohrungen geben. Eine Aussage kann hierbei in der Regel fast ausschließlich über die Integrität der innersten Rohrtour und den umgebenden Ringraum gemacht werden.

Zur Abdichtung des Ringraums wird nach Einbau der Verrohrung in der Regel eine Zementsuspension durch die Verrohrung

Links: Nutzung eines geothermischen Reservoirs. Produktionstest in der Bohrung Hellisheiði HE-53 auf Island (Foto: T. Reinsch, GFZ)

Left: Utilization of a geothermal Reservoir. Flow test in well Hellisheiði HE-53, Iceland



Kontakt: T. Reinsch
(thomas.reinsch@gfz-potsdam.de)

in die Tiefe gepumpt und steigt dann von unten im Ringraum zwischen Verrohrung und Gebirge nach oben. Durch die hohe Dichte des Zements wird dabei im Ringraum vorhandenes Fluid verdrängt. Die Zementsuspension wird dafür so aufbereitet, dass der Zement erst nach Ende des Verpressvorgangs im Ringraum aushärtet und diesen somit hydraulisch abdichtet.

Zur Überwachung des Zementierungsprozesses werden seit langem Temperaturmessungen verwendet. Beim Aushärten des Zements wird Wärme freigesetzt (exotherme Hydratationsreaktion), daher können Temperaturmessungen zur Lokalisierung des Zements im Ringraum genutzt werden. Eine quantitative Aussage über die Zementmenge und den Zustand des Zements ist anhand einzelner Temperaturmessungen allerdings nur eingeschränkt möglich.

Eine neue Möglichkeit zur Überwachung der Bohrungsintegrität während der Zementierung bietet die permanente Installation eines faseroptischen Messkabels im zementierten Ringraum. Dieses kann zusammen mit der Verrohrung eingebaut und zementiert werden und steht dann im Folgenden dauerhaft für Messaufgaben zur Verfügung. Die Expertise zum Einsatz solcher permanent installierten Messkabel wurde am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ innerhalb der Forschungsbohrprojekte Mallik (Henninges et al., 2005) und am Pilotstandort Ket-zin (Prevedel et al., 2008), sowie im Geothermiefeld Hellisheiði in Island (Reinsch et al., 2013), auf das später näher eingegangen wird, entwickelt.

Die thermische Situation im Ringraum kann hierbei mit Hilfe des Verfahrens der ortsverteilten Temperaturmessungen (Distributed Temperature Sensing, DTS) überwacht werden. Zur Messung der Temperatur wird ein Laserpuls in die Glasfaser des Messkabels eingekoppelt. Die ausgesandten Photonen streuen auf ihrem Weg entlang der Glasfaser an einzelnen Molekülen. Das Streusignal wiederum weist eine charakteristische Signatur auf, die von der Temperatur der Faser abhängig ist. Über die Laufzeit zwischen der Aussendung des Signals und der Detektion am Messgerät kann eine Aussage über den Ort des Streuprozesses und somit über den Messpunkt getroffen werden. Hierdurch können quasi-kontinuierliche Temperaturprofile entlang des Kabels mit einer hohen räumlichen Auflösung gemessen werden.

Während der Produktion von Thermalwasser kann es zu starken Temperaturänderungen entlang des Bohrpfads kommen. Die thermische Expansion der verschiedenen Strukturelemente einer Bohrung (Zement und Stahlverrohrung) in Kombination mit starken thermischen Gradienten in den Materialien von der Innen- zur Außenseite führt hierbei zu einer großen mechanischen Beanspruchung des Zements. Eine starke Beanspruchung kann eine Beeinträchtigung der Zementintegrität zur Folge haben. Auch hier können Temperaturmessverfahren, wie beispielsweise DTS-Messungen, genutzt werden, um integritätsrelevante Prozesse zu beobachten, sofern diese eine thermische Signatur haben.

Die Anwendung der Methode der ortsverteilten Temperaturmessungen zur Überwachung der Bohrlochintegrität wird im Folgenden anhand einer Installation in einer Hochenthalpiebohrung auf Island erläutert. In der Bohrung HE53 im Geothermiefeld Hellisheiði im Südwesten von Island wurde im Frühjahr 2009 ein faseroptisches Messkabel permanent installiert. Temperaturmessungen wurden während der Zementierung sowie zu Beginn eines Produktionstests durchgeführt und bewertet (Reinsch, 2012; Reinsch et al., 2013).

Kabelinstallation

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts HITI (Asmundsson et al., 2014) wurde im Mai 2009 ein faseroptisches Messkabel hinter der Verrohrung der Bohrung HE-53 bis in eine Tiefe von 261 m installiert (Abb. 2). Zur Verbesserung der Messgenauigkeit ist es vorteilhaft, Messungen von beiden Enden der Faser durchzuführen. Hierfür wurde das Messkabel in einer Schleife an der Verrohrung befestigt (Abb. 2, rechts). Zur Zentrierung der Verrohrung und zur Fixierung des Messkabels wurde unterhalb jedes Rohrverbinders ein Zentrierkorb installiert. Zwischen den Rohrverbindern ist das Kabel zusätzlich direkt an den Rohren befestigt. Hierdurch variiert der Abstand zwischen Kabel und Verrohrung mit der Tiefe, was einen Einfluss auf das gemessene Temperaturprofil hat.

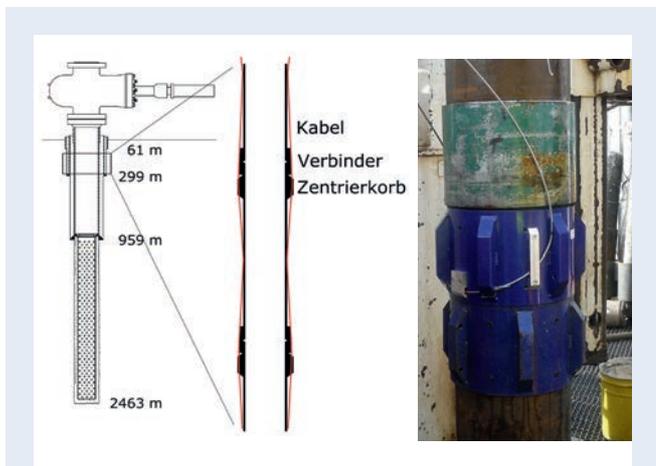


Abb. 2: Links: Darstellung der Installation des Messkabels (rot) in der Bohrung HE-53 (verändert nach S. Thorhallsson; Ausbaugaben mit freundlicher Genehmigung von Reykjavik Energy). Rechts: Umlenkung der Kabelschleife am Ende des installierten Kabels (Foto: T. Reinsch, GFZ)

Fig. 2: Left: Installation of the fibre optic cable (red) in well HE-53 (modified from S. Thorhallsson; well information with kind courtesy of Reykjavik Energy). Right: Cable loop at the bottom of the installed fibre optic cable.

Die Installation des Messkabels zusammen mit der Verrohrung ermöglichte die Überwachung sowohl des Zementierungsprozesses, als auch der Temperaturentwicklung während eines Produktionstests nach Fertigstellung der Bohrung im Sommer 2009. Da das Kabel hinter der Verrohrung installiert wurde, konnten DTS-Messungen während der beiden Messkampagnen ohne Beeinträchtigung weiterer Arbeiten an der Bohrung durchgeführt werden.

Zementierung

Abbildung 3 zeigt die Temperaturentwicklung während des Zementierungsprozesses und der Hydratation des Zements im Ringraum. In den ersten zehn Stunden der Messung sind mehrere Temperatursignaturen zu erkennen, die sich von unten nach oben und im Anschluss von oben nach unten im Ringraum ausbreiten. Über die Temperaturentwicklung lässt sich die Dynamik der Zementsuspension im Ringraum während des Verpumpens sehr gut untersuchen. Im weiteren Verlauf der Messung stiegen die Temperaturen dann durch die Hydratation des Zements stark an. Einfluss auf die tatsächlich gemessene Temperatur haben hierbei sowohl die Position des Kabels im Ringraum, als auch die thermischen Eigenschaften des Bohrlochfluids und des umgebenden Gebirges. Darüber hinaus ist die Temperaturentwicklung von der Zusammensetzung der Zementsuspension abhängig. Für die Hydratation spielt hierbei die zur Verfügung stehende Menge an Wasser eine entscheidende Rolle. Zu wenig Wasser führt zu einer unvollständigen Hydratation, zu viel Wasser zu einer schnellen Hydratation mit geringer Wärmeentwicklung. Die Kinetik und die bei der Reaktion maximal auftretenden Temperaturen stehen daher in direktem Zusammenhang mit dem Mischungsverhältnis von Wasser und Zement und damit der Zementdichte. Die kontinuierliche Überwachung der Temperaturentwicklung mittels der Methode der ortsverteilten Temperaturmessungen ermöglicht daher die detaillierte Untersuchung des Hydratationsprozesses im Ringraum. Die in der Abbildung sichtbare starke Temperaturerniedrigung nach etwa 30 Stunden in den obersten 110 m wurde durch ein Auffüllen der Bohrung mit kaltem Fluid verursacht.

Produktionstest

Das vorrangige Ziel einer geothermischen Bohrung ist die Förderung von Thermalwasser mit einer möglichst hohen Temperatur. Abbildung 4 stellt die Temperaturentwicklung im Ringraum hinter der Verrohrung zu Beginn eines Produktionstests dar, bei dem über einen Zeitraum von mehreren Wochen heißes Thermalwasser gefördert wurde. Auch hier haben die Kabelposition sowie die thermischen Eigenschaften des Bohrlochausbaus und des Gebirges einen großen Einfluss auf die gemessenen Temperaturen.

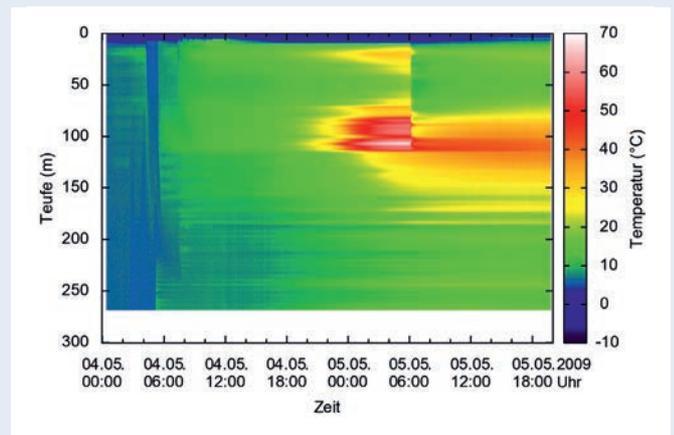


Abb. 3: Temperaturentwicklung während der Zementierung der Verrohrung in der Bohrung Hellisheiði HE-53

Fig. 3: Temperature evolution during the cementation of the anchor casing in well Hellisheiði HE-53

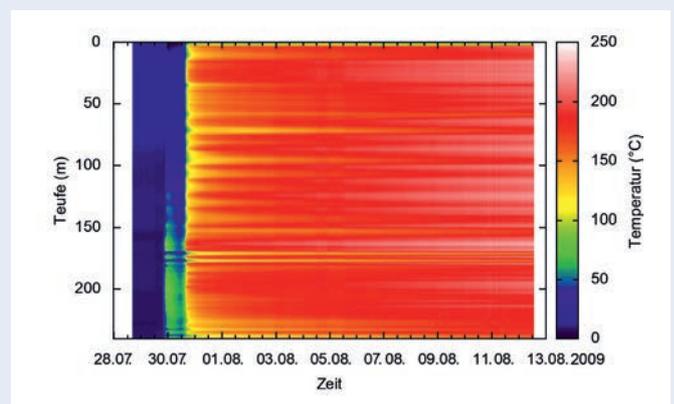


Abb. 4: Temperaturmessungen zu Beginn eines Produktionstests in der Bohrung HE-53

Fig. 4: Temperature evolution at the beginning of a flow test in well HE-53

Am ersten Tag der Messung konnten statische Formationstemperaturen gemessen werden. Das Profil ist annähernd isothermal. Zu Beginn des Produktionstests wurde erst Gas, welches sich am Kopf der Bohrung gesammelt hatte, abgelassen. Dies führte zu einem Anstieg des Wasserspiegels und einer moderaten Temperaturerhöhung im unteren Teil der Messstrecke. Nach einem weiteren Tag startete die massive Förderung von Thermalwasser. Innerhalb kurzer Zeit stieg die Temperatur des geförderten Fluides um etwa 200 °C an. Gleichzeitig wurde im

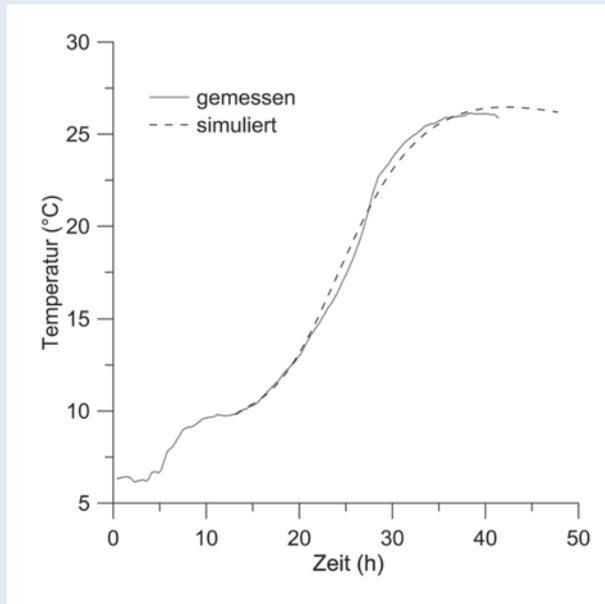


Abb. 5: Gemessene und simulierte Temperaturentwicklung für ein Teufenintervall der Bohrung HE-53 (Reinsch, 2012)

Fig. 5: Measured and simulated temperature evolution for a specific depth in well HE-53 (Reinsch, 2012)

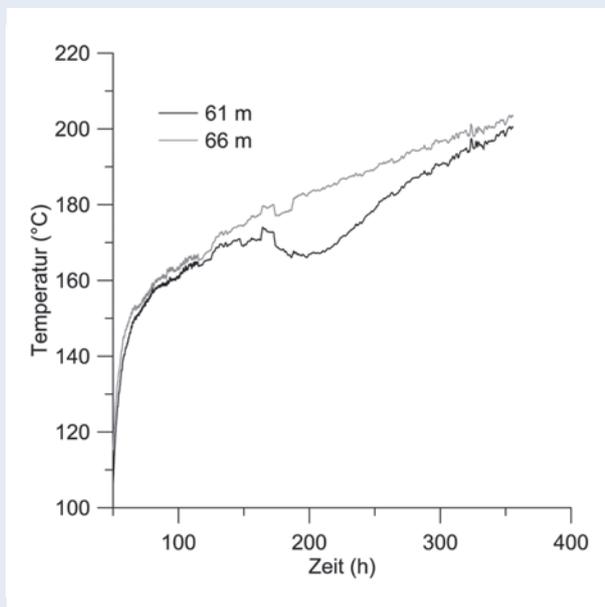


Abb. 6: Temperaturentwicklung während eines Produktionstests im Ringraum der Bohrung HE-53 für zwei verschiedene Teufenintervalle (Reinsch, 2012)

Fig. 6: Temperature evolution at two different depths within the annulus of well HE-53 during a flow test (Reinsch, 2012)

Ringraum eine Temperaturerhöhung um etwa 150 °C festgestellt. Im weiteren Verlauf der zweiwöchigen Messkampagne stieg die Fluidtemperatur am Bohrlochkopf linear auf über 250 °C an. Im Ringraum war dabei ein Temperaturanstieg bis auf 230 °C zu beobachten.

Bewertung der Zementintegrität

Zementierungsprozess: Wie zuvor beschrieben, ist die Temperaturentwicklung im Ringraum abhängig von dem Mischungsverhältnis von Wasser und Zement. Die Kopplung einer thermischen Simulation mit einem theoretischen Hydratationsmodell (Lin und Meyer, 2009) ermöglicht daher die Berechnung der Ringraumtemperatur in Abhängigkeit von der Zementdichte.

Abbildung 5 zeigt exemplarisch für eine Teufe die Temperaturentwicklung während des Verpumpens und der anschließenden Hydratation der Zementsuspension. Die gekoppelte Simulation wurde genutzt, um aus dem Temperaturverlauf eine Aussage über das Mischungsverhältnis von Wasser und Zement zu treffen. Dafür wurden Simulationen mit verschiedenen Zementdichten durchgeführt und die berechnete Temperaturentwicklung mit den Messwerten verglichen. Hierdurch war es möglich, sowohl die Zementdichte als auch den Grad der Hydratation an jedem Ort und zu jedem Zeitpunkt der Messung zu ermitteln.

Produktionstest: Während der Förderung heißen Thermalwassers wurde eine lokal begrenzte Temperaturanomalie im Zement beobachtet. Obwohl die Temperatur des produzierten Fluids stieg, wurden im Ringraum lokal begrenzt und zeitlich fortschreitend in angrenzenden Teufenintervallen sinkende Temperaturen gemessen. Abbildung 6 zeigt dazu exemplarisch die Temperaturentwicklung in zwei Teufenintervallen. Während die Temperatur in der Teufe 66 m kontinuierlich ansteigt, sinkt die Temperatur in 61 m innerhalb einiger Stunden um etwa 10 °C, bevor sie im Anschluss wieder langsam ansteigt.

Die Hypothese zur Erklärung dieses Phänomens ist eine Rissbildung im zementierten Ringraum, verbunden mit der Evaporation von Porenfluid im Zement. Zement weist eine sehr geringe Permeabilität auf, daher wird er auch zur hydraulischen Isolation der Verrohrung verwendet. Das Porenfluid kann während des Temperaturanstiegs zu Beginn der Thermalwasserproduktion nicht verdampfen. Erst durch die Ausbildung von Rissen, welche die Poren im Zement verbinden, kann das Fluid schlagartig verdampfen. Hierdurch kommt es zu einer Austrocknung des Zements. Diese Hypothese konnte durch eine thermische Simulation bestätigt werden (Reinsch, 2012).

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Durch die Kombination der faseroptischen, ortsverteilten Temperaturmessung mit numerischen Simulationen ist es möglich, thermische Effekte, die einen Einfluss auf die Integrität einer Bohrung haben, zu analysieren. Es konnte gezeigt werden, dass sich dieses neu entwickelte Messverfahren sehr gut eignet, um Aussagen über die Qualität des Zements hinter der Verrohrung zu treffen. Durch den Vergleich der gemessenen Temperaturentwicklung in einzelnen Teufen mit den Simulationsergebnissen konnten die Zementdichte und der Grad der Hydratation ermittelt werden. In Kombination mit Standardverfahren zur Evaluierung der Zementierung, wie z. B. akustische Bohrlochmessverfahren, können die ermittelten Daten ein sehr viel genaueres Bild über die Qualität des Zements im Ringraum liefern.

Neben der Überwachung der Zementierung war es darüber hinaus möglich, während der Produktion von Thermalwasser einen integritätsrelevanten Prozess im Ringraum zu untersuchen. Erstmals konnte die thermische Signatur einer Rissbildung im Zement in Echtzeit beobachtet werden. Durch die permanente Überwachung des Ringraums mittels dieser neuartigen Messmethode ergibt sich daher eine Möglichkeit, integritätsrelevante Prozesse zu identifizieren und potenzielle Risiken für die Umwelt, die mit einem Verlust der Integrität einer Bohrung einhergehen, zu minimieren.

Danksagung

Diese Arbeiten wurden im Rahmen des von der Europäischen Kommission geförderten Projekts HiTI (Proposal/Contract no.: 019913) und dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts GeoEn Phase 2 (BMBF, 03G0767A) durchgeführt. Darüber hinaus möchten sich die Autoren bei E. Huenges, K. Reinicke und C. Teodoriu für die fachliche Begleitung dieser Arbeit bedanken. Die Autoren möchten darüber hinaus folgenden Personen danken: M. Poser, J. Schrötter und C. Cunow für die Unterstützung bei den Feldarbeiten, R. Asmundsson für die Koordination der Feldarbeiten, M. Loizzo für die Diskussionen über die Zementhydratation. Darüber hinaus gebührt folgenden Unternehmen Dank: Reykjavik Energy (OR) für die Bereitstellung einer Bohrung, sowie dem Iceland GeoSurvey (ISOR) und Mannvit für die Unterstützung bei den operativen Arbeiten.

Literatur

- Ásmundsson, R., Pezard, P., Sanjuan, B., Henninges, J., Deltombe, J.-L., Halladay, N., Lebert, F., Gadalia, A., Millot, R., Gibert, B., Violay, M., Reinsch, T., Naisse, J.-M., Massiot, C., Azais, P., Mainprice, D., Karytsas, C., Johnston, C. (2014): High temperature instruments and methods developed for supercritical geothermal reservoir characterisation and exploitation - The HiTI project. - *Geothermics*, 49, 90-98. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.07.008>
- Gasda, S. E.; Bachu, S., Celia, M. A. (2004): Spatial characterization of the location of potentially leaky wells penetrating a deep saline aquifer in a mature sedimentary basin. - *Environmental Geology*, 46, 6-7, 707-720. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00254-004-1073-5>
- Goldstein, B., Hiriart, G., Bertani, R., Bromley, C., Gutierrez-Negrin, L., Huenges, E., Muraoka, M. A., Ragnarsson, A., Tester, J., Zui, V. (2012): Geothermal Energy - In: Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S., Stechow, C. v., Matschoss, P. (Eds.), *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, 401-436.
- Goodwin, K., Crook, R. (1992): Cement Sheath Stress Failure. - *SPE Drilling Engineering*, 7, 4, 291-296. DOI: <http://doi.org/10.2118/20453-PA>
- Henninges, J., Huenges, E., Burkhardt, H. (2005): In situ thermal conductivity of gas-hydrate-bearing sediments of the Mallik 5L-38 well. - *Journal of Geophysical Research*, 110, B11206. DOI: <http://doi.org/10.1029/2005JB003734>
- Lin, F., Meyer, C. (2009): Hydration kinetics modeling of Portland cement considering the effects of curing temperature and applied pressure. - *Cement and Concrete Research*, 39, 4, 255-265. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.01.014>
- Nelson, E. B., Guillot, D. (Eds.) (2006): *Well Cementing*, 2. ed., Sugar Land, Tex.: Schlumberger, 773 p.
- Prevedel, B., Wohlgemuth, L., Henninges, J., Krüger, K., Norden, B., Förster, A., CO2SINK Drilling Group (2008): The CO2SINK boreholes for geological storage testing. - *Scientific drilling: reports on deep earth sampling and monitoring*, 6, 32-37. DOI: <http://doi.org/10.2204/iodp.sd.6.04.2008>
- Reinsch, T. (2012): Structural integrity monitoring in a hot geothermal well using fibre optic distributed temperature sensing, PhD Thesis, Clausthal-Zellerfeld: Universitätsbibliothek Clausthal, 219 p. URN: <urn:nbn:de:gbv:104-1111221>
- Reinsch, T., Henninges, J., Asmundsson, R. (2013): Thermal, mechanical and chemical influences on the performance of optical fibres for distributed temperature sensing in a hot geothermal well. - *Environmental Earth Sciences*, 70, 8, 3465-3480. DOI: <http://doi.org/10.1007/s12665-013-2248-8>