

A. Hesshaus
H. Hauswirth
R. Jatho
T. Tischner
R. Schellschmidt
R. Junker
H. Sulzbacher

Verbundprojekt GeneSys:

GeneSys Horstberg II – Methoden und Konzepte zur Erdwärmegewinnung aus gering permeablen Sedimentgesteinen

Abschlussbericht

zum Vorhaben FKZ 0329996



**Bundesanstalt für
Geowissenschaften und Rohstoffe
Hannover**

Verbundprojekt GeneSys

**GeneSys Horstberg II – Methoden und Konzepte
zur Erdwärmegewinnung aus gering permeablen
Sedimentgesteinen**

– Abschlussbericht –

Das diesem Bericht zugrunde liegende Verbundvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen 0329996 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren:	Annalena Hesshaus, Dipl.-Geowiss. Holger Hauswirth, Dipl.-Ing (FH) Reiner Jatho, Dipl.-Ing. Dr. Torsten Tischner, Dipl.-Phys. Rüdiger Schellschmidt, Dipl.-Geophys. Ralf Junker, Dipl.-Geol. Hans Sulzbacher, Dipl.-Phys.
Projektleiter:	Dr. Torsten Tischner
Auftraggeber:	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Projektträger Jülich (PTJ-EEN)
Förderkennzeichen:	0329996
Laufzeit des Vorhabens:	01.04.2005 – 30.06.2009
Berichtsdatum:	30.04.2010

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Kurzdarstellung	7
A. <i>Aufgabenstellung</i>	7
B. <i>Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens</i>	12
C. <i>Stand von Wissenschaft und Technik zu Beginn des Vorhabens</i>	13
D. <i>Planung und Ablauf des Vorhabens</i>	16
E. <i>Zusammenarbeit mit Projektpartnern und anderen Stellen</i>	19
Ergebnisse	21
1. Bohrung und Versuchsfeld	21
1.1. <i>Bau der Pumpenkammer</i>	22
1.2. <i>Beschaffung und Inbetriebnahme einer Tiefpumpe</i>	23
1.3. <i>Beschaffung und Inbetriebnahme der Hochdruckpumpen</i>	24
1.4. <i>Drahtwinde für den Einsatz von Memory-Sonden</i>	25
1.5. <i>Weitere Einrichtungen und Umstrukturierungen auf dem Bohrplatz</i>	26
1.5.1. <i>Verbesserung der Datenerfassung und Aufbereitung</i>	26
1.5.2. <i>Bau der Lager- und Montagehalle</i>	27
2. Hydraulische Tests in Horstberg	29
2.1. <i>Übersicht über hydraulische Experimente</i>	29
2.1.1. <i>Hydraulische Tests</i>	31
4. Austausch des Bohrlochpackers an der Bohrung Horstberg	43
4. Hydrogeochemische Untersuchungen	48
4.1. <i>Ausfällungsprozesse an der Bohrung Horstberg Z1</i>	48
4.1.1. <i>Einleitung und Zielstellung</i>	48
4.1.2. <i>Methodik</i>	49
4.1.3. <i>Ergebnisse</i>	49
4.1.4. <i>Thermodynamische Berechnungen</i>	56
4.1.5. <i>Diskussion</i>	57
4.1.6. <i>Zusammenfassung</i>	61
4.2. <i>Korrosion an den Stahlrohren des Förderstranges der Bohrung Horstberg</i>	63
4.2.1. <i>Material der Stahlrohre</i>	63
4.2.2. <i>Untersuchung der Stahlrohre</i>	64
4.2.3. <i>Zustand des Förderstranges</i>	67

4.2.4.	Ablagerungen	76
4.2.5.	Thermodynamische Berechnungen	84
4.2.6.	Diskussion der Korrosion und Ablagerungen.....	85
4.2.7.	Zusammenfassung	91
4.3.	<i>Radioaktivität an der Bohrung Horstberg Z1</i>	93
4.3.1.	Bisherige Untersuchungen.....	93
4.3.2.	Folgerungen.....	95
4.3.3.	Strahlenexposition auf dem Gelände der Bohrung	96
4.3.4.	Fazit.....	97
4.4.	<i>Vergleich der Wasserchemie aus verschiedenen Fördertests</i>	99
4.5.	<i>Literaturverzeichnis-Kapitel 4</i>	101
5.	Untersuchungen zum Selbststützungsmechanismus von hydraulisch induzierten Rissen.....	103
5.1.	<i>Laboruntersuchungen</i>	103
5.1.1.	Probenmaterial und Versuchsmethodik	103
5.1.2.	Numerische Modellierungen	106
5.2.	<i>Diskussion der Ergebnisse</i>	107
6.	Numerische Modellrechnungen zur Wärmegewinnung.....	109
6.1.	<i>Modellrechnungen zur zyklischen Injektion und Produktion</i>	109
6.2.	<i>Resümee</i>	119
6.3.	<i>Modellkalibrierung der Modellrechnungen zum Verfahren der Tiefenzirkulation</i>	121
6.3.1.	Modellkalibrierung mit Daten der Vorgeschichte des Tracer- Experimentes.....	125
6.3.2.	Modellkalibrierung mit hydraulischen Daten und Tracer-Daten	127
7.	Verwertbarkeit der Ergebnisse	132
8.	Ergebnisse Dritter.....	134
9.	Veröffentlichungen – Berichte.....	135
10.	Anhänge.....	137

Zusammenfassung

Die Bohrung Horstberg stellt weltweit die einzige Forschungsbohrung dar, in der Konzepte entwickelt und erprobt werden für die geothermische Nutzung von tiefliegenden und gering permeablen Sedimentgesteinen. Die hier gewonnenen Erkenntnisse sind von grundsätzlicher Bedeutung im Hinblick auf eine Nutzung der in Sedimentgesteinen gespeicherten Erdwärme. Zudem bilden die an der Bohrung Horstberg gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen die Basis für die Umsetzung des GeneSys-Demonstrationsprojekts am Standort Hannover.

In der Anfangsphase des Projektes GeneSys Horstberg II wurde der Bohrplatz der Bohrung Horstberg zu einem permanenten Versuchsgelände ausgebaut. Durch die Installation von 2 elektrisch betriebenen Hochdruckpumpen, den Aufbau einer Lagerhalle sowie durch die Beschaffung von weiteren Ausrüstungsgegenständen (Hoch- und Niederdruckausrüstung, Unterwassermotorpumpe, Filterstation,...) wurden die Voraussetzungen geschaffen, um umfangreiche hydraulische Untersuchungen an der Bohrung durchzuführen.

In den Jahren 2006 und 2007 wurden zahlreiche Injektions-, Produktions- und Zirkulationstests zur Charakterisierung der an die Bohrung angeschlossenen Horizonte „Solling“ und „Detfurth“-Sandstein und zur Umsetzung der Nutzungskonzepte durchgeführt. Hierdurch konnte u.a. gezeigt werden, dass:

- Der im Jahre 2003 im Detfurth-Sandstein künstlich erzeugte Riss über mindestens 5 Jahre hydraulisch hoch leitfähig geblieben ist. Somit konnte nachgewiesen werden, dass nicht nur im kristallinen Gestein sondern auch in Sedimentgesteinen ein Selbststützungsmechanismus nach massiven Wasserinjektionen auftritt.
- Durch den Zirkulationstest im November 2006 konnte die hydraulische Kommunikation zwischen den beiden Horizonten „Detfurth“ und „Solling“ als Basis für die Energiegewinnung durch das Verfahren der Einbohrlochzirkulation nachgewiesen werden. Limitiert wurde die Energiebilanz für die Einbohrlochzirkulation vor allem durch die bohrlochnahe hydraulische Limitierung (Skin) im Bereich des Solling-Sandsteins.

Im Jahr 2007 wurde bei einem Injektionstest in den Solling-Sandstein die Umläufigkeit des in der Bohrung eingebauten Packers nachgewiesen. Folgerichtig war der Austausch des Bohrlochpackers notwendig. Der Ausbau des alten Packers erwies sich als ausgesprochen schwierig und kostenaufwendig. Es waren umfangreiche Fangarbeiten notwendig. Anschließend wurde ein neuartiger permanenter Packer eingebaut, der eine deutlich höhere mechanische und thermische Belastbarkeit aufweist als der zuvor verwendete „ziehbare Packer“. Durch Einbau einer sogenannten Schiebemuffe oberhalb des Packers besteht zudem die Möglichkeit, Partikel die sich im Ringraum oberhalb des Packers absetzen, auszuzirkulieren.

Im Zusammenhang mit dem Packertausch wurde der Bereich der Solling-Sandsteine nochmals perforiert. Ein anschließender Fördertest im Frühjahr 2009 zeigte, dass die bohrlochnahe hydraulische Limitierung (Skin) deutlich reduziert werden konnte. Die Produktivität dieses Horizonts konnte auf mindestens das Doppelte erhöht werden. Es ist nunmehr davon auszugehen, dass die hydraulischen Bedingungen für die Realisierung der „Einbohrlochzirkulation“ deutlich besser sind als vor dem Packertausch. Leider konnte nach

dem Packertausch aufgrund des nahenden Projektendes kein Zirkulationsexperiment mehr durchgeführt werden.

Weiterhin wurde während des Packertauschs der Förderstrang auf dessen Wandstärke hin untersucht worden, um zu überprüfen, ob die einzelnen Rohre für einen Wiedereinbau geeignet sind. Von insgesamt 434 Rohren konnten 67 Rohre nicht für den Wiedereinsatz empfohlen werden aufgrund einer Wandstärkenreduktion. Es wird vermutet, dass die hauptsächliche Ursache in der Säurekorrosion liegt, möglicherweise in Kombination mit Ablagerungen. Insbesondere in Stillstandszeiten fallen Ablagerungen aus der Thermalsole aus, die sich an die Rohrwände anlegen und bei späterer Förderung abreißen können. Dabei wird auch Material des Rohres mit abgerissen, an denen später Säurekorrosion bevorzugt ansetzen kann.

Bei mehreren Fördertests wurde die Thermalsole der Bohrung hydrochemisch untersucht, mit der Zielstellung, herauszufinden, ob nach Abkühlung des Thermalwassers in den obertägigen Anlagen beziehungsweise bei der anschließenden Reinjektion des Wassers Probleme mit Ausfällungen auftreten können. Als kritisch werden in diesem Zusammenhang vor allem Sulfatausfällungen angesehen, da diese schwer wieder löslich sind. Es zeigt sich, dass mit relevanten Mengen an Sulfatausfällungen im geothermischen Anlagenbetrieb zu rechnen ist. Bei einer Förderrate von 7 l/s und Ausfällungen von ca. 10 mg/l können sich maximal bis zu 250 g/h Sulfat-Ablagerungen ergeben. Die Menge der ausgefallenen Sulfatminerale ist relativ unabhängig davon, ob Sauerstoff Zutritt oder nicht. Sauerstoffausschluss muss aber in der gesamten Anlage gewährleistet sein, unter anderem um die Ausfällungen von Eisenmineralen (Akaganéit) zu vermeiden. Die Temperaturabsenkung ist ursächlich für die Ausfällung der Sulfatminerale auch wenn im untersuchten Bereich von 20 °C bis 60 °C kein großer Temperatureinfluss nachgewiesen werden konnte.

Die Arbeitsgruppe "Experimentelle Geophysik" der Ruhr-Universität Bochum hat im Auftrag des LIAG den Selbststützungsmechanismus von hydraulischen Rissen in geschichteten Sedimenten untersucht. Diese Untersuchungen haben gegenüber Beobachtungen an hydraulisch induzierten Rissen bzw. stimulierten, vorhandenen Störungsflächen in Kristallingesteinen bisher keine neue Möglichkeit zur Selbststützung aufzeigen können. Schichten mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften führen lediglich zu sehr selektiver Stützung. Die zentrale Bedingung ist neben einer gewissen Rauigkeit der Rissfläche das Vorhandensein von Scherspannung auf der Rissfläche. Der Abbau dieser Spannung und die damit einhergehende Verschiebung der Rissoberflächen gegeneinander bei der Rissentstehung haben den potentiell größten Einfluss auf die resultierende hydraulische Transmissivität.

Zur Untersuchung des thermischen Langzeitverhaltens beim wochen- und jahreszyklischen Betrieb wurden numerische Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Modellrechnungen zeigen, dass mit dem zyklischen Verfahren wirtschaftlich relevante thermische Leistungen in der Größenordnung von 2 MW für die Beheizung großer Gebäudekomplexe über Betriebszeiten von mindestens 25 Jahren zu erzielen sind. Der jahreszyklische Betrieb hat, in allen betrachteten Szenarien unter erwarteten Betriebsbedingungen, gegenüber dem Wochenzyklus sowie dem Tageszyklus einen klaren Vorteil, sowohl bei der thermischen Leistung als auch beim Wirkungsgrad. Darüber hinaus hat der jahreszyklische Betrieb gegenüber dem tages- und wochenzyklischen Betrieb den

deutlichen Vorteil, dass eine Wärmeversorgung des GEOZENTRUMS Hannover unabhängig von Tages- und Nachtzeit sowie von Wochen-, Feier- und Sonntagen gewährleistet ist. Lediglich in den Sommermonaten müsste die Warmwasserversorgung über einen Gasbrenner erfolgen.

Die numerischen Modellrechnungen zum Verfahren der Tiefenzirkulation (Einbohrlochzirkulation) wurden mit hydraulischen und Tracer-Test-Daten kalibriert. Als außerordentlich schwierig erwies sich hierbei die notwendige Berücksichtigung von druckabhängigen Parametern (insbesondere Rissleitfähigkeit). Es konnte jedoch eine sehr gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Bohrlochkopfdrukken erzielt werden. Dagegen ist die Anpassung der Tracerdaten partiell unbefriedigend geblieben.

Kurzdarstellung

Das Projekt „GeneSys Horstberg II – Methoden und Konzepte zur Erdwärmegewinnung aus gering permeablen Sedimentgesteinen“ ist ein Verbundprojekt. Die Arbeiten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) wurden gemeinsam mit dem Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) – vormals Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA) – durchgeführt und werden auch weitgehend gemeinsam in diesem Abschlussbericht für den Berichtszeitraum 01.04.2005 – 30.06.2009 dargestellt.

Das Vorhaben knüpft unmittelbar an ein vorangegangenes Projekt an. Es war ebenfalls ein Verbundvorhaben mit dem Titel „GeneSys Vorstudie – Erprobung der Wasserfrac-Technik und des Einsonden-Zweischichtverfahrens für die Direktwärmenutzung aus gering permeablen Sedimentgesteinen“. Diese Vorstudie wurde gemeinsam von der BGR (01.10.2002 – 31.12.2005; Förderkennzeichen 0327112) und dem LIAG (01.10.2002 – 30.9.2005; Förderkennzeichen 0327116) erstellt. Beide Verbundvorhaben wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert.

A. Aufgabenstellung

Die Nutzung der tiefen Erdwärme ist derzeit an das Vorhandensein von hydraulisch gut durchlässigen Schichten im Untergrund gebunden. Hydraulisch gut durchlässige Schichten machen jedoch nur einen sehr kleinen Teil der potenziell nutzbaren Schichten des tiefen Untergrundes aus. Wenn es gelingt, Erdwärme auch aus wenig durchlässigen bzw. dichten Gesteinsformationen zu entziehen, kann ein um ein Vielfaches größeres geothermisches Potenzial nutzbar gemacht werden. Der Geothermie kann dadurch eine weitgehende Standortunabhängigkeit verschafft werden. Die (Weiter-) Entwicklung entsprechender Methoden und Konzepte war das Ziel des Vorhabens.

Eine Schlüsselstellung für die angestrebte Nutzung von dichten Gesteinsformationen nimmt die Fractechnik, insbesondere die Wasserfractechnik, ein. Durch massive Injektion von Wasser werden Risse im Gestein erzeugt und hierdurch natürliche Wasserwegsamkeiten (Klüfte, Klüftzonen, Störungen) an Bohrungen hydraulisch angeschlossen. Auf diese Weise wird die Produktivität der Bohrungen gesteigert.

Bisher konzentrierten sich die Forschungsarbeiten auf kristalline Gesteine (Hot-Dry-Rock Projekte, bzw. „Enhanced Geothermal Systems“ wie in Soultz und Bad Urach). Erst in den letzten Jahren wurden in den Projekten GeneSys und Groß Schönebeck analoge Konzepte zur Erschließung dichter Sedimentgesteine untersucht. Während in Groß Schönebeck die Experimente auf Dubletten-Systeme in den subsalinaren Formationen (Rotliegend-Sandsteine) ausgerichtet sind, werden im GeneSys-Projekt Einbohrlochkonzepte in den suprasalinaren Formationen (Buntsandstein, Muschelkalk, Kreide) erprobt. Einbohrloch-Konzepte können gegenüber der üblichen Dublettenanlage eine kostengünstige Alternative darstellen und die große Lücke im Leistungsbereich zwischen der tiefen Erdwärmesonde ($\ll 1 \text{ MW}_{\text{th}}$) und den Dublettenanlagen ($> 5 \text{ MW}_{\text{th}}$) füllen. Sie sind für Verbraucher mittlerer Größe (Kliniken, Bürokomplexe, Industriebetriebe u. a.) interessant.

Im Zentrum dieses Vorhabens steht die praktische Untersuchung von Einbohrlochkonzepten zur Erschließung von Erdwärme aus dichten Sedimentgesteinen. Bei den bisherigen

Untersuchungen im Projekt GeneSys haben sich zwei Konzepte als besonders aussichtsreich erwiesen, das „Zyklus-Konzept“ und das „Tiefen-Zirkulationskonzept“. Diese neuartigen Konzepte sollten durch *in-situ* Experimente am Standort Horstberg weiter entwickelt werden. Die Übertragbarkeit dieser Konzepte sowie der Wasserfrac-Technik sollte in der Bohrung des GEOZENTRUMs am Standort Hannover geprüft werden.

Tiefenzirkulations-Konzept

Bei den im Jahr 2003 durchgeführten Stimulationstests wurde im Detfurth-Sandstein ein künstlicher Riss erzeugt, der sich bis in den ca. 120 m höher gelegenen Solling-Sandstein ausgebreitet hat. Diese Konstellation erlaubte es, Wasser zwischen den beiden Schichten über den Riss zu zirkulieren und sich dabei erhitzen zu lassen (Abb. A.1). Für einen Nachweis dieses Konzeptes wurde ein erstes Experiment Ende 2004 durchgeführt. Dazu wurden zunächst die beiden Schichten durch Einbau eines Packers an einem Steigrohr hydraulisch getrennt. Während eines mehrwöchigen Tests wurde Kaltwasser über das Steigrohr in den Detfurth-Sandstein verpresst und Heißwasser aus dem Solling-Sandstein gefördert. Während der Injektionsphase konnten ein deutlicher Druckanstieg im Solling-Sandstein sowie ein Tracer-Durchgang nachgewiesen werden. Auch stellte sich durch die Injektion von Frischwasser in den Detfurth-Sandstein eine erhöhte Produktion aus dem Solling-Sandstein ein. Die erzielte Produktionsfließrate war für die praktische Nutzung jedoch noch zu gering.

Folgende wissenschaftlich-technische Fragestellungen sollten im Zusammenhang mit diesem Konzept näher untersucht und beantwortet werden:

Wie kann die Fließrate auf eine praktisch nutzbare Größe gesteigert werden?

Die nicht ausreichende Produktionsrate bei dem bereits durchgeführten Test resultiert aus den ungenügenden Zuflussbedingungen im Produktionshorizont. Sie sollen durch einen massiven Wasserfrac-Test im Solling-Sandstein verbessert werden. Die Absicht ist damit einen hydraulischen Riss mit ähnlichen Dimensionen wie im Detfurth-Sandstein zu erzeugen (Abb. A1). Somit stehen sich in relativ geringen Abstand zwei großflächige Risse gegenüber, zwischen denen auch bei schlechter Durchlässigkeit des Gesteins eine ausreichende Fließrate erzielt werden kann. Gleichzeitig wird durch die veränderte Fließgeometrie gegenüber dem Ausgangszustand von nur einem Riss die Nutzungsdauer des geothermischen Systems deutlich gesteigert.

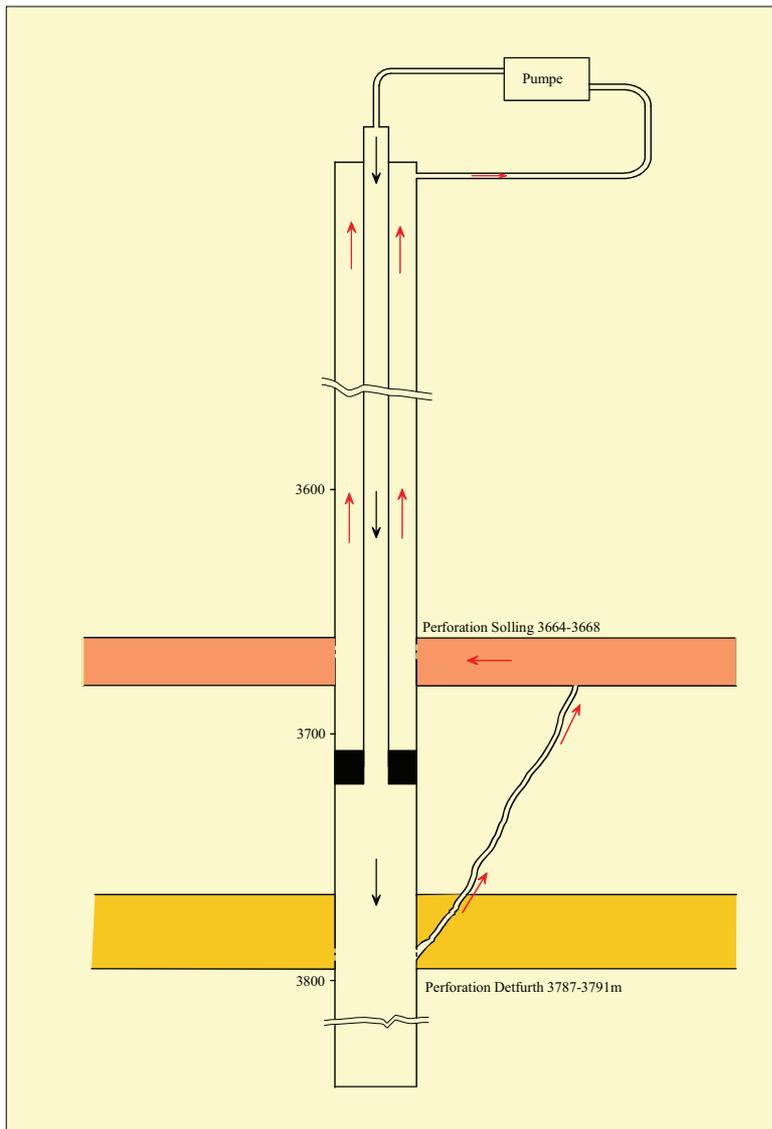


Abb. A.1: Schematische Darstellung des Ein-Bohrloch-Zirkulationssystems

Wie lassen sich die Druckverluste im System verringern?

Für den ökonomischen Betrieb eines Zirkulationssystems sollte die Differenz zwischen Injektions- und Produktionsdruck möglichst gering sein, da diese zusammen mit der Fließrate die aufzuwendende Pumpleistung bestimmt. In der Praxis sollte die Druckdifferenz deutlich unter 10 MPa liegen. Bei den im Vorläuferprojekt durchgeführten Versuchen lag diese Druckdifferenz jedoch über 10 MPa. Die Druckverluste lassen sich prinzipiell durch bereits oben genannte Verbesserung der Zuflussbedingungen verringern. Zum anderen können der Druckverlust durch Erhöhung des Druckniveaus im System verringert werden, da eine solche Erhöhung des Druckniveaus zu einer Vergrößerung der Rissöffnungsweite und damit der hydraulischen Leitfähigkeit des Risses führt.

Andererseits muss berücksichtigt werden, dass bei einem höheren Druckniveau die Flüssigkeitsverluste in die Formation zunehmen. Daher soll durch Zirkulationstests auf unterschiedlichen Druckniveaus ein optimales Druckniveau für den Betrieb ermittelt werden.

Wie lässt sich das thermische Langzeitverhalten des Systems prognostizieren?

Eine Prognose des thermischen Langzeitverhaltens ist nur mit numerischen Modelluntersuchungen möglich. Für die Entwicklung eines konzeptionellen Modells müssen Annahmen über die Geometrie des geothermischen Systems und über die Modellparameter getroffen werden. Wesentliche Informationen können bereits durch eine Auswertung der hydraulischen Tests ermittelt werden. Wichtige Informationen zur Geometrie des Systems können aus der Durchführung und Auswertung von Tracer-Experimenten gewonnen werden. Diese Tracer-Tests waren Bestandteil des Forschungsvorhabens der Arbeitsgruppe Prof. Sauter der Universität Göttingen (Jung et al. 2006).

Für die Modellrechnungen wurden die im Vorläuferprojekt entwickelten numerischen Modelle weiter ausgebaut, die auf dem Finite-Elemente Programm RockFlow basieren. Da die Modelle auch die hydraulischen Prozesse beschreiben, können sie zur Optimierung der Betriebsweisen genutzt werden.

Zyklus-Konzept

Das Zyklus-Konzept besteht darin, im zyklischen Wechsel kühles Wasser in einen großflächigen Riss einzupressen und dieses nach seiner Erwärmung während einer Einschlussphase im Riss wieder zu fördern (Abb. A.2). Zur Erprobung dieses Konzeptes wurden im Vorläuferprojekt entsprechende Experimente im Tages- und Wochenzyklus ausgeführt. Die Testdurchführung orientierte sich hinsichtlich der Wasservolumina und der Dauer der drei Phasen: Injektion, Einschluss und Rücklauf an den praktischen Erfordernissen für den Heizbetrieb des GEOZENTRUMs. So könnte beim Tageszyklus in der ersten Nachthälfte injiziert, in der zweiten Nachthälfte eingeschlossen und während des Tages produziert werden. Beim Wochenzyklus würde über das Wochenende injiziert und eingeschlossen und während der Woche produziert werden. Obwohl die Ergebnisse grundsätzlich positiv zu bewerten sind, muss die Effizienz des Systems erhöht werden. Dies kann durch eine Erhöhung der thermischen Leistung und durch Einsparung von Pumpenergie geschehen.

Wie lässt sich die thermische Leistung des Systems verbessern?

Die thermische Leistung des Systems kann durch eine räumliche Trennung von Injektions- und Produktionsstelle erhöht werden. Auf diese Weise umgeht man, dass das im Riss erhitzte Wasser die durch die Injektion von Kaltwasser bohrlochnah erzeugte Kühlzone wieder durchströmen muss und dabei abgekühlt wird.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, das System auf einem erhöhten Druckniveau zu betreiben. Durch die Druckerhöhung wird der Riss auch in den Teilgebieten wieder geöffnet, die bei geringerem Druck geschlossen sind (z. B. in den Tonsteinlagen). Damit steht für den Wärmeaustausch eine größere Fläche zur Verfügung. Gleichzeitig steigen jedoch auch die Wasserverluste aus dem System, so dass ein Optimum ermittelt werden muss.

Wie lässt sich Pumpenergie einsparen?

Für die Einsparung bieten sich mehrere Wege an. Energie-Rückgewinnung: Ein großer Teil der für die Injektion aufgewendeten Pumpenergie wird als elastische Energie im Riss gespeichert. Dieser Anteil ist im Prinzip mittels einer Wasserturbine rückgewinnbar. Die Untersuchungen könnten zeigen, ob sich auf diese Weise elektrischer Strom in einer wirtschaftlich relevanten Größenordnung speichern und wiedergewinnen lässt.

Nutzung von zwei Rissen (Abb. A2): Es sollte versucht werden, das Wasser zwischen zwei in großen Tiefen und unter etwa gleich hohem Druck stehenden Rissen hin und her zu pumpen. Eine solche Betriebsweise wird durch den aktuellen Ausbau der Bohrung ermöglicht. Dieser Ausbau erlaubt es, das Wasser zwischen den Rissen im Detfurth- und im Solling-Sandstein hin und her zu pumpen. Der Betrieb wird auf einem hohen Druckniveau durchgeführt, jedoch sind die Druckdifferenzen zwischen den Rissen relativ gering, so dass die jeweils aufzubringende Pumpleistung deutlich geringer ist als bei einer Betriebsweise, bei der das Wasser produktionsseitig auf Atmosphärendruck entspannt wird.

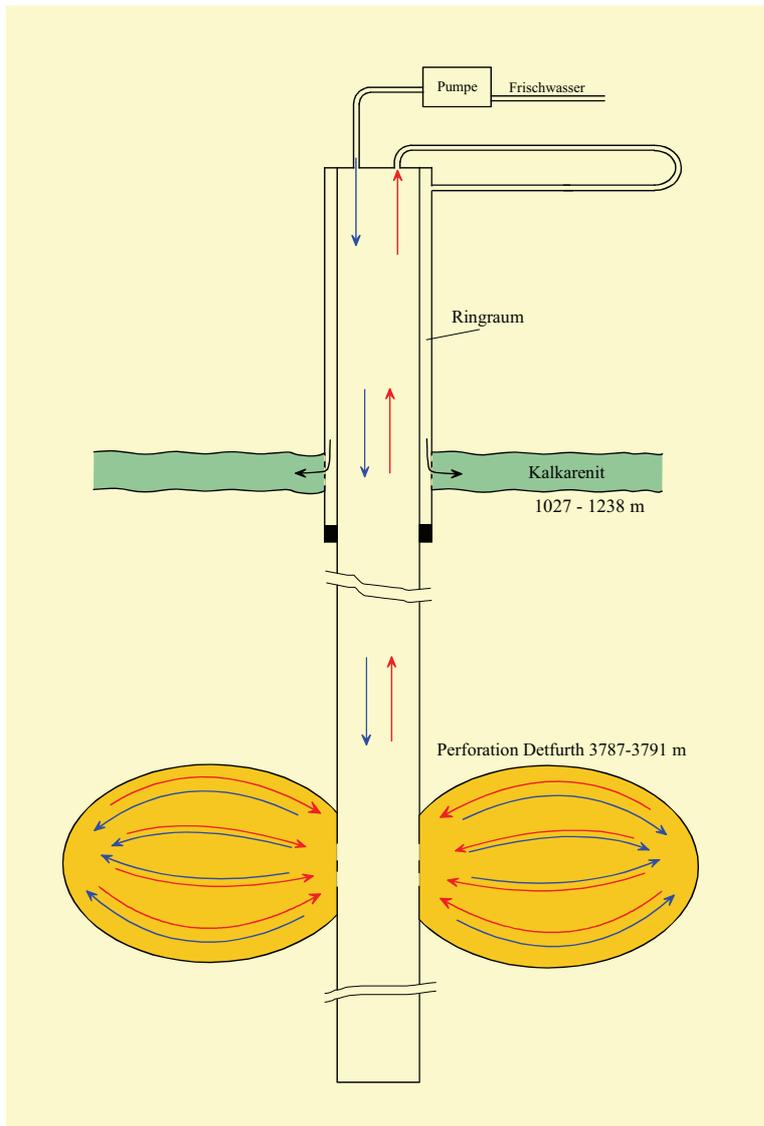


Abb. A.2: Schematische Darstellung des zyklischen Betriebs

Wie lässt sich das thermische Langzeitverhalten des Systems prognostizieren?

Erste Modellrechnungen aus dem Vorläuferprojekt haben ergeben, dass über eine Nutzungsdauer von mehreren Jahrzehnten wirtschaftlich relevante thermische Leistungen mit dem Zyklus-Verfahren entzogen werden können. Das vorhandene numerische Modell wird auf die oben beschriebenen neuen Bedingungen angepasst und zur Prognose des thermischen Langzeitverhaltens genutzt. Auch hier soll eine optimierte Betriebsweise durch

numerische Untersuchungen bestimmt werden. Hier kann z.B. die zeitliche Aufteilung (Zyklen) der drei Phasen Injektion, Einschluss, Produktion und der Einfluss verschiedener Injektions- und Produktionsraten sowie unterschiedlicher untersucht werden.

Übertragbarkeit der Methoden und Konzepte

Die vorgestellten Konzepte wurden bisher nur am Standort Horstberg erprobt. Eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Standorte setzt voraus, dass die Wasserfrac-Technik ähnlich erfolgreich unter anderen tektonischen und lithologischen Bedingungen eingesetzt werden kann. Die Bohrung des GEOZENTRUMs Hannover bietet die Möglichkeit, die Wasserfrac-Technik an einem weiteren Standort zu erproben. Daher war geplant, auch in dieser Bohrung massive Wasserfrac-Tests durchzuführen. Die an den beiden Versuchsstandorten gewonnenen Beobachtungsergebnisse sollten miteinander verglichen werden, um allgemeine Aussagen hinsichtlich der Rissausbreitung und der hydraulischen Risseigenschaften abzuleiten. Insbesondere sollte der Einfluss des von der Salztektonik und der Schichtung der Gesteinsformationen bestimmten Spannungsregimes betrachtet werden (Arbeitsgruppe Prof. Dr. Gudmundsson, Universität Göttingen). Außerdem sollten Modelle erstellt werden, die die unterschiedlichen Ergebnisse von Frac-Experimenten in kristallinen und sedimentären Gesteinen wie z.B. die unterschiedliche Seismizität und die unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften der Risse erklären können (Arbeitsgruppe Prof. Gudmundsson, Universität Göttingen).

B. Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens

Die Voraussetzungen für die Durchführung der Vorstudie zu diesem Projekt wurden eingehend im Abschlussbericht des vorangegangenen Projekts (Jung et al. 2006) „GeneSys Vorstudie – Erprobung der Wasserfrac-Technik und des Einsonden-Zweischichtverfahrens für die Direktwärmenutzung aus gering permeablen Sedimentgesteinen“ beschrieben. Seitens des GEOZENTRUMs Hannover bestanden bereits zu Beginn der Vorstudie gute Voraussetzungen zur erfolgreichen Durchführung des Projektes: mehr als zwei Jahrzehnte Erfahrung in der HDR-Forschung durch federführende Beteiligung im europäischen HDR-Projekt Soultz-sous-Forêts und im deutschen „Falkenberg-Projekt“, umfangreiche Tiefbohrerfahrung aus dem Kontinentalen Tiefbohrprojekt (KTB), sowie gute Kenntnis der geologischen Bedingungen im Norddeutschen Raum.

Darüber hinaus gehende, wissenschaftliche und technische Erfahrungen konnten die BGR und das LIAG während der dreijährigen GeneSys Vorstudie sammeln. Während dieser Zeit wurde eine umfangreiche instrumentelle Ausstattung in das Projekt eingebracht. So verfügt die BGR (zuständig für das Testgelände in Horstberg) über Einrichtungen für hydraulische Tests, die zum Teil in der Vorstudie genutzt werden konnten, wie z. B. Messwerterfassungssystem, temperierte Drucksensoren für stabile Langzeitmessungen, Messsensoren für Durchfluss, Druck, Temperatur, Hoch- und Niederdruckleitungen, zwei elektrisch betriebene Hochdruckpumpen (je 360 kW) für Injektionstests sowie ein Hochleistungs-Tauchpumpe (Schlumberger) incl. Pumpenkammer. Ein beim LIAG vorhandenes Bohrlochmessfahrzeug (Teufenkapazität 6000 m) sowie eine elektrisch betriebene Winde (Teufenkapazität: > 4000 m) für den Einsatz von 2 Memory-Sonden zum Messen von Druck- und Temperaturwerten konnten in der Tiefbohrung Horstberg Z1 eingesetzt werden. Das LIAG

verfügt außerdem über Finite-Elemente-Programme und entsprechende Erfahrungen zur Berechnung des Fluid- und Wärmetransports in geothermischen Systemen.

Somit bestanden seitens des GEOZENTRUMs Hannover zu Beginn des Projektes gute Voraussetzungen zur erfolgreichen Durchführung des Forschungsvorhabens.

C. Stand von Wissenschaft und Technik zu Beginn des Vorhabens

Die vorgeschlagenen Konzepte zur Erschließung von geothermischer Energie aus gering permeablen Sedimentgesteinen basieren weitgehend auf den Ergebnissen und Erfahrungen der Hot-Dry-Rock-Forschung, die zur Zeit der ersten Ölpreiskrise 1973 begann und die geothermale Stromproduktion aus kristallinen Tiefengesteinen (Granit, Gneis) zum Ziel hat. Das in Los Alamos entwickelte Hot-Dry-Rock-Basiskonzept sah vor, zwei Tiefbohrungen durch hydraulisch erzeugte Gesteinsrisse zu verbinden und auf diese Weise einen großflächigen unterirdischen Wärmetauscher zu schaffen. Zur Wärmegewinnung sollte über eine der Bohrungen Kaltwasser in das Rissystem eingepresst und das im Rissystem erhitzte Wasser in der zweiten Bohrung wieder zur Oberfläche geleitet werden. Das überhitzte Wasser steht in diesem geschlossenen Kreislauf unter Druck, so dass ein Sieden verhindert wird. Der zur Stromerzeugung benötigte Dampf wird in einem Sekundärkreislauf erzeugt.

Das Hot-Dry-Rock-Basiskonzept ist seitdem in mehreren wissenschaftlichen Grundlagenprojekten Falkenberg (Deutschland), Le Mayet de Montagne (Frankreich), Hachimantai (Japan) Fjällbacka (Schweden) und in einigen Großprojekten Los Alamos (U.S.A.), Camborne (England), Hijiori und Ogachi (Japan) weiterentwickelt worden. Die bisher besten Ergebnisse wurden im Europäischen Hot-Dry-Rock-Projekt Soultz erreicht, an dem die BGR und das LIAG seit dem Beginn im Jahr 1987 beteiligt sind. Dort gelang es in 3 km Tiefe ein ca. 3 km² großes Rissystem zu erzeugen und damit zwei 500 m voneinander entfernte Tiefbohrungen zu verbinden. Während eines viermonatigen Probetriebs wurden mit einer Fließrate von 90 m³/h und einer thermischen Leistung von 10 MW erstmals wirtschaftlich relevante Werte erreicht. Zwischenzeitlich konnte ein thermisches Reservoir in 5000 m Tiefe über drei Tiefbohrungen erschlossen werden. Über ein Kraftwerk (ORC-Anlage der Firmen Crystar und Turboden) können derzeit 1,5 MW_{el} ins örtliche Stromnetz eingespeist werden.

Der weitere Erfolg des HDR-Konzeptes hängt wesentlich von einem erfolgreichen Einsatz der Frac-Technik (Hydraulic-Fracturing) ab. Diese wurde in der Erdöl/Erdgas-Industrie entwickelt und seit ihrer Einführung vor mehr als 50 Jahren in Erdöl- und Erdgasbohrungen eingesetzt, um die Ergiebigkeit der Förderbohrungen zu steigern. Durch Einpressen von Flüssigkeit in Tiefbohrungen wird bei diesem Verfahren das Gestein hydraulisch aufgespalten. Im Idealfall entsteht an gegenüberliegenden Seiten der Bohrlochwand ein axial verlaufendes Risspaar, das sich bei anhaltender Flüssigkeitsinjektion als Zugriss im Gestein ausbreitet. Die Ausbreitungsebene des Risspaares steht senkrecht zur Richtung der minimalen Gebirgsspannung. Da in der Regel eine der beiden horizontalen Hauptspannungen die minimale Gebirgsspannung ist, verlaufen die Risse meistens vertikal. Um ein Schließen der Risse nach Beendigung der Frac-Operation zu verhindern, werden in der Erdöl-/Erdgasindustrie der Flüssigkeit als Stützmittel Sand oder ähnliche Substrate

beigegeben. Um diese in die Risse transportieren zu können, verwendet man für die Injektion spezielle Gels. Die hohe Viskosität dieser Gels verhindert gleichzeitig zu hohe Flüssigkeitsverluste in die Gesteinsmatrix während der Frac-Operation. Bei Fractests in Erdöl-/Ergasfeldern werden typischerweise Flüssigkeitsvolumina von wenigen hundert Kubikmetern verpresst und damit Risslängen um hundert Meter erreicht. Die Öffnungsweite der gestützten Risse liegt i. A. zwischen 5 und 10 mm. Ihre Transmissibilität (hydraulische Leitfähigkeit) erreicht maximal wenige Darcy-Meter. Eine erfolgreiche Frac-Operation kann die Produktivität einer Erdöl-/Erdgasbohrung verdoppeln oder verdreifachen. Trotz des langjährigen Einsatzes der Frac-Technik in vielen hunderttausend Erdöl- und Erdgasbohrungen sind die oben beschriebenen Annahmen über die Rissausbreitung unter *in-situ* Bedingungen nicht experimentell gesichert, da keine direkten Beobachtungsmöglichkeiten bestehen und die Erdöl-/Erdgasindustrie auch mehr an dem Effekt der Frac-Operation als an einem Verständnis des Mechanismus interessiert ist. Hinzu kommt, dass das in den Firmen vorhandene Wissen nicht vollständig veröffentlicht wird.

Die für das Hot-Dry-Rock-Konzept erforderlichen Rissflächen von mehreren Quadratkilometern übertreffen die Rissgröße bei der Erdöl-/Erdgasproduktion um etwa das hundertfache. Derart große Rissflächen können mit der in der Erdöl-/Erdgasindustrie gebräuchlichen Frac-Technik nicht erzeugt werden, da es nicht möglich ist, die Stützmittel in den Rissen über derart große Entfernungen zu transportieren. Abgesehen davon würden die immensen Kosten einen solchen Versuch schon aus wirtschaftlichen Gründen verbieten. Es war daher von Anfang an klar, dass auf den Einsatz der teuren Gels und Stützmittel verzichtet werden muss und dass der Weg zum Erfolg nur über die einfache Wasser-Frac-Technik führen kann. In den Hot-Dry-Rock-Projekten wurden daher fast ausschließlich Wasser-Fractests ausgeführt. Bei typischen Tests dieser Art werden Wasservolumina von 10.000 – 30.000 m³ mit Fließraten bis zu 100 l/s verpresst. Im Gegensatz zu den Erdöl-/Erdgas-Fractests, bei denen in kurze mittels Packer abgedichtete Bohrlochsektionen injiziert wird, erfolgt bei den HDR-Fractests die Injektion i. A. über mehrere hundert Meter lange unverrohrte Bohrlochabschnitte. Diese enthalten in der Regel eine Vielzahl natürlicher Gesteinsrisse in Form von Einzelklüften, Kluffzonen oder Störungen. Der Frac-Vorgang ist unter diesen Bedingungen sehr viel komplexer und noch nicht vollständig geklärt. Offensichtlich entstehen dabei nicht nur künstliche Risse, sondern es werden auch vorhandene Gesteinsrisse aufgeweitet oder gesichert.

Während der Frac-Tests entstehen Bruchsignale, die mit Hilfe hochempfindlicher Bohrlochgeophone in benachbarten Bohrungen, zum Teil auch an der Oberfläche registriert werden. Mit Hilfe dieser mikroseismischen Registrierungen können die Herdlokationen der Bruchsignale bestimmt und damit die raumzeitliche Ausbreitung des hydraulisch aktivierten (stimulierten) Gebirgsbereichs verfolgt werden. Sie enthalten außerdem Informationen über die Bruchmechanismen, die man in den letzten Jahren in internationalen Kooperationsprojekten (MTC-Projekt, MURPHY-Projekt) zu entschlüsseln versuchte.

Die Wasser-Frac-Technik erwies sich in den HDR-Projekten als sehr erfolgreich. In praktisch allen Großprojekten konnten damit Riss-Systeme von mehreren Quadratkilometern Größe hydraulisch stimuliert werden. Ihre Form ist annähernd planar und ihre Ausrichtung durch das Spannungsfeld vorgegeben. Es zeigte sich außerdem, dass die Risse durch einen Selbststützungsmechanismus offen gehalten werden. Ihre Transmissibilität erreicht bzw. übertrifft die Werte stützmittel-gefüllter Risse. Trotzdem sind die Fließwiderstände in den Rissen nach wie vor eines der Hauptprobleme der HDR-Technik. An allen HDR-Standorten

mit Ausnahme von Los Alamos erwiesen sich die stimulierten Riss-Systeme als peripher offen. Zumindest am Standort Soultz scheint dies darauf zurückzuführen sein, dass die stimulierten Rissysteme an großräumige hochpermeable Störungszonen angeschlossen sind und der große Erfolg in Soultz ist ganz wesentlich auf diesen Umstand zurückzuführen. Tracertests während der mehrmonatigen Zirkulation zeigten nämlich, dass nur etwa ein Drittel des in der Produktionsbohrung geförderten Thermalwasserstroms von der Reinjektionsbohrung stammte. Der überwiegende Teil floss aus Störungszonen zu. Aus dieser Beobachtung wurde ein modifiziertes Erschließungskonzept entwickelt, das die Existenz solcher Störungszonen voraussetzt und nutzt. Hauptziel dieses modifizierten Konzeptes ist es nicht mehr, durch die hydraulische Stimulation eine hydraulische Verbindung zwischen zwei Bohrungen herzustellen. Vielmehr soll jede Bohrung für sich durch ein stimuliertes Riss-System an das vorhandene grobmaschige Netzwerk permeabler Störungszonen angeschlossen werden. Auf diese Weise lassen sich sehr viel größere Zirkulationssysteme mit entsprechend längerer Nutzungsdauer erstellen als mit dem alten Konzept. Gleichzeitig vermeidet man das schwierige Problem, die Zweitbohrung gezielt in das stimulierte Rissystem der Erstbohrung lenken zu müssen.

Um die Übertragbarkeit der Strategien auf dichte Sedimentgesteine zu testen, wurden im Vorläuferprojekt in der Bohrung Horstberg Z1 bereits ein umfangreiches hydraulisches Testprogramm durchgeführt. Bei den Untersuchungen standen folgende Fragestellungen im Vordergrund:

Lassen sich auch in dichten Sedimentgesteinen mit der Wasser-Fractechnik Riss-systeme in der Größenordnung Quadratkilometer erzeugen?

Werden die stimulierten Risse durch natürliche Stützmechanismen offen gehalten, so dass hinreichende Transmissibilitäten bestehen bleiben?

Sind auch an geologisch normalen Standorten hochdurchlässige Störungs- oder Klufzonen vorhanden und lassen sich die stimulierten Rissysteme an diese anschließen?

Zur Beantwortung dieser Fragen wurden im Teufenbereich von 3700 m der Bohrung Horstberg Z1 ein massiver Wasserfrac-Test im Mittleren Buntsandstein ausgeführt. Wie im Kristallin ließ sich bei diesen Tests eine außerordentlich große Rissfläche (Mindestgröße mehrere hunderttausend Quadratmeter) erzeugen. Entgegen den Erwartungen von Frac-Experten der Erdöl-/Erdgasindustrie, breitete sich der Riss auch vertikal über eine große Distanz (mindestens 100 m) aus und durchschlug dabei mehrere Ton- und Sandsteinschichten. Auch konnte nachgewiesen werden, dass der Riss aufgrund natürlicher Stützmechanismen offen gehalten wird und zumindest in der Sandsteinschicht, in der er initiiert wurde, auch nach Druckentlastung eine hohe hydraulische Leitfähigkeit behält. Ein hydraulischer Anschluss an Wasser führende Störungszonen wie dies in Soultz beobachtet wurde, kam jedoch nicht zustande. Daher war keine dauerhafte Heißwasserproduktion mit einer wirtschaftlich relevanten Fließrate möglich.

Der während der Frac- und Einschließphasen beobachtete Druckverlauf lässt vermuten, dass es sich um einen Zugriss handelt. Zur Beobachtung der Rissausbreitung wurden die Tests durch geophysikalische Messungen (induzierte Seismizität, Neigungsmessungen, Eigenpotenzial) an oder nahe der Erdoberfläche überwacht. Im Gegensatz zu Wasserfrac-Tests in kristallinen Gesteinen, bei denen mehrere tausend oder einige zehntausend

induzierte Ereignisse registriert werden, konnten hier trotz ähnlicher Empfindlichkeit des Netzwerkes nur 11 induzierte Ereignisse detektiert werden.

D. Planung und Ablauf des Vorhabens

Aktivitäten an der Bohrung Horstberg Z1

Da die Bohrung Horstberg Z1 alle für das norddeutsche Becken typischen stratigraphischen Einheiten und Lithologien des Suprasalinars durchteuft, bietet sie optimale Bedingungen für die systematische Erprobung von Erschließungskonzepten zur geothermischen Energienutzung. Der Bohrplatz Horstberg, der bereits wesentliche Infrastrukturelemente aufweist, sollte deshalb weiter zu einem permanent betreibbaren Versuchsfeld ausgebaut werden. Dieses Versuchsfeld steht auch nach Ablauf der Projektlaufzeit für weitgehende Untersuchungen neuartiger Erschließungskonzepte auch anderen Arbeitsgruppen (z.B. GFZ Potsdam, Universitäten, Industriepartnern) zur Verfügung. Zusammen mit dem Versuchsfeld des GFZ in Groß Schönebeck, in dem die geothermische Nutzbarkeit der Formationen des Subsalinars untersucht werden, stehen damit Versuchsbohrungen zur Verfügung, die praktisch alle bohrtechnisch erreichbaren Formationen des Norddeutschen Beckens erfassen.

Einrichtung des Versuchsfeldes Horstberg zum Projektbeginn

Der Standort Horstberg verfügte bereits zu Beginn des Projektes über eine umfangreiche Infrastruktur, wie z.B. Stromversorgung, Wasserversorgung, Wasserreservoir, Telefonanschluss, befestigter Platz und Zufahrtswege und ein seismisches Beobachtungsnetzwerk. Für einen permanenten Betrieb sollten weitere Versuchseinrichtungen installiert werden. Dadurch wird eine flexible und kostengünstige Durchführung hydraulischer Tests und Stimulationsarbeiten zur Erprobung neuartiger Erschließungskonzepte ermöglicht. Die Einrichtung des Versuchsfeldes ist in Kapitel 1 detailliert erläutert.

Untersuchung des Langzeitverhaltens der Risstransmissivität

Für die Nutzung stimulierter geothermischer Systeme ist das Langzeitverhalten der Risstransmissivität von entscheidender Bedeutung. Das Langzeitverhalten der Transmissivität Stützmittel-freier Risse wurde bisher nicht systematisch untersucht und es herrscht bei Experten der Erdöl-/Ergdasindustrie die Meinung vor, dass solche Risse nicht dauerhaft offen bleiben. Daher war geplant, die hydraulischen Eigenschaften des im Oktober 2003 im Detfurth-Sandstein erzeugten Risses durch weitere Tests zu untersuchen. Dazu waren Injektionstest mit geringer Fließrate und Produktionstests geplant (vgl. Kapitel 2 und 5).

Untersuchung der hydraulischen Eigenschaften des Solling-Sandsteins

Die hydraulischen Eigenschaften des Solling-Sandsteins konnten in der Vergangenheit nicht ermittelt werden. Dies wird erst durch den aktuell in der Bohrung vorhandenen Ausbau, der den Solling-Sandstein vom Detfurth-Sandstein trennt, ermöglicht. Die Kenntnis der hydraulischen Eigenschaften ist für eine abschließende Bewertung des bereits im Herbst 2004 durchgeführten Tiefenzirkulationstests und für die Planung von Stimulationsarbeiten und Zirkulationstests unerlässlich. Auch hier waren Injektionstests mit geringer Fließrate und Produktionstests vorgesehen (vgl. Kapitel 2).

Stimulation Solling

Durch den im November 2004 abgeschlossenen Tiefenzirkulationstest wurde nachgewiesen, dass der im Detfurth-Sandstein erzeugte Riss sich über 120 m nach oben bis in der Solling-Sandstein ausgebreitet hat. Aufgrund dieser hydraulischen Verbindung konnten bereits beachtliche Zirkulationsfließraten erzielt werden. Um die Zuflussverbindung aus dem Solling-Sandstein zu verbessern, sollte im Solling-Sandstein durch einen massiven Wasserfractest ein großflächiger Riss erzeugt werden. Durch das damit geschaffenen System von Parallelrissen wird eine deutliche Vergrößerung der Wärmeaustauschfläche erzielt und die hydraulischen Bedingungen für die Zirkulation verbessert. Derartige Systeme stellen niedrige Anforderungen an die hydraulischen Eigenschaften der Schichten zwischen den Rissen (hier: Solling-Sandstein) und können damit in weiten Teilen des Norddeutschen Beckens Anwendung finden (vgl. Kapitel 2).

Nach-Frac Test Solling

Um die hydraulischen Eigenschaften des erzeugten Risses zu untersuchen, wurden Injektions- und Produktionstests durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Tests werden verglichen mit denen entsprechender Tests, die im Detfurth-Sandstein durchgeführt wurden. Damit wird überprüft, ob ähnlich wie im Detfurth-Sandstein auch hier mit der Wasserfractechnik ein hochleitfähiger Riss erzeugt werden kann (vgl. Kapitel 2).

Tiefenzirkulations-Test

Bei diesem Test soll Wasser zwischen dem Detfurth- und Solling-Sandstein über das System von Parallelrissen zirkuliert werden. Hauptuntersuchungsziele waren der Wärmeaustausch und das hydraulische Verhalten dieses Systems. Die Zirkulation sollte bei verschiedenen Druckniveaus erfolgen, um die optimalen Betriebsbedingungen für eine Minimierung der Fließwiderstände und Flüssigkeitsverluste zu bestimmen.

Für die Zirkulation bei unterschiedlichen Druckniveaus ist der Einsatz einer Unterwasserpumpe nötig, da nur diese bei hohen Temperaturen des Mediums und Einlassdrücken betrieben werden können. Die Unterwasserpumpe sollte obertägig in eine Pumpenkammer installiert werden, so dass der kostspielige und aufwendige Einsatz der Pumpe in der Bohrung entfällt (vgl. Kapitel 2). Mittels Tracer-Zugabe sollte das Volumen des genutzten Systems bestimmt werden. Diese Informationen dienen der Kalibrierung des thermo-hydraulischen Modells (vgl. Kapitel 6).

Zyklische Tests

Mit großem Erfolg wurden im Frühjahr 2004 zyklische Tests durchgeführt, bei denen Kaltwasser in den Detfurth-Riss injiziert wurde, das sich während einer Verweilzeit im Riss erwärmte und als Heißwasser wieder aus dem Detfurth-Riss gefördert wurde. Obwohl relativ hohe Auslauftemperaturen erzielt wurden, besteht ein grundsätzliches Problem darin, dass das Wasser durch die während der Injektion geschaffene Kühlzone am Risseinlass rückgefördert werden muss. In den geplanten zyklischen Tests sollten Einlass und Auslass räumlich getrennt werden. Sofern durch die vorhergehende Stimulation des Solling-Sandsteins eine deutliche Verbesserung der hydraulischen Verbindung zwischen Solling und Detfurth erreicht wurde, werden zyklische Tests derart ausgeführt, dass in den Detfurth-Riss injiziert wird und nach einer Einschlusszeit aus dem Solling-Riss später produziert wird. Bei weiterhin ungenügender hydraulischer Verbindung wird das Wasser zwischen dem Detfurth-

Riss und dem Solling-Riss mit entsprechenden Verweilzeiten hin und her gepumpt. Dadurch wird das o.g. Problem umgangen (vgl. Kapitel 2 und 6).

Ein weiteres Problem für die Energiebilanz bei zyklischen Tests können die hydraulischen Druckverluste bei der Injektion und Rückförderung darstellen. Setzt man statt Wasser ein Fluid mit höherer Viskosität (Gel, Öl) ein, so lassen sich gegebenenfalls die Druckverluste dadurch minimieren, dass man weniger Fluid in die Matrix verliert und permanent oberhalb des Rissöffnungsdrucks arbeitet. In Abhängigkeit von den Ergebnissen bei Verwendung von Wasser sollte diese Alternative zunächst durch numerische Untersuchungen geprüft und bei technischer Machbarkeit ggf. getestet werden.

Aktivitäten am Standort Hannover

Mit den am Standort Horstberg durchgeführten Experimenten wurde die prinzipielle Machbarkeit der geothermischen Direktwärmenutzung am Standort Hannover nachgewiesen. Die erzielten Ergebnisse wurden im Februar 2005 einem einschlägigen Expertenteam zur Begutachtung vorgelegt. Die Empfehlung der Gutachtergruppe war die Grundlage für die Planung des Projektes am Standort Hannover. Planung und Ausschreibung der Bohrarbeiten erfolgten nach der Begutachtung, so dass bei der Antragstellung mit einem Bohrbeginn Ende 2005 gerechnet wurde. Die Bohrung sollte dann für hydraulische Tests und Stimulationsarbeiten voraussichtlich ab April 2006 zur Verfügung stehen. Mit diesen Tests sollte das geothermische System für die Direktwärmeversorgung des GEOZENTRUMs Hannover generiert werden. Die Kosten für operative Arbeiten am Standort Hannover sind im Haushalt der BGR eingestellt und belasteten nicht das Budget des beantragten Projektes. Wesentliche Teile des hydraulischen Testprogramms hätten mit der für Horstberg beschafften technischen Ausrüstung bestritten werden können. Die wissenschaftliche Mitarbeit an den Arbeiten in Hannover hätte die einmalige Chance geboten, die an der Bohrung Horstberg erprobten Konzepte und Methoden an einer weiteren Tiefbohrung zu testen. Diese zusätzlichen Erfahrungen wären für eine bessere Einschätzung der Übertragbarkeit der Erschließungskonzepte und Methoden auf andere Standorte wichtig gewesen.

Die geplanten Arbeiten am Standort Hannover konnten jedoch nicht durchgeführt werden, da die Bohranlage erst im Juni 2009 mobilisiert und aufgebaut werden konnte. Am 24.06.2009 begann die Bohrarbeiten an der Tiefbohrung Groß Buchholz GT-1 (GEOZENTRUM), eine Woche vor Ende des Projekts GeneSys- Horstberg II.

Auswertung der Experimente und Modellrechnungen

Hydraulische Testauswertung

Das oben beschriebene Testprogramm umfasste eine Vielzahl unterschiedlicher Tests am Standort Horstberg. Diese Tests mussten z.T. zeitnah zur weiteren Testplanung ausgewertet werden. Da zahlreiche Einzelaspekte im Rahmen dieser ad-hoc Auswertung nicht berücksichtigt werden konnten, wurden die Auswertungen auch nach Beendigung der Geländearbeiten fortgeführt. Zur Auswertung wurden kommerziell erhältliche ausgereifte Software-Lösungen genutzt, die in Vorläuferprojekten beschafft wurden. Wegen der vorhandenen Lizenzverträge, die aus Kernhaushaltsmitteln bezahlt werden, war eine Auswertung nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik gewährleistet. Neben dem Programmpaket Saphir (Kappa) für die Auswertung hydraulischer Tests verfügen wir

mit dem Programm FracPro über eine leistungsfähige Software für die Auswertung und Planung von Stimulationsexperimenten (vgl. Kapitel 2).

Numerische Untersuchungen zum thermo-hydraulischen Langzeitverhalten der geothermischen Systeme

Mittels numerischer Modelle, die in den Vorläuferprojekten (GeneSys und Soultz) auf der Basis des Finite-Elementen-Programms ROCKFLOW entwickelt wurden, wurde das thermische Langzeitverhalten der generierten geothermischen Systeme untersucht. Damit konnten belastbare Prognosen für die Wärmeversorgung des GEOZENTRUMs erstellt werden. Die im Vorfeld der Prognoserechnung notwendige Kalibrierung des numerischen Modells greift auf die Ergebnisse der hydraulischen Testauswertung zurück und erlaubt somit deren Überprüfung. Wegen der zeitlich begrenzten Beobachtungsdauer im Rahmen der Experimente sind numerische Langzeitbetrachtungen unerlässlich für eine Bewertung der entwickelten Konzepte (vgl. Kapitel 2 und 6).

Meilensteinplanung

Aufgrund des verspäteten Bohrbeginns in Hannover mussten die für den Standort Hannover geplanten Arbeiten entfallen. Wegen eines unerwarteten langwierigen Packerwechsels auf dem Testgelände in Horstberg (Kapitel 3) und starker Korrosion an den Stahlrohren des Förderstranges der Bohrung Horstberg Z1 musste das Test- und Untersuchungsprogramm der neuen technischen Lage angepasst und mit modifizierten wissenschaftlichen und technischen Prioritäten fortgeführt werden. So wurden z. B. die in Kapitel 4 dargestellten Arbeiten über Ausfällungen und Korrosion in das Untersuchungsprogramm neu aufgenommen, da in der Bohrung in Hannover gleiche oder ähnliche Stähle wie in Horstberg eingesetzt werden sollten. Ebenso ist die Zusammensetzung der Tiefenwässer an beiden Standorten vergleichbar.

E. Zusammenarbeit mit Projektpartnern und anderen Stellen

Das GeneSys-Projekt ist ein Gemeinschaftsprojekt der BGR und des LIAG, die beide Teil des GEOZENTRUMs Hannover sind. Das Geozentrum Hannover verfügt über spezialisierte Arbeitsgruppen aus praktisch allen geowissenschaftlichen Disziplinen und Teildisziplinen. Durch viele Informationsveranstaltungen im Vorfeld des Projekts gelang es, nahezu alle Mitarbeiter des Geozentrums einschließlich der Leitungsebene und der Administration für das Vorhaben zu interessieren und eine große Bereitschaft zur Mitarbeit zu erzeugen. Es lag deshalb nahe, zunächst die hauseigenen Ressourcen für das Projekt zu nutzen und nur für solche Aufgaben außerhäusige Gruppen hinzu zu ziehen, die nicht durch eigenes Know-How abgedeckt werden konnten. Dennoch kam es auch mit außerhäusigen Arbeitsgruppen zu intensiver Zusammenarbeit. Insbesondere ist hier der Erfahrungsaustausch mit den vergleichbaren Projekten Soultz (Uni Bochum, Bestec, GTC-Kappelmeyer), Groß Schönebeck (GFZ-Potsdam) und Prometheus (Uni Bochum) zu nennen.

Der BGR oblag die operative Leitung und dem LIAG die wissenschaftliche Leitung. In zahlreichen Fällen wurde auf verschiedene im Geozentrum Hannover vorhandene Kompetenzen und Ausstattung zurückgegriffen. So wurden z.B. die Flachbohrungen für das mikroseismische Netzwerk zur Beobachtung der induzierten Mikroseismizität mit dem Bohrgerät des damaligen NLFb (jetzt: LBEG) abgeteuft und Materialproben aus der Bohrung

chemisch und röntgenografisch untersucht. Bei den hydraulischen Tests konnte die am Geozentrum Hannover aus Vorgängerprojekten vorhandene Ausstattung eingesetzt werden. Das umfangreiche Messprogramm zum geophysikalischen Frac-Monitoring konnte nur durch einen erheblichen Personalaufwand seitens des LIAG durchgeführt werden. Auch die gute apparative Ausstattung des Institutes war von enormem Vorteil. Ohne die dadurch entstehende Flexibilität wären die Messungen in der vorliegenden Qualität nicht möglich gewesen.

Im Rahmen eines Auftrages an die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Sauter (Universität Göttingen) wurden Tracer-Tests in der Bohrung durchgeführt. Mit dieser Arbeitsgruppe und mit der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Gudmundsson, ehemals Universität Göttingen, entstand eine weitergehende Zusammenarbeit. Zum Beginn der Projektlaufzeit ergab sich eine Kooperation mit der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Renner (Ruhr-Universität Bochum), die im Rahmen des GeneSys Horstberg II Projekts intensiviert wurde (vgl. Kapitel 5).

Ergebnisse

1. Bohrung und Versuchsfeld

Die Ergebnisse der Untersuchungen im Projekt Horstberg I an der Bohrung Horstberg Z1 lassen es als sehr wahrscheinlich erscheinen, dass durch die massive Fracoperation im Detfurth-Horizont ein hydraulischer Anschluss zu den ca. 120 m höher gelegenen Solling-Sandsteinen erzielt wurde. Hydraulisch sind sowohl bei Förderung aus dem Detfurth-Sandstein als auch bei Förderung aus dem Solling-Sandstein eindeutige Signaturen eines gut leitfähigen Risses erkennbar. Durch den hydraulischen Anschluss des Risses könnte innerhalb einer Bohrung ein Zirkulationssystem realisiert werden, z.B. Injektion in den Riss und Produktion aus dem höher gelegenen Solling-Sandstein. Auf diese Weise würde ein geschlossenes Zirkulationssystem zwischen 2 verschiedenen Schichten in einem Bohrloch entstehen. Gegenüber dem „gewöhnlichen“ Dublettenbetrieb ist dieses Verfahren deutlich kostengünstiger (nur eine Bohrung) und risikoärmer und bietet sich vor allem für kleinere geothermische Anlagen an.

Zur Verifizierung dieser Annahmen war die Durchführung eines längeren Tiefenzirkulationsversuchs notwendig. Kleinere hydraulische Versuche sollten mit eigener Ausrüstung und Personal durchgeführt werden.

Somit wurden unmittelbar nach Bewilligung der Zuwendung die Beschaffung der hierzu notwendigen Ausrüstungskomponenten (Hochdruckpumpen, Nieder- und Hochdruckleitungen, Ladepumpen, Pumpenkammer, Tiefpumpe, Lager und Messwertcontainer, usw.) eingeleitet. Hierzu fanden Gespräche mit potenziellen Bietern statt, um eine optimal an unseren Bedarf angepasste Ausrüstung zusammenstellen zu können. In Abb. 1.1 ist der ursprünglich vorgesehene schematische Aufstellungsplan dargestellt. Durch diese Beschaffung im Projekt Horstberg II zum Aufbau eines permanenten Versuchsfeldes konnten zeit- und kostenintensive Ausschreibungen und Fremdkosten eingespart werden.

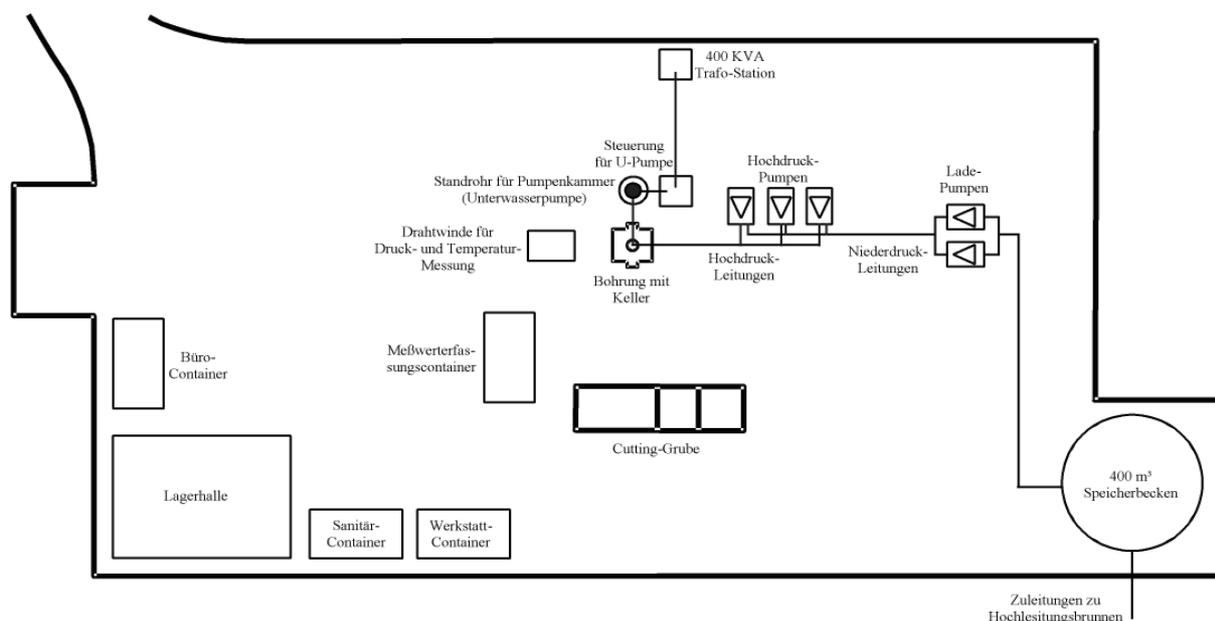


Abb. 1.1: Schematische Darstellung des geplanten Aufbaus des Versuchsfeldes

1.1. Bau der Pumpenkammer

Im Juli 2006 wurde direkt neben der Hauptbohrung eine 30 m tiefe Pumpenkammer errichtet, zur Aufnahme der neu beschafften Tauchpumpe (Electronic Submersible Pump, ESP). Mit der Tauchpumpe ist es möglich, einen kontinuierlichen Wasserkreislauf unter hohen Druck- und Temperaturbedingungen über einen längeren Zeitraum aufrecht zu halten (Abb. 1.2). Der Grund, warum diese Pumpe in eine eigene Pumpenkammer eingebaut wurde, lag darin, dass die Bohrung Horstberg stets unter hohem artesischen Druck steht und somit Wartungsarbeiten an einer Pumpe in der Bohrung mit hohen Kosten verbunden gewesen wären. Außerdem ist die Bohrung Horstberg mit einem 3 ½“ Förderstrang ausgebaut, dessen Innendurchmesser zu klein für die ESP gewesen wäre.

Für die formationsbedingten Druckverhältnisse und Temperaturen war der Bau einer mindestens 50 m tiefen Bohrung zur Aufnahme einer Tiefpumpe mit der erforderlichen hydraulischen Leistung notwendig.

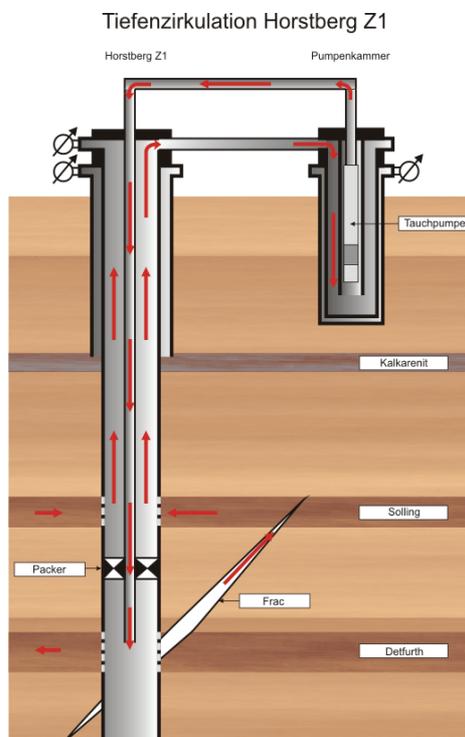


Abb. 1.2: Schematischer Aufbau Tiefenzirkulationsversuch mit Tiefpumpe; detaillierte Darstellung der Pumpenkammer in Anlage 1.1.

Aus den Versuchen des Horstberg Projektes I war bekannt, dass der durch den Formationsdruck in der Produktionsformation am Bohrlochkopf hervorgerufene Druck ca. 150 bar beträgt und Temperaturen über 130 °C zu erwarten sind und dass der Re-Injektionsdruck in den Detfurth-Sandstein ca. 300 bar oberhalb des natürlichen Formationsdruck liegt. Somit musste die Pumpenkammer sowie der aufzubauende Bohrlochkopf für eine Temperatur bis ca. 130 °C und Drücken bis 350 bar ausgelegt werden, gleiches galt für die Verbindungsleitungen. Aufgrund der für solche Baumaßnahmen vorgegebenen Bestimmungen wurde die Planung und Bauüberwachung an das Staatliche Baumanagement vergeben, Planungsbeginn im Oktober 2005, Vergabe im April 2006. Mit dem Bau wurde am 18. Juli 2006 begonnen. Zunächst wurde mit einer Schnecke eine Bohrung bis in Teufe von 4,5 m abgeteuft und durch Einbau einer 660 mm Stahlverrohrung gesichert. Im Lufthebebohrverfahren wurde die „Kammer“ anschließend bis in eine Teufe von 54,1 m vertieft

(Abb. 1.3a u. b). In diese Bohrung wurde eine 16“ Stahlverrohrung als äußere Kammer eingebaut und zementiert (Abb. 1.3c). Darin wurde die eigentliche Pumpenkammer bestehend aus zwei Rohrtouren abgehängt und der Bohrlochkopf montiert. So ist es möglich, im Bedarfsfall, die inneren Rohrtouren ohne Beschädigung der Pumpenkammer austauschen zu können.

Die Arbeiten zur Erstellung der Pumpenkammer wurden im Zeitraum 30.7. bis 4.8.2006 durchgeführt und mit dem Abdrücken der äußeren Kammer beendet.



Abb. 1.3a: Bohren der Pumpenkammer, Lufthebeverfahren



Abb. 1.3b: Lufthebebohrkopf Erweiterungsstufen



Abb. 1.3c: Rohreinbau und Bohrlochkopfmontage

1.2. Beschaffung und Inbetriebnahme einer Tiefpumpe

Erste Nachfragen und die Ausschreibung der für das Projekt und die Versuchsdurchführung notwendigen Unterwasser-Tiefpumpe (UT) begannen schon im Februar 2005. Die Tiefpumpe musste bei möglichst kleiner Bauart eine Temperaturbeständigkeit von min. 130 °C aufweisen und einen Differenzdruck von min. 150 bar aufbauen können. Der Beginn des Vergabeverfahrens war Januar 2005.

Aufgrund der begrenzten Bieter auf dem Weltmarkt und der geringen Verfügbarkeit, bedingt durch die herrschende Nachfragesituation auf dem Ölsektor und dem Geothermiesektor, war eine Beauftragung erst im Juni 2006 möglich. Der Zuschlag ging an die Firma Schlumberger (Reda; Abb. 1.4), die Auslieferung der Pumpe erfolgte im Februar 2007. Diese Pumpe sollte vorrangig der Durchführung von längerfristigen Zirkulationstests zwischen den beiden in der Bohrung erschlossenen Horizonten Solling und Detfurth dienen und perspektivisch auch in Hannover eingesetzt werden.

Im April 2007 wurde diese aus 126 Stufen bestehende UT (ca. 180 kW) in die extra errichtete Pumpenkammer eingebaut. Anschließend wurde ein erfolgreicher Testlauf durchgeführt. Der Aufbau der Pumpe und der Pumpenkammer, sowie technische Daten sind in Anlage 1.2 dargestellt. Der Einbau der Unterwassermotorpumpe erfolgte im Zeitraum 18.04. – 20.04.2007.

Ein langfristiger Zirkulationsversuch konnte, entgegen der Planung, mit dieser Pumpe jedoch nicht durchgeführt werden, da der in der Bohrung befindliche Packer umläufig wurde.



Abb. 1.4: Unterwasserpumpe der Fa. Schlumberger (Reda) und Einbau der Pumpe in die speziell errichtete Pumpenkammer.

1.3. Beschaffung und Inbetriebnahme der Hochdruckpumpen

Ein Auftrag zur Lieferung von elektrisch betriebenen Hochdruckpumpen inkl. Zubehör (Hoch- und Niederdruckleitungen, Ladepumpen, Manifolds) wurde nach Ausschreibung an ein mittelständisches Unternehmen vergeben. Die Ausrüstung wurde weitestgehend im dritten Quartal 2006 geliefert. Lediglich die bestellten Hochdruckleitungen konnten, bedingt durch den ausgelasteten amerikanischen Markt, erst Ende Dezember geliefert werden. Die Entscheidung, elektrisch betriebene Pumpen zu erwerben, war auch in Hinblick auf einen Einsatz in Hannover getroffen worden. Der Faktor Umweltverträglichkeit (Lärm, Abgase, Schutz des Untergrundes usw.) ist gerade für einen Einsatz in Hannover von großer Bedeutung. Der erste Versuchsaufbau erfolgte in Vorbereitung zum Zirkulationstest im November 2006. Hierzu wurden vom beauftragten Unternehmen Hochdruckleitungen kostenfrei zu Verfügung gestellt. Beide Pumpen liefen hierbei über einen Zeitraum von vier Wochen fehlerfrei. Mit Hilfe dieser Ausrüstung konnten jetzt kleinere Frac- und Injektionsversuche ohne zeitaufwendige Ausschreibungsverfahren und dem Problem der schlechten Verfügbarkeit kurzfristig ausgeführt werden. Im Anschluss wurde die zum Bohrgelände gehörende Brunnenbohrung mit einer leistungsstärkeren Brunnenpumpe ausgestattet, so dass die zur Verfügung stehende Wassermenge für diese kleineren Versuche ausreichend und somit keine Fremdbelieferung erforderlich war.

Der Betrieb dieser Ausrüstung konnte nach entsprechender Einweisung durch den Hersteller und Sicherheitsbelehrung durch bei der Bergbehörde zugelassener Aufsichtspersonen durch BGR eigenes Personal erfolgen und hat sich schon mehrfach bewehrt.

Die Pumpen (Abb. 1.5a u. b) sind so ausgelegt, dass deren Leistung für alle Versuche ausreichend ist (je 360 kW, Druck bis 600 bar, Raten bis 600 l/min bei ca. 100 bar je Pumpe). Die Hochdruckleitungen sind für eine Druckstufe von bis zu 10.000 psi (700 bar) ausgelegt. An das Manifold (Verteilungsfeld Niederdruck / Hochdruck) können bis zu sechs Pumpen angeschlossen werden, so dass der Einsatz auch für größere Versuche mit zusätzlich angemieteten Pumpen möglich ist. Die Niederdruckseite (Leitungen und elektrische Ladepumpen) sind ebenfalls dafür ausgelegt.

Wartungsarbeiten und die nach Gesetz (BVOT, EIBergV, usw.) vorgeschriebenen Prüfungen und Überprüfungen werden jährlich durch autorisierte Fremdfirmen ausgeführt, dokumentiert und der Bergbehörde mitgeteilt.



Abb. 1.5a: Hochdruckpumpe: Antriebsseite mit E-Motor



Abb. 1.5b: Hochdruckpumpe: Steuerungs- und Pumpenseite mit Frequenzumrichter und Triplexpumpe

1.4. Drahtwinde für den Einsatz von Memory-Sonden

Für die Aufzeichnung der Druck- und Temperaturdaten während des Versuchsablaufs wurde in den ersten Versuchen des Horstberg-I-Projekts eine Drahtwinde mit Memory Tools angemietet. Eine solche Anmietung war sehr kostenintensiv und die Durchführung der Versuchsreihen war sehr von der Verfügbarkeit der Winden und Sonden abhängig.

Um dies zu umgehen wurde im Horstberg-II-Projekt des GGA Instituts (heute LIAG) die Beschaffung einer Drahtwinde aufgenommen. Wesentliche Rahmenbedingungen waren ein von fremden Energiequellen unabhängiger Betrieb, leichte mobile Bauweise, min. 4000 m Draht auf der Winde, geeignet in der Festigkeit zur Aufnahme von min. zwei Sonden und Schwerstangen, damit die Sonden auch in unter Druck stehenden Bohrungen eingebaut werden können.

Nach längerer Beratungsphase durch verschiedene Bieter wurde ein Messwagen auf einem Doppelachshänger mit 6000 m Draht und elektro- hydraulischem Antrieb bestellt. Der Messwagen wurde zunächst mit zwei Memory Tools für die Erfassung von Druck- und Temperaturdaten ausgerüstet. Erste Einsätze in der Bohrung Horstberg erfolgten im Juli 2006 (Abb. 1.6a u. b).



Abb. 1.6a: Drahtwinde und Einbau der Memory-Sonde



Abb. 1.6b: Steuerseite der Drahtwinde

1.5. Weitere Einrichtungen und Umstrukturierungen auf dem Bohrplatz

Zur Verbesserung der Infrastruktur und der Messdatenerfassung wurden verschiedene Maßnahmen (unter anderem Baumaßnahmen) durchgeführt die nun kurz angesprochen werden.

1.5.1. Verbesserung der Datenerfassung und Aufbereitung

In den vergangenen Jahren hatte sich gezeigt, dass die auf dem Markt erhältlichen Drucksensoren, welche den Anforderungen bezüglich des Druckbereichs und der Auflösung genügen, eine deutliche Temperaturabhängigkeit des Messwerts aufweisen. Da das Verlegen von langen Hydraulikleitungen wegen des generell hohen Druckniveaus in Horstberg aus Sicherheitsgründen vermieden wurde, sind diese zwangsläufig den Schwankungen der Umgebungstemperatur im Außenbereich unterworfen. Diese führten speziell bei Langzeitbeobachtungen zu störenden Schwankungen im Drucksignal.

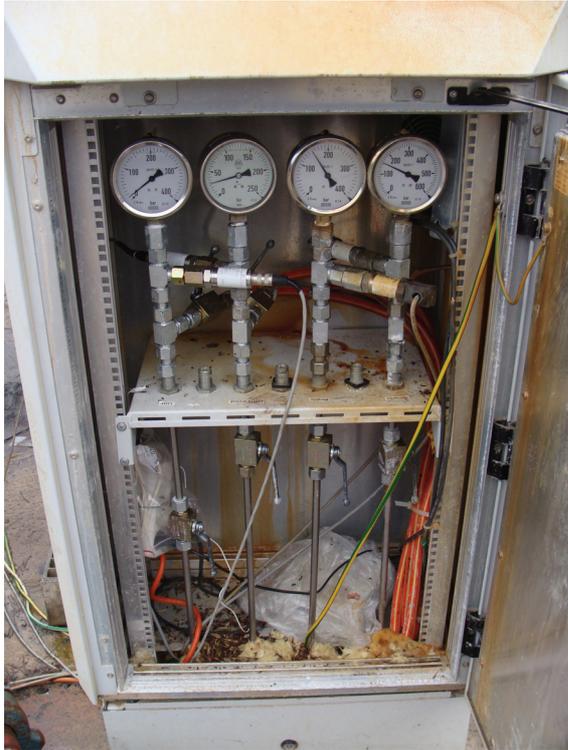


Abb. 1.7: *Temperierter Sensorschaltschrank*

Zur besseren Druckaufzeichnung wurden die Drucksensoren daher in einen temperierten Sensorschrank direkt am Bohrlochkopf eingebaut und die Leitungen zum Schrank isoliert. Zum Einsatz kommen Drucksensoren vom Typ Kistler RAT50A200BC1B mit Messbereichsendwerten von 200 und 500 bar. Die Daten werden mit einem Messdatenerfassungssystem Typ „Autolog3000“ der Firma Peekel Instruments aufgezeichnet. (Abb. 1.7). Der temperierte Sensorschrank wurde am 14.09.2006 in Betrieb genommen.

Um die Spannungsschwankungen zu kompensieren und kleine Ausfallzeiten zu überbrücken wurde eine unterbrechungsfreie Spannungsversorgung aufgebaut. Dadurch kann eine 230 V-Versorgung der Messdatenerfassung unabhängig vom Stromnetz für zwei Stunden aufrecht erhalten werden.

Ferner wurde eine Datenfernübertragung nach Hannover eingebaut, so dass die Daten jetzt auch in Hannover abgerufen werden können.

Ein neuer, größerer Container für den Betrieb der hydraulischen Messwerterfassung wurde in Betrieb genommen. Die Messwerterfassungsanlage läuft seit März 2006 im Dauerbetrieb. Der neue Container bietet deutlich verbesserte Arbeitsmöglichkeiten im Vergleich zu dem vorher genutzten Container, der jetzt als Elektrowerkstatt weiter verwendet wird.

1.5.2. Bau der Lager- und Montagehalle

Mit der Planung und Koordinierung der Arbeitsschritte des Baus der Lager- und Montagehalle wurde das Staatliche Baumanagement Lüneburg beauftragt. Beginn der Arbeiten war Mitte 2006, die Fertigstellung erfolgte im November 2006. Es wurde eine Halle in Stahlkonstruktion mit Trapezblechverkleidung und zwei Rolltoren beauftragt und gebaut. Sie hat eine Grundfläche von 15 x 10 m und eine Firsthöhe von ca. 6 m. In ihr werden alle beweglichen Ausrüstungskomponenten des Versuchsfeldes sowie die Drahtseilwinde inkl. Zubehör gelagert. Ferner wurde eine kleine Werkstatt für Kleinreparaturen und Wartungsarbeiten eingerichtet.

In den Abbildungen 1.8 und 1.9 ist die Einrichtung des Bohrplatzes mit Lager- und Montagehalle, Messcontainer, Pumpenkammer und Hochdruckpumpen dargestellt.



Abb. 1.8: Bohrplatz der Bohrung Horstberg Z 1: (1) Lager- und Montagehalle; (2) Messcontainer; (3) Pumpenkammer; (4 u. 5) Hochdruckpumpen; (6) Bohrlochkopf; (7) Niederdruckleitungen mit Ladepumpen



Abb. 1.9: Luftaufnahme Bohrplatz Horstberg Z1 während der Einbauarbeiten der Tiefpumpe.
 (1) Zufahrt
 (2) Lager- und Montagehalle
 (3) Messcontainer
 (4) u. (5) Hochdruckpumpen
 (6) Pumpenkammer und Steuerungscontainer
 (7) Bohrlochkopf

2. Hydraulische Tests in Horstberg

2.1. Übersicht über hydraulische Experimente

Im Zeitraum September 2003 bis Dezember 2004 (Vorstudie) wurden ein Vielzahl von Wasserfrac-Tests und hydraulischen Nach-Frac-Experimenten durchgeführt - siehe Tab. 2.1 (Jung et al., 2006). In dem aktuellen Projekt wurden zwischen 2006 bis 2008 zahlreiche Injektions- und Produktionstests im Detfurth und Solling sowie Packertests durchgeführt - siehe Tabelle 2.2. Fördertests für hydrogeochemische Untersuchungen werden gesondert im Kapitel 4 betrachtet.

Tabelle 2.1: Experimente in der Bohrung Horstberg Z1 (2003 und 2004). Grau hinterlegt: Wasserfrac-Tests, hellgrün: Tests zum Einbohrloch-Zweischichtverfahren, gelbgrün: Tests zum Zyklischen Verfahren, grün: Tests zum Tiefenzirkulations-Verfahren (Soll.: Solling; Detf.: Detfurth, Kalka.: Kalkarenit)

Zeitraum	Testhorizont	Zweck	Testart	Volumen, m ³	
				Injekt.	Produktion
29.09.- 26.10.03	Volpriehausen	Risserzeugung	Wasserfrac Rücklauf-tests	& 790	130
27.10.- 17.11.03	Detfurth	Risserzeugung Produktionshorizont	Wasserfractests	20100	1650
17.11.03- 20.12.04	Detfurth	Einsonden- Zweischichtverfahren	Zykl. Auslauf Detf., Injekt Kalkar.	6650	
20.01.- 02.02.04	Detfurth	Zyklusverfahren	Tageszyklus	3220	3290
02.02.- 11.02.04	Detfurth	Zyklusverfahren	Wochenzyklus	2570	2450
12.02.- 19.02.04	Detfurth	Einsonden- Zweischichtverfahren	Auslauf Detf., Injektion Kalkar.	2706	
20.02.- 17.03.04	Detfurth & Solling	Einsonden- Zweischichtverfahren	Auslauf Detf. & Soll., Injekt. Kalkar.	7100	
19.03.- 14.07.04	Detfurth & Solling	Risseigenschaften, Randbedingungen	hydr. Druckaufbau	0	
14.07.- 23.07.04	Detfurth & Solling	Einsonden- Zweischichtverfahren	Auslauf Detf. & Soll., Injekt. Kalka.	2350	
23.07.- 07.11.04	Detfurth & Solling	Risseigenschaften, Randbedingungen	hydr. Druckaufbau	0	
24.11.- 30.11.04	Detfurth & Solling	Erprobung Tiefenzirkulation	Injektion Detf., Auslauf Solling	6100	400
30.11.- 01.12.04	Solling	Risserzeugung Reinjektionshorizont	Wasserfractest	1700	
01.12.- 13.12.04	Detfurth & Solling	Erprobung Tiefenzirkulation	Injektion Detf., Auslauf Solling	2900	5200

Tabelle 2.2: Experimente in der Bohrung Horstberg Z1 (Projektlaufzeit: 01.04.2005 – 30.06.2009). Grün hinterlegt: Tests im Solling, gelb: Tests im Defurth, rot: Tests im Solling und Defurth, weiß: Packer- und Sondentests; Q: maximale Fließrate, ΔP : Druckabsenkung.

Zeitraum von	Zeitraum bis	Test-horizont	Test-name	Testart / Bemerkung	Q, l/s	ΔP , bar	Volumen, m ³ Injektion	Volumen, m ³ Produktion
14.06.2006	16.06.2006	Solling	Produktionstest	Produktionstest im Solling Reinjektion in den Kalkarenit	1,5	120		
26.06.2006	30.06.2006	Defurth	Produktionstest	Produktionstest im Defurth Reinjektion in den Kalkarenit	3,7	130		
30.08.2006		Solling	Stufenproduktions- test Solling	Stufenweise Druckabsenkung Offener Auslauf	3,0	150		
12.09.2006		Solling	Stufenproduktions- test Solling	Stufenweise Druckabsenkung Offener Auslauf	3,2	150		
25.09.2006	29.09.2006	Solling	Produktionstest	Produktionstest im Solling Reinjektion in den Kalkarenit	1,1	60		
08.11.2006	01.12.2007	Defurth Solling	Zirkulationstest	Injektion in den Defurth Produktion aus dem Solling Reinjektion in den Kalkarenit	7,5 5,0 - 2,8	max. P=330 90	13.000	2.000
01.03.2007	15.03.2007	Solling	Produktionstest	Produktionstest im Solling Reinjektion in den Ringraum 2	1,2	96		2.000
27.03.2007	29.03.2007	Solling	Injektionstest	Injektionstest im Solling Umläufigkeit des Packers	5,0	80		
04.06.2007	08.06.2007	Defurth Solling	Injektion / Förderung	Injektion in den Defurth Förderung aus den Solling Abdrücken der Pumpenkammer	7,5 4,5	110		
24.06.2007	26.06.2007	Tiefbohrung Horstberg Z1	Sondentest	Test der Druck-/Temperatur- Memory-Sonde				
11.09.2007	14.09.2007	Defurth	Injektionstest	Temperatur-Log im Kalkarenit, Muschelkalk und Buntsandstein Low rate Injection	2,0			
05.02.2008	22.02.2008	Defurth Solling	Produktionstest	Produktionstest im Defurth Mitproduktion aus dem Solling	10 - 2,4			5.000
10.03.2008	13.03.2008	Defurth Solling	Produktionstest	Produktionstest im Defurth Mitproduktion aus dem Solling	7,5			5.000
17.11.2008	31.01.2009	Tiefbohrung Horstberg Z1	Packertausch	Austausch des Bohrlöcherpackers				

2.1.1. Hydraulische Tests

Während der Projektphase GeneSys Horstberg II wurden in Horstberg in den Jahren 2006 bis 2008 zahlreiche hydraulische Versuche im Hinblick auf die Umsetzung von Einbohrlochkonzepten durchgeführt. Das Ziel dieser Tests bestand einerseits darin, die beiden an die Bohrung angeschlossenen Horizonte hydraulisch zu charakterisieren und andererseits einen mehrmonatigen Langzeittest des Zweischicht-Tiefenzirkulationskonzeptes vorzubereiten und durchzuführen.

Hydraulische Tests 2006

14.6. bis 16.6.2006 – Produktionstest im Solling

Der dreitägige Produktionstest aus dem Horizont des Solling-Sandsteins diente der Bestimmung dessen Produktivität, u.z. nach einer längeren Phase des Stillstands.

Es wurde aus dem Solling-Sandstein produziert bei gleichzeitiger Reinjektion in den Kalkarenit. Aufgezeichnete Messgrößen waren der Druck im Detfurth, der Druck im Solling, der Druck im Ringraum 1, der Druck des Kalkarenits, die Temperatur und die Fließrate.

Am Ende des Testes stellte sich eine Fließrate von 1,5 l/s bei einer Druckabsenkung von 120 bar ein. Dies ergab einen Produktivitätsindex von 0,0125 l/s/bar. Dieser ungewöhnlich niedrige Wert stand im Gegensatz zu den aufgrund der Poroperm-Daten des Solling-Sandsteins zu erwartenden Produktivität.

26.6. bis 30.6.2006 – Produktionstest im Detfurth

Der fünftägige Produktionstest aus dem Detfurth-Horizont diente der Bestimmung der Produktivität dieses Sandsteinhorizonts.

Es wurde aus dem Detfurth-Sandstein produziert und in den Kalkarenit reinjiziert. Zu Versuchsbeginn war der Produktionsstrang zum Detfurth mit Frischwasser gefüllt. Aufgezeichnete Messgrößen waren der Druck im Detfurth, der Druck im Solling, der Druck im Ringraum 1, der Druck des Kalkarenits, die Temperatur und die Fließrate.

Die Druckabsenkung von Beginn der Förderung zum Ende des Testes betrug 130 bar, wobei der höhere anfängliche Bohrlochkopfdruck auf Grund des Frischwassers berücksichtigt werden muss. Die erreichte Fließrate betrug 3,7 l/s.

30.8.2006 – Stufenproduktionstest im Solling

Der Stufenproduktionstest im Solling-Sandstein (Abb. 2.1) sollte die geringe Produktivität aus diesem Horizont klären. Vorab stellte sich die Frage, ob eventuell ein turbulentes Strömungsregime im Produktionsstrang für einen erhöhten Fließwiderstand verantwortlich sein könnte. Die stufenweise Erhöhung der Fließrate und die damit einhergehende Druckabsenkung ermöglichen eine Bestimmung des Fließwiderstandes. Bei laminarem Fließen verhält sich der Fließwiderstand linear proportional zur Fließratensteigerung. Liegt ein turbulentes Fließen vor, steigt der Fließwiderstand exponentiell mit der Fließrate.

Die während des Tests aufgezeichneten Messgrößen waren der Druck im Detfurth, der Druck im Solling, der Druck im Ringraum 1, der Druck des Kalkarenit, die Temperatur und die Fließrate.

Der Produktionstest erfolgte mit offenem Auslauf. Die maximale Druckabsenkung betrug 130 bar, wobei eine Fließrate von 3 l/s erreicht werden konnte. Eine Auswertung der Daten konnte keinen zweifelsfreien Zusammenhang zwischen dem Fließregime im Strang und der ungewöhnliche niedrigen Produktivität des Sollings herstellen.

Auffällig war ein bei der 6ten Steigerung der Fließrate (2,6 l/s) auftretender diskreter Sprung in der Fließrate. Die Ursache für dieses Phänomen konnte im Rahmen dieses Tests nicht geklärt werden.

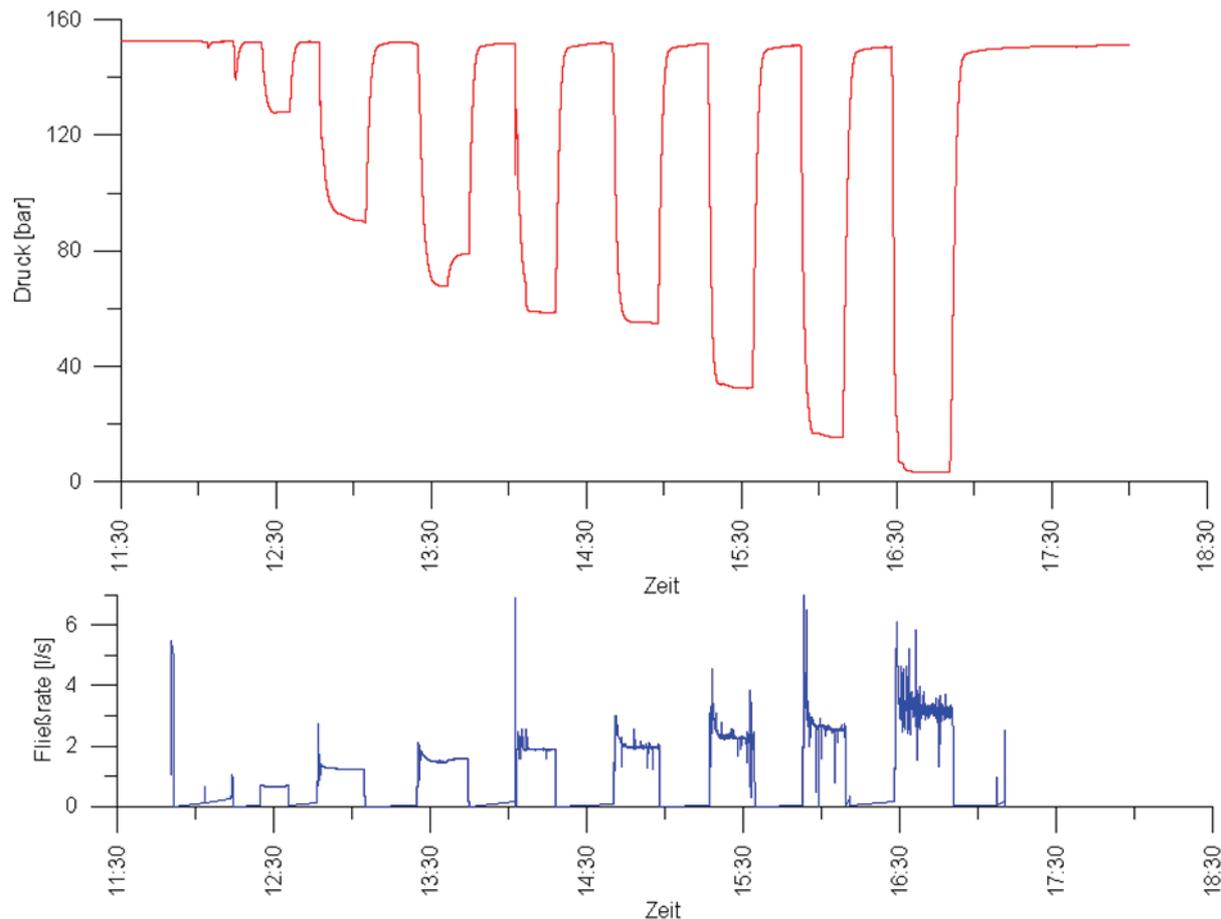


Abb. 2.1: Stufenproduktionstest im Solling am 30.08.2006

12.9.2006 – Stufenproduktionstest im Solling

Dieser Test erfolgte in seiner Anordnung und Ausführung dem Test vom 30.8.06 und diente der genaueren Untersuchung des spontanen Fließratenanstiegs. Der sprunghafte Anstieg in der Fließrate konnte bei ähnlicher Druckabsenkung reproduziert werden. Es handelte sich wie zuvor auch um einen diskreten Anstieg. Abb. 2.2 veranschaulicht diesen Effekt deutlich, hier sind die Fließwiderstände der Stufenproduktionstests im Solling vom 30.08.2006 und vom 12.09.2006 über die Fließraten aufgetragen.

Insgesamt konnte aus der niedrigen Produktivität, dem sprunghaften Anstieg in der Fließrate und den aus den Analysen der Druckanstiegskurven extrem hohen Skin-Faktoren – die ein Indiz für eine bohrlochnahe Fließbehinderung sind – abgeleitet werden, dass der Sandstein entweder eine starke Blockierung des Porenraumes aufweist und/oder womöglich nur einige

wenige Perforationsschüsse die Formation hydraulisch produktiv an die Bohrung angeschlossen haben.

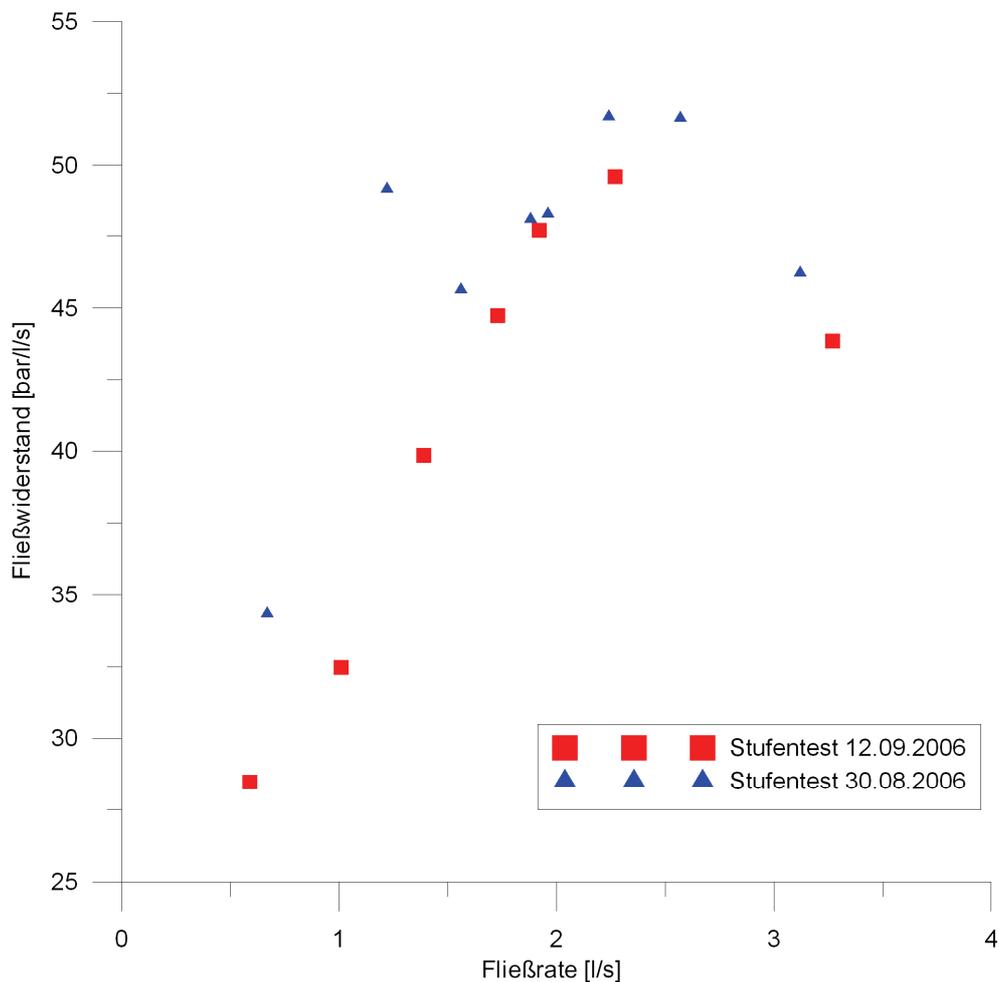


Abb. 2.2: Fließwiderstände der Stufenproduktionstests im Solling am 30.08.2006 und 12.09.2006

25.9. bis 29.9.2006 – Produktionstest im Solling

Dieser fünftägige Produktionstest (inklusive *Shut-in* vgl. Abb. 2.3) im Solling-Sandstein hatte zum Ziel, das Langzeitverhalten des Solling-Reservoirs zu untersuchen und zu zeigen, ob durch eine längere Produktionsphase der Porenraum des Sollings „freigefördert“ werden kann.

Während der Produktionsphase wurden der Druck im Detfurth, der Druck im Solling, der Druck im Ringraum 1, der Druck des Kalkarenits, die Temperatur (Produktion), die Temperatur (Sensoren) und die Fließrate aufgezeichnet.

Bereits am Anfang der Produktion stand am Bohrlochkopf das Formationsfluid an. Gleichzeitig wurde in den Kalkarenit injiziert. Die Fließrate stellte sich zum Ende des Testes auf 1,1 l/s bei einer Druckabsenkung von 60 bar (Abb. 2.3) ein. Daraus ergibt sich ein Produktivitätsindex von 0,018 l/s/bar. Ein „Freifördern“ der Formation konnte allerdings nicht erreicht werden.

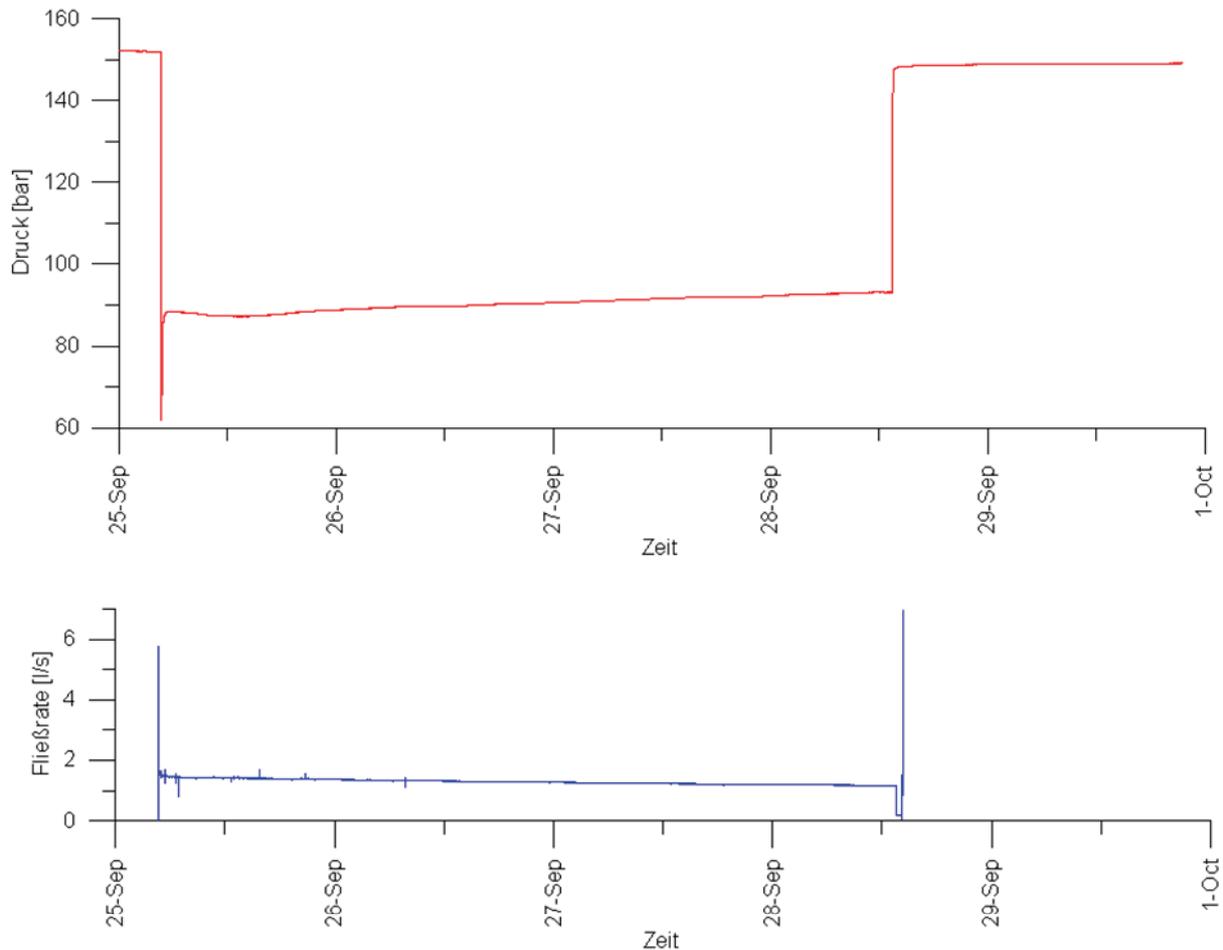


Abb. 2.3: Produktionstest im Solling vom 25.09.2006 bis 01.10.2006

8.11. bis 1.12.2006 - Zirkulationstest (Injektion Detfurth und Produktion Solling)

Dieser fast einmonatige Test sollte die hydraulische Kommunikation zwischen dem Detfurth- und dem Solling-Sandstein und somit das Tiefenzirkulationskonzept nach einer Stillstandszeit seit 2004 zeigen. Von besonderem Interesse war vor allem, ob der Selbststützungsmechanismus des in 2004 erzeugten hydraulischen Risses auch nach dieser Zeit der Inaktivität noch vorhanden war.

Während des Testes wurden der Druck im Detfurth, der Druck im Solling, der Druck im Ringraum 1, der Druck des Kalkarenit, die Temperatur (Produktion), die Temperatur (Sensoren), die Fließrate an der Injektionsseite und die Fließrate an der Produktionsseite aufgezeichnet.

Die Injektion erfolgte im täglichen Wechselbetrieb mit jeweils einer der BGR-Hochdruckpumpen. Vorab wurde eine 15-tägige Injektionsphase in den Detfurth-Sandstein mit 7,5 l/s (Abb. 2.4) durchgeführt. Der Bohrlochkopfdruck erhöhte sich dabei von anfangs 163 bar im Ruhezustand auf ca. 330 bar als *pseudo-steadystate* Wert. Anschließend wurde zusätzlich die Produktion aus dem Solling-Sandstein gestartet. Das geförderte Fluid wurde in den Kalkarenit injiziert. Insgesamt wurden während dieses Testes 13.000 m³ Frischwasser in die Detfurth-Formation injiziert. Das gesamte produzierte Volumen betrug 2.000 m³.

Durch die Injektion in den Detfurth konnte ein Druckanstieg im Solling-Sandstein von anfangs 150 bar (WHP) auf 180 bar beobachtet werden. Dies sprach für die Tatsache, dass nach wie vor eine hydraulische Kommunikation zwischen den beiden Horizonten bestand und dass somit die langzeitige Nutzbarkeit von hydraulischen Rissen auch im Sedimentgestein möglich ist. Bei der Förderung aus dem Solling wurde nach einer anfänglichen Produktion des Formationsfluids mit einer Dichte von ca. 1,2 g/cm³ zunehmend versüßtes Wasser mit abnehmender Dichte bis hin zu fast Frischwasserdichte zu Tage gefördert; dies konnte nur aus dem tiefer gelegenen Detfurth-Sandstein kommen. und untermauerte die Kommunikation zwischen den beiden Formationen. Bei anhaltender Injektion in den Detfurth konnte bei einer Produktion aus dem Solling mit einer Druckabsenkung von 90 bar eine Fließrate von 5,0 bis 2,8 l/s erreicht werden. Dies ergab einen Produktivitätsindex von 0,031 l/s/bar, welcher durch die Erhöhung des Lagerstättendrucks im Solling, über den Riss aus dem Detfurth, eine Verbesserung um den Faktor von ca. 1,7 darstellte.

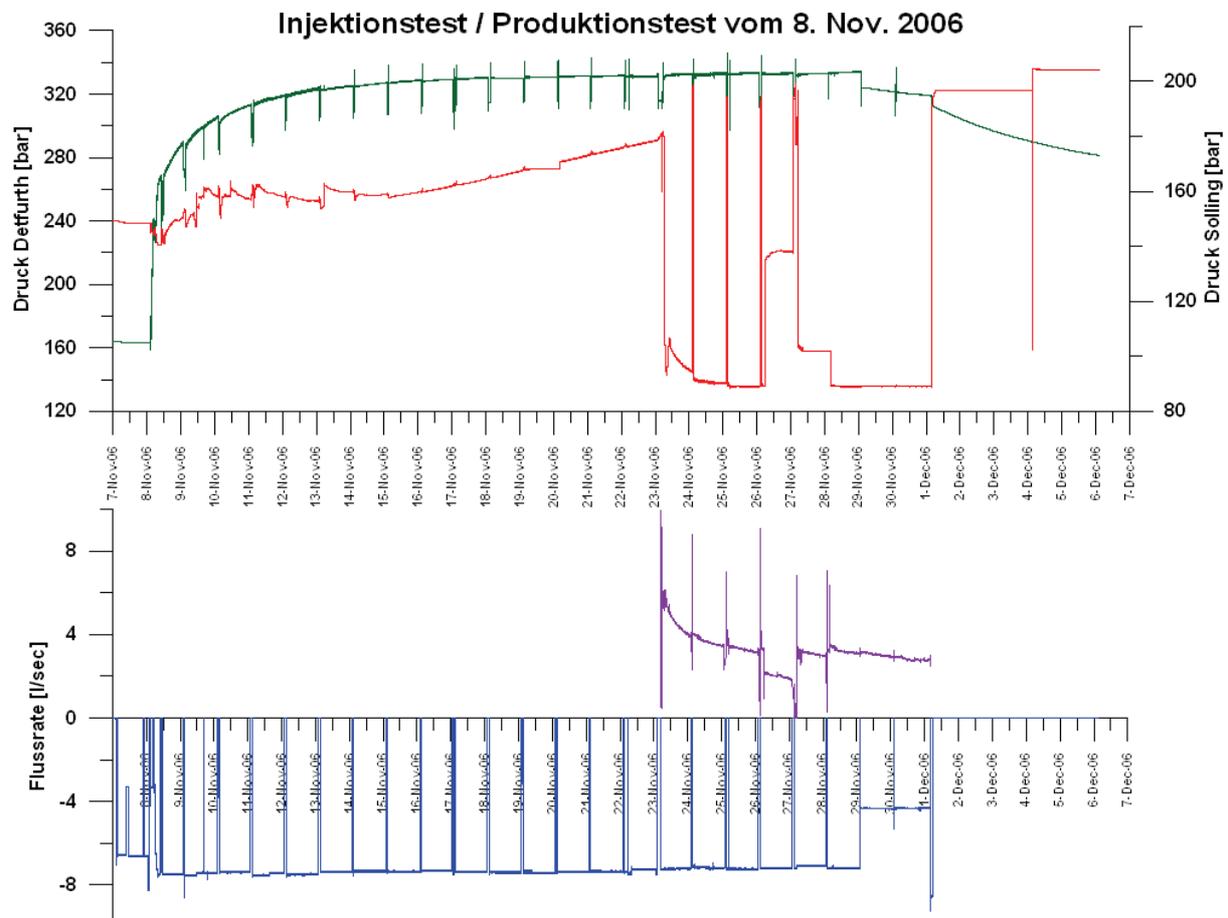


Abb. 2.4: Injektionstest Detfurth und Produktionstest Solling vom 08.11.2006 bis 01.12.2006.

Hydraulische Tests 2007

1.3. bis 15.3.2007 – Produktionstest Solling

Der zweiwöchige Produktionstest im Solling-Sandstein hatte zum Ziel, nach dem Zirkulationstest in 2006 die Änderung der Wasserchemie und der hydraulischen Verhältnisse aufzuzeichnen.

Während des Tests wurden die Drücke im Detfurth, im Solling, im Ringraum 1 und im Kalkarenit, sowie die Produktionstemperatur, die Fließraten, die Fluidichte, der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit aufgezeichnet.

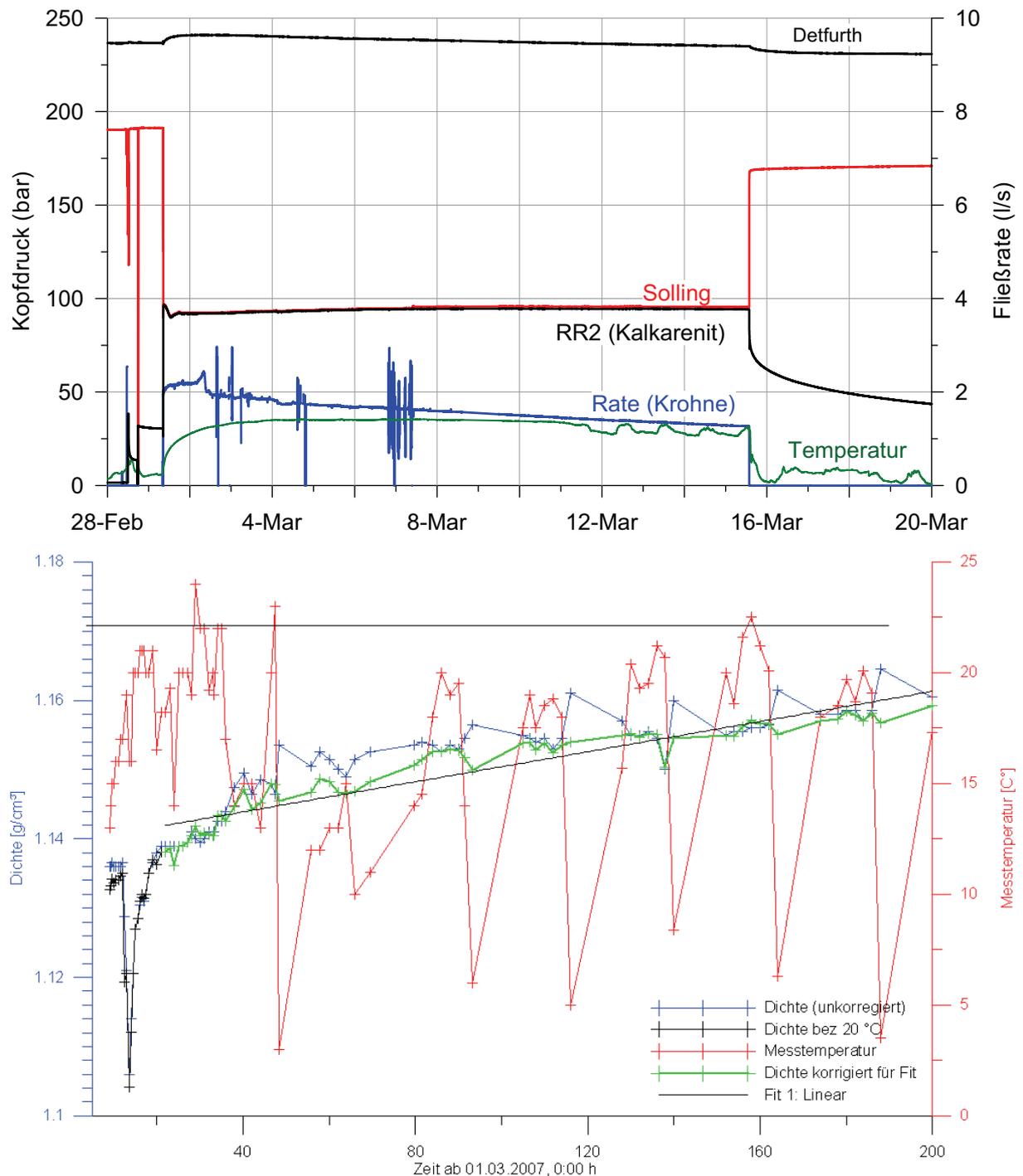


Abb. 2.5: Produktionstest im Solling vom 1.3. bis 15.3.2007; Hydraulische Parameter (oben) Dichtewerte gemessen und korrigiert (unten).

Zu Beginn des Tests wurde noch ein Gemisch aus Formationswasser und Frischwasser aus dem Versuch von 2006 gefördert. Der Druck im Solling fiel während des Test von 190 auf 94 bar ab, wobei das geförderte Fluid in den Kalkarenit verpresst wurde. Das geförderte Gesamtvolumen betrug ca. 2.000 m³ bei einer Fließrate von 2 – 1.5 l/s. Zum Ende des Versuchs besaß das Fluid eine Dichte von 1,16 g/cm³, eine elektrische Leitfähigkeit von 220 mS/cm und einen pH-Wert von 5,25. Da die Dichte weiterhin noch unterhalb von 1,2 g/cm³ lag, wurde vermutlich kein ungestörtes Formationswasser gefördert (Bei näherungsweise ungestörtem Formationswasser ist eine Dichte von 1,2 g/cm³ zu erwarten).

27.3. bis 29.3.2007 – Injektionstest im Solling

Dieser Injektionstest diente zur Vorbereitung eines Zirkulationsexperiments in der Weise, dass oberhalb des Packers (Solling) injiziert und aus dem unteren Horizont gefördert wird. Während des Injektionstests im Solling-Sandstein wurde erstmals eine Umläufigkeit (Undichtigkeit) des Bohrlochpackers beobachtet (Abb. 2.6 und Ausschnitt Abb. 2.7), welche sich durch eine simultane Druckantwort im Defurth-Sandstein zeigte. Bei Reduzierung des Differenzdrucks zwischen Solling und Defurth konnte der Packer kurzzeitig wieder abgedichtet werden (Abb. 2.7). Bei erneuter Injektion in den Solling zeigte sich jedoch wieder eine Umläufigkeit (Abb. 2.8). Dieses mechanisch instabile Verhalten machte den Austausch des Packers notwendig. Die geplante langfristige Erprobung der Einbohrlochzirkulation (Tiefenzirkulation) musste aus diesem Grund aufgeschoben werden und konnte in diesem Vorhaben nicht mehr realisiert werden.

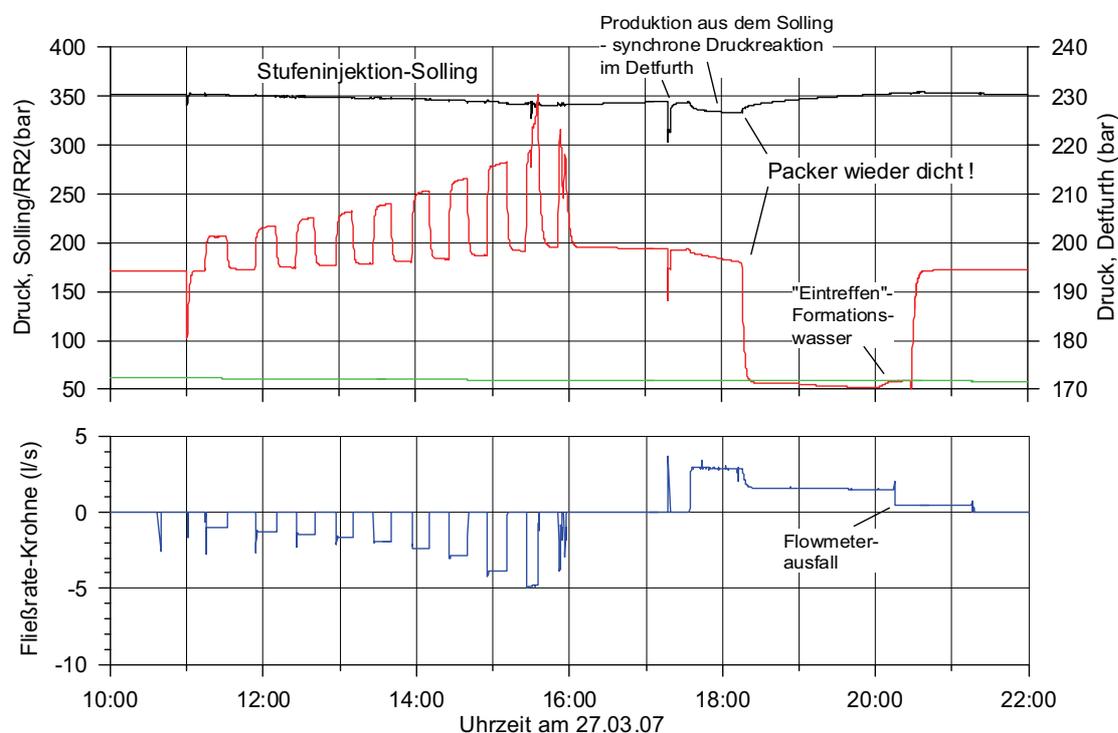


Abb. 2.6: Injektionstest im Solling vom 27.03. bis 29.03.2007; Die Abbildung zeigt den Verlauf für den 27.03.2007, 10 bis 22 Uhr; rote Kurve: Solling-Sandstein, schwarze Kurve Defurth-Sandstein.

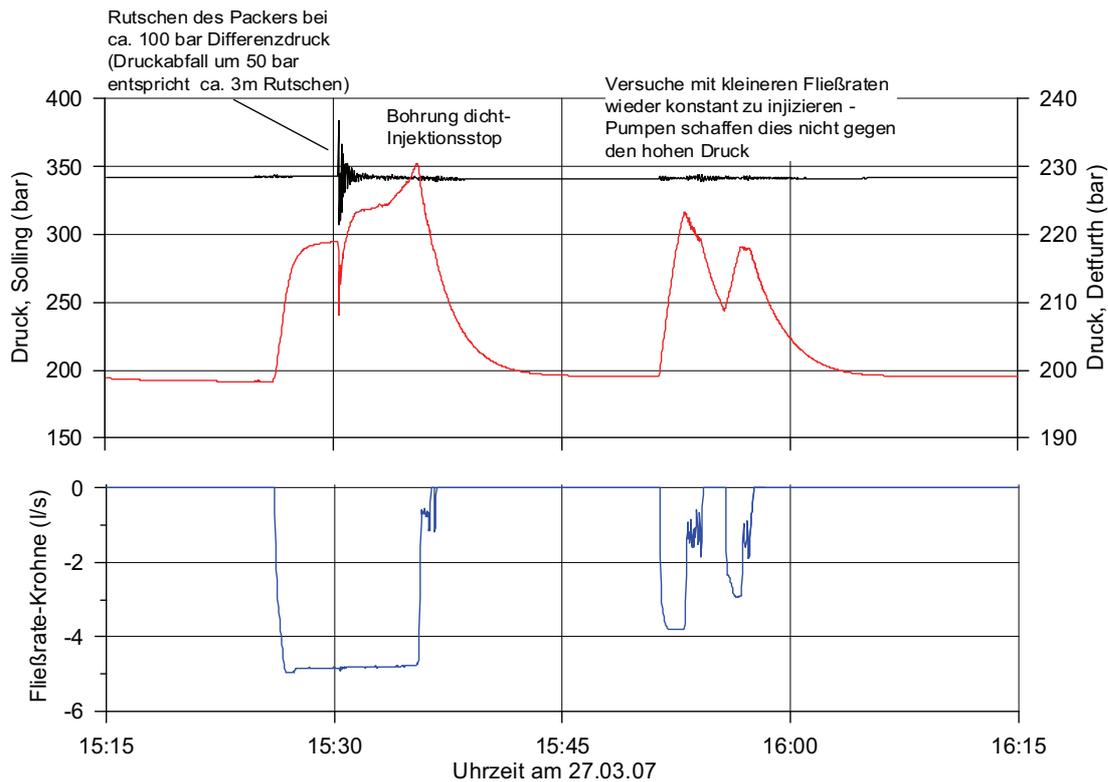


Abb. 2.7: Injektionstest im Solling vom 27.03. bis 29.03.2007; Abbildung zeigt den Verlauf für den 27.03.2007, 15:15 bis 16:15 Uhr; Ausschnitt aus Abb. 2.6; rote Kurve: Solling-Sandstein, schwarze Kurve Detfurth-Sandstein.

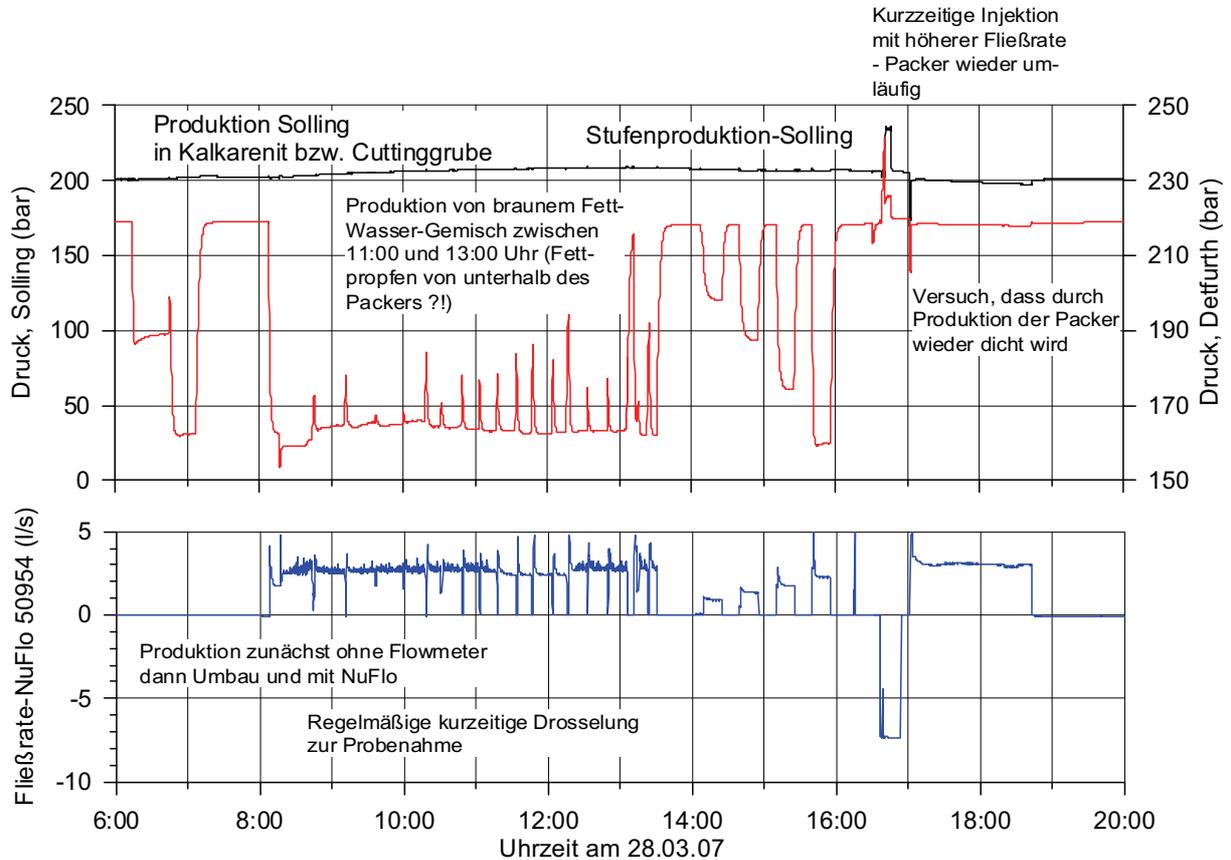


Abb. 2.8a: Injektionstest im Solling vom 27.03. bis 29.03.2007,; rote Kurve: Solling-Sandstein, schwarze Kurve Detfurth-Sandstein.

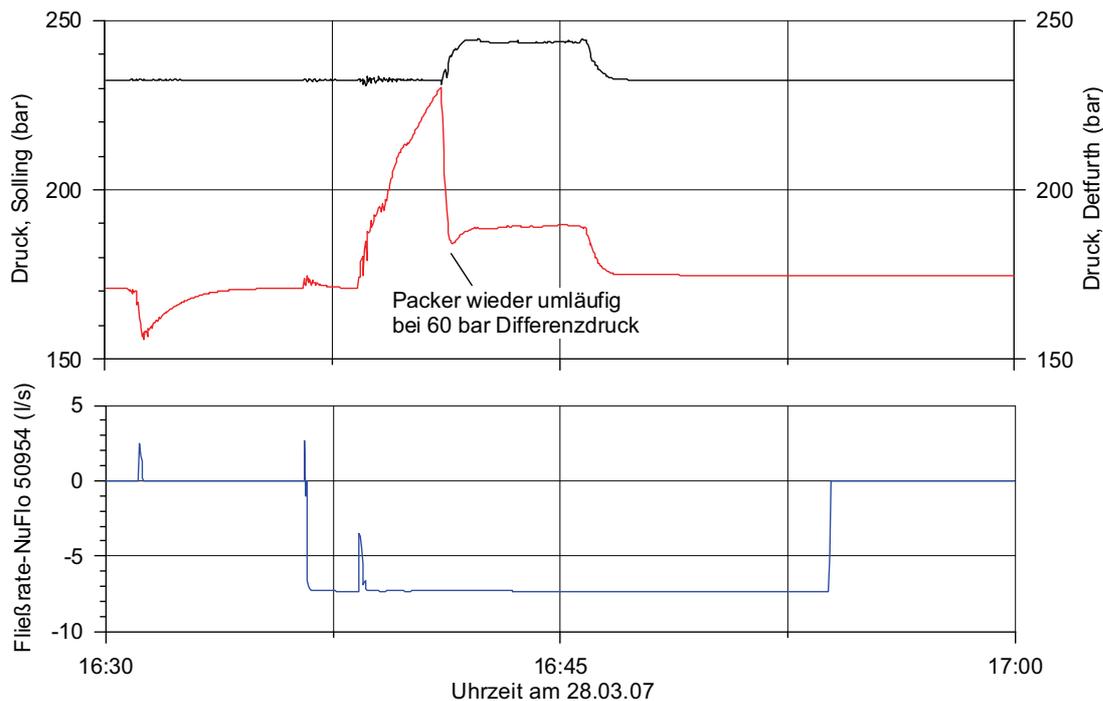


Abb. 2.8b: *Injektionstest im Solling vom 27.03. bis 29.03.2007: Auszug aus der obigen Gesamtdarstellung (Abb. 2.8a) für den Zeitraum 16:30 bis 17:00*

4.6. bis 8.6.2007 – Flowmeter- und Packertest

Diese fünftägige Operation in Horstberg sollte zeigen, ob es einen bestimmten Betriebszustand gibt, bei dem der Bohrlochpacker dicht ist, und ob somit eventuell die Tiefenzirkulation doch noch durchgeführt werden konnte. Leider konnte kein stabiler Betriebszustand des Packers mehr identifiziert werden, so dass die Durchführung der Tiefenzirkulation ohne Austausch des Packers nicht realisierbar ist.

Außerdem wurden vom 4.6 bis zum 6.6.2007 das KROHNE M950, die NuFlos und das Endress & Hauser Flowmeter getestet.

24.7. bis 26.7.2007 – Test PT-Memory-Sonde

Diese Operation diente dazu, die Druck-/Temperatur-Memory-Sonde (P/T-Memory-Sonde) des LIAG an der Drahtwinde in einer Tiefbohrung zu erproben und das Personal mit der Bedienung der Komponenten vertraut zu machen. Die Sonden konnten erfolgreich bis auf eine Teufe von 3750 m ein- und wieder ausgefahren werden.

11.9. bis 14.9.2007 – Low-rate Injection Test Detfurth / T-Log

Den Abschluss der Testarbeiten im Jahr 2007 bildete ein Low Rate Injection Test, bei dem mit sehr geringer Fließrate in den Detfurth-Sandstein injiziert wurde. Ziel des Versuchs war es, durch niedrige Fließraten unterhalb des Drucks zu bleiben, bei dem der Packer umläufig wird. So konnte gezielt der Detfurth-Sandstein untersucht werden. Durch das sehr langsame Ansteigen des Druckniveaus durch die Injektion sollten vor allem der Rissöffnungsdruck und das Rissöffnungsverhalten des Fracs im Detfurth bestimmt werden.

Während dieses Tests wurde zusätzlich auch eine P/T-Memory-Sonde auf eine Teufe von 3750 m eingefahren und somit konnten Druck- und Temperaturdaten im Bohrloch aufgezeichnet werden. Weitere aufgezeichnete Werte waren der Druck im Detfurth, der Druck im Solling, der Druck im Ringraum 1 und im Kalkarenit sowie die Produktionstemperatur und die Injektionsrate.

Die Injektion in den Detfurth erfolgte mit einer konstanten Fließrate von 2 l/s über einen Zeitraum von 46 Stunden. Entgegen der Erwartung, zeigte sich auch hier die Umläufigkeit des Packers. Die gewonnenen Messdaten konnten aber dennoch wissenschaftlich ausgewertet werden (Wessling et al. 2008).

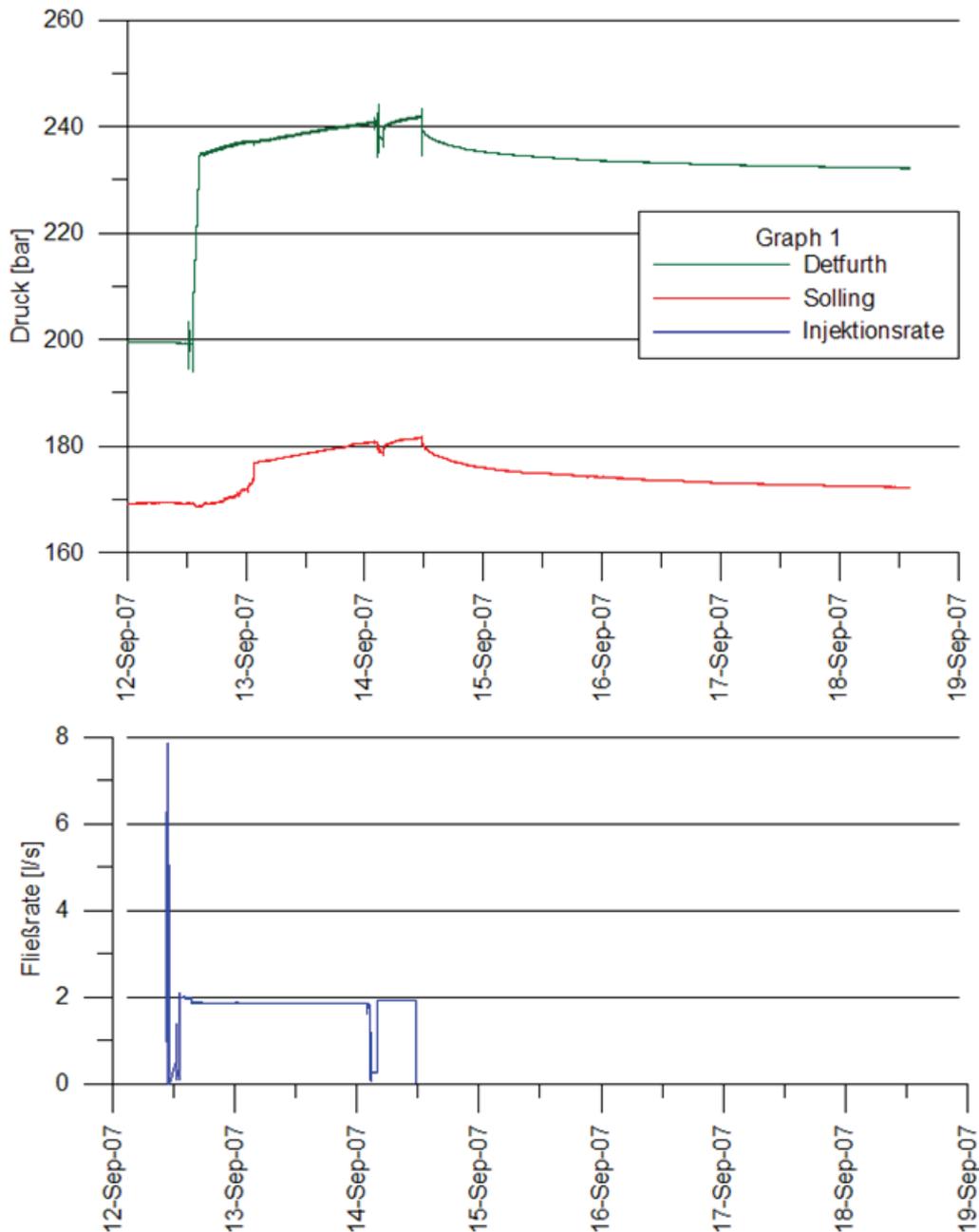


Abb. 2.10: Low Rate Injection Test im Detfurth vom 11.9. bis 14.9.2007.

Hydraulische Tests 2008

5.2. bis 22.2.2008 – Produktionstest im Detfurth

Der zweiwöchige Produktionstest im Detfurth-Sandstein diente der Vorbereitung der Probenentnahme zur Analyse von Ausfällungsprozessen und der Untersuchung der Korrosionsproblematik. Hierzu sollte vorab eine längere Produktionsphase durchlaufen werden, um möglichst ungestörtes Formationsfluid zu erhalten.

Während der Produktion wurden die Drücke im Detfurth, im Solling, im Ringraum 1 und im Kalkarenit sowie die Produktionstemperatur und die Fließrate aufgezeichnet. Zudem wurden stündlich Fluidichte, pH und elektrische Leitfähigkeit gemessen. Jeden zweiten Tag erfolgte eine Probennahme zur Untersuchung der Wasserchemie.

Durch die Umläufigkeit des Packers begann die Produktion aus Detfurth und Solling mit einer Rate von 10 l/s. Nach längerer Testdauer stellte sich allerdings ein pseudo-stabiler Wert von 2,4 l/s ein. Das geförderte Gesamtvolumen betrug 5.000 m³. Die Fluidichte nahm nach Beginn der Produktion stetig auf 1,2 g/cm³ zu, fiel dann auf 1,16 g/cm³ ab und stieg dann abermals stetig an. Ein vollständig ungestörtes Formationswasser konnte nicht gefördert werden, allerdings war die Wasserchemie hinreichend nahe den *in-situ* Bedingungen, so dass das Wasser für wissenschaftliche Untersuchungen geeignet war.

10.3. bis 13.3.2008 – Produktionstest im Detfurth

Dieser Test diente dazu, möglichst ungestörtes Formationsfluid für die Auswertung von Ausfällungsprozessen und der Untersuchung der Korrosionsproblematik (vgl. Kapitel 4) im Rahmen der Diplomarbeit (Hesshaus 2008) zu erhalten. Darüber hinaus sollte auch die Druck- und Temperaturabhängigkeit von Ausfällungsprozessen aus geothermisch genutzten Tiefenwässern untersucht werden.

Während der Produktion wurden die Drücke im Detfurth, im Solling, im Ringraum 1 und im Kalkarenit sowie die Produktionstemperatur und die Fließrate aufgezeichnet. Zudem wurden stündlich die Fluidichte, der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit gemessen. Zudem wurden Proben zur Untersuchung der Wasserchemie und Ausfällungsprodukte entnommen. Dies geschah sowohl unter Sauerstoffzutritt als auch -abschluss.

Die anfängliche Produktionsrate aus dem Detfurth und dem Solling wurde auf 7,5 l/s eingestellt. Das geförderte Gesamtvolumen betrug 5.000 m³. Wie bei der Operation zuvor erhöhte sich die Dichte rasch nach Produktionsstart auf 1,172 g/cm³ und fiel dann auf 1,166 g/cm³ ab. Danach stieg sie wieder stetig an.

Langzeitbeobachtung des hydraulischen Rissverhaltens im Detfurth

Die Bohrung Horstberg Z1 ist weltweit die einzige Forschungsbohrung für Geothermie, in der das Langzeitverhalten von künstlichen hydraulischen Rissen in dichten Sedimentgesteinen untersucht werden konnte. Seit den ersten Tests zum Huff-Puff-Verfahren im Jahr 2003 kann im Projekt GeneSys Horstberg auf eine mittlerweile 6-jährige Forschungsperiode mit zahlreichen Tests, aber auch Stillstandszeiten zurückgeblickt werden.

Die Auswertungen der Druckanstiegskurven während der *Shut-in* Phasen verschiedener Tests seit dem Jahr 2003 (Abb. 2.11) zeigen, dass das hydraulische Verhalten seit 2003

nahezu unverändert geblieben ist und somit keine „Schließungserscheinungen“ zu beobachten sind. Folglich ist der im Jahre 2003 im Detfurth-Sandstein erzeugte hydraulische Riss über mindestens 5 Jahre hydraulisch hoch leitfähig geblieben, was die Theorie eines Selbststützungsmechanismus neben kristallinem Gestein auch in Sedimentgesteinen untermauert.

Zudem konnte durch den Zirkulationstest im November 2006 die nachhaltige hydraulische Kommunikation zwischen Detfurth und Solling über diesen Riss nachgewiesen werden.

Es ist eine deutliche Druckabhängigkeit (Abb. 2.11) des Risses und somit des Fließregimes im Detfurth vorhanden. Der Injektionstest vom November 2006 unterscheidet sich durch die massive Injektion von Frischwasser (hellgrüne, untere Kurve in Abb. 2.11) deutlich von den Druckanstiegskurven der restlichen Tests, die nahezu übereinander liegen. Speziell die Speichereigenschaften des Risses änderten sich durch die Erhöhung des Druckniveaus. Während der Riss-Speicherkoeffizient bei niedrigem Druckniveau bei $1,92 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{bar}$ lag konnte dieser durch die Injektion von 20.000 m³ Frischwasser im November 2006 auf 36 m³/bar drastisch erhöht werden.

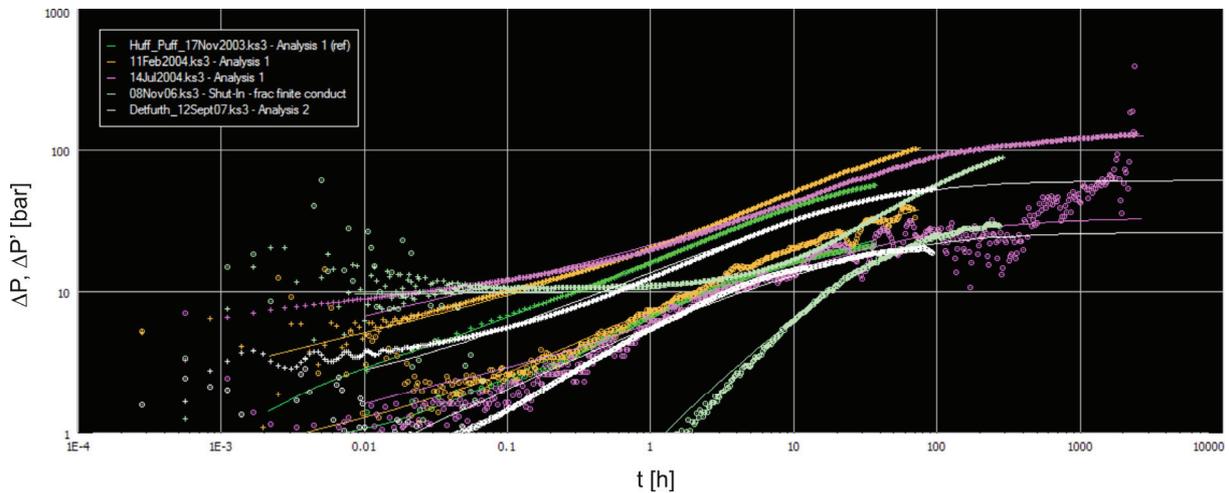


Abb. 2.11: Druckabhängigkeit des Risses und somit des Fließregimes im Detfurth-Sandstein.

3. Austausch des Bohrlochpackers an der Bohrung Horstberg

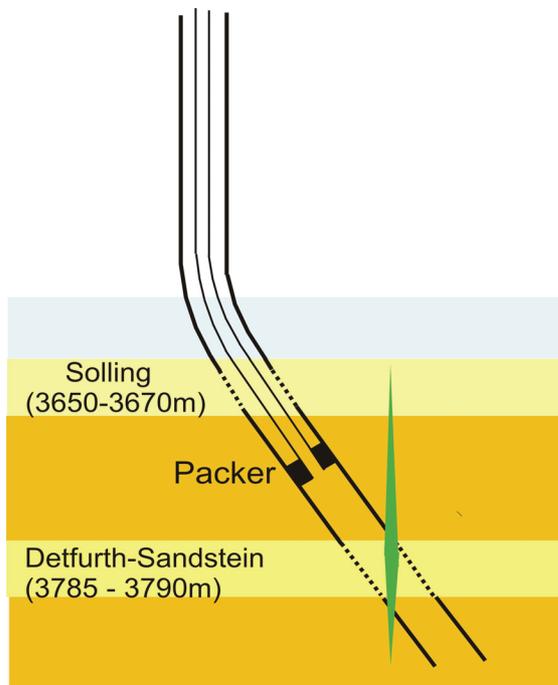


Abb. 3.1: Vereinfachtes Schema der Bohrung Horstberg Z1. Der künstlich erzeugte Riss ist grün dargestellt

Im Juli 2007, nachdem endgültig geklärt war, dass der Zustand der Bohrung keine hydraulischen Tests mehr zulässt, begannen die Vorbereitungen für die Ausschreibung zum Packertausch (Abb. 3.1). Im Zuge des Packertauschs wurden weitere Arbeiten, insbesondere eine zusätzliche Perforation des Casings im Bereich des Solling-Sandsteins (zwecks Skin-Beseitigung), geplant.

Die Arbeiten wurden im Oktober 2007 öffentlich ausgeschrieben. Infolge der angespannten Marktsituation gingen innerhalb der Ausschreibungsfrist keine Angebote ein. Das Verfahren wurde daraufhin aufgehoben und es erfolgte eine freihändiges Vergabeverfahren.

Die Vergabegespräche mit den Anbietern erfolgten im Februar 2008 mit dem Ziel bis Ende Februar 2008 den Auftrag für die entsprechenden Arbeiten zu vergeben. Nach den Gesprächen mit verschiedenen Bietern fiel die Entscheidung auf ein neues Packer-System der Firma Baker Hughes Inteq. Hierbei handelt es sich um ein „Permanent Retrievable Packer“. Dieser verbindet die Vorteile eines permanenten Packers mit denen eines ziehbaren Systems. Aufgrund der langen Lieferzeiten für den Packer und der schlechten Verfügbarkeit einer geeigneten Bohrlochwinde verschob sich der Arbeitsbeginn bis in das 3. Quartal 2008.

Am 17.11.2008 begannen dann die Arbeiten zum Austausch des Bohrlochpackers an der Bohrung Horstberg Z1. Entsprechend der Herstellerangaben sollte der Packer durch einfaches Ziehen mit ca. 8 t Überlast wieder lösbar sein.

Folgende wesentliche Arbeiten wurden hierbei durchgeführt (Abb. 3.2 – 3.8):

17.11. – 24.11.: Aufbau der Bohrlochwinde, Umbau Bohrlochkopf und Totpumpen der Bohrung.

25.11. – 26.11.: Wiederholte Versuche, den Tubinghanger aus dem Bohrlochkopf zu ziehen; erfolgreich erst nach Erwärmung des Bohrlochkopfes.

26.11. – 27.11.: Wiederholte Versuche den Packer mit bis zu ca. 50 t Überlast zu ziehen blieben erfolglos.

3.12.08.: Die Durchführung eines Erschütterungsschusses im Packer führte ebenfalls nicht zum Erfolg.

4.12.08: Die Trennung des Stranges oberhalb des Packers in ca. 3760 m Tiefe erfolgte explosiv und war erfolgreich, sowie der nachfolgende Ausbau des Strangs. Eine Inspektion der ausgebauten Rohre zeigte erhebliche Korrosion insbesondere der unteren Rohre.

08.12. – 17.12.08: Einbau einer Fanggarnitur mit Schlagschere. Die anschließenden Fangversuche blieben erfolglos.

18.12.: Bleiabdruck vom Rohrstück oberhalb des Packers.

5.01. – 12.01.: Einbau einer modifizierten Fanggarnitur mit Schlagschere und anschließende Fangversuche waren technisch erfolgreich, allerdings wurde nur ein kurzes Stück des Packers gefangen, abgeschert und nach oben befördert.

Ab 15.01.: Einbau einer wiederum modifizierten Fanggarnitur.

Neben dem eigentlichen Problem, den Packer gelöst zu bekommen, erwies sich die Stabilität der Bohrspülung (Formiat-Kreidespülung) zum Totpumpen der Bohrung als kritisch. Es muss eine Spüldichte von ca. 1700 kg/l komplett in der Bohrung anstehen, damit sich die Bohrung nicht aktiviert. Die eingesetzte Spülung sedimentierte jedoch aus und musste regelmäßig aufgearbeitet werden, mit entsprechendem zeitlichen/finanziellem Aufwand.

Die Fangarbeiten konnten letztlich erfolgreich abgeschlossen werden, sodass der Packer nicht überfräst werden musste. Es zeigten sich Risse und Brüche an den Dichtgummis die allem Anschein nach zur Umläufigkeit geführt hatten.

Anschließend wurde der Solling-Sandstein im Bereich von 3.655,4 bis 3.673 m perforiert. Es wurden zwei Einfahrten mit einer 4 ½“ TAG (Einweg Trägerkanone) und jeweils 160 Schuss Deep Penetration Ladung ausgeführt.

Im Anschluss wurde die Bohrung mit einem 6“ Meißel und einem Scraper spülend, drehend bis in eine Teufe von 4.089 m befahren.

Nach dieser Scraperfahrt wurden zwei Bohrlochmessungen zur Kontrolle des Casing ausgeführt (Multi Finger Kaliber (MFC) und Casing Inspection Tool (CIT)). Beide zeigten im befahrenen Bereich zwischen 3.850 und 3.000 m keine größeren Auffälligkeiten an der Casingwand.

Auf Grundlage dieser Untersuchungen wurde die Sitzposition des Packers festgelegt und der Packer am 01. bis 03. Februar bis in die vorgesehene Setzteufe von ca. 3.750 m eingebaut.

Am 04. Februar wurde der Bohrlochkopf wieder umgebaut – Abbau BOP (blow out preventer) Stack und Montage des LD (tubing control head) und des E-Kreuz - und der Steigrohrstrang auf dem LD abgesetzt.

Nach Auszirkulieren der für das Tot-Pumpen eingebrachten Formiat-Kreide-Spülung wurde über einen Zeitraum von ca. 12 Stunden Frischwasser in den Ringraum Tubing / Casing eingebracht und in den Solling verpresst, um den Strang auf eine für das Setzen des Packers möglichst neutrale Spannung zu bringen.

Am 06. Februar sollte der Packer gesetzt werden. Die vorbereitenden Arbeiten sowie das Setzen des Stopfens verliefen unproblematisch. Beim Setzvorgang des Packers konnte aber kein Druck im Steigrohrstrang aufgebaut werden und somit der Packer nicht gesetzt werden.

Der Versuch den Vorstopfen (Prong) zu ziehen schlug fehl, der Fänger konnte aufgrund einer im Steigrohr befindlichen Brücke aus Rohrfett und Feinstmaterial aus der Formation nicht bis auf den Prong eingebaut werden.

Aufgrund der nicht geklärten Haushaltssituation in der BGR zu diesem Zeitpunkt wurde die Bohrung zunächst in diesem sicheren Zustand eingeschlossen.

Am 12. März 2009 begannen die Vorbereitungsarbeiten für den erneuten Versuch den Packer zu setzen. Zunächst wurde versucht, durch wechselnde Förder- und Injektionsversuche die Verstopfung über dem Prong zu beseitigen. Danach wurde eine 69,5 mm Fangglocke eingebaut und der Prong geborgen. Am Prong waren keine besonderen Merkmale zu sehen.

In einer weiteren Einfahrt wurde die Fanggarnitur für Stopfen eingebaut und nach vier bis fünf Schlägen war der Stopfen frei, danach erfolgte der Ausbau. Auch am Stopfen waren keine Merkmale einer Beschädigung zu sehen. So konnte mit den Vorbereitungen zum Einbau des N Test Tools (Werkzeug zum Abdichten des Stranges, Stopfen) zum Setzen des Packers begonnen werden.



Abb. 3.2: Bohrlochwinde in Horstberg



Abb. 3.3: Explosiv getrennter Strang aus ca. 3750 m Tiefe



Abb.3.4: Fanggarnitur für Fangversuch



Abb. 3.5: Bleibdruck vom Rohrstück oberhalb des Packers



Abb. 3.6: Ausbau des gefangenen „Fisches (Packer)“ - oberer Teil



Abb. 3.7: Alter Packer Gesamtansicht.

Abb. 3.8: Beschädigte Dichtelemente des alten Packers.

Am 17. März 2009 wurde das N Test Tool eingebaut, dabei wurde in den Steigrohrstrang Wasser injiziert, um den Sitz sauber zu halten. Das N Test Tool wurde kurz in den Sitz gefahren und dann einen Meter über Sitz stehen gelassen. Während der Umbauarbeiten Übertageaufbau einer Maximator Pumpe mit der der notwendige Setzdruck erzielt werden kann - wurde weiter Wasser eingepumpt. Das diente zum Einen dem Kühlen, um die neutrale Spannung im Steigrohr für den Setzvorgang zu erreichen und zum Anderen dem Sauberhalten des Sitzes des Test Tools. Nach dem Einpumpen von ca. 60 m³ wurde das N Test Tool in den Sitz gefahren und der Packer in zwei Stufen erfolgreich gesetzt (Abb. 3.9). Anschließende kurzzeitige Fördertests aus beiden Zonen (Solling – oberhalb des Packers; sowie Detfurth – unterhalb des Packers) zeigten eindeutig, dass der neue Packer beide Zonen hydraulisch voneinander trennt.

Im Anschluss wurde über drei Tage ein Fördertest durchgeführt, um den Erfolg der Perforation im Solling-Sandstein zu prüfen. Hierbei zeigte sich, dass die bohrlochnahe Limitierung (Skin) erheblich reduziert werden konnte (Abb. 3.10). Der Vergleich mit dem

Fördertest im März 2007 belegt, dass hierdurch die Ergiebigkeit dieser Zone mindestens auf das Doppelte gesteigert werden konnte.

Die Operation des Packertauschs war trotz der Komplikationen in allen wesentlichen Punkten letztlich erfolgreich:

- Es konnte ein robuster neuer Packer erfolgreich gesetzt werden
- Durch die zusätzliche Perforation im Solling konnte die Ergiebigkeit dieses Horizonts erheblich gesteigert werden
- Durch den Einbau der Schiebmunne oberhalb des Packers besteht die Möglichkeit, aussedimentiertes Material aus dem Bereich der Perforationsöffnungen des Solling auszuzirkulieren.

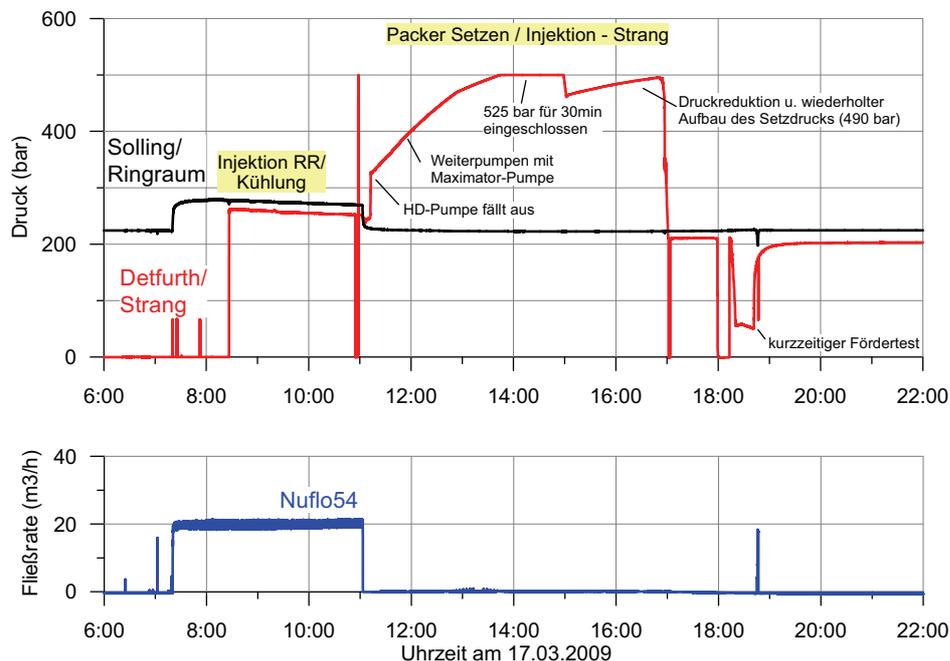


Abb. 3.9: Druckaufzeichnung und Fließrate während des Kühlens des Stranges und „Setzens“ des Packers. Während des eigentlichen Setzvorgangs wurde die Fließrate nicht aufgezeichnet.

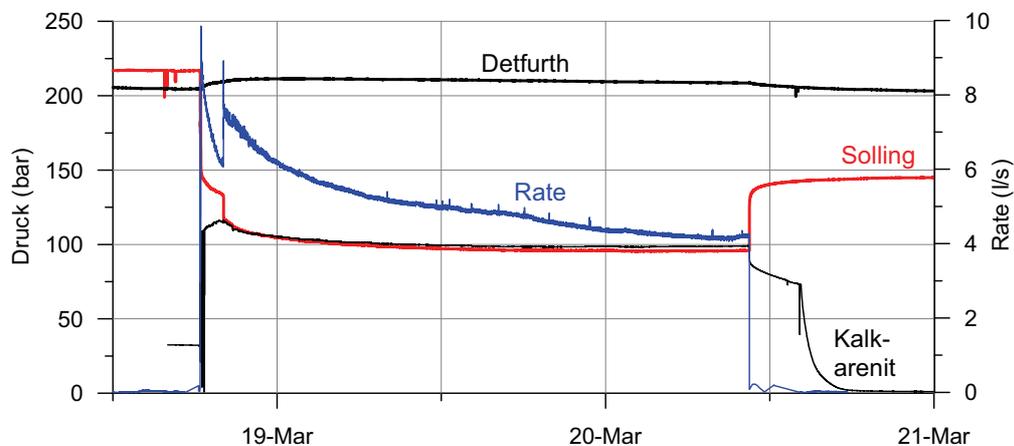


Abb. 3.10: Fördertest aus dem Solling im Anschluss an den Packertausch.

4. Hydrogeochemische Untersuchungen

4.1 Ausfällungsprozesse an der Bohrung Horstberg Z1

4.1.1 Einleitung und Zielstellung

Neben den Fündigkeitsrisiken, die beim Aufsuchen an potenziell geeigneten Standorten bestehen, ergeben sich oftmals beim Betrieb eines Geothermie-Kraftwerkes weitere Probleme (UNGEMACH, 2003). Je nach Höhe des Salzgehalts der geförderten Wässer können Mineralausfällungen auftreten. Speziell Sulfatausfällungen können zu erheblichen Problemen führen. Im Vergleich zu anderen typischen Ausfällungen (z.B. Halit, Eisenausfällungen) sind Sulfatausfällungen deutlich schwerer zu beseitigen (RIEDEL, 2004).

Tabelle 4.1.1: Konzentration der Ionen der Thermalsole in der Bohrung Horstberg Z1; Mittelwerte der Analysen nach einem Fördertest 2004

Ionen	Konzentration [mg/l]
Cl ⁻	175.000
SO ₄ ²⁻	888
HCO ₃ ⁻	32
BO ₂ ⁻	365
Br ⁻	1.188
K ⁺	6.225
Na ⁺	65.975
Mg ²⁺	1.628
Ca ²⁺	35.700
Fe ²⁺	179
Li ⁺	179
Mn ²⁺	258
Pb ²⁺	153
Sr ²⁺	1.908
Zn ²⁺	325
SiO ₂	58
Ba	52

Aus Analysenergebnissen (Tabelle 4.1.1) der bei einem Fördertest im Jahre 2004 geförderten Wasserproben sind die Ionenkonzentrationen des ungestörten Formationswassers von Horstberg annähernd bekannt. Das Wasser hat einen sehr hohen Gehalt an Natrium, Calcium und Chlorid. Die Sulfatgehalte wie auch die Gehalte an Barium und Strontium sind im Formationswasser sehr hoch.

Das Problem der Sulfatausfällungen ist aus dem Betrieb von geothermischen Anlagen bekannt. In dieser Arbeit wurde untersucht, inwieweit Ausfällungen in Thermalwässern der Bohrung Horstberg Z1 auftreten können und welche potentiellen Probleme diese für den Anlagenbetrieb eines geothermischen Heizkraftwerkes bringen können. Die Motivation zu diesen Untersuchungen ergab sich vor allem aus Voruntersuchungen, bei denen festgestellt wurde, dass aus den Wässern der Bohrung Horstberg Z1 Schwerspat ausfällt. Eine systematische Untersuchung dieser Ausfällungen stand jedoch bisher aus. Nachfolgend sollen die Temperatur- und die Zeitabhängigkeit sowie der Einfluss des Sauerstoffgehalts auf die Schwerspatausfällungen untersucht werden. Ferner werden die sich potentiell ausbildenden Mineralphasen ermittelt. Die experimentellen Ergebnisse werden mit thermodynamischen Modellierungen der Löslichkeiten verglichen.

4.1.2 Methodik

Im Frühjahr 2008 wurde ein Fördertest durchgeführt, um nahezu ungestörtes Formationswasser aus der Detfurth-Sandstein aus ca. 3.800 m Tiefe zu erlangen. Am Ende dieses Fördertests sind die Proben für die Untersuchungen der Ausfällungen genommen worden. Des Weiteren sind im gesamten Verlauf des Tests Proben zur Bestimmung der Dichte und der elektrischen Leitfähigkeit sowie welche zur Ermittlung der Ionenkonzentrationen im Fluid genommen worden. Die Bestimmung dieser Parameter diente der Abschätzung, inwieweit sich das geförderte Wasser den Formationswasserbedingungen annähert.

Da die Sauerstoffabhängigkeit der Ausfällungen untersucht werden sollte, wurden die Proben in verschiedenen Gefäßen gewonnen. Die Proben ohne Sauerstoffabschluss wurden in einfachen Plastik-Probenflaschen genommen. Die sauerstofffreien Proben sind in Gasmäusen abgefüllt worden. Bei den Gasmäusen (zum Teil aus Glas zum Teil aus Stahl) handelte es sich um spülbare und fest zu verschließende Gefäße, bei der ein Sauerstoffzutritt ausgeschlossen werden konnte. Um die Untersuchung der Temperatur- und Zeitabhängigkeiten der Ausfällungsprozesse zu ermöglichen sind die Proben bei verschiedenen Temperaturen (20°, 40° und 60 °C) verschieden lange Zeiträume (2, 10 und 30 Tage) gelagert worden.

Nach den jeweiligen Lagerungszeiten wurden die Proben filtriert, um den Niederschlag von dem Rückstand zu trennen. Dazu wurde ein Büchnertrichter verwendet. Als Filterpapier wurden zwei verschiedene Typen verwendet: Grobporige (~10 µm) Papierfilter und feinporige (0,45 µm) Cellulose-Nitratfilter. Die Probenaufbereitung unter Sauerstoffabschluss wurde entweder durch Arbeit in einer Glovebox oder durch Beaufschlagung von Argon gewährleistet.

Die Niederschläge wurden hinsichtlich ihrer Mineralogie mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) und Rasterelektronenmikroskopie (REM) untersucht. Die chemische Zusammensetzung der Niederschläge wurde nach einem Vollaufschluss mit ICP OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy) ermittelt. Die Ionenkonzentrationen der Rückstände sind ebenfalls mittels ICP OES bestimmt worden.

4.1.3 Ergebnisse

Zusammensetzung der Thermalsole

Aus den Daten des Fördertests 2004 (siehe Tabelle 4.1.1) ist die Zusammensetzung der Thermalsole bekannt. Die hier untersuchten Fluide aus dem Fördertests des Jahres 2008 haben eine geringere Salinität als die im Fördertest 2004 gewonnenen, da infolge von zwischenzeitlichen Injektionstests Frischwasser in die Formation gelangte. In der Tabelle (Tabelle 4.1.2) sind die Ionenkonzentrationen der Thermalsole repräsentativ zusammengefasst. Bei den dargestellten Konzentrationen handelt es sich um Mittelwerte aus Messwerten von Proben, die zum Ende des Fördertests genommen wurden.

Tabelle 4.1.2:
Ionenkonzentrationen der
Thermalsole; Mittelwerte
von 4 Proben des
Fördertests im Februar
2008 (Det20 – Det24).

Ionen	Mittelwert
	[mg/l]
Cl ⁻	156.361
SO ₄ ²⁻	934
HCO ₃ ⁻	110
B ⁻	275
Br ⁻	860
K ⁺	4.442
Na ⁺	62.866
Mg ²⁺	1.259
Ca ²⁺	26.920
Fe ²⁺	84
Li ⁺	113
Mn ²⁺	173
Pb ²⁺	74
Sr ²⁺	1.413
SiO ₂	66
Ba ²⁺	54

**Tabelle 4.1.3: Spurenelemente der
Thermalsole der Bohrung Horstberg
Z1**

	[µg/l]		[µg/l]
Cu	15	Nd	1,4
Ni	232	Pr	0,3
Pb	49980	Rb	17366
Ag	83	Sb	2,9
As	2161	Sc	5,5
Be	22	Se	9795
Bi	3,2	Sm	0,7
Cd	414	Sn	3,3
Ce	1,1	Ta	0,8
Cs	8902	Tb	0,2
Eu	2,0	Th	0,1
Ga	120	Tl	1395
Gd	1,4	V	335
In	0,6	W	3,9
La	1,1	Y	11,9
Lu	0,2	Yb	0,3
Mo	20,5	Zr	2,8

Neben den Hauptinhaltsstoffen (Natrium, Calcium, Chlorid und Sulfat) ist die Thermalsole reich an Elementen, die sonst nur in Spuren auftreten (z.B.: Strontium, Blei, Arsen, Cäsium, Rubidium, Selen, Tellur; siehe Tabelle 4.1.3). Blei ist mit einem Gehalt von ca. 50 mg/l sehr hoch konzentriert.

Zusammensetzung der Niederschläge

Die Zusammensetzung der Niederschläge unterscheidet sich qualitativ in Abhängigkeit vom Sauerstoffzutritt. Daher werden nachfolgend die Niederschläge getrennt nach Sauerstoffkontamination und Sauerstoffabschluss betrachtet. Auch unterscheiden sich die Mengen der Niederschläge je nach Sauerstoffgehalt. In Abb. 4.1.1 sind die Probenmengen in mg pro Liter Thermalfluid gegen die Lagerungszeit aufgetragen.

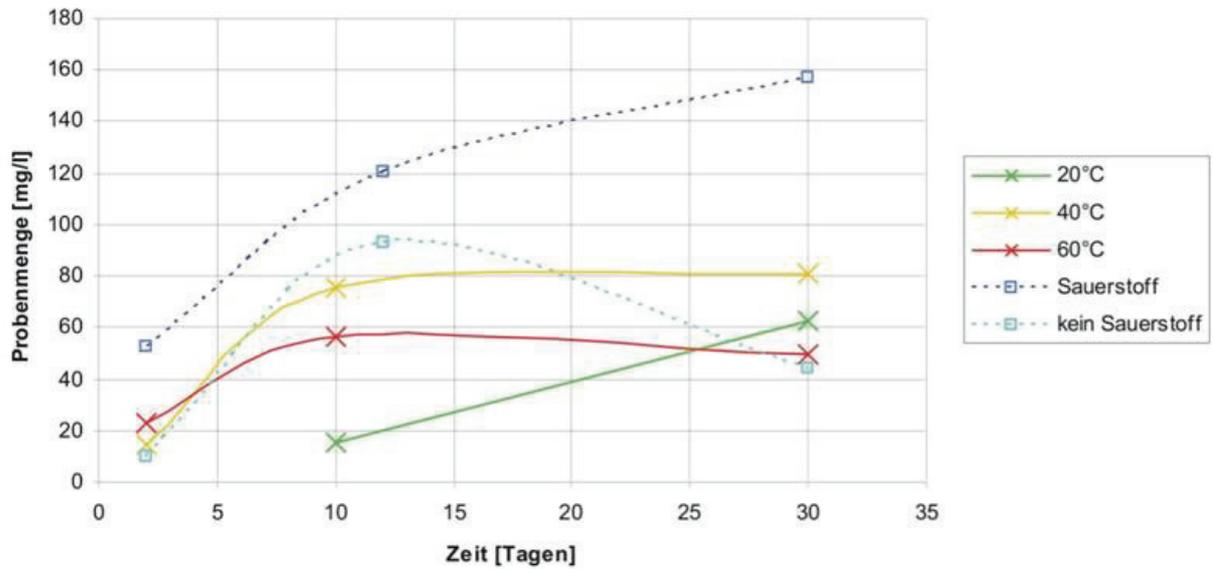


Abb. 4.1.1: Darstellung der Niederschlagsmenge bei verschiedenen Temperaturen bezogen auf die Zeit. Die durchgezogenen Linien zeigen die Niederschläge, die durch die groben Filter aufgefangen wurden (mit Sauerstoffkontamination). Die gestrichelten Linien zeigen die feingefilterten Niederschläge (mit und ohne Sauerstoffkontamination).

Niederschläge bei Sauerstoffzutritt

Die Niederschläge bestehen aus einem Barium-Strontiumsulfat und einer Eisenphase (Akaganéit: $\beta\text{-Fe}^{3+}(\text{O}, \text{OH}, \text{Cl})$, bekannt aus früheren Messungen mit XRD). Auf Abb. 4.1.2 ist eine REM-Aufnahme einer Probe zu sehen. Die Barium-Strontiumsulfate sind faserig bis hantelförmig. Sie sind durchschnittlich 10 μm lang und haben einen Durchmesser von weniger als 1 μm . Die Akaganéit-Kristalle sind sehr fein, ihre Größe beträgt weniger als 1 μm .

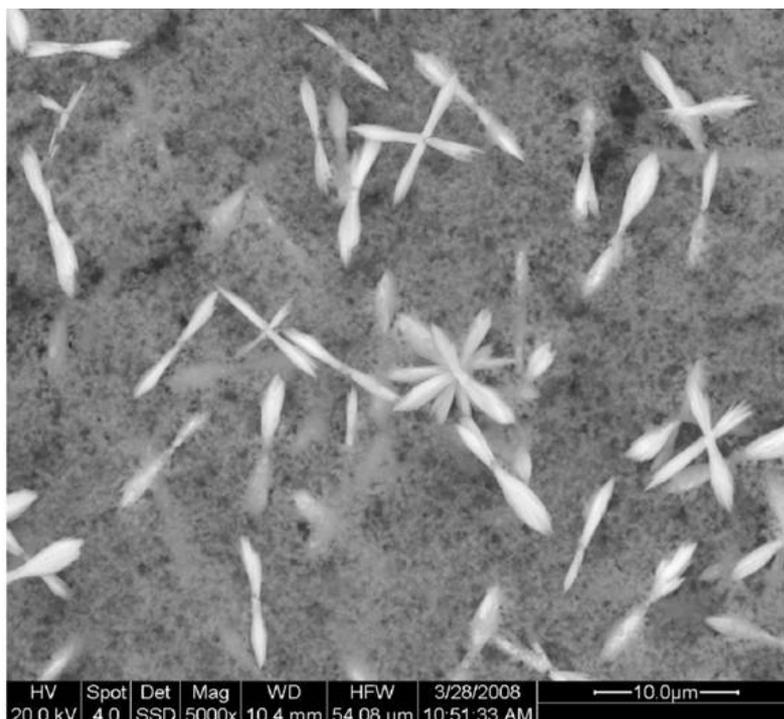


Abb. 4.1.2: REM-Aufnahme einer sauerstoffkontaminierten Probe, die zwei Tage bei 20 °C gelagert wurde. Die hantelförmigen Kristalle sind Barium-Strontiumsulfate, die kleinen, kuguligen Minerale sind Akaganéite

In Tabelle 4.1.4 sind die chemischen Zusammensetzungen der Niederschläge der Filtration, mit den groben Filtern zu sehen. Dargestellt sind die absoluten Gehalte der einzelnen Hauptbestandteile in Milligramm pro Kilogramm Wasser. Bei Probe 20 °C-2d reichte die Probenmenge nicht aus. Die Niederschläge bestehen überwiegend aus Eisen, Barium, Siliziumdioxid, Sulfat und Strontium.

Tabelle 4.1.4: Zusammensetzung der sauerstoffkontaminierten Niederschläge (Filtration mit Grobfiltern); absolute Gehalte der Hauptbestandteile; dargestellt sind Mittelwerte aus je zwei Proben.

Mittelwerte	Mg [mg/kg]	Ca [mg/kg]	FeOOH [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Al [mg/kg]	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Sr [mg/kg]	Zn [mg/kg]	SO ₄ [mg/kg]	SiO ₂ [mg/kg]
20°C - 2d												
20°C - 10d	0,00	0,16	1,65	0,00	0,00	0,09	1,99	0,01	0,46	0,01	1,86	1,87
20°C - 30d	0,02	0,61	6,83	0,02	0,02	0,40	4,19	0,08	1,20	0,04	4,02	6,11
40°C - 2d	0,00	0,11	3,23	0,01	0,01	0,09	0,25	0,03	0,03	0,02	0,28	1,64
40°C - 10d	0,01	0,49	9,60	0,02	0,02	0,43	5,24	0,11	1,98	0,03	6,59	5,72
40°C - 30d	0,01	0,52	10,20	0,02	0,02	0,54	4,77	0,15	2,24	0,04	6,43	6,61
60°C - 2d	0,00	0,18	6,15	0,01	0,01	0,23	0,21	0,06	0,04	0,01	0,23	2,95
60°C - 10d	0,00	0,16	11,16	0,00	0,02	0,44	2,80	0,07	1,18	0,01	3,64	3,13
60°C - 30d	0,00	0,16	7,53	0,00	0,01	0,31	3,85	0,03	1,93	0,02	5,35	1,57

In Tabelle 4.1.5 sind die Hauptbestandteile der sauerstoffkontaminierten Niederschläge der Proben, die mit den feinporigen Filtern filtriert wurden, dargestellt, auch hier handelt es sich um Mittelwerte aus je zwei Proben. Die Niederschläge bestehen hauptsächlich aus Eisen, Barium, Siliziumdioxid, Sulfat und Strontium. Des Weiteren sind diese Niederschläge, vor allem die, die nach kurzer Lagerungszeit ausgefallen sind, relativ reich an Calcium. Möglicherweise hat dieses etwas mit dem bei diesem Niederschlag niedrigeren Eisengehalt zu tun.

Tabelle 4.1.5: Zusammensetzung der sauerstoffkontaminierten Niederschläge (Filtration mit Feinfiltern), absolute Gehalte der Hauptbestandteile; dargestellt sind Mittelwerte aus je zwei Proben.

Mittelwerte	Mg [mg/kg]	Ca [mg/kg]	FeOOH [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Al [mg/kg]	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Sr [mg/kg]	Zn [mg/kg]	SO ₄ [mg/kg]	SiO ₂ [mg/kg]
O ₂ -kont 2d	0,06	1,60	2,26	0,01	0,02	0,09	10,90	0,05	2,61	0,04	12,68	2,02
O ₂ -kont 12d	0,06	2,20	12,51	0,03	0,04	0,71	16,33	0,15	4,78	0,05	19,22	10,26
O ₂ -kont 30d	0,04	2,28	21,00	0,04	0,06	1,28	16,87	0,32	5,92	0,07	23,47	16,59

Niederschläge bei Sauerstoffabschluss

Bei der Filtration mit den grobporigen Filtern konnten keine Niederschläge bei den Proben mit Sauerstoffabschluss beobachtet werden. In Abb. 4.1.3 ist eine sauerstofffreie Probe, die mit dem feinporigen Filter filtriert wurde dargestellt. Die Niederschläge bestehen aus Barium-Strontiumsulfaten, wie auch die der sauerstoffkontaminierten Niederschläge. Doch ist hier kein Eisenmineral zu finden. Die Sulfate sind faserig und weisen eine durchschnittliche Größe von 10 bis 15 µm auf.

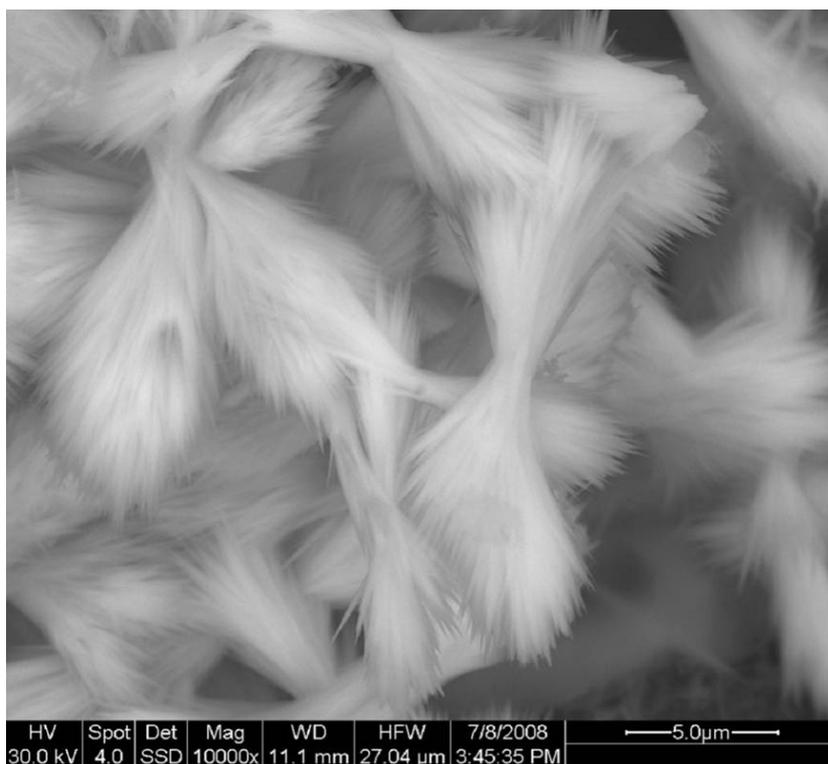


Abb. 4.1.3: REM-Aufnahme einer Probe (Filtration mit Feinfilter), die unter Sauerstoffausschluss 12 Tage bei 20° C gelagert wurde; hantelförmige Kristalle sind Barium-Strontiumsulfate.

In Tabelle 4.1.6 sind die chemischen Zusammensetzungen der sauerstofffreien Niederschläge (Filtration mit Feinfilter) dargestellt. Die Angaben sind die absoluten Gehalte der einzelnen Hauptbestandteile in mg pro Kilogramm Wasser.

Tabelle 4.1.6: Zusammensetzung der sauerstofffreien Niederschläge (Filtration mit Feinfiltern); absolute Gehalte der Hauptbestandteile; dargestellt sind Mittelwerte aus je zwei Proben.

Mittelwerte	Mg	Ca	FeOOH	Mn	Al	As	Ba	Pb	Sr	Zn	SO ₄	SiO ₂
	[mg/kg]	[mg/kg]										
O ₂ -frei 2d	0,06	0,96	0,04	0,01	0,04	0,00	0,22	0,01	0,10	0,03	0,46	0,38
O ₂ -frei 12d	0,15	3,22	0,17	0,02	0,08	0,01	14,96	0,05	4,48	0,03	19,16	0,62
O ₂ -frei 30d	0,10	2,22	0,12	0,02	0,01	0,01	4,52	0,02	1,52	0,04	5,94	0,34

Zeitabhängigkeit

Mit der Zeit nimmt die Menge der Niederschläge zu. Der Ausfällungsprozess verlangsamt sich jedoch mit der Zeit, so dass nach dreißig Tagen nur unwesentlich größere Mengen ausfallen als nach zehn Tagen. Bei Sauerstoffkontamination steigen die Mengen der Ausfällungen tendenziell stärker an (Abb. 4.1.4). Der Calciumgehalt ist bei Sauerstoffausschluss und kurzer Lagerungszeit höher als der Bariumgehalt (Abb. 4.1.5). Grundsätzlich ist, unabhängig vom Sauerstoffgehalt, der Bariumgehalt der Niederschläge höher als der Strontiumgehalt.

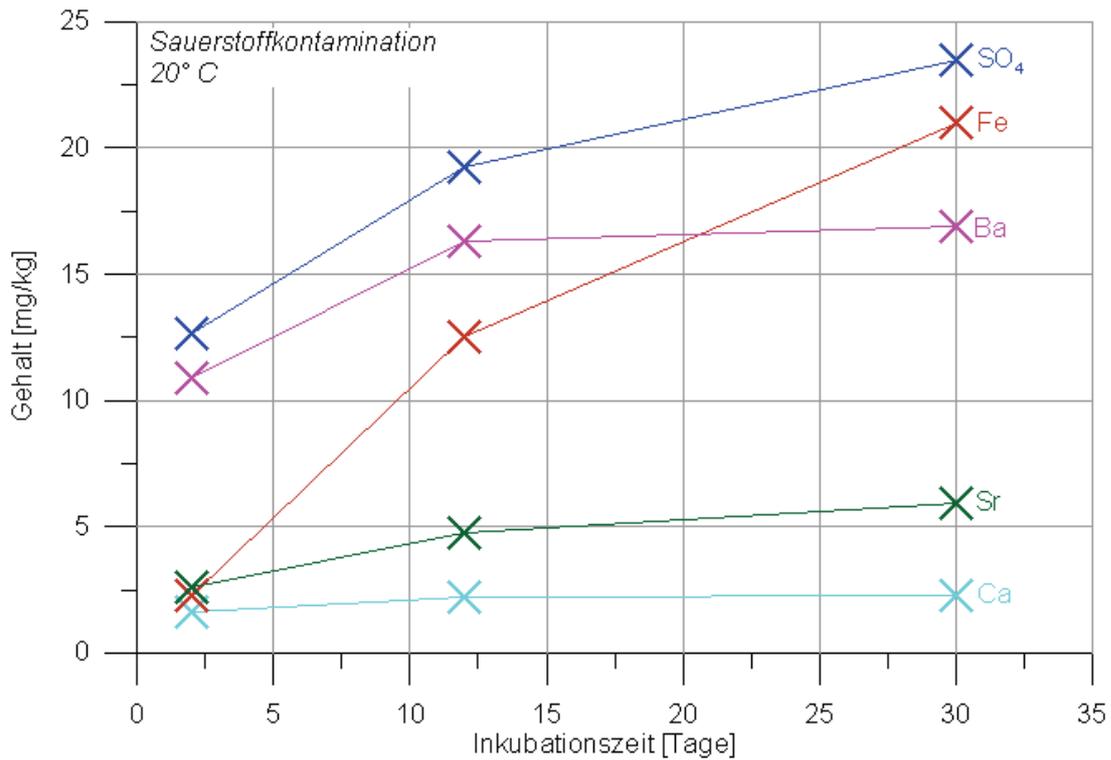


Abb. 4.1.4: Darstellung der Änderung der Gehalte der Hauptbestandteile im Niederschlag bei Sauerstoffkontamination und bei 20° C gegen die Lagerungszeit (Filtration mit Feinfiltern). Fe steht für FeOOH. Dargestellt sind Mittelwerte aus jeweils zwei Messungen.

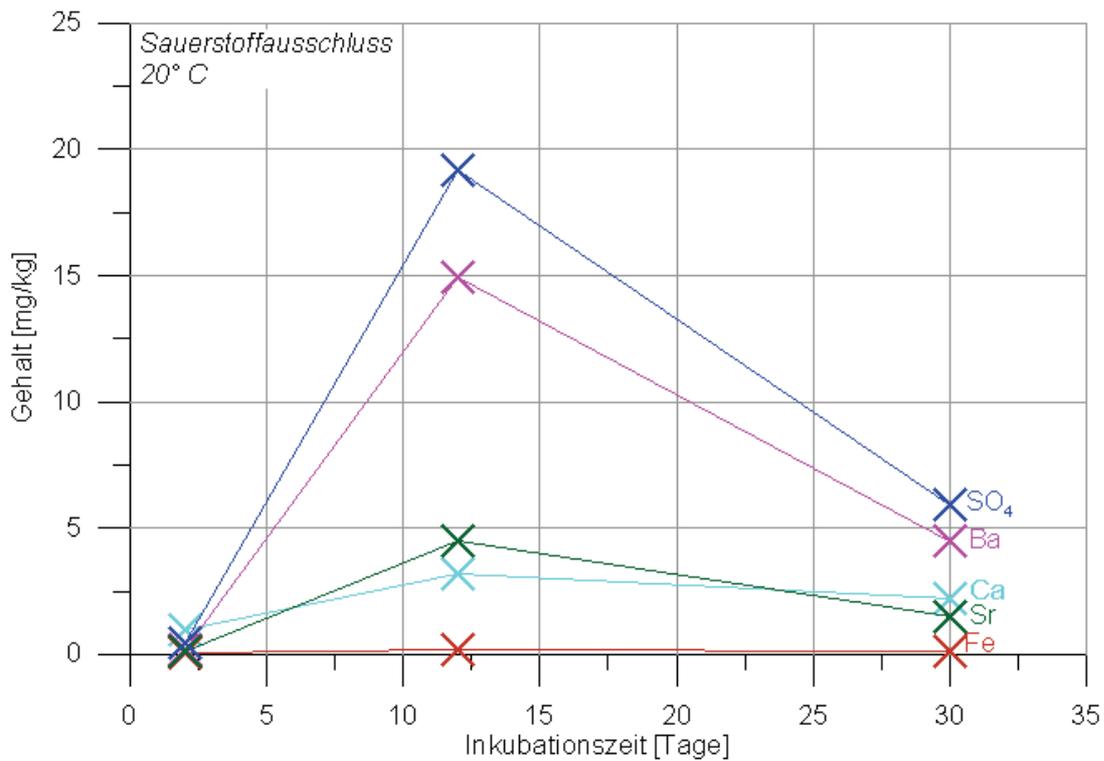


Abb. 4.1.5: Darstellung der Änderung der Gehalte der Hauptbestandteile im Niederschlag (Filtration mit Feinfiltern) bei Sauerstoffausschluss und bei 20° C gegen die Lagerungszeit. Dargestellt sind Mittelwerte von jeweils zwei Proben.

Temperaturabhängigkeit

Die Untersuchungen der Temperaturabhängigkeit wurden unter Sauerstoffausschluss und mit Sauerstoffkontamination durchgeführt.

Die Temperaturabhängigkeit unter Sauerstoffausschluss kann nur über eine Abschätzung aus den Rückständen ermittelt werden, da von der ersten Probennahme keine sauerstofffreien Niederschläge aufgefangen werden konnten. Im Folgenden ist die Temperaturabhängigkeit der Zusammensetzung der Niederschläge bei Sauerstoffkontamination dargestellt. Die Gehalte an Barium und Strontium in den Niederschlägen variieren stark mit steigender Temperatur. Die ausgefallenen Mengen steigen mit der Lagerzeit und der Temperatur bis 40 °C an. Von 40 °C bis 60 °C nimmt die Präzipitation ab (Abb. 4.1.6).

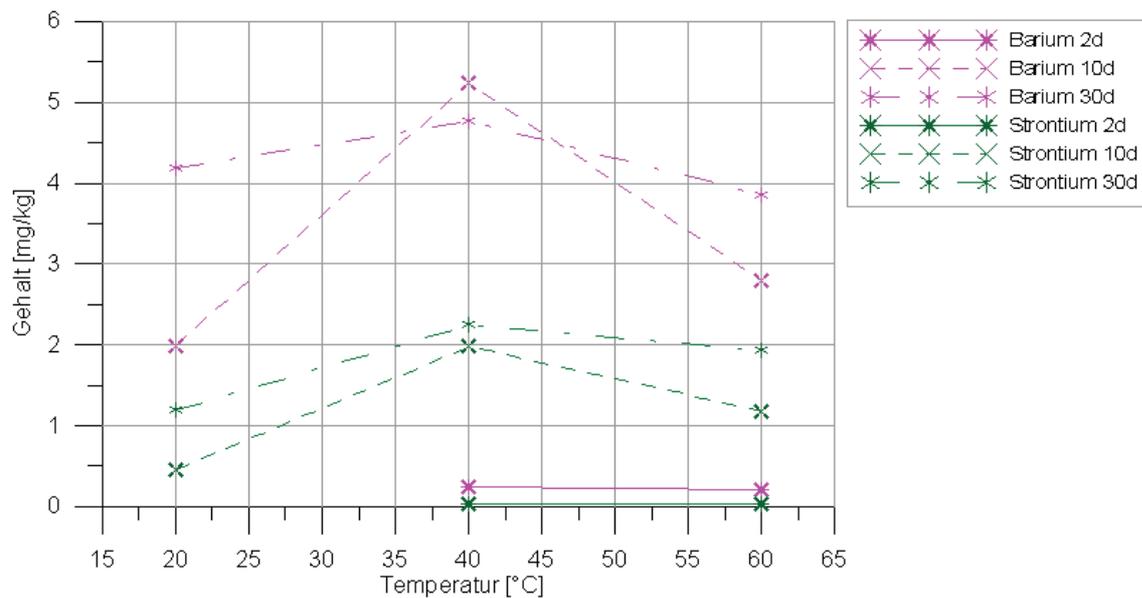


Abb. 4.1.6: Temperatur- und Zeitabhängigkeit der Barium- und Strontiumgehalte in den Niederschlägen mit Sauerstoffkontamination. Filtration mit Grobfiltern.

Bei 40 °C ist bei allen Lagerungszeiten die größte Menge an Ausfällungen von Barium und Strontium zu finden. Die Temperaturabhängigkeit der Ausfällungen bei Sauerstoffausschluss ist in Abb. 4.1.7 anhand der Bariumkonzentrationen in den Rückständen der Proben der ersten Probennahme dargestellt. Die Gehalte an Barium sinken von 20 °C auf 40 °C und steigen bis 60 °C an. Die Zusammensetzung der sauerstofffreien Sulfatniederschläge zeigt demnach die gleiche Temperaturabhängigkeit wie bei Sauerstoffkontamination.

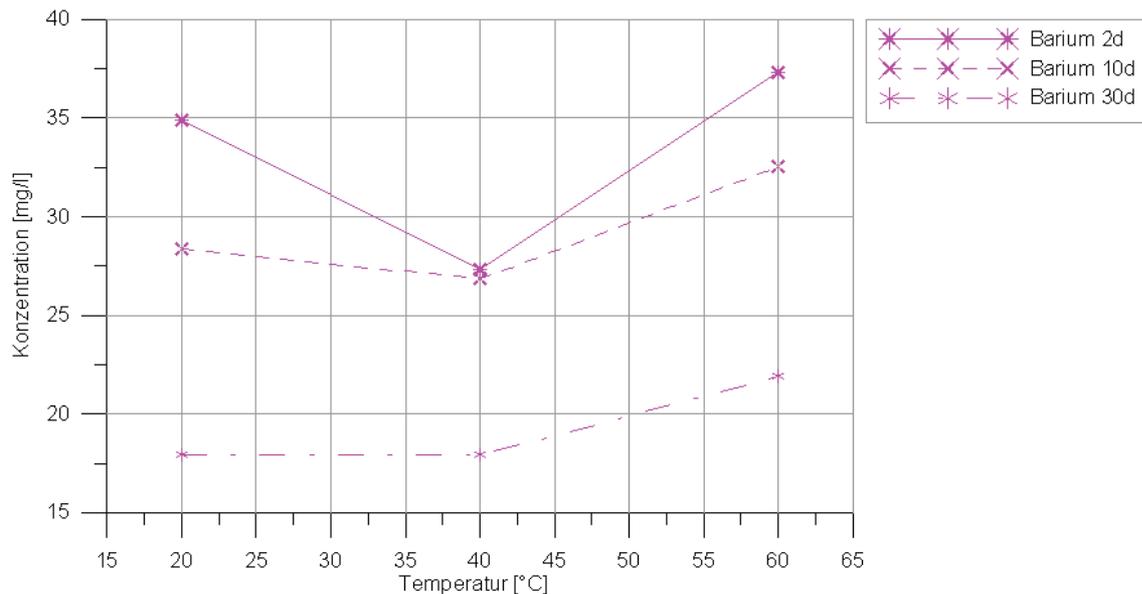


Abb. 4.1.7: Darstellung der Änderung der Bariumkonzentrationen in den Rückständen bei Sauerstoffausschluss. Filtration mit Grobfiltern.

Grundsätzlich wird bei allen Lagerungszeiträumen und unabhängig vom Sauerstoffzutritt beobachtet, dass die Menge der ausgefallenen Sulfatminerale bei 40°C höher ist als bei 20°C. Die Niederschlagsmenge verringert sich erst bei Temperaturen oberhalb 40°C.

4.1.4 Thermodynamische Berechnungen

Um die experimentell ermittelten Ergebnisse zu überprüfen wurden thermodynamische Gleichgewichtsberechnungen mit dem Programm SHEMAT durchgeführt (CLAUSER, 2003). SHEMAT steht für „Simulator for HEat and MAss Transport“. Mit diesem Programm können für eingeschränkte Stoffsysteme auch Gleichgewichtsberechnungen bis zu einer Temperatur von ca. 150 °C und hohen Salinitäten durchgeführt werden.

Für diese Arbeit war die Modellierung von Löslichkeiten von Interesse. Als Datengrundlage dienten die im Fördertest 2004 bestimmten Ionenkonzentrationen (Tabelle 4.1.1). Die Dichte der Thermalsole betrug ca. 1,18 kg/l und der pH-Wert 6,0. Es wurden diese Daten verwendet um die maximal möglichen Ausfällungen unter Gleichgewichtsbedingungen zu bestimmen und mit den experimentell gefundenen Ergebnissen zu vergleichen.

Bei den Niederschlägen, die bei den Experimenten der vorliegenden Arbeit entstanden, handelt es sich um einen Mischkristall. Die Stöchiometrie des Sulfats ist unter verschiedenen Bedingungen unterschiedlich. Reiner Baryt oder reiner Coelestin liegt nie vor. Der Bereich, in dem die Niederschlagsmengen liegen können, ist also relativ groß (Abb. 4.1.8). Entsprechend der Berechnungen würde im Gleichgewichtszustand bei 40 °C die maximale Niederschlagsmenge bei 8,87 mmol/kg (reiner Coelestin) und die minimale Menge bei 0,42 mmol/kg (reiner Baryt) liegen.

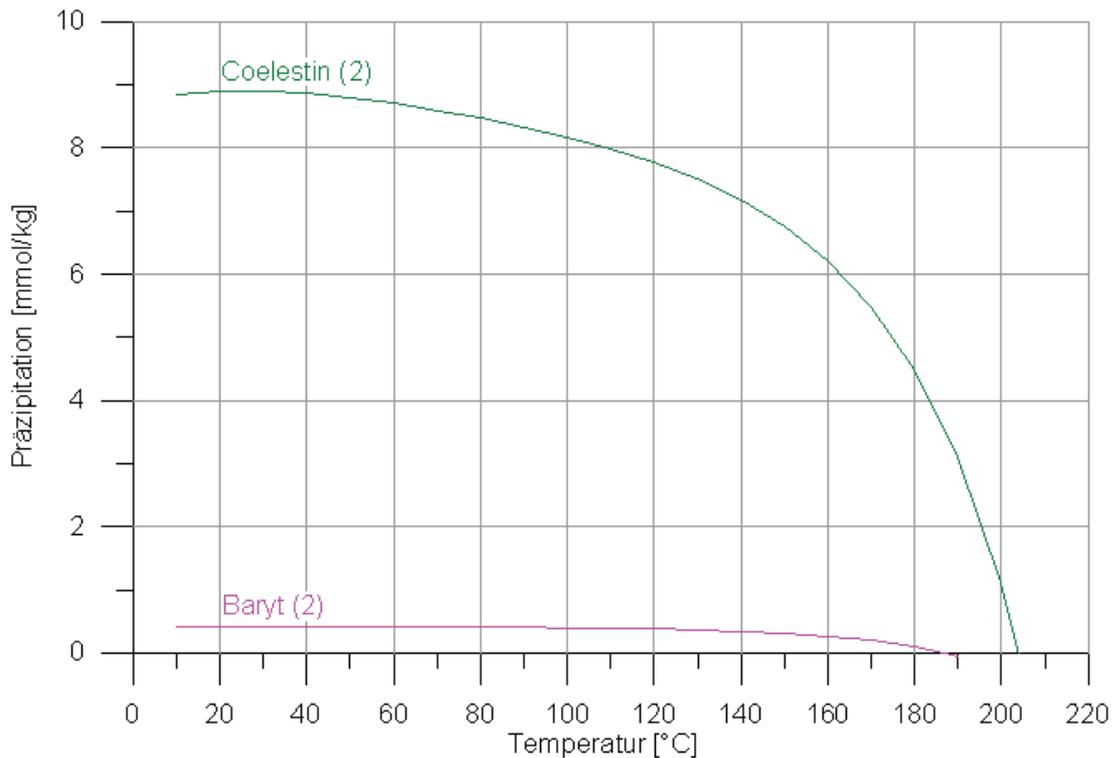


Abb. 4.1.8: Darstellung der berechneten größt- und kleinstmöglichen Niederschlagsmengen für Baryt und Coelestin in Abhängigkeit mit der Temperatur. Coelestin (2) steht für eine Berechnung in der nur Coelestin im Gleichgewicht mit dem Gestein steht; bei Baryt (2) steht nur Baryt im Gleichgewicht.

Bei 60 °C sollten im Gleichgewicht ca. 0,4 mmol/kg Baryt und ca. 8,7 mmol/kg Coelestin ausfallen. Das entspricht ca. 93 mg/kg_w Baryt und 1.597 mg/kg_w Coelestin. Die experimentell beobachteten Mengen liegen deutlich darunter. Außerdem fällt in den Versuchen mehr Baryt als Coelestin aus, auch diese Beobachtung stimmt mit den Modellierungen nicht überein. Die Sulfatausfällungen sind offensichtlich stark kinetisch beeinflusst. In den Experimenten ist der Gleichgewichtszustand nicht erreicht und noch weit entfernt. Außerdem scheint die Coelestinausfällung gegenüber der Barytausfällung zusätzlich gehemmt zu sein.

4.1.4 Diskussion

Die Betrachtungen der vorliegenden Arbeit sind hauptsächlich wegen der geothermischen Tiefbohrung des GeneSys-Projekts Hannover (Groß Buchholz GT1) durchgeführt worden. Es wird davon ausgegangen, dass die Thermalsole im Mittleren Buntsandstein der Bohrung in Hannover der der Bohrung Horstberg sehr ähnlich ist. Deswegen wird im Folgenden auf ein mögliches Anlagensystem eines Heizkraftwerkes eingegangen und potentielle Auswirkungen der Ausfällungen aus den Wässern werden diskutiert.

Art der Ausfällungen

Aus der Thermalsole der Bohrung Horstberg Z1 fallen bis zu 46 mg/kg Barium-Strontiumsulfate aus. Die Röntgendiffraktometrie-Untersuchungen zeigen, dass es sich bei den Niederschlägen um Mischkristalle aus Baryt und Coelestin handelt. Aus den chemischen Zusammensetzungen der Niederschläge ist zu erkennen, dass die Sulfate zum Teil auch hohe Gehalte an Calcium aufweisen, bzw., dass neben den Baryt-Coelestin-Mischkristallen auch Gips oder Anhydrit ausfällt. Die thermodynamischen Berechnungen in Abschnitt 5 weisen darauf hin, dass die Thermalwässer in Horstberg Z1 an Baryt und Coelestin

übersättigt sind. Auch aus den Wässern des Heizkraftwerkes Neustadt-Glewe (SCHRÖDER et al., 2006), welche in ihrer Zusammensetzung mit denen von Horstberg Z1 vergleichbar sind, fallen neben Karbonaten, Bleisulfiden und Blei auch Coelestin-Baryt-Mischkristalle aus. Die Ionenkonzentrationen sind in den Thermalwässern in Neustadt-Glewe niedriger als die der Sole in Horstberg Z1 und dennoch gibt es dort massive Ausfällungen.

In den Arbeiten von MONNIN (1999) und BLOUNT (1977), sowie von KÜHN et al. (2002) werden die Löslichkeiten von Baryt und Coelestin berechnet. Die Löslichkeit beider Minerale steigt mit der Salinität und der Temperatur. Die hohe Salinität der Thermalsole in Horstberg Z1 setzt demnach die Löslichkeit der genannten Sulfate hoch. Laut den thermodynamischen Berechnungen dieser Arbeit können bei einer Temperatur von 60 °C zwischen 0,4 und 8,7 mmol/kg, das entspräche 93 bis 1.597 mg/l Barium-Strontiumsulfat, entstehen. Außerdem ist bei dieser Temperatur Anhydrit (CaSO_4) übersättigt. Das spricht dafür, dass neben den Baryt-Coelestin-Mischkristallen Anhydrit oder Gips ausfällt. Diese These lässt sich mit den Ergebnissen der Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop stützen. In dem Niederschlag wurde ein Calciumsulfat gefunden. Die Barium-Strontiumsulfate sind ausschließlich faserig ausgebildet und erreichen eine Länge von bis zu 25 µm. Eine solche Form ist für den Anlagenbetrieb, gerade im Reinjektionshorizont, sehr ungünstig, da sich die Fasern verkeilen, in den Poren des Aquifers festsetzen und somit zur Erniedrigung der Permeabilität führen können.

Einfluss des Sauerstoffgehalts

Neben den Sulfatausfällungen sind bei den sauerstoffkontaminierten Proben auch Ausfällungen eines Eisenminerals zu beobachten. Bei dem Eisenmineral handelt es sich um Akaganéit. Akaganéit ist ein β -Eisen-Oxihydroxid, welches aus einer stark chlorhaltigen Lösung fällt und Chlor in seine Struktur einbaut. Die Strukturformel lautet $\beta\text{-Fe}^{3+}(\text{O}, \text{OH}, \text{Cl})$. Das Mineral hat eine röhrenförmige Ausbildung, die Röhren sind durch unterschiedlich große Anteile an Chlor und Wasser gefüllt und stabilisiert (SCHWERTMANN & CORNELL, 2003). Auch die Eisenminerale bilden sich bevorzugt in faserigem oder nadeligem Habitus aus, welcher zur Verstopfung des Porenraumes des Aquifers führen kann. Der Sauerstoffausschluss muss in der gesamten Anlage gewährleistet sein.

Neben der Ausfällung des Eisenminerals hat der Sauerstoffzutritt auch Einfluss auf die Ausfällung der anderen Minerale. Bei Sauerstoffausschluss ist der Calciumgehalt im Niederschlag höher als bei Sauerstoffkontamination. Der hohe Gehalt an Calcium und die im Vergleich niedrigen Gehalte an Barium und Strontium lassen darauf schließen, dass sich Gips oder Anhydrit gebildet hat. Calciumsulfate sind leichter zu lösen als Barium- und Strontiumsulfate (BLITZ et al., 1987). Die Gesamtmenge der Ausfällungen an Barium-, Strontium-, und Calciumsulfat ist relativ unabhängig vom Sauerstoffzutritt. Bei Sauerstoffausschluss fällt etwas weniger aus (maximal ca. 40 mg/kg) als bei Sauerstoffkontamination (maximal ca. 46 mg/kg). Die Ausfällung von Barium-Strontiumsulfaten kann durch Sauerstoffausschluss weder signifikant verringert noch vermieden werden. Die Struktur der Minerale (Ba-Sr-Sulfate) weist auf Ausfällung aus der Lösung hin, daher ist eine Mitfällung durch das Eisenmineral nicht anzunehmen.

Einfluss von Zeit und Temperatur

Mit der Zeit verändert sich das Verhältnis von Barium zu Strontium. Bei kurzen Lagerzeiten haben die Niederschläge ein Ba:Sr-Verhältnis von 2:1. Wenn die Lösung längere Zeit zur

Verfügung hat, werden die Sulfate bariumreicher, das Verhältnis liegt dann bei ca. 3:1. Aufgrund der thermodynamischen Modellierungen wären strontiumreichere Sulfate zu erwarten. Zusätzlich müssten laut den Berechnungen weitaus mehr Niederschläge anfallen. Demnach kann, befände sich das Fluid im Gleichgewicht, mit einer bis zu 30-fachen Menge an Barium-Strontiumsulfatausfällungen gerechnet werden. Da eine solche Menge bei den Experimenten nicht gefunden wurde, ist davon auszugehen, dass die Ausfällung dieser Sulfate einem kinetischen Effekt unterliegt. Entsprechend der Modellrechnungen ist zu erwarten, dass bei weit längeren Lagerungszeiten noch mehr Barium-Strontiumsulfate ausfallen und diese dann auch strontiumreicher würden.

Das Thermalfluid befindet sich in der gesamten Anlage in Strömung. Die Verweilzeit der Sole in den obertägigen Anlagenelementen ist sehr kurz und hängt stark von der Fließgeschwindigkeit ab. Nach kurzer Lagerzeit (zwei Tage) und bei Sauerstoffausschluss ist bei den Experimenten der vorliegenden Arbeit ein Niederschlag entstanden, der zu ca. 40 % aus Calcium, zu ca. 10 % aus Barium, zu ca. 4 % aus Strontium und zu ca. 20 % aus Sulfat besteht. Bei den Sulfaten wird es sich hauptsächlich um Anhydrit oder Gips handeln und nur untergeordnet um Coelestin und Baryt. Nach weiterer Lagerungszeit geht der Calciumanteil gegenüber den Barium- und Strontiumanteilen deutlich zurück. Wegen der kurzen Verweilzeit in der Anlage, wie zum Beispiel dem Wärmetauscher, ist dort mit der Ausfällung von hauptsächlich Calciumsulfat und untergeordnet Barium-Strontiumsulfat zu rechnen. Diese Ergebnisse stimmen nicht ganz mit denen von KÜHN et al. (1997) überein. KÜHN et al. (1997) haben bei ihren Experimenten keine Ausfällungen von Coelestin oder Anhydrit nachgewiesen, nur von Baryt, doch dort wurde auch mit anderen Zusammensetzungen, größtenteils mit niedrigeren Konzentrationen gearbeitet.

In dem betrachteten Intervall ist der Einfluss der Temperatur auf die Ausfällungen gering. Bei einer kurzen Lagerzeit gibt es kaum Unterschiede in den Gehalten der Niederschläge zwischen 40 °C und 60 °C. Bei 30 Tagen Lagerung sind die Temperaturabhängigkeiten größer. Mit steigender Temperatur nimmt der prozentuale Bariumanteil am Gesamtniederschlag zu, sowie auch der des Strontiums. Die absoluten Mengen an Barium und Strontium in den Niederschlägen zeigen ähnliche Trends. Bei einer kurzen Lagerungszeit ändert sich die Menge mit steigender Temperatur kaum, bei längerer Zeit steigen die Mengen von 20 °C bis 40 °C an, von 40 °C bis 60 °C sinken sie. Möglicherweise gehen die Schwankungen der Mengen auf die Probleme der Methodik zurück, denn mit steigender Temperatur (im betrachteten Temperaturintervall) sollte die Löslichkeit der Sulfate ebenfalls steigen (BLOUNT, 1977). Auch nach MONNIN (1999) ist eine solche Abhängigkeit anzunehmen.

Die thermodynamischen Berechnungen, die für diese Arbeit durchgeführt wurden, sprechen grundlegend ebenfalls dafür, dass die Löslichkeit mit der Temperatur steigt. Einzig die Berechnung für die Präzipitation von Coelestin, wenn sich Baryt und Coelestin im Gleichgewicht mit dem Gestein befinden, zeigt ein Verhalten wie in den Experimenten beobachtet. Im Temperaturintervall von 10° bis 30 °C steigt die Ausfällung und somit sinkt die Löslichkeit von Coelestin. Diese Berechnungen zeigen, dass die experimentell ermittelte Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit grundsätzlich realistisch ist.

Sinnvoll für die spätere Energiegewinnung wäre eine Abkühlung des Thermalfluids auf 60° bis 70 °C (KEHRER et al., 2007). Bei 60 °C und kurzer Lagerungszeit sind die Gehalte an Barium und Strontium in den Niederschlägen sehr gering (~ 0,2 mg/kg Barium; ~ 0,04 mg/kg

Strontium und 0,2 mg/kg Sulfat). Eine Abschätzung über die Menge der Ausfällungen, die über die Zeit in der Anlage und im Verpresshorizont auftreten können, kann nur sehr vage gemacht werden. Bei einer Lagerungszeit von zwei Tagen und Sauerstoffausschluss ist bei den Horstbergwässern ca. 10 mg/l Niederschlag ausgefallen, die maximale Niederschlagsmenge lag bei ca. 150 mg/l bei 30 Tagen Lagerung und Sauerstoffkontamination. Bei Sauerstoffausschluss ist also mit einem Ausfallen von ungefähr 10 mg/l in der Anlage (kurze Verweilzeiten) zu rechnen. Bei einer Fließrate von 7 l/s (KEHRER et al., 2007) entspräche dieses dann 252 g/h (davon ca. 34 % BaSrSO₄) Ausfällungen. Dieser Wert ist allerdings kritisch zu betrachten, da die Niederschläge, mit deren Mengen hier gerechnet wurde, in strömungsfreien Gefäßen gefallen sind. In der Anlage wäre das Fluid nicht im Ruhezustand. Darum ist hier eine geringere Niederschlagsrate anzunehmen.

Verringerung der Permeabilität

Die Minerale der Niederschläge sind faserig ausgebildet. Die Baryt-Coelestin-Minerale haben eine Größe von bis zu 25 µm. Die beobachteten Akaganéit-Minerale sind weitaus kleiner. Die Porenradien der Detfurth-Sandsteine weisen Radien zwischen 0,04 µm und 0,4 µm auf. Die Porenweiten der Solling-Sandsteine werden ihnen in etwa entsprechen. Sollten also Minerale dieser Größe in die Poren der Sandsteine eingetragen werden, führt das zur Verringerung der Permeabilität des Aquifers.

Nach Nutzung der Wärmeenergie des Fluides (Abkühlung auf ca. 60 bis 70 °C) wird es je nach Anlagen-Konzept entweder in den Kalkarenit verpresst oder zur Tiefenzirkulation in die Solling-Sandsteine geleitet. Der Kalkarenit weist eine Temperatur von ca. 40 °C auf und wird an der Bohrung Horstberg Z1 als Verpress-, bzw. Reinjektionshorizont verwendet. Er befindet sich in ca. 1020 bis 1200 m Tiefe. In Hannover wird ist die Nutzung der Wealden-Sandsteine als Reinjektionshorizont wahrscheinlicher. Diese befinden sich ebenfalls in ca. 1.200 m Tiefe. Die Eigenschaften der Horizonte werden hier als ähnlich angesehen. So würde hier das Fluid weiter abgekühlt werden. Die Verweilzeit im Verpresshorizont ist nicht mehr von der Fließgeschwindigkeit beeinflusst und ist somit weitaus höher als in der Anlage selbst. Daher kann es im Kalkarenit zur Ausfällung von größeren Mengen des Baryt-Coelestin-Mischkristalls kommen. Die Durchströmungsexperimente von KÜHN et al. (1997) zeigten hingegen auch über längere Zeiträume keine Veränderungen in den Konzentrationen der Lösungen, die durch Sandsteine geleitet wurden, also keine Ausfällungen. Als Grund dafür wird angenommen, dass die Ausfällung von Sulfaten neben der Löslichkeit auch von der Porosität des durchströmten Mediums abhängig ist (PUTNIS et al., 1995). Demnach ist die Ausfällung bei geringem Porenraum unwahrscheinlicher als bei einer größeren Porosität, welches zu einer Verminderung der Ausfällungen führen könnte.

Im Konzept der Tiefenzirkulation wird das genutzte Thermalfluid in die Sandsteine der Solling-Formation geleitet. Diese Formation hat eine ähnliche Temperatur wie die Detfurth-Formation, aus der das Fluid stammt. Hier ist das Risiko der Ausfällung geringer als bei Injektion in den Kalkarenit, da die Gesteinstemperatur deutlich höher ist. In den Solling-Sandsteinen können sich allerdings Kristalle einlagern, die schon vorher ausgefallen sind, aber noch im Volumenstrom weiter transportiert wurden. Bei Herabsetzung der Fließgeschwindigkeit im Aquifer kann es dann zur Sedimentation dieser Minerale kommen.

Bezug zur Geothermie-Bohrung Hannover

Die Probleme, die bei der geplanten Geothermie-Bohrung in Hannover auftreten können, sind in der Öl- und Gasindustrie ebenfalls bekannt. Auch hier haben die Betreiber der Förderbohrungen oftmals Probleme mit Schwerspatausfällungen. Es gibt dennoch kaum Möglichkeiten, diese zu vermeiden. Anhydritablagerungen sind mit einfacheren Mitteln, wie Lösungsmittel und Komplexbildner zu beseitigen als Ablagerungen von Baryt und Coelestin. Im Labormaßstab wurde versucht, Komplexbildner zur Verhinderung der Barytausfällung zu entwickeln (LAKATOS et al., 2002). In Feldversuchen stellten sich solche allerdings als ungeeignet heraus (HATSCHER, 2008), da die Wirksamkeit bei erforderlichem Aufwand (zeitlich und finanziell) zu niedrig ist. Für die Entfernung von Schwerspat in der obertägigen Anlage sieht die Industrie die mechanische Reinigung als die beste Methode an (HATSCHER, 2008). Im Bohrstrang werden sogenannte Ringkratzer verwendet, um Ablagerungen an der Bohrlochwand zu beseitigen. Eine Möglichkeit zur Auflösung von im Aquifer festgesetzten Schwerspaten ist das Einbringen von stark basischen Lösungen. Dieser Vorgang müsste nach Ermessen wiederholt werden, sobald der Skineffekt die Injektion des abgekühlten Thermalfluids beeinträchtigt (HATSCHER, 2008).

4.1.6 Zusammenfassung

Im Rahmen des GeneSys-Projekts des GEOZENTRUMs Hannover wurde die Thermalsole der 4.100 m tiefen Bohrung Horstberg Z1 hinsichtlich der möglichen Ausfällungen untersucht. Der Hintergrund ist hierbei die Frage, ob nach Abkühlung des Thermalwassers in den obertägigen Anlagen, beziehungsweise bei der anschließenden Reinjektion des Wassers, Probleme mit Ausfällungen auftreten. Als kritisch werden in diesem Zusammenhang vor allem Sulfatausfällungen angesehen, da diese schwer wieder löslich sind.

In einem Produktionstest wurde Formationswasser gefördert und Wasserproben entnommen. Die Proben wurden unter Sauerstoffabschluss und unter Sauerstoffkontamination bei verschiedenen Temperaturen (20°, 40° und 60 °C) verschieden lange Zeiträume (2, 10 und 30 Tage) gelagert. Im Anschluss wurden die Proben filtriert und die Niederschläge wie auch die Rückstände hinsichtlich ihrer Zusammensetzung untersucht. Die Niederschläge bestehen aus einem Baryt-Coelestin-Mischkristall, bei Sauerstoffkontamination zusätzlich aus einem Eisen-Oxidhydroxid (Akaganéit: $\beta\text{-Fe}^{3+}(\text{O}, \text{OH}, \text{Cl})$). Das Verhältnis von Barium zu Strontium in den Niederschlägen variiert über die Zeit und über den Temperaturbereich. Grundsätzlich handelt es sich um strontiumreichen Baryt. Calciumsulfat tritt hauptsächlich bei Sauerstoffabschluss auf.

Die Niederschlagsmenge steigt mit der Zeit, nach zehn Tagen Lagerung ist der Großteil ausgefallen. Die Niederschlagsmenge liegt bei mindestens 10 mg pro Liter Probenvolumen (Sauerstoffausschluss). Bei Sauerstoffkontamination fällt bis zu 160 mg pro Liter Probenvolumen Niederschlag aus.

Die ausgefallenen Sulfatkristalle sind relativ klein (10 bis 25 μm) aber faserig. Die Struktur der Ausfällungen deutet darauf hin, dass es sich bei den Ausfällungen um Neubildungen aus der Lösung handelt und nicht um Mitfällungsprodukte. Da die mittlere Porengröße der Gesteine in die reinjiziert wird noch kleiner ist (z.B. zwischen 0,04 und 0,4 μm im Detfurth-Sandstein), können die kleinen, faserigen Kristalle zur Herabsetzung der Permeabilität führen.

Die Temperatur hat im Intervall von 20° C bis 60 °C laut den Ergebnissen dieser Arbeit und den thermodynamischen Berechnungen keinen großen Einfluss auf die Ausfällungen. Daher ist eine Abkühlung auf unter 60 °C nicht als kritischer zu beurteilen als eine Abkühlung auf 60 °C.

Schlussfolgernd lässt sich sagen, dass mit relevanten Mengen an Sulfatausfällungen im geothermischen Anlagenbetrieb zu rechnen ist. Bei einer Förderrate von 7 l/s und Ausfällungen von ca. 10 mg/l könnten sich ca. 250 g/h Ablagerungen ergeben. Die Menge der ausgefallenen Sulfatminerale ist relativ unabhängig davon, ob Sauerstoff Zutritt oder nicht. Sauerstoffausschluss muss aber in der gesamten Anlage gewährleistet sein, unter anderem um die Ausfällungen von Eisenmineralen (Akaganéit) zu vermeiden.

4.2. Korrosion an den Stahlrohren des Förderstranges der Bohrung Horstberg

Im März 2007 ist der Packer ist der Bohrung Horstberg Z1 umläufig geworden. Daraufhin wurde dieser ausgetauscht. Beim Tausch ist der Förderstrang an dem der Packer hing auf dessen Wandstärke hin untersucht worden, um zu überprüfen, ob die einzelnen Rohre für einen Wiedereinbau geeignet sind. Bei dieser Prüfung, die von der Fa. *Manfred Krajewski – zerstörungsfreie Materialprüfung zmp* durchgeführt worden ist, sind 15 % der Stahlrohre ausgefallen. Von insgesamt 434 Rohren konnten 67 Rohre nicht für den Wiedereinsatz empfohlen werden. Sie weisen eine Wandstärkenverringering von über 20 % auf (siehe Messbericht 2008, Anhang 4.1). Die Ursache für die Verringerung der Wandstärke kann zum Einen Korrosion und zum Anderen mechanische Beschädigung sein.

Um die Ursache genauer charakterisieren zu können, wurden die Stahlrohre weiter untersucht. Zuerst ist ein Teil der ausgefallenen Rohre bei *Krajewski* ein zweites Mal untersucht worden. Danach wurden an geeigneten Stellen Proben herausgeschnitten. Zusätzlich zu diesen Proben sind weitere aus den Rohren unterhalb des Packers geschnitten worden. Diese Rohre lagen bis dahin auf dem Gelände der Forschungsbohrung Horstberg. Der Zustand der Rohre wurde zunächst makroskopisch aufgenommen. Im Folgenden sind die Proben von *VKTA Rossendorf e.V.* metallographisch untersucht worden. Außerdem wurden dort auch der durchschnittliche sowie der maximale Abtrag der Schadstellen bestimmt. Die Rohre, die sich unterhalb des Packers befunden haben sind nicht abgebürstet worden, wie die restlichen Rohre. Somit war es möglich die Ablagerungen an den Innenwandungen sowie die auf der Außenseite abzukratzen und zu analysieren. Anschließend sind von allen Proben kleine Abmessungen herausgeschnitten worden, um sie im Rasterelektronenmikroskop untersuchen zu können.

Das Interesse an der Ursache, die zu den beobachteten Schäden geführt hat liegt vor allem im Bezug der Forschungsbohrung Horstberg zu der GeneSys-Bohrung (GT1) in Hannover Buchholz. Die Bohrung Horstberg dient der Voruntersuchung von verschiedenen Punkten für die GT1. Es ist davon auszugehen, dass die Thermalsole, die im Reservoir in Hannover angetroffen wird, der in Horstberg zumindest sehr ähnlich ist. Somit ist weiterhin damit zu rechnen, dass Probleme, die in Horstberg auftreten auch in Hannover vorkommen können. Daher ist es sinnvoll die Ursachen zu kennen, um für Hannover mögliche Gegenmaßnahmen entwickeln zu können.

4.2.1. Material der Stahlrohre

Die Stahlrohre des Förderstranges bestehen aus Schwarzstahl, C95 api 5 CT casing-grade. Die chemische Zusammensetzung wurde vor Einbau der Rohre durch die *TPS TECHNITUBE Röhrenwerke GmbH* bestimmt. Es wurde ein Abnahmeprüfzeugnis gemäß EN 10204 erstellt (siehe Anhang 4.2). In Tabelle 4.2.1 ist die Zusammensetzung dargestellt.

Tabelle 4.2.1: Zusammensetzung der Stahlrohre des Förderstranges; Untersuchung von TPS; Angaben in Gew %; persönliche Auskunft aus der Stahlindustrie: C95-Stahl hat zusätzlich 0,3-0,6 Gew % Molybdän

Name	Proben Nr.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
Cross Overs	565621	0.32	0.26	0.77	0.012	0.003	1		0.12	0.24
Tubing	568819	0.31	0.25	0.76	0.013	0.003	1.01		0.09	0.2
Tubing	568820	0.33	0.24	0.75	0.012	0.002	0.99		0.09	0.21
Tubing pers. Auskunft	568821	0.31	0.25	0.74	0.016	0.002	0.99	0,3 - 0,6	0.09	0.24

C95-Stahl ist ein mittellegierter Stahl, an der Grenze zu einem Niedriglegiertem. Als Hauptbestandteil, neben Eisen, sind Chrom, Mangan, Kohlenstoff und Silizium zu nennen. Des Weiteren wurden die Werkstoffkennwerte Streckgrenze, Zugfestigkeit und Dehnung bestimmt. Dabei ergaben sich die in Tabelle 4.2.2 dargestellten Kennwerte.

Tabelle 4.2.2: Werkstoffkennwerte des Förderstranges; Untersuchungen von TPS

Name	Proben Nr.	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Dehnung
		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]
	Soll:	655-758	min 724	min 13,5
Cross Overs	4100	701	810	21
Tubing	8895	655	791	22
Tubing	8896	668	787	22
Tubing	8897	703	833	22

Der Stahl hat eine durchschnittliche Streckgrenze 680 N/mm². Die Streckgrenze wird als die Zugbeanspruchung angegeben, bis zu der ein Werkstoff belastet werden kann, ohne eine plastische Verformung zu zeigen. Als Norm ist eine minimale Streckgrenze von 655 N/mm² genannt. Dieser Wert entspricht 95.000 psi, woher auch der Name des Stahls, C95 stammt:

$$95.000 \text{ psi} * 6,894757 * 10^{-3} \approx 655 \text{ N/mm}^2$$

Unter der Zugfestigkeit wird die maximal erreichte Zugkraft verstanden, ab der der Prüfkörper eines Werkstoffes beginnt sich einzuschüren und folglich bricht. Durchschnittlich liegt dieser Wert bei dem Stahl des Förderstranges bei 805 N/mm², somit oberhalb der Mindestzugfestigkeit von 724 N/mm².

Bei der Dehnung handelt es sich um die elastische Dehnung (Elastizität), die reversibel ist und keine plastische Verformung des Werkstückes enthält. Die durchschnittliche Elastizität liegt bei 22 %, und somit oberhalb der Mindestelastizität.

4.2.2. Untersuchung der Stahlrohre

Probennahme

Einige der beim Packerausbau untersuchten und wegen Korrosion ausgefallenen Stahlrohre wurden durch die Firma *Krajewski* ein zweites Mal untersucht. Dabei wurden an geeigneten Stellen Proben aus den Stahlrohren geschnitten.

Auf dem Gelände der Bohrung Horstberg Z1 waren ebenfalls einige der Rohre des Förderstranges gelagert. Von diesen Rohren sind am 07. Mai 2009 Proben geschnitten worden. Das so gewonnene Material wurde aufgesägt und längs halbiert. Die sich an den Wandungen befindlichen Ablagerungen wurden abgekratzt und zur weiteren Analyse vorbereitet.

Zerstörungsfreie Materialprüfung

Im Dezember 2008 wurden die 434 Stangen des Förderstranges von *Krajewski* untersucht (Messbericht 2008; Anhang 4.1). Die Rohre wurden auf ihre Wandstärke hin untersucht. Dabei ist bei 67 Rohren eine Verringerung der Wandstärke von über 20 % festgestellt worden. Als Ursache für die Verringerung wird Korrosion oder mechanische Beschädigung angegeben. Es konnte nicht unterschieden werden welche der beiden Ursachen die richtige ist. Somit wurde eine zweite Messung von ausgewählten Rohren in Auftrag gegeben. Die Rohre sind zuerst gebürstet worden und anschließend auf Längs- und Querdefekte und Wandstärkenverringerungen hin untersucht.

Es wurden verschiedene Verfahren zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung verwendet:

Magnetpulverprüfung (DIN EN ISO 9934)

Mit der Magnetpulvermethode können Risse an der Oberfläche und oberflächennahe Fehlstellen von Werkstoffen aus ferromagnetischen Material detektiert werden. Das Werkstück wird magnetisiert, dadurch entstehen Magnetfeldlinien, die parallel zur Oberfläche verlaufen. Risse und oberflächennahe Fehlstellen, die senkrecht zu den Feldlinien liegen stören die Feldlinien, so dass sie aus der Oberfläche heraustreten und ein Streufluss erzeugt wird. Das Werkstück wird nun mit einer Suspension aus Öl und freibeweglichen ferromagnetischen Partikeln bedeckt. Die Partikel ordnen sich längs der Feldlinien an und bilden so die Fehlstellen ab.

Das Verfahren kann nur für ferromagnetische Werkstoffe angewendet werden. Es können nur Fehler detektiert werden die senkrecht zu den Feldlinien liegen. Somit müssen zwei senkrecht zueinander stehende Magnetfelder erzeugt werden, um Längs- und Querrisse in einem Werkstück erkennen zu können. (BARGEL & SCHULZE, 2008)

Wirbelstromverfahren (DIN EN 12084)

Das Wirbelstromverfahren ist ein induktives Verfahren. Eine Spule erzeugt zeitlich veränderliche Magnetfelder, diese sorgen in einem elektrisch leitenden Material einen Wirbelstrom. Bei einer Werkstofftrennung (Defekt) tritt eine lokale Störung der Wirbelstromausbildung auf. Über eine Empfängerspule kann die Änderung des resultierenden Magnetfeldes gemessen werden. Das Verfahren muss an einem intakten Prüfkörper geeicht werden, die Fehlerbestimmung erfolgt dann über Vergleich mit dem Referenzkörper.

Die Art des Fehlers kann mit diesem Verfahren in der Regel nicht bestimmt werden. Es ist aber möglich die Schichtdicke, bzw. die Wandstärke eines Prüfkörpers zu messen. (BARGEL & SCHULZE, 2008)

Strahlenverfahren

Beim Strahlenverfahren wird mit Röntgen- oder Gammastrahlung gearbeitet. Diese kurzwelligeren elektromagnetischen Strahlen können auch metallische Werkstoffe durchdringen. Sie werden je nach Werkstoff und dessen Beschaffenheit abgeschwächt. Somit lässt sich ein Abbild des Werkstückes erzeugen. Bei Bestrahlung eines Werkstückes kann die Reststrahlung mittels Fotomaterial oder Detektor registriert werden. Bei Defekten hat die Strahlung nach Durchdringen des Prüfkörpers eine höhere Intensität als bei intakten Bauteilen. (BARGEL & SCHULZE, 2008)

Makroskopische Untersuchungen

Nach der Probennahme wurden die Rohrstücke makroskopisch begutachtet. Die augenscheinlichen Schäden sind dokumentiert und fotografiert worden. Bei einigen Rohrproben (von unterhalb des Packers) wurden Ablagerungen an den Wandungen gefunden.

Metallographische Untersuchungen

Die metallographischen Untersuchungen sind an zwei Probenkörpern von 10 x 10 mm Größe aus den Rohrsegmenten 1 und 6 vom *Institut für Sicherheitsforschung des Forschungszentrum Dresden-Rossendorf (FZD)* durchgeführt worden. Die Proben wurden in Epoxidharz gebettet und die Messfläche ist abgeschliffen worden. Danach erfolgte ein Feinschliff mit Diamant-Paste mit anschließender Ätzung (mit 3 %iger alkoholischer HNO₃) zur Gefügeentwicklung. Anschließend wurde das Gefüge auf Orientierung des Werkstoffgefüges und Korrosionsspuren hin mikroskopisch untersucht. Neben der Gefügeuntersuchung wurden auch Härtemessungen (nach Vickers) durchgeführt. (Ergebnisbericht „Präparation und Vermessung von Stahlproben“ *VKTA Rossendorf e.V.* 2009; siehe Anhang 4.3)

Bei dem Härteprüfverfahren nach Vickers handelt es sich um ein Eindringverfahren, bei dem die Härte über die Bestimmung der Kraft auf einer Fläche ermittelt wird. Der Eindringkörper, eine gleichseitige Diamantpyramide mit einem Öffnungswinkel von 136°, wird mit einer festgelegten Prüfkraft in das Werkstück eingedrückt. Die eingedrückte Marke wird dann im Mikroskop ausgemessen. Aus den Längen der Diagonalen wird die Eindrückoberfläche berechnet. Das Verhältnis von Prüfkraft zur gemessenen Oberfläche wird mit dem Faktor 0,102 multipliziert und ergibt die Vickers-Härte (HV). (aus Vorlesungsskript des Instituts für Werkstoffkunde, 2006)

Bestimmung des Abtrages der Schadstellen

Die Bestimmung des durchschnittlichen sowie des maximalen Abtrages der Schadstellen ist an 6 Proben von ca. 25 x 25 mm Größe von *VKTA Rossendorf e.V.* durchgeführt worden. Die Ermittlung erfolgte vorzugsweise entlang der Transsekten der Korrosionsnarben. Dabei wurden die Parameter Wanddicke, Loch-/Muldentiefe, Fläche bezogen auf die untersuchte Probenoberfläche, sowie jeweils Standardabweichung, Maximalwert und Median ermittelt. Die Ermittlung der Flächenanteile erfolgte bei ca. 10-facher Vergrößerung unter einem Mikroskop. Für die Bestimmung der Lochtiefe ist eine Mikrometerschraube mit speziellen Messspitzen verwendet worden. Pro Probe wurden 10 bis 20 Korrosionsmulden /-löcher ausgemessen. Die Ermittlung der Wanddicke als Bezug für die Bestimmung der Eindringtiefe war mit Unsicherheiten verbunden. Die Rohrsegmente wiesen bereits fertigungsbedingt eine ungleichmäßige Oberfläche auf. Die Messung der Wand- sowie auch der Scalingdicke wurden mit Ultraschall durchgeführt. (Ergebnisbericht „Präparation und Vermessung von Stahlproben“ *VKTA Rossendorf e.V.* 2009; siehe Anhang 4.3)

Analysen der Ablagerungen

Die Ablagerungen wurden mittels Röntgendiffraktometrie und Röntgenfluoreszenzanalytik untersucht.

Die Röntgendiffraktometrie (XRD für engl. X-Ray Diffraction) ist eine mineralogische Analyseverfahren zur qualitativen Charakterisierung der Kristalle in einer Probe (KELLNER et al., 2004). Eine Einschätzung über die Mengenverteilung verschiedener Phasen in einem

Gemisch ist möglich, aber nicht sehr genau. Für diese Arbeit ist diese Methode wichtig, da das Probenmaterial nicht zerstört wird und eine Abschätzung über den Mineralbestand möglich ist. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte qualitativ anhand des digitalen Vergleichs mit Daten der JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards). Dabei handelt es sich um eine umfangreiche Datenbank von über 500.000 Einträgen, bzw. Mineralen. Die Messungen wurden im Labor für Technische Mineralogie der BGR / LBEG von D. Weck unter der Leitung von Dr. R. Dohrmann durchgeführt. Die Messungen wurden mit dem X'Pert PW3710 Θ -2 Θ Diffraktometer (CuK α -Strahlung erzeugt bei 40kV und 40mA) der Firma Phillips durchgeführt.

Die Röntgenfluoreszenz Analytik (RFA) ist eine Methode zur Charakterisierung und Konzentrationsbestimmung aller Elemente ab einer Ordnungszahl von 9 (Fluor). Bei dieser Methode geht die Probe verloren, da sie zu einem feinen Pulver gemahlen werden muss, welches zu einer Probenplatte gepresst oder geschmolzen wird. Die Nachweisgrenzen sind allerdings sehr niedrig und die Konzentrationsbestimmung sehr genau. Das macht die RFA zu einer unverzichtbaren Analysemethode. (KELLNER et al., 2004)

Bei dieser Arbeit wurden die Spektrometer PANalytical Axios and a PW2400 verwendet. Die Messungen wurden im Röntgenfluoreszenz-Labor der BGR / LBEG von F. Korte unter der Leitung von Dr. R. Dohrmann durchgeführt.

REM Untersuchungen

Bei der Rasterelektronenmikroskopie (REM) handelt es sich um ein analytisches Verfahren, bei dem die Morphologie der Oberfläche und die Dichte einer Probe bestimmt werden können (REIMER & PFEFFERKORN, 1977). In der vorliegenden Arbeit wurde das ESEM FEI Quanta 600 FEG benutzt. Dieses Gerät arbeitet im „low-vacuum-mode“ (0,6 mbar), deswegen ist es nicht nötig, dass die Proben mit Gold oder Kohlenstoff besputtert werden. Das Gerät ist zusätzlich mit einem EDX-System (Energiedispersive Röntgenspektroskopie) der Firma EDAX (Genesis 4000) ausgerüstet. Mit Hilfe des EDX-Systems ist es möglich punktuell oder flächig die Elementzusammensetzung der Probe zu ermitteln. So lassen sich einzelne Kristallphasen charakterisieren.

Die Aufnahmen wurden im Rasterelektronenmikroskopielabor der BGR / LBEG gemacht. Für die Untersuchungen wurde eine Auswahl von verschiedenen aus den Rohren gesägten Proben verwendet. Unter diesen Proben befinden sich zum Teil welche von oberhalb des Packers und zum Teil von unterhalb des Packers. Die Proben wurden hinsichtlich ihrer Korrosionsschäden sowie auf die Ablagerungen hin untersucht.

4.2.3. Zustand des Förderstranges

Ergebnisse der zerstörungsfreien Materialprüfung

Für die erneute Untersuchung der Rohre des Förderstranges wurden von den 67 Rohren, die bei der ersten Untersuchung ausgesondert wurden, 18 Rohre ausgesucht. Die Untersuchung mittels Magnetpulverprüfung, Wirbelstromverfahren und Strahlenverfahren durch *Krajewski* zeigten, dass alle 18 Rohre erneut nicht für den Wiedereinsatz empfohlen werden konnten (Messbericht 2274; Anhang 4.4). Dieses Mal kann als Ursache Korrosion eindeutig angegeben werden.

Die untersuchten Rohre sind an verschiedenen Stellen aufgeschnitten worden. An den Innenseiten, sowie an den Außenseiten der Rohre sind deutliche Korrosionsspuren zu erkennen. Alle weisen mäßige bis starke Lochkorrosion auf.

Ergebnisse der makroskopischen Untersuchungen

Zustand der Außenwände

Die Außenseiten der Rohrstücke unterscheiden sich nicht. Sie weisen alle mäßige bis starke Korrosionsschäden auf. In Abb. 4.2.1 ist repräsentativ für alle die Außenwand von Rohrstück Nr. 2 dargestellt.



Abb. 4.2.1: Korrosionsschäden an der Außenwand von Rohrstück Nr. 2

An den Außenwänden sind Schäden im cm-Bereich zu beobachten. Die Löcher weisen Tiefen von bis zu 1 mm auf.

Die Außenwände der Rohrstücke unterhalb des Packers sehen ebenfalls ähnlich aus. Wegen der stark anhaftenden Ablagerungen ist der Zustand schwer zu erkennen (Abb. 4.2.2). Die Ablagerungen weisen eine graue bis schwarze Färbung auf. Außerdem sind rostrote Flecken zu erkennen. Diese Flecken sind vermutlich erst nach dem Ausbau und bei der Lagerung durch Sauerstoffkontakt entstanden, es handelt sich wahrscheinlich um Goethit. Beim Abkratzen der Ablagerungen zeigte sich ein ähnliches Bild, wie bei den anderen Proben.



Abb. 4.2.2: Schäden und Ablagerungen an der Außenwand eines Rohrstücks von unterhalb des Packers

Zustand der Innenwände

Der Zustand der Innenwände ist in den folgenden Abbildungen dargestellt. Alle Rohrstücke weisen Korrosionsschäden, teils starke auf. Charakteristisch sind die in Linien angeordneten Löcher, wie sie in Abb. 4.2.3 zu beobachten sind. Das hier zu beobachtende Werkstück weist starke Korrosionsschäden auf. Es sind viele unterschiedlich große Pittings zu finden.



Abb. 4.2.3: Korrosionsschäden an der Innenwand; Pittings sind in Linien angeordnet. Bei diesem Rohrstück sind wenige, dafür starke Schäden zu beobachten.

Bei einigen Rohren sind auf der Innenseite des Werkstückes viele kleine, gleichgroße Pittings zu erkennen, sie sind gleichmäßig über das Rohrstück verteilt. Vereinzelt sind auch hier Linien von Korrosionsschäden zu finden (Abb. 4.2.4).



Abb. 4.2.4: Korrosionsschäden an der Innenwand eines Rohrstücks; es sind viele Schäden, die gleichmäßig verteilt sind zu beobachten.

Bei der in Abb. 4.2.5 zu beobachtenden Probe sind ebenfalls nur wenige Schäden zu sehen. Diese sind allerdings größtenteils tiefe Pittings. An einer Stelle ist eine stark korrodierte Stelle vorhanden, sie ist durch eine Kreideumrandung gekennzeichnet. Die Löcher sind in Linien angeordnet.

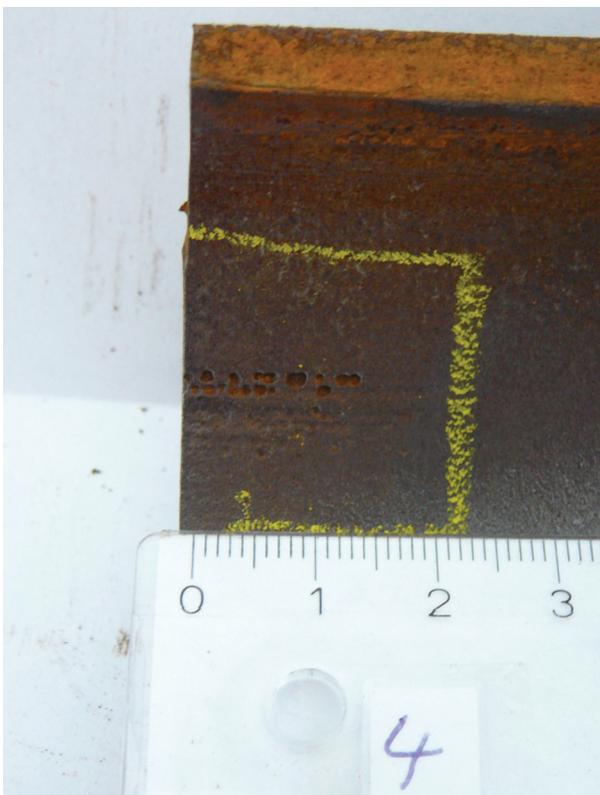


Abb. 4.2.5: Korrosionsschäden an der Innenwand eines Rohrstücks. Die Probe weist tiefe Pittings auf.

Ergebnisse der metallographischen Untersuchungen

Die Proben haben eine Härte von 250 HV10 (Vickers-Härte). Beide Proben (jeweils von oberhalb des Packers) wiesen Seigerungsstreifen (Entmischungen) in Walzrichtung auf, die sich zur Rohrrinnenwand hin verdichten. In diesen Bereichen war auch eine Randentkohlung zu beobachten. Diese kann durch korrosionsbedingten Gefügezerfall verursacht worden sein. In den Bereichen liegt die Härte bei 200 HV10.

In den Abb. 4.2.6 und 4.2.7 sind die lamellenartigen Seigerungen (dunkle bandförmige Strukturen) zu erkennen. Die lamellenartige Struktur verläuft parallel zur Walzrichtung, bzw. zur Durchflussrichtung.

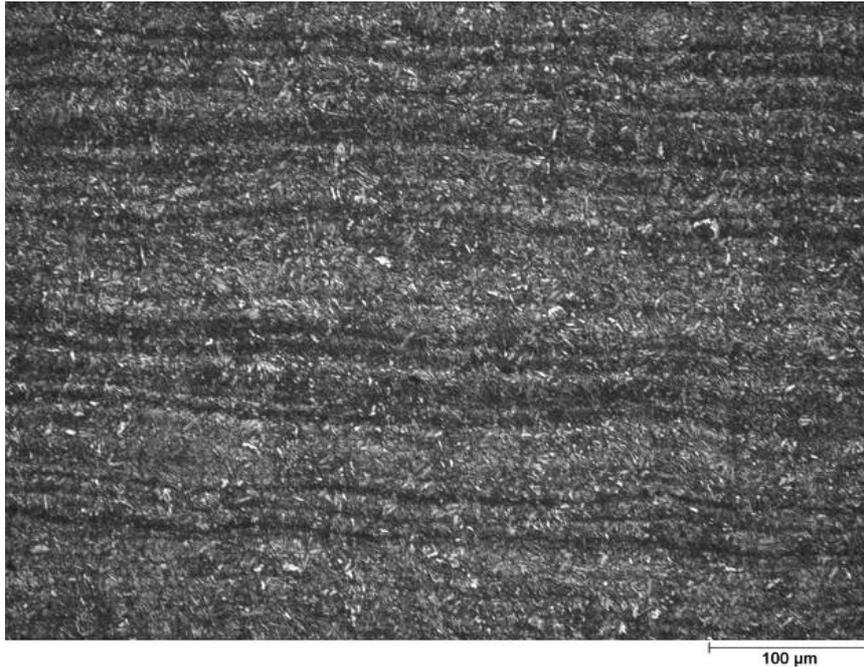


Abb. 4.2.6: Lamellenartige Seigerungen; Probe 2

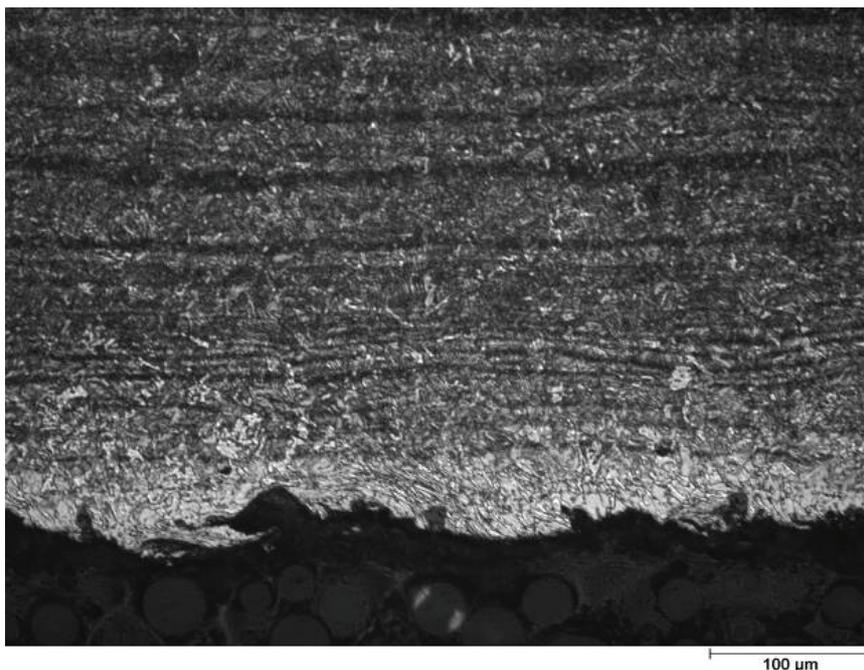


Abb. 4.2.7: Lamellenartige Seigerungen; Probe 6

Das Mikrogefüge zeigt innerhalb der Lamellen eine im Wesentlichen gleichmäßige Ausbildung der Kristallite ohne erkennbare Vorzugsrichtung (Abb. 4.2.8 und 4.2.9). Unmittelbar entlang der Seigerungen ist jedoch eine Bevorzugung quer zu den Lamellen zu erkennen, dieses führt zu einer Häufung energetisch exponierter Korngrenzen. Diese Zonen sind dann für Korrosion stärker anfällig als das umgebene Material und daher bevorzugter Angriffspunkt für Korrosionsprozesse.



Abb. 4.2.8: Mikrogefüge Probe 2

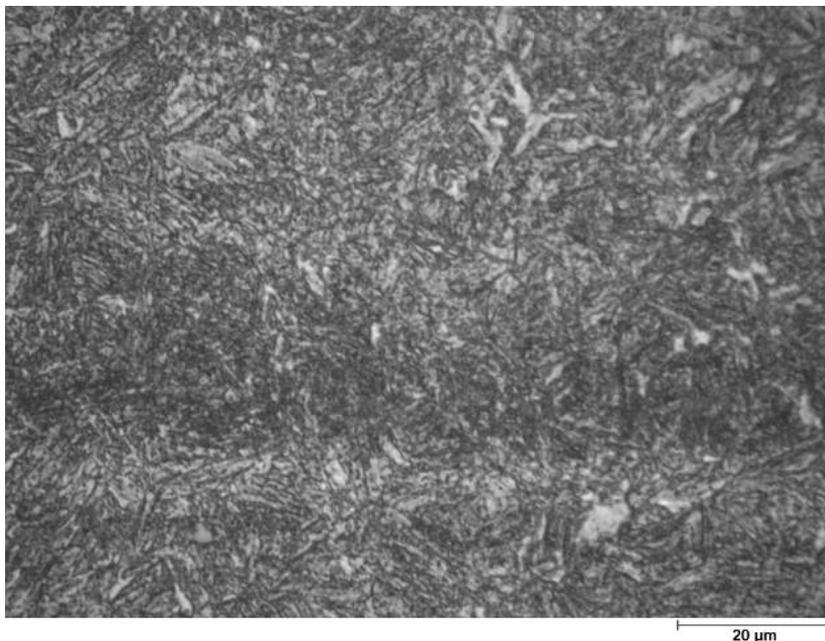


Abb. 4.2.9: Mikrogefüge Probe 6

In Abb. 4.2.10 ist ein Anschnitt einer Korrosionsmulde zu erkennen. Die Korrosionsnarbe folgt in ihrem Tiefenprofil weitestgehend den Seigerungszone. (aus: Ergebnisbericht „Präparation und Vermessung von Stahlproben“ VKTA Rossendorf e.V. 2009; siehe Anhang 4.3)

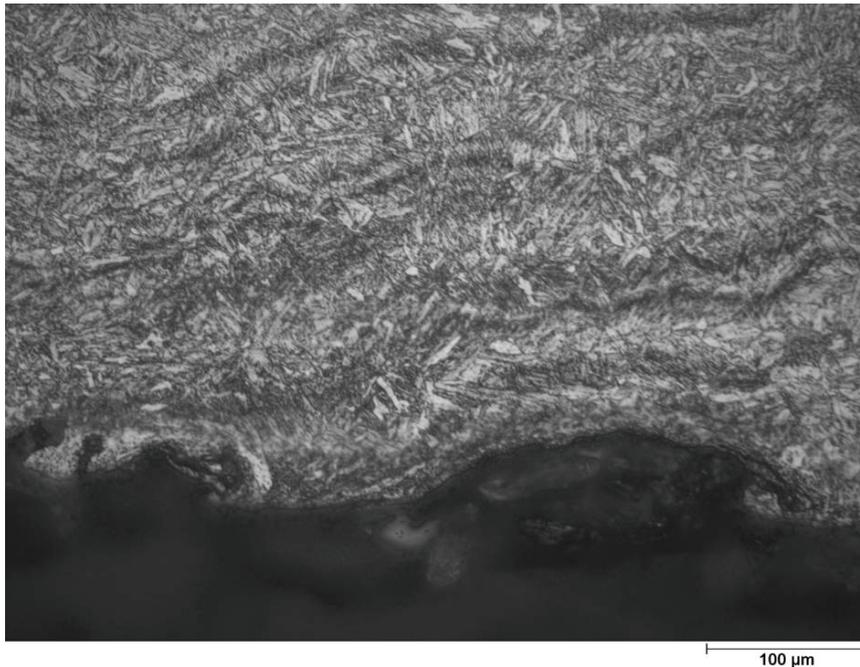


Abb. 4.2.10: Verlauf einer Korrosionsnarbe und der Seigerungen; Probe 2

Ergebnisse der Bestimmung des Abtrages der Schadstellen

Die Messungen ergaben eine mittlere Eindring- bzw. Korrosionsrate von 0,2 bis 0,3 mm/a, eine Einsatzdauer von 5 Jahren zu Grunde legend. Eine maximale Rate ist mit 0,05 bis 0,08 mm/a angegeben. In der Tabelle 4.2.3 sind die Ergebnisse der Messungen dargestellt. Bei der Ermittlung von Mittelwert, Standardabweichung und Median sind einzelne große, längliche Korrosionsnarben unberücksichtigt geblieben und als Ausreißer behandelt worden.

Tabelle 4.2.3: Auswertung der Messungen des Abtrages; gemessen wurde an Proben von oberhalb des Packers

Parameter	Probennummer						
	r	1	2	3	4	5	6
ausgewertete Fläche [mm ²]		400	200	900	400	770	800
Anzahl der Löcher/Mulden		17	31	16	14	10	20
Fläche gesamt [mm ²]		40,80	19,20	12,82	40,70	28,80	89,60
Anteil [%]		10,00	9,60	1,43	10,20	3,73	11,20
mittlerer Querschnitt [mm ²]		2,40	0,62	0,80	0,37	2,87	4,48
Standardabweichung [mm ²]		1,09	0,33	0,33	0,30	2,80	0,19
maximale Größe [mm ²]		5,34	1,72	1,33	1,43	9,30	20,50
Median [mm ²]		2,30	0,66	0,78	0,57	1,37	0,40
Wanddicke [mm]		6,43	6,43	6,41	6,70	6,33	6,54
mittlere Tiefe [mm]		0,13	0,09	0,16	0,06	0,28	0,10
Standardabweichung [mm]		0,06	0,05	0,08	0,04	0,10	0,05
maximale Tiefe [mm]		0,24	0,23	0,30	0,15	0,40	0,26
Median [mm]		0,13	0,09	0,16	0,05	0,28	0,09
Korrosionsrate [mm/a]		0,026	0,018	0,032	0,012	0,056	0,020
maximale Korrosionsrate [mm/a]		0,048	0,046	0,060	0,030	0,080	0,052

Die Dicke der Scalings wurde mit 0,3 bis 0,6 mm bestimmt. Die Messungen sind an drei Proben durchgeführt worden (Nr. 7, 9 und 10). (aus: Ergebnisbericht „Präparation und Vermessung von Stahlproben“ VKTA Rossendorf e.V. 2009; siehe Anhang 4.3)

Ergebnisse der REM Untersuchungen

Die Oberfläche der Stahlproben ist bei allen Proben mit einem Scaling bedeckt. Die Proben, die von oberhalb des Packers stammen wurden gebürstet und weisen daher keine Rückstände von Ausfällungsprodukten aus der Thermalsole mehr auf. Diese Proben sind größtenteils mit einer Eisenoxidschicht bedeckt. Es ist zu vermuten, dass die Eisenoxidablagerungen erst nach dem Ausbau der Rohre und durch den Kontakt mit dem Luftsauerstoff entstanden sind. In Abb. 4.2.11 ist eine der Proben in der Übersicht zu sehen. Gut zu erkennen ist die Oberfläche des Stahls, dessen Kristalline keine besondere Gefügeausrichtung zeigen. In der Mitte der Abb. sind zwei Korrosionslöcher zu beobachten. Die Löcher sind laut EDX-Analyse mit einem Eisenoxid gefüllt.

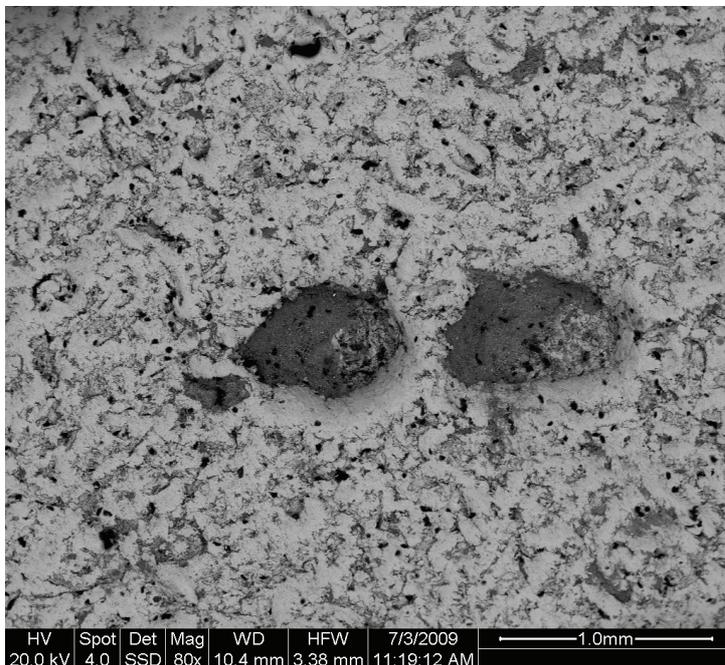


Abb. 4.2.11: REM-Aufnahme einer Probe von oberhalb des Packers; Darstellung der Übersicht bei 80-facher Vergrößerung; Stahloberfläche mit Korrosionslöchern; Phase innerhalb des Lochs: Eisenoxid; Phase außerhalb: Stahl, stellenweise oxidiert

Die Ränder der Löcher sind auf der einen Seite stark gerundet, auf der anderen Seite sind sie wesentlich schartiger. Abb. 4.2.12 zeigt die obere linke Kante des linken Lochs. Zu erkennen ist der scharfe, wie abgerissen wirkende Rand. Vereinzelt sind auf der Probe, im Loch und in Hohlräumen des Gefüges Calcit-Kristalle zu beobachten.

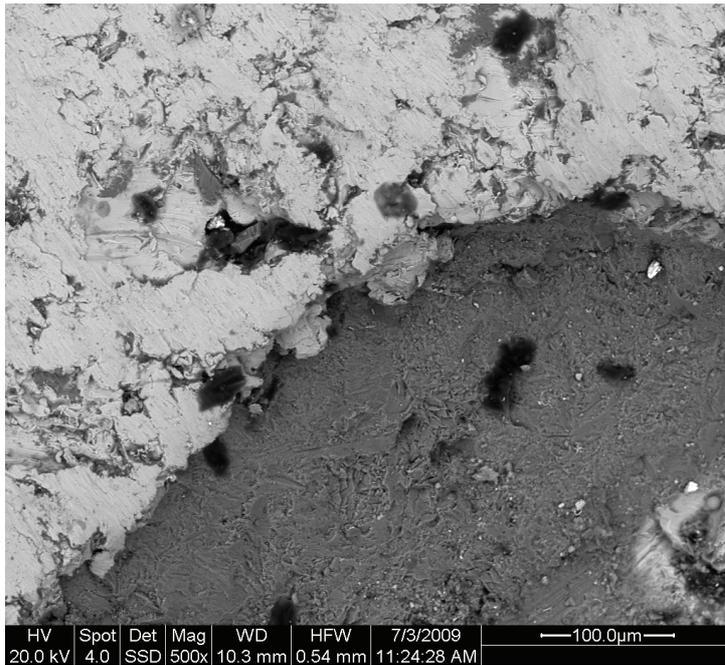


Abb. 4.2.12: REM-Aufnahme einer Probe von unterhalb des Packers; Darstellung zeigt die linke obere Kante des linken Lochs aus Abb. 4.2.11 bei 500-facher Vergrößerung; Phase innerhalb des Loches: Eisenoxid; Phase außerhalb: Stahl

Die Kante rechts unten der in Abb. 4.2.11 dargestellten Löcher ist stark gerundet. Das gleiche Aussehen weisen die Löcher in Abb. 4.2.13 ebenfalls auf. Die Ränder der zu beobachtenden Löcher sind ringsherum gerundet. Bei der Phase innerhalb der Löcher handelt es sich wieder um Eisenoxid. Außerhalb der Löcher ist nicht oxidiertes Stahl zu erkennen (helle Phase). Der Stahl ist dennoch zu großen Teilen von einer Eisenoxidschicht bedeckt. Die unbedeckte Stahloberfläche weist Striemen auf, möglicherweise ist dies durch das Bürsten entstanden. Ebenso können die gerundeten Kanten auf die mechanische Bearbeitung zurück zu führen sein.

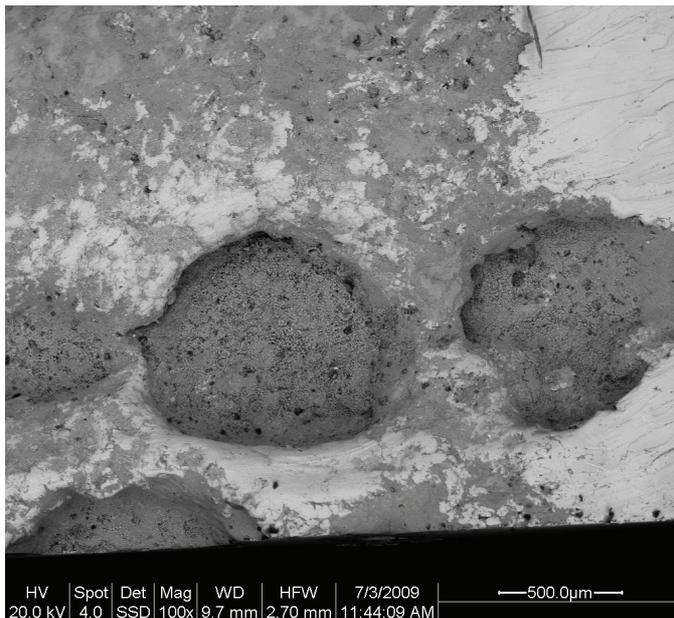


Abb. 4.2.13: REM-Aufnahme einer Probe von unterhalb des Packers; Darstellung einiger Löcher am Rand der Probe bei 100-facher Vergrößerung; Phase im Innern der Löcher: Eisenoxid; helle Phase außerhalb: Stahl; dunklere Phase außerhalb: ebenfalls Eisenoxid

4.2.4. Ablagerungen

Makroskopische Untersuchungen:

Die Rohrstücke die sich unterhalb des Packers in der Bohrung befanden, wiesen Ablagerungen von ca. 1 mm Dicke an den Innen- sowie auch an den Außenwandungen auf (Abb. 4.2.14). Die deutlich stärkeren Ablagerungen an den Rohren unterhalb des Packers sind vermutlich maßgeblich durch Spülung zu erklären, die hier nicht bzw. nicht vollständig auszirkuliert werden konnte.



Abb. 4.2.14: Rohrstück von unterhalb des Packers vorm Aufschneiden und Auskratzen

Die Ablagerungen auf den Innenseiten hatten eine wesentlich hellere Färbung als die außen. Die Ablagerungen innen waren größtenteils weißlich bis grünlich mit rostroten Stellen (Abb. 4.2.15). Die rostroten Stellen sind vermutlich erst nach Ausbau der Rohre und bei der Lagerung durch Sauerstoffkontakt entstanden. Wahrscheinlich handelt es sich bei den Flecken um Goethit.

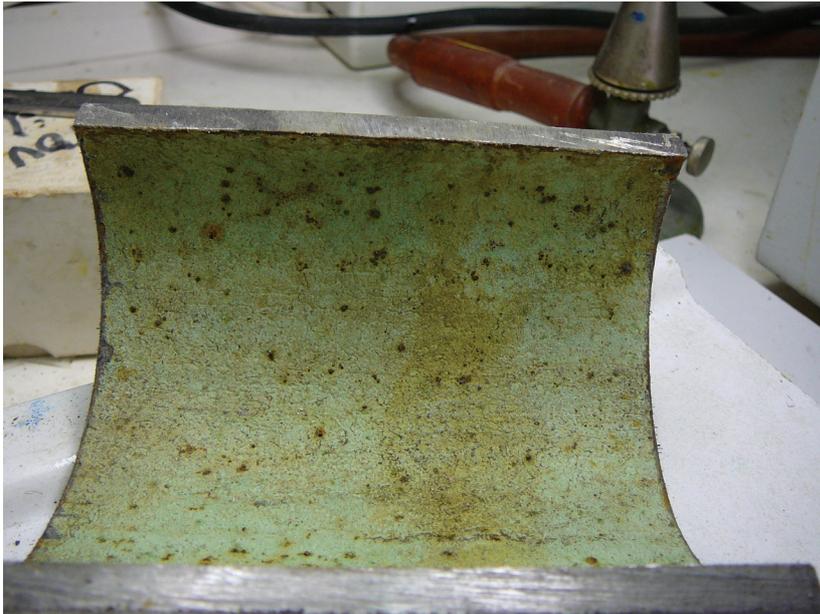


Abb. 4.2.15: Ablagerungen an der Innenwand eines Rohrstücks von unterhalb des Packers

Die Ablagerungen ließen sich sehr schwer abkratzen. Eine vollständige Ablösung konnte auch durch Einsetzen einer Stahlbürste nicht bewerkstelligt werden. Durch das Abkratzen konnte Probenmaterial zur Analyse gewonnen werden.

Nach Abkratzen wurden die Korrosionsschäden an den Wandungen sichtbar. An den Innenseiten sind hauptsächlich kleinere Mulden zu erkennen (Abb. 4.2.16). An manchen Proben sind größere Plättchen abgeplatzt (Abb. 4.2.17). Vermutlich sind diese Schäden aber erst unter Sauerstoffkontakt an der Erdoberfläche entstanden.



Abb. 4.2.16: Abgekratzte Innenwand eines Rohrstücks von unterhalb des Packers; muldenförmige Schadstellen



Abb. 4.2.17: Bereiche mit größeren Materialablösungen an der Innenwand einer Rohrprobe von unterhalb des Packers

Ergebnisse der XRD-Untersuchungen

Bei den XRD-Untersuchungen (Tabelle 4.2.4) wurden verschiedene Phasen nachgewiesen. Mit Sicherheit nachgewiesen werden konnte Calcit. Der Calcit befindet sich in den Ablagerungen an den Außen- sowie den Innenwandungen, es ist kein Unterschied feststellbar. Zusätzlich wird bei den meisten Proben Baryt, bzw. Sr-reicher Baryt in Spuren gefunden oder vermutet. Es ist nicht vollständig klar, ob es sich wirklich um eine dieser Phasen handelt, es ist auch möglich, dass es sich um Aragonit handelt oder alle drei Phasen nebeneinander vorliegen. Des Weiteren wurde in manchen Proben Quarz gefunden. Seltener ist Siderit, Magnetit und Goethit gefunden worden. In fast allen Proben wird ein Arsen-Kupfer-Mineral vermutet. Möglicherweise handelt es sich hierbei um Koutekit (Cu_5As_2). Bei einer Probe wurde das Bleikarbonat Cerussit (PbCO_3) gefunden. In einer anderen Probe kann laut der Analyseergebnisse auch Galenit (PbS) vorliegen.

Tabelle 4.2.4: Bestandteile der Ablagerungen aus den Rohren von unterhalb des Packers; zur Probenbeschriftung: i = Innenwandung; a = Außenwandung

Proben Nr.	Haupt- Nebenbestandteile	Spuren
1i	Calcit, Koutekit o.ä.	Baryt? plus unidentifizierbare Phase
1a	Calcit	Sr-reicher Baryt o.ä., Koutekit?
2i	Calcit, Cerussit	Quarz plus ?
2a	Calcit	Sr-reicher Baryt o.ä., Magnetit, Blei?
3i	Calcit	Quarz, Sr-reicher Baryt o.ä., Koutekit?
3a	Calcit	Sr-reicher Baryt o.ä., Koutekit?
3i2	vermutlich amorph	Calcit, Magnetit, Siderit, Goethit, Koutekit?
4i	Calcit	Quarz, Sr-reicher Baryt o.ä., Koutekit?
4a	Calcit	Baryt, Sr-reicher Baryt oder Aragonit, Koutekit?
5i	Calcit	Magnetit, Quarz, Siderit, Baryt, Koutekit, plus?
5a	Calcit	Sr-reicher Baryt oder Aragonit, Siderit, Magnetit, Galenit?, Koutekit?

Zur Erläuterung der Mineralphasen sind diese in Tabelle 4.2.5 zusammengefasst.

Tabelle 4.2.5: Zusammenstellung der Namen und chemischen Formeln der in Tabelle 4.2.4 genannten Minerale

Mineralname	chem. Formel
Calcit	CaCO ₃
Aragonit	CaCO ₃
Quarz	SiO ₂
Baryt	BaSO ₄
Siderit	FeCO ₃
Cerussit	PbCO ₃
Koutekit	Cu ₅ As ₂
Magnetit	Fe ₃ O ₄
Goethit	FeOOH
Galenit	PbS

Ergebnisse der RFA-Untersuchungen

Die Analysenergebnisse (Tabelle 4.2.6 bis 4.2.8) der RFA Untersuchungen zeigen ebenfalls, dass eine Calciumphase der Hauptbestandteil (20 – 30 %) der Ablagerungen ist. Eisen hat in fast allen Proben eine Konzentration von 10 bis 20 %. Eine Ausnahme bildet Probe 3i2, hier ist der Eisengehalt viel höher und der Calciumgehalt wesentlich geringer als bei den restlichen Proben. Bei dieser Probe handelt es sich um abgeplatzte Rostplättchen, somit ist dieses Ergebnis nicht verwunderlich. Die Konzentrationen an Titan, Aluminium, Mangan, Magnesium, Kalium, Phosphor und ebenso Natrium und Chlorid, die in der Thermalsole sehr hoch konzentriert sind, sind in den Ablagerungen relativ gering.

In einigen Proben sind die Eisen- und die Calciumgehalte geringer als in anderen. Diese niedrigeren Werte sind mit höheren Werten bei Arsen, Kupfer, Blei, Barium, Strontium und / oder SO₃ gekoppelt. Probe 1i weist hohe Arsen und Kupfergehalte auf, das spricht für die Annahme aus den XRD-Untersuchungen, dass diese Probe Koutekit enthält. Probe 2i hat einen hohen Bleigehalt, das untermauert die These, dass hier Cerussit enthalten ist. Probe 3a weist neben hohen Arsen-, Kupfer- und Bleigehalten auch relativ hohe Barium-, Strontium- und SO₃-Gehalte auf, ebenso Probe 4i und 4a. Probe 4a weist zusätzlich auch einen verhältnismäßig hohen Strontiumgehalt auf. Diese Proben enthalten demnach relativ hohe Gehalte an Baryt, bzw. Sr-reichen Baryt.

Insgesamt lässt sich sagen, dass alle Proben neben Calcit auch andere Phasen aufweisen. Es ist sehr wahrscheinlich dass es sich bei diesen Phasen um Koutekit, Sr-reichen Baryt, Cerussit, vielleicht Galenit und gediegen Blei handelt.

Tabelle 4.2.6: Chemische Zusammensetzung der Ablagerungen der Rohre unterhalb des Packers; Hauptbestandteile; Probenbeschriftung: i = Innenwandung; a = Außenwandung; der Fluorgehalt liegt unterhalb der Nachweisgrenze (0,05 %)

Probe	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	LOI	Summe
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1i	2.56	0.03	0.58	8.09	0.78	0.14	23.62	0.45	1.00	0.10	1.04	0.04	21.00	59.43
1a	2.42	0.04	0.43	10.62	1.62	0.38	34.46	0.01	0.05	0.18	1.59	0.06	32.74	84.60
2i	4.84	0.03	0.91	9.05	0.38	0.29	29.59	0.35	0.66	0.09	0.97	0.06	25.94	73.17
2a	3.34	0.11	0.51	10.59	1.59	0.42	36.84	0.04	0.06	0.19	1.78	0.05	33.68	89.20
3i	3.95	0.04	0.80	19.73	0.76	0.34	28.59	0.09	0.09	0.08	0.69	0.02	26.16	81.34
3a	1.84	0.03	0.34	16.17	1.12	0.28	23.89	0.03	0.01	0.07	2.55	0.06	20.08	66.49
3i2	2.01	0.05	0.57	53.69	0.86	0.15	9.39	0.05	0.08	0.04	0.30	0.09	21.54	88.81
4i	4.09	0.07	1.35	10.15	0.67	0.25	26.48	0.28	0.91	0.08	1.06	0.03	20.21	65.62
4a	2.31	0.02	0.44	6.71	1.15	0.33	31.65	0.07	0.09	0.06	5.89	0.02	26.81	75.56
5i	3.25	0.04	0.85	12.71	0.75	0.25	23.97	0.38	0.82	0.10	1.18	0.03	22.49	66.82
5a	2.36	0.04	0.34	13.93	1.60	0.35	33.54	0.02	0.04	0.20	1.46	0.05	26.42	80.34

Tabelle 4.2.7: Chemische Zusammensetzung der Ablagerungen der Rohre unterhalb des Packers; Nebenbestandteile. In dieser Tabelle sind die Nebenbestandteile zusammengefasst, deren Konzentration verhältnismäßig hoch ist; Probenbeschriftung: i = Innenwandung; a = Außenwandung

Probe	As	Ba	Cu	Pb	Sb	Sr	Zn
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
1i	91500	11610	202900	8594	4222	2654	288
1a	37630	10410	59080	8886	644	4484	958
2i	18760	15220	70410	120800	1861	1905	481
2a	15420	20360	23070	25170	301	5368	654
3i	39950	8279	84190	9259	1881	3537	304
3a	69060	36900	137700	17180	1343	5184	480
3i2	28600	2041	51680	1970	826	693	188
4i	72690	13080	170500	7647	4947	2314	288
4a	35870	101200	49560	6511	548	11270	309
5i	69840	14000	165100	5744	4528	1299	543
5a	47370	9613	76440	15880	735	5601	778

Tabelle 4.2.8: Chemische Zusammensetzung der Ablagerungen der Rohre unterhalb des Packers; in dieser Tabelle sind die Spurenbestandteile zusammengefasst, deren Konzentration im Verhältnis zu den anderen niedrig ist. Angaben in mg/kg. Die Elemente, deren Nachweisgrenze nicht überschritten wurden, sind nicht dargestellt (Ce <30; Cs <4; Ga <4; La <25; Nd <22; Sc <3; Sm <25; Ta <15 [mg/kg]); Probenbeschriftung: i = Innenwandung; a = Außenwandung;

Probe	Bi	Co	Cr	Hf	Mo	Nb	Ni	Rb	Sn	Th	U	V	W	Y	Zr
1i	57	577	59	<13	148	20	374	27	17	62	13	<6	57	11	19
1a	5	318	95	<13	83	10	179	19	118	40	8	12	<8	12	24
2i	30	82	705	<17	241	19	244	5	19	18	<7	<8	8	13	<6
2a	8	147	531	<11	206	6	148	5	9	35	<5	<7	50	<6	31
3i	28	170	104	<11	45	73	285	13	10	41	<6	12	<7	15	19
3a	16	352	155	<14	160	9	218	15	8	58	<7	<8	16	12	24
3i2	11	181	140	<12	133	11	252	17	50	40	7	16	<8	9	18
4i	55	237	116	67	66	20	371	24	10	55	11	<7	<7	14	57
4a	6	322	70	<12	43	6	179	17	<5	74	<6	<9	15	13	46
5i	60	243	538	49	115	19	479	19	<5	48	9	<6	<7	13	27
5a	6	397	130	<13	109	10	184	9	<6	45	<7	9	19	10	20

Ergebnisse der REM Untersuchungen

Die Proben vom unterhalb des Packers weisen neben den Ablagerungen von Eisenoxid noch weitere auf. Bei diesen Scalings handelt es sich laut der EDX-Analysen des REM um Calcit und Kupferarsenid. Die Ergebnisse stimmen gut mit den XRD- und RFA-Analysen der Ablagerungen, die in Kapitel 4.2.3.5 besprochen werden, überein. Auf Abb. 4.2.18 sind die Phasen anhand ihrer unterschiedlichen Helligkeiten zu unterscheiden. Die dunklere Phase im Innern des Lochs ist Eisenoxid. Am Rand des Lochs sowie auf der Oberfläche vereinzelt verteilt ist eine helle Phase zu beobachten, dabei handelt es sich um ein Kupferarsenid. Mit der EDX-Analyse konnte ein Kupfer zu Arsen Verhältnis von ca. 2:1 ermittelt werden. Das unterstreicht die XRD-Ergebnisse, nach denen in den Ablagerungen vermutlich Koutekit (Cu_5As_2) enthalten ist.

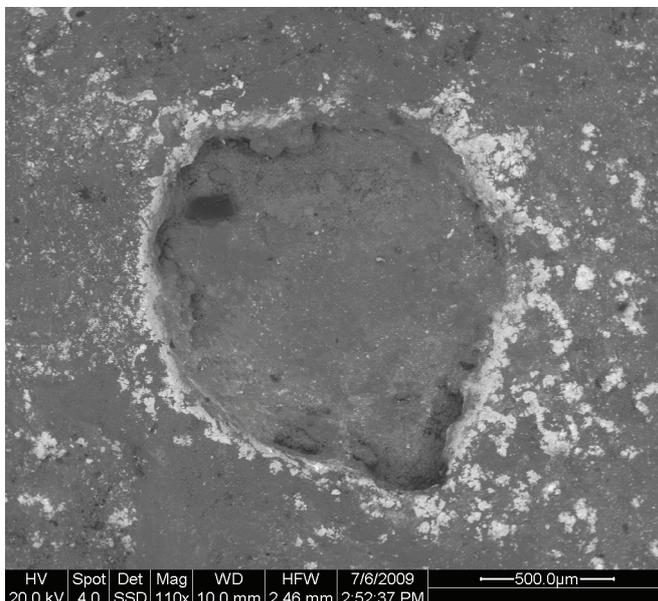


Abb. 4.2.18: REM-Aufnahme einer Probe von unterhalb des Packers, Darstellung eines Lochs bei 110-facher Vergrößerung; Phase innerhalb des Lochs: Eisenoxid; helle Phase am Lochrand: Kupferarsenid; Phase auf der Oberfläche außerhalb des Lochs: Eisenoxid und Calcit

Auf der Abb. 4.2.19 ist eine weitere Phase zu erkennen. Zu beobachten ist die Füllung eines Korrosionslochs. Bei den hellen Ei-förmigen Mineralen in der linken unteren Bildecke handelt es sich vermutlich um Cerussit (PbCO_3). Diese These unterstützt zum Einen die EDX-Analyse des REM und zum Anderen die Ergebnisse der XRD-Analysen aus Kapitel 4.2.3.5. Die andere helle Phase (links oben im Bild) ist wieder das Kupferarsenid (vermutlich Koutekit). In der linken oberen Ecke ist eine dunklere kristalline Phase zu erkennen, hierbei handelt es sich um Calcit. Die restliche Oberfläche ist mit Eisenoxid bedeckt.



Abb. 4.2.19: REM-Aufnahme einer Probe von unterhalb des Packers; Scaling bei 2.500-facher Vergrößerung; Ei-förmige Minerale in der linken unteren Bildecke: Pb-haltige Phase; helle Minerale links oben: Kupferarsenid; kristalline Phase links oben: Calcit; restliche Oberfläche Eisenoxid

Die Kupferarsenide haben zwei verschiedene Ausbildungen. Zum Teil haben sie sich als plattige, verzahnte, bzw. verzwilligte Kristallite gebildet (Abb. 4.2.20). Die Kristallitgröße liegt im Bereich zwischen 0,5 und 1 µm. Die andere Erscheinungsform ist eine flächige, stark an der Probenoberfläche anhaftende Ausbildung (Abb. 4.2.21). Diese Form des Kupferarsenids weist zum Teil Minerale mit einer Länge von über 30 µm auf.

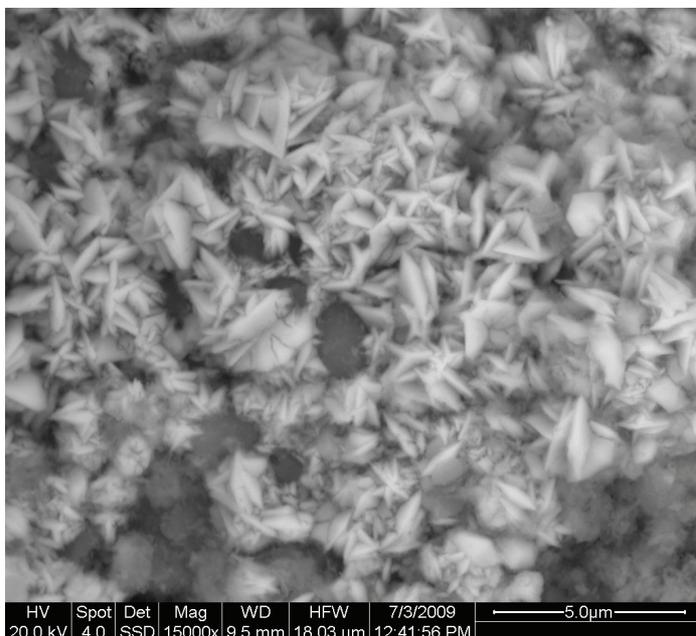


Abb. 4.2.20: REM-Aufnahme einer Probe von unterhalb des Packers; Kupferarsenide bei 15.000-facher Vergrößerung; plattige, verzahnte, bzw. verzwilligte Ausbildung der Minerale

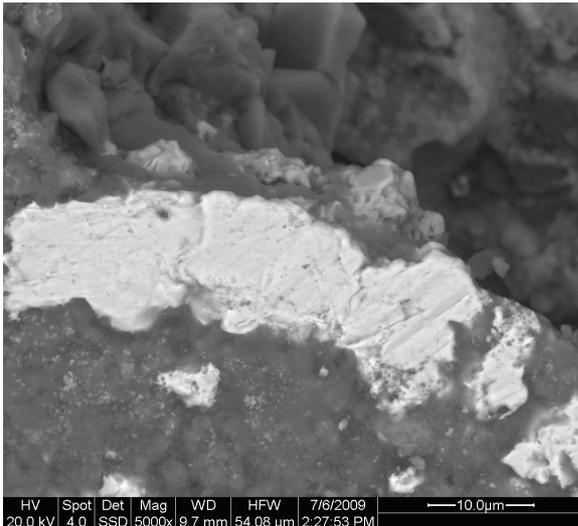


Abb. 4.2.21: REM-Aufnahme einer Probe von unterhalb des Packers; flächiges Kupferarsenid mit fester Anhaftung an die Oberfläche bei 5.000-facher Vergrößerung; dunklere kristalline Phase im Hintergrund: Calcit; restliche Oberfläche: Eisenoxid

Es konnte beobachtet werden, dass das Scaling aus verschiedenen Schichten besteht. In Abb. 4.2.22 ist eine REM-Aufnahme dargestellt, bei der die Probe im 45°-Winkel betrachtet wurde. Zu sehen ist die Draufsicht auf eine Kante der Probe. Auf der linken Seite des Bildes ist der Stahl mit Bearbeitungsspuren zu erkennen. Die Spuren kommen vom Heraussägen aus dem Stahlrohr. Die Oberfläche der Probe ist mit einer Schicht aus Ablagerungen bedeckt. An den Stellen, wo diese Ablagerungen abgeplatzt sind, ist oxidiertes Stahl zu sehen. Die Ablagerungen sind in verschiedenen Schichten aufgebaut. Die oberste Schicht besteht aus Calcit. Der Calcit ist fein kristallin und dadurch relativ porös. Darunter liegt eine Schicht aus Kupferarsenid. Zwischen Kupferarsenid und Stahl ist scheinbar eine Eisenoxidschicht. Möglicherweise wiesen die Stahlrohre schon vor Einbau in die Bohrung diese Oxidschicht auf.

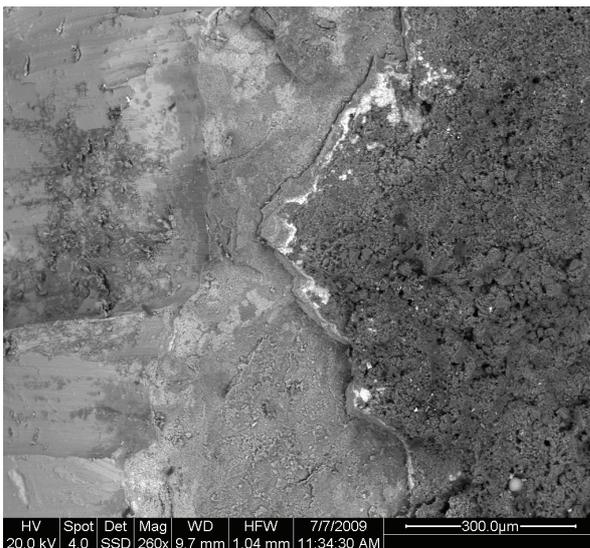


Abb. 4.2.22: REM-Aufnahme einer Probe von unterhalb des Packers; Probe um 45° gekippt; Darstellung der Probenkante mit Scaling bei 260-facher Vergrößerung; helle Phase am linken Rand: Stahl mit Bearbeitungsriefen (Sägen der Probe) z. T. oxidiert; helle Phase in der Ablagerung: Kupferarsenid; dunkle Phase auf der rechten Seite des Bildes: Calcit;

4.2.5. Thermodynamische Berechnungen

Es wurden mit dem Programm PHREEQC Modellierungen durchgeführt, um die Sättigungszustände im Formationswasser im Gleichgewicht zu bestimmen. Das Ziel der Modellierungen war die Ermittlung, ob der CO₂-Gehalt des Formationswassers zu einer Säurekorrosion führen kann, bzw. konnte. Als Datengrundlage diente der Pitzerdatensatz mit möglichst wenigen Reaktionen, von denen keine Pitzer-Parameter vorhanden waren. Diese wurden manuell aus dem Datensatz entfernt. Die Sättigungsindizes wurden für verschiedene Temperaturen (25, 60 und 150 °C) modelliert. Zusätzlich wurde jede Rechnung zuerst ohne Zugabe von CO₂ und dann mit Zugabe von CO₂ (1,32*10⁻⁰³ mol/kg_w) durchgeführt. Die hinzugefügte Menge an CO₂ errechnete sich aus dem sich im entspannten System befindenden Anteil an Gas, bzw. an CO₂. Des Weiteren wurden Parameter, wie das Zulassen von bestimmten Lösungsspezies, verändert. Diese Variationen ergaben dennoch die gleichen Ergebnisse. Die Modellierungen wurden von Matthias Rateitzak (BGR) durchgeführt.

Grundsätzlich hat sich ergeben, dass im Gleichgewichtszustand bei allen modellierten Temperaturen folgende Minerale ausfallen können:

- - Anhydrit
- - Baryt
- - Coelestin
- - Gips

In Tabelle 4.2.9 sind die Sättigungsindizes für diese Phasen mit steigender Temperatur (mit und ohne Zugabe von CO₂) dargestellt. Außer für Baryt und Siderit steigt der Sättigungsindex der Phasen mit der Temperatur an. Dargestellt sind Mittelwerte aus den drei durchgeführten Modellierungen, da die Ergebnisse gut vergleichbar sind.

Tabelle 4.2.9: Sättigungsindizes der im Gleichgewicht ausfallenden Phasen; Abhängigkeit von der Temperatur und vom CO₂-Gehalt

pH	Temperatur [°C]	Anhydrit	Baryt	Coelestin	Gips	Siderit	Calcit
		CaSO ₄	BaSO ₄	SrSO ₄	CaSO ₄ *2H ₂ O	FeCO ₃	CaCO ₃
ohne CO ₂							
4,85	25	0,47	2,10	0,99	0,47	-1,29	-1,07
4,91	60	1,09	1,80	1,28	0,56	-0,98	-0,73
5,16	150	4,24	1,67	2,06	0,86	-1,53	-0,62
mit CO ₂							
4,57	25	0,47	2,10	0,99	0,47	-1,31	-1,08
4,58	60	1,09	1,80	1,28	0,56	-1,06	-0,82
4,92	150	4,24	1,67	2,05	0,85	-1,42	-0,51

Der CO₂-Gehalt hat lediglich auf den pH-Wert und auf die Karbonatphasen einen Einfluss. Bei Zugabe von CO₂ ist der errechnete pH-Wert niedriger. Die Sättigungsindizes der Karbonatphasen sind etwas höher. Diese Erhöhung ist chemisch logisch, liegt aber im Fehlerbereich der Modellierungen. Der Fehlerbereich wird mit ± 0,5 angegeben.

Neben den in Tabelle 4.2.9 erwähnten Phasen kann es auch zur Fällung von weiteren Phasen kommen (Tabelle 4.2.10). Das Ausfallen einer SiO₂-Phase ist durchaus realistisch. Außerdem können im Gleichgewicht auch Bleiphasen entstehen. Ein Einfluss des CO₂-Gehalts ist nicht zu erkennen. Mit steigender Temperatur sinken bei den in Tabelle 4.2.10 aufgezeigten Phasen die Sättigungsindizes. Somit ist die Löslichkeit dieser Phasen bei höheren Temperaturen höher und die Ausfällung erfolgt bei niedrigeren Temperaturen.

Tabelle 4.2.10: Sättigungsindizes weiterer Phasen

Temperatur [°C]	Chalcedon SiO ₂	Quarz SiO ₂	Cristobalit SiO ₂	Tridymit SiO ₂	Bassanit CaSO ₄ ·0,5H ₂ O	Cotunnit PbCl ₂	Phosgenit Pb ₂ (CO ₃)Cl ₂
ohne CO ₂							
25	0,79	1,06	0,51	0,88	-0,24	1,11	1,49
60	0,26	0,51	0,03	0,34	0,18	0,47	0,38
150	-0,45	-0,26	-0,61	-0,46	1,19	-0,72	-2,15
mit CO ₂							
25	0,79	1,06	0,51	0,88	-0,24	1,11	1,57
60	0,26	0,51	0,03	0,34	0,19	0,47	0,42
150	-0,45	-0,25	-0,61	-0,46	1,19	-0,72	-1,85

Laut diesen Modellierungen ist im höheren Temperaturbereich mit mehr Ausfällungen der Strontium-Sulfate zu rechnen. Bei niedrigeren Temperaturen fallen die SiO₂-Phasen bevorzugt aus. Doch aufgrund der unzureichenden Datenlage, sowie der nur schlecht anzupassenden Parameter ist diese Aussage mit Vorsicht zu genießen. Die wesentliche Aussage der Modellierungen ist allerdings, dass eine Ausfällung von Sulfat- und SiO₂-Phasen als sehr wahrscheinlich angesehen werden kann, Karbonatphasen hingegen werden höchstwahrscheinlich nicht ausfallen.

4.2.6. Diskussion der Korrosion und Ablagerungen

Säurekorrosion

In der Thermalsole an der Bohrung Horstberg Z1 ist ein gewisser Gehalt an CO₂ gelöst. Kohlenstoffdioxid als Gas ist nicht korrosiv, doch löst es sich in der Wasserphase und bildet eine schwache Säure.

CO₂ löst sich im Wasser und reagiert zur Kohlensäure (H₂CO₃), diese reagiert mit Wasser zu H₃O⁺ und CO₃⁻. Die durch die Dissoziation der Säure entstandenen Protonen diffundieren zur Metalloberfläche (Phasengrenze) und reagieren dort mit den Elektronen des Metalls zu Wasserstoff und Wasser. Dabei wird das Metall oxidiert.

CO₂ kann aber auch direkt an der Metalloberfläche adsorbiert werden und im Laufe von heterogenen Reaktionen zu Kohlensäure reagieren. In jedem Falle kommt es zur Reduktion und Adsorption von Wasserstoffionen an der Metalloberfläche. Folglich wird das Metall oxidiert (SCHMITT, 1983), was zum Abtrag des Metalls führen kann.

Die Korrosionsrate wurde in verschiedenen Experimenten an verschiedenen Stahlgüten untersucht (SCHMITT, 1983). Die Rate mit der ein Werkstoff korrodiert hängt von mehreren Faktoren ab. Neben dem CO₂-Partialdruck, der Temperatur, dem Salzgehalt der Elektrolytlösung, dem pH-Wert, der Legierung des Stahls, der Ausbildung einer Passivschicht durch die Korrosionsprodukte spielt die Expositionszeit eine große Rolle (SCHMITT, 1983). Da gerade bei Geothermiebohrungen diese Parameter sehr speziell sind,

sind allgemeine Aussagen schwer zu treffen. Nützlich wären Langzeitexperimente unter insitu Bedingungen der Anlagen.

In der Arbeit von G. SCHMITT (1983) wurden verschiedene Legierungen 7 Tage lang in destilliertem Wasser, bei 0 - 80 °C und CO₂-Partialdrücken von 1 - 60 bar, ohne Zufuhr von Sauerstoff belassen. Danach sind die Schutzschichten untersucht worden. Dabei zeigte sich, dass nicht, wie möglicherweise zu vermuten ist, weniger Korrosion bei niedrigeren Kohlenstoffgehalten auftritt. Die Korrosion wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Die Passivierungsschicht wird bei höheren Temperaturen und CO₂-Partialdrücken kristalliner und ihre Anhaftung an der Metalloberfläche nimmt ebenfalls zu. Die Korrosionsrate steigt mit zunehmender Temperatur, die sich ausbildende Schutzschicht wird allerdings mit steigender Temperatur passivierender. Welche Temperatur zu einem Minimum der Korrosionsrate führt, ist für jede Stahlgüte verschieden. Da zusätzlich auch der Salzgehalt des Elektrolyten Einfluss auf die Korrosion hat lässt sich eine solche Abschätzung nur schwerlich durchführen. Steigende Salzgehalte verringern die Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid (der sogenannte „salting out“ Effekt). Somit wird auch die Korrosionsrate vermindert.

Der niedrig legierte Stahl, aus dem die Rohre in Horstberg bestehen, ist stark anfällig für Säurekorrosion (SCHMITT, 1983). Die mulden- bis lochförmigen Schäden, die bei einer solchen Korrosion entstehen, sehen den am Förderstrang Beobachteten ähnlich. Bei den thermodynamischen Modellierungen (Kapitel 4.2.4) konnte eine pH-Wert-Verringerung durch Zusatz von CO₂, unter insitu-Bedingungen, ermittelt werden. Aus früheren Messungen ist die Zusammensetzung des Gases, das sich aus dem Thermalfluid der Bohrung Horstberg entlöst, bekannt. Wegen der hohen Drücke im Reservoir kann davon ausgegangen werden, dass sich unter Reservoirbedingungen das gesamte Gas in Lösung befindet. Im Gas sind (im entspannten System) 15 Vol% CO₂ enthalten, das entspricht einem CO₂-Gehalt von $1,32 \cdot 10^{-03}$ mol/kg_w im gesamten System unter Reservoirbedingungen. Die hierdurch gebildete Kohlensäure, bzw. deren dissoziierte Protonen können zur Korrosion an den Stahlrohren geführt haben. Die Ergebnisse der Untersuchungen der Schadstellen mittels REM lassen keine weiteren Schlüsse zu, ob es sich bei der Ursache um Säurekorrosion handelt. Es ist anzunehmen, dass die Ränder der Korrosionsmulden glatt und rund sind, wenn sie durch Auflösung durch Säure entstanden wären. Doch zeigen nicht alle Löcher solche Ränder. Zum Teil sind die Ränder stark schartig und kantig. Die Innenseiten der Rohrstücke weisen laut Ergebnisbericht von VKTA Rossendorf e.V. neben den lokal begrenzten Korrosionsmulden und -löchern auch gleichmäßigen Flächenabtrag auf. Dies kann die These der Säurekorrosion stützen. Die Bestimmung der Orientierung des Gefüges durch das FZD hat gezeigt, dass das Gefüge Seigerungsstreifen in Walzrichtung aufweist. Die Streifen verdichten sich in Richtung Rohrrinnenwand. Außerdem war in diesen Bereichen eine Randentkohlung wahrzunehmen, welches auf korrosionsbedingten Gefügezerfall schließen lässt (aus: Ergebnisbericht „Präparation und Vermessung von Stahlproben“ VKTA Rossendorf e.V. 2009; siehe Anhang 3). Die Kristallite im Mikrogefüge sind hauptsächlich ohne bevorzugte Orientierung zu beobachten, doch an den Seigerungsstreifen sind sie häufig quer zu den Lamellen ausgerichtet. Die so entstehenden energetisch exponierten Korngrenzen sind anfälliger für Korrosion als das umliegende Material. Dieses könnte ein Grund dafür sein, dass die Korrosionsschäden größtenteils in Linien, parallel zur Walzrichtung, angeordnet sind.

Kavitationskorrosion

Der der Kavitation zu Grunde liegende Vorgang ist rein physikalisch. Bei Unterschreiten des Dampfdrucks einer Flüssigkeit, bzw. des Lösungsdruck der in einer Flüssigkeit gelösten Gase, kommt es zur Dampfbildung oder zur Entgasung. Mögliche Ursachen dafür sind hohe Strömungsgeschwindigkeiten oder Turbulenzen. Durch die Entgasung bilden sich kleine Gasbläschen. Kurz danach, wenn der Druck des Systems wieder oberhalb des Lösungsdrucks liegt, fallen die Bläschen in sich zusammen. Diese Implosionen bewirken extreme Druckspitzen, wodurch der Werkstoff mechanisch zerrüttet werden kann. Nadelstichartige Löcher sind ein typisches Schadensbild (aus: LEXIKON DER KORROSION UND DER KORROSIONSARTEN; 2009).

Für Kavitationskorrosion sind zumindest kleinräumige Druckentlastungen notwendig. Überwiegend haben die Stahlrohre in Horstberg jedoch eine glatte Innenwand, welche wenig Möglichkeit für Turbulenzen birgt. Außerdem wäre ein vermehrtes Auftreten der Schäden an den Rohrübergängen - die einzigen Unebenheiten im Strang - zu erwarten. Dieses konnte nicht festgestellt werden. Diese Korrosionsart ist zudem für Horstberg als unwahrscheinlich anzusehen, da die Bohrung unter einem hohen artesischen Überdruck steht, wodurch die Entgasung und Dampfbildung in der Tiefe faktisch ausgeschlossen sind.

Tribokorrosion

Unter der Tribokorrosion lässt sich eine Reibekorrosion vorstellen. Die Ursache die zu den Schäden führt ist hier ein chemischer Vorgang gekoppelt mit einem mechanischen.

Im Anlagenstillstand fallen Minerale aus der Thermalsole aus, diese lagern sich an den Rohrwandungen an. Bei der erneuten In-Betriebnahme der Anlage reißen die Ablagerungen von den Wänden ab und nehmen dabei Werkstoff der Rohre mit.

Als Voraussetzung für die Tribokorrosion ist die Ausfällung von Ablagerungen aus der Thermalsole anzusehen. In Kapitel 4.2.4 und HESSHAUS (2008) sind die Modellierungsergebnisse dargestellt, bei denen ermittelt wurde, zu welchen Ausfällungen es im Gleichgewichtszustand bei verschiedenen Temperaturen kommen kann. Die Modellierungen unterstützen die Ergebnisse der Analysen der gebildeten Ablagerungen relativ gut. Laut Modellierung sind die Sulfatminerale übersättigt, diese fallen auch tatsächlich aus. Nicht berechnet werden konnten die Sättigungszustände für Koutekit (Cu_5As_2) und Cerussit (PbCO_3), die durch XRD, RFA und REM der Ablagerungen in den Rohren nachgewiesen werden konnten. Folglich kann gesagt werden, dass es in der Bohrung zur Ausfällung von verschiedenen Phasen kommen kann, bzw. kommt. Diese lagern sich allerdings flächig an die Rohrwandungen (außen sowie innen) an. Sie bilden eine sehr feste Schicht, die selbst durch starkes Kratzen nicht vollständig von den Stahlrohren gelöst werden konnte. Somit ist es fraglich, aber nicht ausgeschlossen, ob die Ablagerungen durch die Strömung im Rohr bei In-Betriebnahme der Anlage abreißen können. Das Abreißen von Ablagerungen kann zur Ablösung von Werkstoffmaterial führen.

Korrosion durch Anhaftung von Ablagerungen

Diese Korrosionsursache ist aus der KTB (Kontinentale Tiefbohrung) bekannt. Dort haben sich an den Innenwänden des Rohrgestänges mulden- bis lochförmige Korrosionsschäden gebildet. Der zu Grunde liegende Vorgang war dabei eine Sauerstoffkorrosion.

Die Spülung, die bei den Bohrarbeiten verwendet wurde neigte zur Klümpchenbildung. Diese Klümpchen haben sich an den Innenwandungen des Gestänges festgesetzt und so ein Belüftungselement gebildet. Dabei finden eine Metallauflösung (Oxidation) und eine Reduktion des im Wasser gelösten Sauerstoffs statt.

Das Schadensbild (Abb. 4.2.23) ist dem der in dieser Arbeit untersuchten Rohren sehr ähnlich.



Abb. 4.2.23: Aufgeschnittenes Rohrgestänge aus der KTB; mulden- bis lochförmige Korrosionsschäden; Ursache: Belüftungselement durch Anhaften von Spülungsresten (aus: Luis et al., 1989; unveröffentlichter Bericht)

Voraussetzung für diese Korrosionsursache ist zunächst die Klumpung der Spülung. (Luis et al., 1989) Durch Zusatz von speziellen Polymeren konnte dieses Problem an der KTB beherrscht werden. Die bei der Bohrung Horstberg während des Packerausbaus verwendete Spülung zeigt keinerlei Tendenz zur Verklumpung. Die zweite Voraussetzung für diese Theorie als Ursache ist der Kontakt zu Sauerstoff. Durch Spülung wird Sauerstoff in die Bohrung eingebracht, somit kann dieser Vorgang möglicherweise zu den beobachteten Schäden geführt haben. An den Rohren, die nach dem Ausbau des Packers auf dem Gelände der Bohrung Horstberg lagen, konnte ebenfalls eine flächige Anhaftung der Spülung, sowie von Ablagerungen aus der Formation beobachtet werden. Somit kann es sein, dass die Schäden auch erst später obertage bei der Lagerung durch Sauerstoffkorrosion entstanden. Als wahrscheinlich ist es anzusehen, dass obertage Schäden hinzu kamen. Bei der Lagerung der Förderstrangrohre unter atmosphärischem Einfluss ist eine Korrosion unausweichlich.

Ursache der Schäden

Die im Zuge dieser Arbeit ermittelten Daten lassen die Vermutung zu, dass die wahrscheinliche Ursache für die an den Rohren beobachteten Schäden in der Säurekorrosion liegt. Weiterhin wird angenommen, dass dieser Prozess von weiteren überlagert, bzw. unterstützt wurde. Die aus der Thermalsole ausgefallenen Ablagerungen können sich an den Rohrwänden angelagert haben und wurden, bei Wieder-Inbetriebnahme

abgerissen. An diesen Stellen konnte die Säurekorrosion, wegen der höheren Oberflächenrauigkeit besser ansetzen. Die Möglichkeit der Korrosion über eingetragene sauerstoffhaltige Fluide ist auch nicht auszuschließen. Es kann als sicher angesehen werden, dass die Schäden an den Rohren während der Lagerung nach Ausbau verstärkt wurden.

Weitere Untersuchungen zu diesem Thema sind hilfreich und erforderlich.

Ablagerungen

Bei den Ablagerungen, die aus der Thermalsole in Horstberg ausfallen handelt es sich hauptsächlich um Calcit, Koutekit (Ca_5As_2) und Cerussit (PbCO_3). Neben den Hauptbestandteilen liegen Baryt, Coelestin, Quarz, Galenit und andere Karbonatphasen in Spuren vor. Die Ablagerungen bestehen zu ca. 30 % aus CaO, zu zwischen 1 und 9 % aus Arsen, zu zwischen 1 und 10 % aus Barium, zu 3 bis 20% aus Kupfer und zu zum Teil 12 % aus Blei. Diese Befunde passen gut zusammen mit den thermodynamischen Berechnungen, die im Zusammenhang mit dieser Arbeit erstellt wurden. Laut den Rechnungen sind Baryt, Coelestin, Anhydrit und Quarz selbst bei hohen Temperaturen übersättigt. Nur der Sättigungsindex von Calcit ist bei allen untersuchten Temperaturen negativ, demnach ist es untersättigt. Möglicherweise kommen die Calcitausfällungen daher nicht aus der Thermalsole, sondern aus der bei Bohrungsarbeiten verwendeten Spülung.

Die Beobachtungen lassen sich auch gut mit denen aus HESSHAUS (2008) vergleichen. Hier ist ebenfalls die Thermalsole in Horstberg auf deren Ausfällungsprozesse hin untersucht worden (siehe Abschnitt 4.1). Wie im Abschnitt 4.1 nachzulesen ist, fallen bei längerer Lagerungszeit aus Formationswasserproben Baryt und Coelestin, bzw. ein Mischkristall derer aus.

Prognose

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen der *VKTA Rossendorf e.V.* konnten auch Abtragsraten bestimmt werden. Die Berechnungen beruhen auf den mittleren Abtragstiefen und einer Verweilzeit der Rohre in der Bohrung von ca. fünf Jahren. Daraus ergeben sich Raten von durchschnittlich 0,02 – 0,03 mm/a und maximal 0,05 – 0,08 mm/a. Würden die Rohre mit der maximalen Rate weiter korrodieren (gleiche Bedingungen vorausgesetzt), ergäbe dies einen Materialabtrag von 1 mm nach ca. 12 Jahren. Laut *VKTA Rossendorf e.V.* hätte die Wandstärkenverringerung erst nach einer Standzeit von 20 bis 25 Jahren erheblichen Einfluss auf die Integrität der Verrohrung. Es ist aber durchaus möglich, dass schon früher einzelne Schadstellen so tief werden, dass das Rohr Löcher bekommt. Mit 0,40 mm ist in einer Probe das tiefste Loch gemessen worden. Es bleibt abzuschätzen, ob dieses eine Beeinträchtigung der Rohre darstellen würde. Im ungünstigen Fall können diese Löcher in Linien angeordnet sein und so ein Rohr zum Aufplatzen bringen.

Ein weiterer Punkt, der hier Beachtung finden soll, ist der unregelmäßige Betrieb der Anlage an der Bohrung Horstberg. Nach sehr langen Stillstandzeiten ist die Förderung zwischendurch wieder aufgenommen worden. Dabei können Prozesse wie in Kapitel 4.2.5.1 und 4.2.5.3 beschrieben statt gefunden haben. Nicht geklärt ist es, ob ein dauerhafter Betrieb die beobachteten Schäden verschlimmert oder verringert hätte, bzw. in der Zukunft verschlimmern oder verringern wird. Wenn außerdem die Schäden durch den Eintrag von sauerstoffhaltigen Fluiden in kurzen, zeitlich stark begrenzten Abschnitten entstanden sind, welches als durchaus möglich erscheint, kann die Abtragsrate nicht auf einen Zeitraum

übertragen werden. Demnach muss von einer schnelleren Rate ausgegangen werden, während Sauerstoff anwesend war.

Gegenmaßnahmen

Während der Untersuchungen, die zu dieser Arbeit geführt haben sind verschiedene Gegenmaßnahme und Vorkehrungen diskutiert worden. Der hauptsächliche Beweggrund dafür ist der Bezug zu der GeneSys-Bohrung in Hannover (GT1). Alle in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse sind vorrangig für diese Bohrung von Interesse. Es wird angenommen, dass die chemischen Bedingungen im Reservoir in Hannover denen in Horstberg sehr ähneln.

Mögliche Gegenmaßnahmen zur Vermeidung von Korrosion sind im Wesentlichen: Einsatz eines Inhibitors, Einsatz einer Opferanode, Verwendung von anderen Stahlgütern oder Materialien oder die Verwendung von Rohren mit höheren Wandstärken. Die wichtigste Gegenmaßnahme ist aber die Vermeidung von Sauerstoff in sämtlichen Anlagenteilen. Es ist also sehr zu empfehlen nur sauerstofffreie Fluide in die Bohrung einzubringen. Das ist nicht nur für die Korrosionsfragestellung, sondern auch für die der Ausfällungen dringen anzuraten.

Einen Einsatz eines Inhibitors wäre theoretisch denkbar. Durch persönliche Auskünfte von verschiedenen Firmen, die solche Inhibitoren herstellen, ist es zwar schwierig, aber dennoch möglich einen geeigneten Stoff herzustellen. Die große Herausforderung liegt dabei in den besondern Anforderungen: den hohen Temperaturen, Drücken und Salzgehalten. Doch trotz der technischen Machbarkeit ist diese Methode verworfen worden. Der Grund ist einfach. Der Inhibitor müsste im ganzen System mitgefahren werden. Die Wirkung des Stoffes liegt in der Komplexierung korrosiver Bestandteile, diese Komplexe würden dann aber die Formation zusetzen. So wäre unter Umständen die Stahlverrohrung geschützt, aber das Reservoir geschädigt. Außerdem ist es schwer zu gewährleisten, dass der Inhibitor auf dem gesamten Fließweg des Fluides wirksam ist.

Der Einsatz einer Opferanode ist aus heutiger Sicht eine zu überlegende Möglichkeit die Rohre zu schützen. Im horizontalen Bau ist es eine bewährte Methode. Es werden Rohrstrecken von 4 km Länge mit einer Opferanode bestückt und so nachhaltig geschützt. Es bleibt nun zu bestimmen, ob ein solcher Einsatz auch im Tiefbau möglich ist. Dazu müsste sichergestellt sein, dass an alle im Bohrloch verwendeten Rohre eine austauschbare Opferanode angebracht werden kann.

Ein anderes Material für die Rohre erscheint als durchaus ratsam. In vielen Projekten werden GFK-Rohre (Glasfaserverstärkter Kunststoff) verwendet, doch aufgrund der in Hannover erwarteten hohen Temperaturen und Drücke sind diese hier nicht möglich. Ein höher legierter Stahl, der dadurch weniger anfällig für Korrosion ist, ist dagegen durchaus geeignet (SCHMITT, 1983). Der Ausbau der Groß Buchholz GT1 ist zum Zeitpunkt dieses Berichts schon abgeschlossen. Aus verschiedenen Gründen (vorrangig finanzielle) wurde sich bei der Auswahl des Casingstahls für niedrig-legierte API 5CT casing pipe Stähle entschieden.

Für andere Geothermievorhaben ist es aber ratsam über höhere Investitionen für höher legierte, und damit teurere Stahlgütern nachzudenken.

Eine weitere Maßnahme zur Verlängerung der Standzeit einer geothermischen Anlage ist die Erhöhung der Wandstärken der Stahlrohre. Dieses wäre, neben den Überlegungen über andere Stahlgütern eine Fragestellung, die mit der Industrie besprochen werden müsste.

Dazu sollte geklärt werden, ob die Herstellung von Rohren mit höheren Wandstärken technisch machbar und sinnvoll ist.

Weiterer Forschungsbedarf

Grundsätzlich besteht weiterer Forschungsbedarf zu diesem Thema. Es konnte, wie erwähnt nicht stichhaltig geklärt werden, welche Ursache wirklich für die Schäden verantwortlich ist. Es ist dringend erforderlich, dass weitere Tests und Untersuchungen durchgeführt werden. Dabei sollte es sich um langfristige Tests zur Tiefenzirkulation handeln, bei denen die Korrosionsbeständigkeit der Bauteile im Thermalfluid ermittelt werden kann. Außerdem sollten genauere thermodynamische Modellierungen angestellt werden. Dafür wäre vorerst die Schaffung einer besseren Datengrundlage von Nöten. Die bekannten Parameter zur Modellierung von Ausfällungsprozessen sind nur bedingt für geothermische Reservoirs geeignet. Neben mangelnden Daten für hohe Temperaturen, Drücke und Salzgehalte fehlen für viele im geothermischen System auftretende Minerale die Parameter gänzlich.

Zur Ermittlung der Korrosions- und Scalingprozesse in der Geothermie-Anlage Groß Buhholz GT1 ist ein kontinuierliches Monitoring während der Testarbeiten zur Konzepterprobung und während des späteren Betriebs der Anlage dringend erforderlich.

4.2.7. Zusammenfassung

Im Zuge des Packertauschs an der Bohrung Horstberg Z1 konnte der Förderstrang auf dessen Wandstärke hin untersucht werden. Dabei sind 15 % der Rohre aufgrund korrosiver Schäden aussortiert worden. Im Anschluss wurden die Rohrstücke untersucht, um auf die Ursache der Schäden schließen zu können. Zunächst sind die Rohre mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren getestet worden, dabei wurden eine Wandstärkenverringerung von bis zu 20 % festgestellt und einzelne Proben für weitere Analysen ausgesucht. Die Proben sind metallographisch auf Vorzugsrichtungen im Gefüge untersucht worden. Ziel war es dabei zu bestimmen, ob die Schäden an bevorzugten Stellen des Gefüges zu finden sind. Die gefundenen Seigerungsstreifen in Walzrichtung können bevorzugte Ansatzstellen der Korrosion darstellen. Außerdem wurden die Abtragstiefen und -raten bestimmt. Es konnte eine durchschnittliche Abtragsrate von 0,02 bis 0,03 mm/a ermittelt werden, eine maximale Abtragsrate kann mit 0,08 mm/a angegeben werden. Demnach wäre bei gleichbleibenden Expositionsbedingungen mit einem Abtrag von 1 mm nach 12 Jahren zu rechnen. Die Raten beziehen sich auf gleichbleibende Bedingungen in der Anlage. Sollten die Schäden bei zeitlich begrenzten Ereignissen entstanden sein, muss von einer punktuell höheren Abtragsrate ausgegangen werden. Die durchschnittliche Tiefe der Schäden beträgt 0,14 mm, die Maximale 0,28 mm.

Des Weiteren konnten im Rahmen dieser Arbeit Ablagerungen an Rohren von unterhalb des Packers (also aus 3770 m Teufe) untersucht werden. Die Ablagerungen bestehen hauptsächlich aus Kalziumkarbonat. Es ist zu vermuten, dass das Karbonat aus der Spülung, die bei den Bohrarbeiten und den Ausbauarbeiten verwendet wurde ausgefallen ist. Neben karbonatischen Verbindungen sind auch andere Phasen beobachtet worden. Dabei handelt es sich um Eisenoxide, die zumindest zum Teil, vielleicht auch komplett oberflächlich entstanden sind. Außerdem wurden Blei-, Kupfer- und Arsenverbindungen gefunden. Diese sind aller Wahrscheinlichkeit nach aus dem Thermalfluid ausgefallen.

Die Ursache, die zu den Schäden geführt hat, konnte aber nicht schlussendlich geklärt werden. Es wird vermutet, dass die hauptsächliche Ursache in der Säurekorrosion liegt. Doch kann nicht ausgeschlossen werden, dass auch weitere Prozesse ihren Teil im System haben. Möglicherweise unterstützt die Tribokorrosion den Vorgang. Dieser Theorie liegt zu Grunde, dass in Stillstandzeiten der Anlage Ablagerungen aus der Thermalsole ausfallen, die sich an die Rohrwände anlegen und bei Wieder-Inbetriebnahme abreißen. Dabei wird auch etwas des Werkstoffes mit abgerissen. An diesen Stellen kann die Säurekorrosion dann bevorzugt ansetzen. Unwahrscheinlich sind hingegen kavitative Prozesse als Ursache. Eine weitere mögliche Ursache kann die durch Eintrag von sauerstoffhaltigen Fluiden erzeugte Sauerstoffkorrosion sein. Um die Ursache endgültig zu klären müssten noch weitere Untersuchungen angestellt werden.

4.3. Radioaktivität an der Bohrung Horstberg Z1

Die Thermalsole von tiefen hochsalinaren Geothermiereservoirs weist oftmals einen messbaren Gehalt an radioaktiven Stoffen auf (NORM für „naturally occurring radioactive material“) (SCHRÖDER & HESSHAUS, 2009). Somit besteht die Möglichkeit, dass an der Geothermiebohrung Horstberg Z1 die Wässer eine radioaktive Belastung mit sich führen. Die Höhe und der Grad der radioaktiven Belastung, sowie deren Einfluss auf die Arbeiten an der Bohrung soll hier diskutiert werden. Für die Betrachtungen sind direkte Messungen an der Bohrung durchgeführt worden. Außerdem sind Ablagerungen und Proben der Thermalsole von VKTA Rossendorf e.V. (Labor für Umwelt- und Radionuklidanalytik) auf deren Radioaktivität hin untersucht worden.

4.3.1. Bisherige Untersuchungen

In früheren Untersuchungen wurde bestätigt, dass in den Wässern Radionuklide zu finden sind. Von VKTA Rossendorf e.V. sind verschiedene Proben analysiert worden.

Feststoffprobe aus dem Bohrlochsumpf

Am 16.01.2004 wurden Feststoffproben aus dem Bohrlochsumpf genommen. Die Probenahme fand nach Verfüllung der Rotliegend Sandsteine und bevor die Kreidespülung in die Bohrung gebracht wurde statt.

Die durch die Bailerprobenahme gewonnene Probe wurde am 29.03.2004 auf Radionuklide mittels γ -Spektrometrie hin untersucht (Anlage 4.5: Prüfbericht: 1434.1/1). In Tabelle 4.3.1 sind die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt.

Tabelle 4.3.1: radioaktive Isotope der Feststoffprobe aus dem Bohrlochsumpf (29.03.2004)

a_i = spezifische Aktivität [Bq/g]

s_g = Gesamtunsicherheit [Bq/g]

s_g/a_i = relative Unsicherheit [-]

g^* = Erkennungsgrenze nach DIN 25 482

Für ein Vertrauensniveau von 90% ist der Vertrauensbereich durch $c_i \pm 1,645 s$ gegeben

		^{238}U	^{226}Ra	^{210}Pb	^{228}Ra	^{228}Th	^{40}K	^{137}Cs
a_i	[Bq/g]	<0,11	6,8	44	9	1,14	<0,16	<0,013
$1*s_g$	[Bq/g]		0,7	4	0,6	0,08		
s_g/a_i			10%	10%	7,00%	7,00%		
g^*	[Bq/g]	0,053	0,0094	0,057	0,017	0,011	0,081	0,0065

Die Probe enthält erwartungsgemäß Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen. Dabei dominieren die Radium-Nuklide ^{226}Ra und ^{228}Ra sowie das radioaktive Isotop des Bleis, ^{210}Pb . Das ebenfalls nachgewiesene ^{228}Th wird durch den radioaktiven Zerfall des ^{228}Ra nachgebildet.

Die Probe wird von VKTA Rossendorf e.V. als zu berücksichtigender Rückstand eingestuft, da alle nachgewiesene Isotope spezifischen Aktivitäten von größer $0,2 Bq/g$ aufweisen. Die untersuchten Materialien sind des Weiteren als überwachungsbedürftige Materialien eingeordnet worden. Solche Stoffe müssen gegen Abhandenkommen und vor dem Zugriff von Unbefugten gesichert werden. Wenn der Grenzwert $1 mSv a^{-1}$ nicht überschritten wird,

können die Materialien dennoch einer einfachen Entsorgung zugeführt werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass der Grenzwert nicht überschritten wird. Dies sollte aber mit einem Gutachter, der zuständigen Behörde und dem entsprechenden Deponiebetreiber besprochen werden.

Rohrstücke

Im Februar 2008 wurden drei Rohrstücke untersucht (Anlage 4.6: Prüfbericht 1855.1/1). Die Rohrstücke wurden vorher bei einem Produktionstest verwendet und wiesen Ablagerungen auf. Die Prüfstücke sind im Oktober 2007 bei VKTA Rossendorf e.V. eingereicht worden.

Die in den Innenseiten der Rohrstücke anhaftenden Beläge sollten zunächst mit einem Skalpell abgekratzt werden. Wegen deren geringer Mächtigkeit konnte auf diesem Weg keine signifikante Probenmenge gewonnen werden. Daher wurde ein sogenannter Wischtest durchgeführt. Die Rohrenden wurden bis zu einer Tiefe von 7 cm bewischt. Die Wischfläche betrug 38,5 cm². Die Wischpads wurden anschließend mittels γ -Spektrometrie analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.3.2 dargestellt.

Tabelle 4.3.2: flächenbezogene Aktivitäten der natürlichen Radionuklide auf den Innenflächen der Rohrstücke

Probe		²³⁸ U	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	²²⁸ Ra	²²⁸ Th	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs
1	a _i [^{Bq} /cm ²]	< 0,010	0,009	<0,013	<0,006	<0,003	<0,019	<0,002
2	a _i [^{Bq} /cm ²]	<0,010	0,006	<0,014	<0,005	<0,002	<0,017	<0,002
3	a _i [^{Bq} /cm ²]	<0,023	0,016	<0,024	<0,005	<0,003	<0,0018	<0,002

Da die Aktivitäten der gemessenen Radionuklide sehr gering sind, kann eine Gefährdung der Bevölkerung durch diese Materialien ausgeschlossen werden. Auch für die Beschäftigten auf der Anlage kann ebenfalls eine Gefährdung durch radioaktive Ablagerungen an den Rohren, beim sachgemäßen Umgang ausgeschlossen werden.

Wasserprobe

Bei einem Fördertest im Februar 2008 wurde eine Wasserprobe zur Bestimmung der radioaktiven Bestandteile entnommen. Bei der Probe handelt es sich vermutlich um ein Gemisch aus Thermalsole der Detfurth- und der Sollingformation, da zum Zeitpunkt der Probennahme der Packer umläufig war. Die Probe besteht, wegen einiger vorangegangenen Injektionstests, nicht aus vollständig ungestörtem Formationswasser. Im Prüfzeitraum 21. April bis zum 26. Mai 2008 wurde die Wasserprobe mit doppelter γ -Spektrometrie im zeitlichen Abstand untersucht (Anlage 4.7: Prüfbericht 1855.2/1). In Tabelle 4.3.3 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zusammen gestellt.

Tabelle 4.3.3: Aktivitäten der Radionuklide der Wasserprobe; c_i = Aktivitätskonzentration; s = Gesamtunsicherheit; s/c_i = relative Unsicherheit; g^* = Erkennungsgrenze nach DIN 25 482; für ein Vertrauensniveau von 90 % ist der Vertrauensbereich durch $c_i \pm 1,645 s$ gegeben

Radionuklid	c_i [^{Bq/l}]	$1*s$ [^{Bq/l}]	s/c_i [%]	g^* [^{Bq/l}]
²³⁸ U	<10			5
²³⁴ Th	<4,6			2,3
²³⁰ Th	<47			24
²²⁶ Ra	26,1	0,9	3,3	0,14
²¹⁰ Pb	31,3	2,2	7	3,4
²³⁵ U	<1,7			0,84
²³¹ Pa	<5,2			2,6
²²⁷ Ac	<1,0			0,5
²²⁷ Th	<1,1			0,55
²²³ Ra	<0,50			0,25
²²⁸ Ra	28	1	3,5	0,27
²²⁸ Th	0,92	0,1	10	0,14
²²⁴ Ra	40	8	20	0,12
⁴⁰ K	133	9	6,6	0,8

Die Thermalsole hat erhöhte Aktivitäten von ²²⁶Ra, ²¹⁰Pb, ²²⁸Ra, ²²⁸Th, ²²⁴Ra und ⁴⁰K (Tabelle 4.3.3). Bis auf Kalium sind diese Nuklide Bestandteile der natürlichen Zerfallsreihen von ²³⁸U zum Einen und ²³²Th zum Anderen. ⁴⁰K ist keiner Zerfallskette zugehörig, aber in der Natur allgegenwärtig.

Da die Thermalsole an der Bohrung Horstberg im geschlossenen Kreislauf gehalten wird, kann eine Gefährdung der Bevölkerung, sowie des Personals ausgeschlossen werden. Die Wässer enthalten α -Strahler und β -Strahler, somit muss die Aufnahme des Thermalwassers in den Verdauungstrakt auf jeden Fall vermieden werden. Die γ -Direktstrahlung kann, laut Prüfbericht, als vernachlässigbar eingestuft werden.

Die Wässer dürfen des Weiteren nicht über das Abwasser oder das Oberflächenwasser abgeführt werden, doch wegen der hohen Salzgehalte ist dies ohnehin nicht möglich.

Die Ergebnisse der Analyse des Thermalwassers lassen darauf schließen, dass auch Ablagerungen, die aus den Wässern ausfallen, eine radioaktive Belastung tragen müssten. Das steht im Widerspruch zu den Ergebnissen der Untersuchungen der Ablagerungen in den Rohrstücken (Anlage 4.6: Prüfbericht 1855.1/1).

4.3.2. Folgerungen

Ablagerungen aus der Thermalsole in Horstberg wiesen nur eine sehr geringe radioaktive Belastung auf.

Die Untersuchungen zu Ausfällungsprozessen aus den Wässern der Bohrung zeigen, dass bei längeren Standzeiten einer Anlage Schwerspatablagerungen zu erwarten sind (HESSHAUS, 2008). Da Radium und Barium sich chemisch sehr ähnlich sind, ist folglich mit Einbau von radioaktiven Materialien in die Ablagerungen möglich. Daher sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Interessant wäre nach einem längeren Auslauf- oder Zirkulationstest die Rohre erneut auf Ablagerungen hin zu untersuchen.

4.3.3. Strahlenexposition auf dem Gelände der Bohrung

Im Zuge der Betrachtungen der radioaktiven Belastung der Thermalsole und deren Ausfällungsprodukte erschien es als sinnvoll, die Dosisleistung auf dem Gelände direkt zu bestimmen. Dazu wurden an zwei Tagen (31.03.2009 und 07.04.2009) Messungen vor Ort durchgeführt. Die Messungen sind mit dem tragbaren γ -Spektrometer LB 125 der Firma *Berthold Technologies* vorgenommen worden.

Tabelle 4.3.4: Darstellung der Messwerte vom 31.03.2009; direkt an der Probe(Objekt); zwei Messungen (Beginn: 10:30h und 13:15h); cps = counts per second; DL = Dosisleistung

Messung - Nr	1	1	1	2	2	2
Uhrzeit (Beginn)	10:30	10:30	10:30	13:15	13:15	13:15
Messpunkt	cps	$\mu\text{Sv/h}$	Nuklid	cps	$\mu\text{Sv/h}$	Nuklid
Messcontainer/ Aufenthaltsr.	50	0.03		44	0.04	
Messcontainer Computerraum	44	0.04		44	0.05	
grüner Container	44-50	0,05-0,07		45	0.05	
Türschwelle Cuttinggrube	53	0.04		53	0.03	
Rohrleitung Entgasung	55	0.04		52	0.06	
Bohrkopf	40	0,03-0,07		50	0.04	
Umgebung Bohrkopf	80-120	0,08-0,13		140	0.15	
Detfurth-Leitung	(-)	(-)		115	0.20	
Solling-Leitung	(-)	(-)		133	0.13	
Niederdruck- leitung	50	0.04		40	0.04	
Packer	80-90	0.10		118	0.16	
Packergummi	~265	0,25-0,36	Tc-99m ?	275	0.41	Am241 ? Th (nat) ?;
Lagerhalle	55-60	0.06		68	0.06	
Bereich vorm Sanitärcont.	50	0.05		50	0.04	
im Sanitär- container	40	0,02-0,06		55	0.09	
Proben im Magazin 1	350-500	1.00	Am241	570	0.77	Th (nat) ?; U (nat) ? Tc-99m ?
Proben im Magazin 2			Tc-99m, Am241	660	1.07	Th
Magazin	(-)	(-)		54	0.09	
vor dem Magazin	(-)	(-)		55	0.06	

Vor den Messungen sind an der Bohrung einige Tests durchgeführt worden. Dabei wurde die Dichtheit des neuereingebauten Packers über Fördertests bestimmt. So war es möglich auch den alten, ausgebauten Packer zu messen, sowie die verwendeten Rohrleitungen (von außen). Des Weiteren sind Proben, die sich im Aufbewahrungsraum auf dem

Bohrungsgelände befinden gemessen worden. Bei diesen Proben handelt es sich um Spülungsproben, die während des Packeraus- und Einbaus genommen wurden. In Tabelle 4.3.4 und Tabelle 4.3.5 sind die Messwerte dargestellt.

Tabelle 4.3.5: Darstellung der Messwerte vom 07.04.2009; Messabstand: 15 cm; cps = counts per second; DL = Dosisleistung; Nuklide konnten nicht nachgewiesen werden.

Messung Beginn: 11:00 Uhr

Messpunkt	cps	µSv/h
Leitungen:		
Defurth	106	0.16
Solling	142	0.18
weiterer Verlauf	103	0.11
Verbinder zw. Detfurth und		
Druckentlastung	80	0.06
Schlauch auf Kalkarenit	65	0.05
FlowMeter	78	0.09
Kalkarenit	107	0.12
Niederdruckschlauch	60	0.08
Entlastung	55	0.05
Packer	93	0.13
Packergummi	163	0.2
Leitungen in der Halle		
1	95	0.08
2	113	0.13
3	86	0.08
Proben im Magazin 1	206	0.35
Proben im Magazin 2	213	0.37
Magazin	60	0.04

Es wurden drei Messungen durchgeführt, um eine bessere Vergleichbarkeit zu bekommen. Am 31.03.2009 wurde die maximale Strahlungsexposition bestimmt, da hier direkt an den zu prüfenden Gegenständen gemessen wurde. Bei den gemessenen, bzw. identifizierten Nukliden Am241 und Tc-99m handelt es sich um Fehlinterpretationen. Es ist stark anzunehmen, dass es sich jeweils um ²¹⁰Pb handelt, die Energieniveaus liegen sehr nahe beieinander (pers. Auskunft, DEGERING & KÖHLER; VKTA Rossendorf e.V., 2009).

Am 07. April 2009 wurden die Messungen mit einem Messabstand von 15 cm wiederholt. Zu erkennen ist, dass die in den ersten Messungen sehr hohen Werte im Abstand von 15 cm um ca. die Hälfte geringer sind.

Die Messwerte für die Container und den Platz sind aus der ersten Messreihe vertrauenswürdig, da hier die Umgebungsluft und kein bestimmter Gegenstand gemessen wurde.

4.3.4. Fazit

Laut Strahlenschutzverordnung ist eine effektive Dosis von 1 mSv im Jahr für die allgemeine Bevölkerung nicht zu überschreiten. Für beruflich strahlenexponierte Personen gilt ein Grenzwert von 20 mSv und im Einzelfall von 50 mSv.

Bei den temporär an der Bohrung Horstberg durchzuführenden Arbeiten wird selbst die unterste Schwelle von 1 mSv im Jahr mit Sicherheit nicht erreicht. Die (relativ) höchsten Dosisleistungen lieferten die Gummis des ausgebauten Packers und die Proben im Aufbewahrungsraum. Beide Gegenstände sollten nur mit Handschuhen angefasst werden.

Aus Vorsorgegründen sollte zudem ein längerer Aufenthalt im Umfeld von Probenmaterial vermieden werden. Außerdem sollten die Proben nach Möglichkeit auf Horstberg verbleiben. Wenn sie analysiert werden sollen, sollten sie nur in den dafür vorgesehenen Transportboxen transportiert werden.

Bei sachgemäßen Arbeiten kann an der Bohrung eine Gefährdung durch radioaktive Strahlung ausgeschlossen werden.

4.4. Vergleich der Wasserchemie aus verschiedenen Fördertests

Im Folgenden werden die Daten aus vier verschiedenen Fördertests an der Bohrung Horstberg Z1 verglichen.

Im Jahr 2004 wurde im Zuge des Frac-Tests (2003) Thermalsole aus allen von der Bohrung angeschlossenen Formationen produziert. Bei der Probennahme war die Bilanz zwischen injizierter und produzierter Wassermenge ausgeglichen, somit ist davon auszugehen, dass es sich um nahezu ungestörtes Formationswasser handelte. Zu diesem Zeitpunkt war noch kein Packer in der Bohrung, daher war das geförderte Wasser eine Mischung aus Formationswasser der Detfurth- und der Sollingfolge.

Der zweite hier besprochene Produktionstest fand 2008 statt. Inzwischen ist in die Bohrung ein Packer eingebaut worden, doch bei einem Injektionstest im Frühjahr 2007 ist festgestellt worden, dass dieser nicht mehr dicht war. Also wurde bei dem Produktionstest 2008 wieder eine Mischung aus beiden Formationstests gefördert. Um an möglichst ungestörtes Formationswasser zugelenken ist zuerst ca. 6.000 m³ Fluid produziert worden. Das entsprach in etwa der Menge die vorher bei verschiedenen Tests eingebracht wurde. Im Laufe des gesamten Tests sind Proben genommen wurden, die repräsentativsten waren verständlicherweise die zu Ende des Tests genommenen.

Anfang 2009 wurde ein neuer Packer in die Bohrung eingebaut. Um dessen Dichtigkeit zu prüfen sind im Nachfolgenden der Einbauarbeiten zwei Produktionstests durchgeführt worden. Dabei ist zuerst nur aus der Sollingformation produziert worden. Im zweiten Test war nur die Detfurthformation angeschlossen. Die Probennahmen fanden jeweils über den ganzen Test verteilt statt, es wurde darauf geachtet, dass jeweils mindestens ein Bohrlochvolumen ausgetauscht war.

In der Tabelle 4.4.1 sind die Konzentrationen der Bestandteile der Thermalsole aus den verschiedenen Fördertests dargestellt. Die höchsten Konzentrationen haben die Wässer des Fördertests 2004 und die der Produktion aus der Sollingformation 2009. Die beiden Wässer sind auch relativ gut vergleichbar. Die einzelnen Ionenkonzentrationen liegen jeweils im gleichen Bereich.

Die 2009 geförderte Thermalsole aus der Detfurthformation weist die geringsten Konzentrationen auf. Das liegt zum Einen an der Förderdauer, dieser Test war der kürzeste. Eine weitere Erklärung könnte darin liegen, dass während des Frac-Tests 2003 und während der Zirkulationsexperimente 2004 und 2006 in die Detfurthformation große Wassermengen an Frischwasser injiziert wurden. Das Formationsfluid ist dabei stark verdünnt worden. Das kann auch eine Ursache dafür sein, dass die Ionenkonzentrationen der Sole aus dem Test 2008 verhältnismäßig gering sind. Hier wurde Wasser aus beiden Formationen gefördert. Es ist also möglich, dass das verdünnte Detfurthfluid sich mit dem höher konzentrierten Sollingfluid zu einem Wasser von mittlerer Konzentration vermischt hat. Für diese These sprechen auch die hohen Konzentrationen der 2009 aus dem Solling geförderten Wässer. In die Sollingformation ist während der Frac-Test-Arbeiten und danach nahezu kein Frischwasser injiziert worden.

Tabelle 4.4.1: Gegenüberstellung der chemischen Zusammensetzung der Thermalsole in Horstberg Z1 bei verschiedenen Fördertests; Die Buchstaben S und D stehen für Förderung aus der Solling- und der Detfurthformation. Bei den Daten handelt es sich jeweils um Mittelwerte.

		2004 S und D	2008 S und D	2009 S	2009 D
Cl	[mg/l]	175.000	156.361	179.795	118.857
SO ₄	[mg/l]	888	934	1.456	1.011
HCO ₃	[mg/l]	32	110	93	21
B	[mg/l]	365	275	374	198
Br	[mg/l]	1.188	860	1.158	631
K	[mg/l]	6.225	4.442	6.152	11.165
Na	[mg/l]	65.975	62.866	67.273	51.482
Mg	[mg/l]	1.628	1.259	1.638	967
Ca	[mg/l]	35.700	26.920	36.439	17.701
Fe	[mg/l]	179	84	326	190
Li	[mg/l]	179	113	179	87
Mn	[mg/l]	258	173	286	136
Pb	[mg/l]	153	74	(-)	(-)
Sr	[mg/l]	1.908	1.414	1.860	1.001
Zn	[mg/l]	325	(-)	289	185
SiO ₂	[mg/l]	58	66	66	105
Ba	[mg/l]	52	54	71	36
pH	[-]	4,9	5,5	(-)	5,2
Dichte	[g/cm ³]	1,18	1,17	(-)	1,15
T bei Probennahme	[°C]	~ 90	~ 40	(-)	(-)
Leitfähigkeit	[mS/cm]	~ 200	(-)	(-)	~ 205

4.5. Literaturverzeichnis-Kapitel 4

- BARTELS, J., KÜHN, M. & CLAUSER, C. (2003): Numerical Simulation of Reaktive Flow using SHEMAT. In: Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers. Hrsg.: CLAUSER, C., Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York. S. 5-68.
- BLITZ, H., KLEMM, W. & FISCHER, W. (1987): Experimentelle Einführung in die Anorganischen Chemie. Walter de Gruyter Verlag Berlin, New York. 285 S.
- BLOUNT, C. W. (1977): Barite solubilities and thermodynamic quantities up to 300 °C and 1400 bars. In: American Mineralogist, 62. S. 942-957.
- CLAUSER, C. (Hrsg.) (2003): Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York. S. 331.
- DEGERING, D. & KÖHLER, M. (2009): pers. Auskunft von VKTA Rossendorf e.V.
- HATSCHER, S. T. (2008): Fa. Wintershall, Banstorf, persönliche Kommunikation
- HESSHAUS, A. (2008) Ausfällungsprozesse und deren Einfluss auf die geothermische Nutzung der Bohrung Horstberg Z1; Diplomarbeit; BGR
- KEHRER, P., ORZOL, J., JUNG, R., JATHO, R. & JUNKER, R. (2007): The GeneSys-Project - a contribution of GEOZENTRUM Hannover to the development of Enhanced Geothermal Systems (EGS). In: Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 158/1, S. 119-132.
- KELLNER, R., MERMET, J.-M., OTTO, M., VALCÁRCEL, M. & WIDMER, H. M. (Hrsg.) (2004): Analytical Chemistry – A modern Approach to Analytical Science. 2. Aufl. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Weinheim. S. 1181.
- KÜHN, M., FROSCH, G., KÖLLING, M., KELLNER, T., ALTHAUS, E. & SCHULZ, H. D. (1997): Experimenteller Untersuchungen zur Barytübersättigung einer Thermalsole. In: Grundwasser / Fachsektion Hydrogeologie in der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 2/3. S. 111-117.
- KÜHN, M., BARTELS, J., PAPE, H., SCHNEIDER, W. & CLAUSER, C. (2002): Modelling chemical brine-rock interaction in geothermal reservoirs. In: Water-rock Interactions. Hrsg.: STOBER, I. & BUCHER, K., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. S. 147-169.
- LAKATOS, I., LAKATOS-SZABÓ, J. & KOSZTIN, B. (2002) Comparative study of different barite dissolvers: technical and economic aspects. SPE 73719
- LEXIKON DER KORROSION UND DER KORROSIONSARTEN (veränderliche Internetseite; 2009) <http://www.korros.de/korrosion.html>
- LUIS H.; ANEMÜLLER, U. & TAI, P. (1989) Untersuchung von Korrosionsschäden an Bohrgestängen; unveröffentlichter Bericht des Instituts für Werkstoffkunde der Universität Hannover
- MONNIN, C. (1999): A thermodynamic model for the solubility of barite and celestite in electrolyte solutions and seawater to 200 °C and to 1 kbar. In: chemical Geology, 153. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam. S. 187-209.

- PUTNIS, A., PRIETO, M., FERNANDEZ-DIAZ, L. (1995): Fluid supersaturation and crystallization in porous media. In: Geological Magazine 132. S. 1-13.
- REIMER, L. & PFEFFERKORN, G. (1977) Raster-Elektronenmikroskopie. 2. Auflage. Springer-Verlag Berlin / Heidelberg / New York. S. 282.
- RIEDEL, E. (2004) Anorganische Chemie. 6. Aufl. Walter de Gruyter Verlag, Berlin / New York. S. 935
- SCHMITT, G. (1983): Fundamental aspects of CO₂ corrosion; Corrosion'83; National Association of Corrosion Engineers; Paper number: 43.
- SCHRÖDER, H. & HESSHAUS, A. (2009): Langfristige Betriebssicherheit geothermischer Anlagen; Abschlussbericht der BGR; 134 S.
- SCHRÖDER, H., TESCHNER, M., SEIBT, A., WOLFGRAMM, M., MÖLLMANN, G. & HOTH, P. (2006): Langfristige Betriebsicherheit Geothermischer Anlagen. In: Mehr Energie von unten, Tagungsband der 9. Geothermischen Fachtagung 2006 in Karlsruhe. Hrsg.: Geothermische Vereinigung e.V. –Bundesverband Geothermie. S. 134-140.
- SCHRÖDER, H., TESCHNER, M., KÖHLER, M., SEIBT, A., KRÜGER, M., FRIEDRICH, H.-J. & WOLFGRAMM, M. (2007) Long term reliability of geothermal plants – Examples from Germany. In Proceedings European Geothermal Congress, 30.5. – 1.6.2007. S.1-5.
- SCHWERTMANN, U. & CORNELL, R. M. (2003) The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurences and Uses. Wiley VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim. S. 664.
- UNGEMACH, P. (2003) Reinjektion of cooled geothermal brines into sandstone reservoirs. In: Geothermics 32. Elsevier Science Ltd.. S. 743-761.
- WERKSTOFFKUNDE I (2006) Skript zur Vorlesung; Institut für Werkstoffkunde, Leibniz-Universität Hannover

5. Untersuchungen zum Selbststützungsmechanismus von hydraulisch induzierten Rissen

Im Frühjahr 2006 haben die Arbeitsgruppe (AG) "Experimentelle Geophysik" an der Ruhr-Universität Bochum und das LIAG einen Vertrag über ein Projekt zum Selbststützungsmechanismus von hydraulischen Rissen in geschichteten Sedimenten abgeschlossen. Das Ziel des Projekts war die Entwicklung möglicher Szenarien für die aus Feldversuchen abgeleitete Selbststützung hydraulischer Risse in geschichteten Sedimenten. Die AG "Experimentelle Geophysik" wurde mit experimentellen und numerischen Untersuchungen beauftragt. Für die experimentellen Untersuchungen wurden Kerne aus Explorationsbohrungen in Niedersachsen zur Verfügung gestellt, die den Untergrund der Bohrung Horstberg Z1 repräsentieren. Die Ergebnisse der vorangestellten experimentellen Untersuchungen sollten für die numerischen Modellierungen die Eingangsparameter liefern. Das Arbeitsprogramm wurde in enger Zusammenarbeit mit der GeneSys-Arbeitsgruppe vorab und während persönlicher Treffen festgelegt. Darüber hinaus wurde auf regelmäßigen Austauschtreffen das Arbeitsprogramm den aktuellen Ergebnissen angepasst. Die hier dargestellten Ergebnisse wurden dem Abschlussbericht (Renner 2008) entnommen.

5.1. Laboruntersuchungen

5.1.1. Probenmaterial und Versuchsmethodik

Es wurden Kerne repräsentativer Sedimente beprobt und untersucht. Der Schwerpunkt lag nach einer Charakterisierung durch Dichte und Ultraschallgeschwindigkeit auf der Bestimmung mechanischer Eigenschaften, die für die numerischen Modellierungen als Eingangsparameter dienen sollten. Die ausgesuchten Kerne stammen aus der Hardeggen-, der Deffurth- und der Volpriehausen-Formation und stellen sowohl „reine“ Sandstein- und Tonstein-Endstück als auch Wechsellagerungen dieser beiden Typen auf der Zentimeterskala dar. Kerne wurden parallel und senkrecht zur ursprünglichen Bohrrichtung präpariert, sodass sich auch unterschiedliche Orientierungen zur sedimentären Schichtung ergaben. Zur Untersuchung einer möglichen Skalenabhängigkeit von Dichte und Ultraschallgeschwindigkeit wurden entsprechende Untersuchungen auch an Kernen durchgeführt.

Es standen nominell 53 Proben mit 30 mm Durchmesser in axialer and radialer Richtung zur Kernachse zur Verfügung. Jedoch erbrachte die im Kernlager von Conoco durchgeführte Präparation in vielen Fällen nicht die erwünschte Länge von ~100 mm (Abb. 5.1), so dass Probenstücke sukzessive mit verschiedenen Methoden getestet werden mussten. Zum Beispiel wurden die aus einem Dreipunktbiegeversuch resultierenden Probenstücke zu Proben für triaxiale Druckversuche oder für hydraulische Zerreißversuche weiterpräpariert. Die Präparation (Bohren, Sägen, Schleifen) wurde mit Diamantwerkzeugen unter Wasser- (Sandsteine) bzw. Petroleum-Kühlung (Tonsteine und Wechsellagerungen) durchgeführt. Fertiggestellte Proben wurden mit Aceton gereinigt und bei ~45°C getrocknet.

Die Probengeometrie für die verschiedenen Versuchstypen ist in Abb. 5.1 wiedergegeben. Das bevorzugte Länge-Durchmesser-Verhältnis von 2 bis 2.5 zu 1 (Paterson, M.S., Rock deformation: The brittle field, *Springer Verlag*, Berlin, 1978) wurde nicht durchweg erreicht.

Die kürzeren Proben erscheinen möglicherweise als relativ druckfest. Für die Drei-Punkt-Biegeversuche musste die Mehrzahl der Proben mit Epoxid-Harz-Enden verlängert werden, die nur geringen Einfluss auf die Spannungskonzentration an den eingesägten Chevron-Kerben haben. In Tabelle 5.1 sind die Methoden und Bedingungen für die Bestimmung der verschiedenen physikalischen Eigenschaften zusammengefasst.

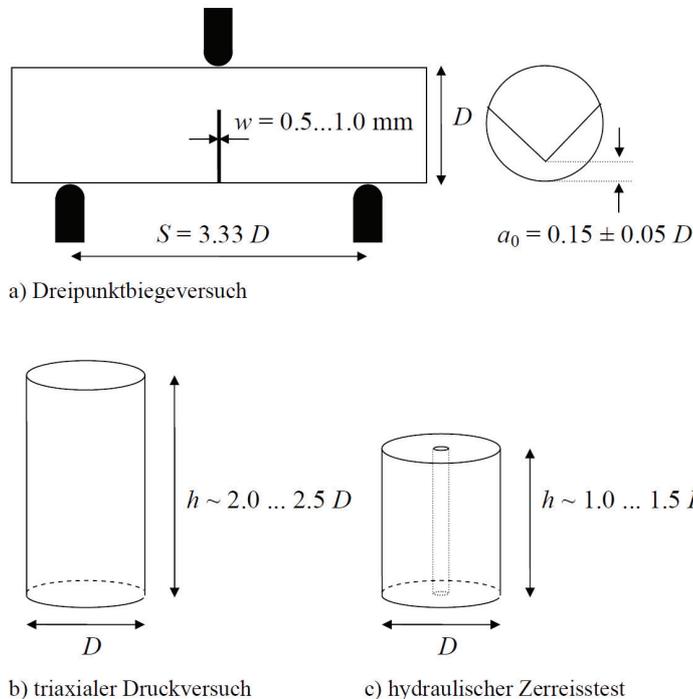


Abb. 5.1: Ideale Probengeometrie für a) Dreipunktbiegeversuche, b) triaxiale Kompressions-, und c) hydraulische Zerreißteste (Renner 2008, seine Abb. 2).

Tabelle 5.1: Methoden und Bedingungen für die Bestimmung der verschiedenen physikalischen Eigenschaften (Renner 2008, seine Tabelle. 1).

physikalische Eigenschaft	Meßmethode	Bedingungen
Dichte ρ	geometrische Vermessung der zylindrischen Proben, Wägung	Raumbedingungen
P-Wellengeschwindigkeit v_p	Durchschallung mit Ultraschall	Raumbedingungen
Bruchzähigkeit K_{Ic}	Dreipunktbiegeversuche	Raumbedingungen
hydraulische Zugfestigkeit T_{hyd}	hydraulische Zerreißversuche	Manteldruck $0 < p_m < 100 \text{ MPa}$
Frac-Gradient λ		Injektionsrate $\dot{V} \sim 0.1 \text{ ml/s}$
statische Elastizitätsgrößen E , ν	triaxiale Kompressionsversuche	Manteldruck $0 < p_m < 100 \text{ MPa}$
Parameter linearer Bruch- und Reibungskriterien: einaxiale Druckfestigkeit C , Koeffizient der inneren Reibung μ_i , Kohäsion τ_0 , Reibungskoeffizient μ		Verformungsrate $\dot{\epsilon} \sim 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

Ergebnisse

Die unterschiedliche Komposition der untersuchten Proben spiegelt sich deutlich in der Dichte ρ wider (Tabelle 5.2). Die Sandsteinproben haben die niedrigsten Dichten, vermutlich auf Grund der größten Porosität und die Häufigkeit von Quarz. Bei Raumbedingungen zeigen die Proben eine starke Anisotropie in Ultraschallgeschwindigkeit (v_p) und Bruchzähigkeit (K_{Ic}). Bei Raumbedingungen breiten sich Ultraschallwellen in Richtung der Bohrkernachse (axial) und damit senkrecht zur sedimentären Schichtung langsamer aus als in radialer Richtung. Zudem liegt parallel zur sedimentären Schichten eine geringe Zugfestigkeit vor. Beide Beobachtungen deuten auf sogenanntes "core diskings" im Zusammenhang mit der Spannungsentlastung der Kerne hin. Messungen in radialer Richtung werden weniger von diesem Phänomen beeinflusst und korrelieren mit mikrostrukturellen Parametern der Proben. Sandsteine, die generell größere Körner und höhere Porenanteile enthalten als Tonsteine, zeigen entsprechend geringere Bruchzähigkeiten.

Bei den *in-situ* Bedingungen entsprechenden Umgebungsdrücken zeigen Sandsteinproben nahezu isotrope elastische Eigenschaften ($E_a \approx E_r$; Index a: axial und r: radial). Die geringe Variation in den ermittelten hydraulischen Zugfestigkeiten (T_{hyd}) deutet darauf hin, dass mit zunehmendem Umgebungsdruck die Anisotropie im Rissausbreitungsverhalten abnimmt. Die Sandsteine sind druckfester als die Tonsteine und zeigen eine stärkere Abhängigkeit der Versagensbedingungen vom Umgebungsdruck, die durch den höheren Koeffizienten der inneren Reibung (μ_i) und den höheren Reibungskoeffizienten (μ) ausgedrückt wird. Die Wechsellagerung von sandigeren und tonigeren Lagen beeinflusst die Rissausbreitung. Zug- und Scherbrüche scheinen in den tonigen Lagen initiiert zu werden, enden oft an der Grenze zu sandigeren Lagen bzw. schwenken in die Grenze um.

Tabelle 5.2: Zusammenstellung der a) in Laborexperimenten bestimmten und b) für die Modellrechnungen benutzten physikalischen Eigenschaften (Renner 2008, seine Tabelle. 2).

a)								
Typ	ρ (kg/m ³)	Richtung	v_p (m/s)	$E_{a,r}$ (GPa)	K_{Ic} (MPa m ^{0.5})	C, μ_i (MPa), (-)	τ_0, μ (MPa), (-)	T_{hyd} (MPa)
Sandstein	2500 - 2600	schichtparallel (radial)	3900 - 4500	35 - 50 ⁺	0.4 - 1.0	175, 4*	7.9, 0.68*	28
		schichtvertikal (axial)	2900 - 3700		0.9 - 1.5			29.5
Tonstein	2650 - 2750	schichtparallel (radial)	3600 - 4000	~45	0.5 - 0.7	140, 2*	8.5, 0.54*	28
		schichtvertikal (axial)	>5000	~35	~1.8			29.5

* unzureichende Datenmenge, um Richtungsabhängigkeit aufzulösen

+ nahezu isotrop aber druckabhängig

b)				
Typ	$E_{a,r}$ (GPa)	C, μ_i (MPa), (-)	τ_0, μ (MPa), (-)	T_{hyd} (MPa)
Sandstein	10	30, 4	2.3, 0.68	3
Tonstein	30	24, 2	3.2, 0.54	1

5.1.2. Numerische Modellierungen

Die Selbststützung des Risses muss mit einem irreversiblen Verformungsvorgang im Untergrund zusammenhängen, da rein elastisches Verhalten auch bei geschichteten Medien zum vollständigen Schließen nach Abbau des Fluiddrucks im Riss führen würde. Die durchgeführten Rechnungen sollten zunächst untersuchen, ob in geschichteten Medien anders als in homogenen Medien auch in großem Abstand von der Bohrung Spannungskonzentrationen auftreten können, die die Festigkeit überschreiten und damit zu inelastischer Verformung führen können. Für diesen Teil der Berechnungen wurde eine „boundary-element“-Methode gewählt, da sie sich besonders eignet, Spannungskonzentrationen an Grenzflächen präzise und räumlich detailliert aufzulösen. Im zweiten Schritt wurden „finite-differences“-Modellrechnungen durchgeführt, in denen auch inelastisches Materialverhalten zugelassen wurde. Neben begrenzten Druck- und Zugfestigkeiten für die Gesteinseinheiten wurden hier vor allem Reibungseigenschaften der Rissfläche spezifiziert. Den verschiedenen Modellen liegt die Annahme eines Bohrlochs in einer Tiefe von 4000 m zu Grunde. Der Überlagerungsdruck (Vertikalspannung) wird für eine angenommene mittlere Dichte von 2500 kg/m³ berechnet.

Elastische Modellrechnungen mit ABAQUS

Die elastischen Modellrechnungen wurden mit dem Programmpaket ABAQUS nach der „boundary element“-Methode vorgenommen. Elastische Parameter wurden in einem weiten Bereich variiert (Elastizitätsmodul zwischen 5 und 50 GPa, Poisson-Zahl zwischen 0.1 und 0.4). Es wurden nacheinander homogene Modelle, Modelle mit einer Grenze und schließlich Modelle mit einer Schicht untersucht. Dabei wurden Schichtmächtigkeiten zwischen 1 und 10 m realisiert. Abschließend wurden Risse betrachtet, die senkrecht zur Schichtung stehend in Richtung der größeren Horizontalspannung verlaufen. Zwar treten in den Modellen mit Grenzen im Vergleich zu den homogenen Modellräumen lokal erhöhte Spannungen auf, diese bleiben aber räumlich auf die Verschneidung zwischen Bohrloch und Grenzen begrenzt.

Inelastische Modellrechnungen mit FLAC3D

In „finite differences“-Modellrechnungen mit dem Programm FLAC 3D (Itasca Corp., USA) wurde auch inelastisches Materialverhalten (Bruch und Reibung) berücksichtigt (siehe Tabelle 5.2b). Aus zahlreichen Modellrechnungen lässt sich ableiten, dass für die gewählten mechanischen Eigenschaften signifikante inelastische Verformung nur in Form von Scherverschiebungen auf der Rissfläche auftreten (Abb. 5.2), und das nur, wenn die ideale Geometrie zwischen Rissfläche, Bohrung und größerer Horizontalspannung gebrochen wird. Variationen im Streichen und Fallen der Schichtung zeigen einen untergeordneten Einfluss.

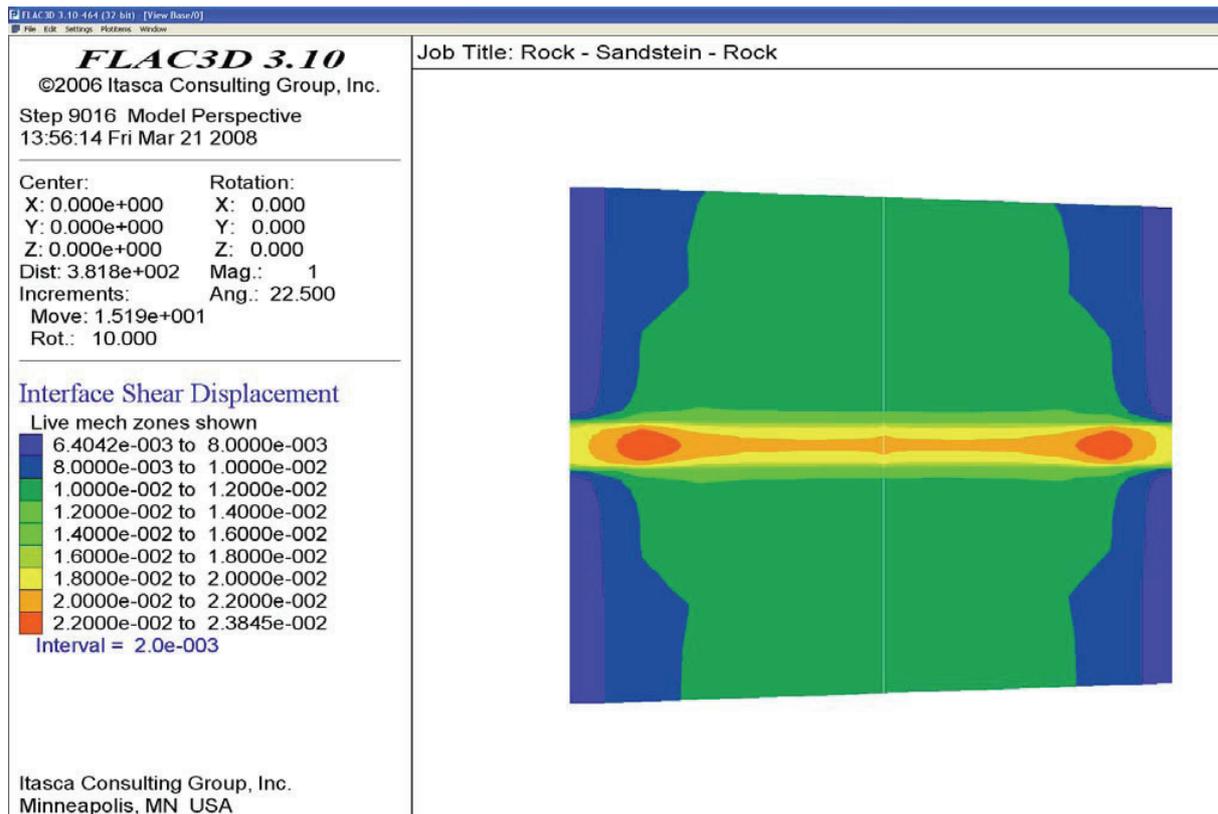


Abb. 5.2: Scherverschiebung zwischen den beiden Rissoberflächen am Beispiel eines um 15° gegenüber der größeren Horizontalspannung miss-orientierten Risses. Die Scherverschiebungen in der 10 m hohen Sandsteinschicht (Streifen in der Mitte) sind im Schnitt mehr als doppelt so groß wie in der Umgebung mit Tonsteineigenschaften (Renner 2008, seine Abb. 3).

5.2. Diskussion der Ergebnisse

Die elastischen Modellrechnungen zeigen, dass Schichtung alleine nicht als Ursache für die Selbststützung der hydraulischen Risse angesehen werden kann. Zwar beeinflusst der schichtweise Wechsel elastischer Eigenschaften die Spannungsverteilung im Untergrund, jedoch bleiben signifikante Spannungserhöhungen, die inelastische Verformung nach sich ziehen könnten, auf die unmittelbare Umgebung der Bohrung beschränkt. Damit kann die aus hydraulischen Experimenten abgeleitete Selbststützung bis in große Entfernungen von der Bohrung durch Schichtung alleine nicht erklärt werden.

Die ideale Geometrie zwischen Bohrung, Riss und Hauptspannungssystem muss gebrochen werden. Dann können die resultierenden Scherspannungen auf der Rissfläche zu relativen Scherversätzen der Rissoberflächen führen, die abhängig von den mechanischen Eigenschaften der Schichten unterschiedliche Größe haben können. Fallen und Streichen der Schichtung spielen eine untergeordnete Rolle. Scherverschiebungen auf hydraulisch induzierten Rissflächen müssen als mögliche Ursache für eine erhöhte hydraulische Transmissivität angesehen werden. Der Scherversatz der hydraulisch geöffneten Flächen führt zusammen mit ihrer Rauigkeit zu erhöhten Rissweiten auch nach Druckabbau, da die Risschließung unvollständig bleibt. Wenn die Beobachtung aus den Laborversuchen, dass hydraulisch induzierte Trennflächen in den Sandsteinproben rauer als in den Tonsteinproben erscheinen, auf die *in-situ* Verhältnisse übertragbar sind, sollte mit den höheren Scherverschiebungen auf den von Sandstein gebildeten Teilen der Rissfläche auch tatsächlich eine erhöhte hydraulische Durchlässigkeit einhergehen.

Damit haben die durchgeführten Untersuchungen gegenüber Beobachtungen an hydraulisch induzierten Rissen bzw. stimulierten, vorhandenen Störungsflächen in Kristallingesteinen keine neue Möglichkeit zur Selbststützung aufzeigen können. Schichten mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften führen lediglich zu sehr selektiver Stützung. Die zentrale Bedingung ist neben einer gewissen Rauigkeit der Rissfläche das Vorhandensein von Scherspannung auf der Rissfläche. Der Abbau dieser Spannung und die damit einhergehende Verschiebung der Rissoberflächen gegeneinander bei der Rissentstehung haben den potentiell größten Einfluss auf die resultierende hydraulische Transmissivität. Während in den Rechnungen die Rissflächenorientierung vorgegeben wurde, muss *in-situ* entweder stark anisotropes Materialverhalten vorliegen, damit die Rissfläche nicht in Richtung der größeren Hauptspannung entsteht, oder die Bohrung muss von der Richtung einer Hauptspannung stark abweichen. Für nominell vertikale Bohrungen trifft dies zu, wenn Topographie dazu führt, dass die Vertikalspannung keine Hauptspannung darstellt. Natürlich können signifikante Abweichungen der Bohrlochrichtung von der Vertikalen ($\sim 10^\circ$) in ebenem Gelände den gleichen Effekt haben.

6. Numerische Modellrechnungen zur Wärmegewinnung

Der Hauptanlass zur experimentellen und numerischen Untersuchung des zyklischen Konzepts (Huff-Puff) waren die hohen Rücklauftemperaturen, die während des intermittierenden Auslauffests (Tabelle 2.2) beobachtet wurden (Jung et al. 2006). Das zyklische Verfahren sieht vor, kaltes Wasser in den Riss zu verpressen und es nach einer Erwärmungsphase wieder rückzufördern. Das geförderte Fluid wird nach dem Wärmeentzug entweder obertägig in einem Speicher oder untertägig in einer permeablen Formation oder einem Riss zwischengespeichert. Diese Abfolge wird dann fortlaufend wiederholt. Die Fluidvolumina, Fließraten und Dauer der jeweiligen Phasen richten sich nach Erfordernissen des Wärmeabnehmers. Im Abschlussbericht der Vorstudie (Jung et al. 2006) wurde eingehend auf die Experimente (Tabelle 2.1) zum Wochen- und Tages-Zykluskonzepts sowie die begleitenden numerischen Modellrechnungen eingegangen. Die Experimente in der Bohrung Horstberg Z1 und die auf den experimentellen Ergebnissen basierenden numerischen Modellrechnungen haben die prinzipielle Machbarkeit des Konzeptes nachgewiesen. Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem zyklischen Verfahren ausreichend hohe Thermalwassertemperaturen und thermische Leistungen für die Beheizung großer Gebäudekomplexe über Betriebszeiten von mindestens 25 Jahren zu erzielen sind.

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der numerischen Modellrechnungen des wochen- und jahreszyklischen Betriebs dargestellt und verglichen sowie die Vor- und Nachteile dieser Verfahren diskutiert. Im Abschnitt 6.2 wird auf die Modellkalibrierung der numerischen Modellrechnungen zum Verfahren der Tiefenzirkulation eingegangen. Es werden die Kalibrierungen mit hydraulischen und Tracer-Test-Daten beschrieben und die Ergebnisse diskutiert.

6.1. Modellrechnungen zur zyklischen Injektion und Produktion

Konzeptionelles und numerisches Modell

Zur Untersuchung des thermischen Langzeitverhaltens beim Zyklusbetrieb wurden numerische Untersuchungen durchgeführt. Das für die Berechnungen verwendete Modell (Abb. 6.1 Wochen- und Jahres-Zyklus) nimmt an, dass der im Detfurth-Sandstein erzeugte Riss nur innerhalb der 6 m mächtigen Sandsteinschicht geöffnet ist und dort eine sehr hohe hydraulische Leitfähigkeit ($> 10 \text{ Dm}$) aufweist. Das Gamma-Ray-Log belegt die Mächtigkeit von 6 m dieser Zone. Sie ist in nahezu dichte Tonsteinabfolgen eingebettet. Bei der Injektion fließt das Wasser aus der Bohrung in diesen Riss und tritt entlang der gesamten Risslänge in die angrenzende permeable Sandsteinschicht ein. Während der Rücklaufphase läuft dieser Prozess umgekehrt ab. Die an den Detfurth-Sandstein angrenzenden Tonsteinschichten werden im Modell als impermeabel angenommen und tragen nur durch Wärmeleitung zum Wärmetransport bei.

Der Fluid- und Wärmetransport wurden mit dem Finite-Elemente-Programm ROCKFLOW berechnet. Das Modell wurde anhand der gemessenen Druck- und Temperaturdaten kalibriert. Um die Anfangsbedingungen zu ermitteln, wurde die Vorgeschichte, d.h. die wesentlichen Auswirkungen der vorherigen Tests berücksichtigt. Die Rechnungen wurden für Injektionstemperaturen von $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (wie im Experiment Tages- und Wochenzyklus) und für $60 \text{ }^\circ\text{C}$ (wie bei der Nutzung) ausgeführt, wobei sowohl Tages-, Wochen- als auch Jahreszyklen

angenommen wurden. Die Ergebnisse der Tages- und Wochenzyklen wurden schon in Jung et al. (2006) diskutiert, so dass in diesem Bericht auf die Modellierung und Ergebnisse der Jahreszyklen sowie die Gegenüberstellung der Wochen- und Jahreszyklen eingegangen wird.

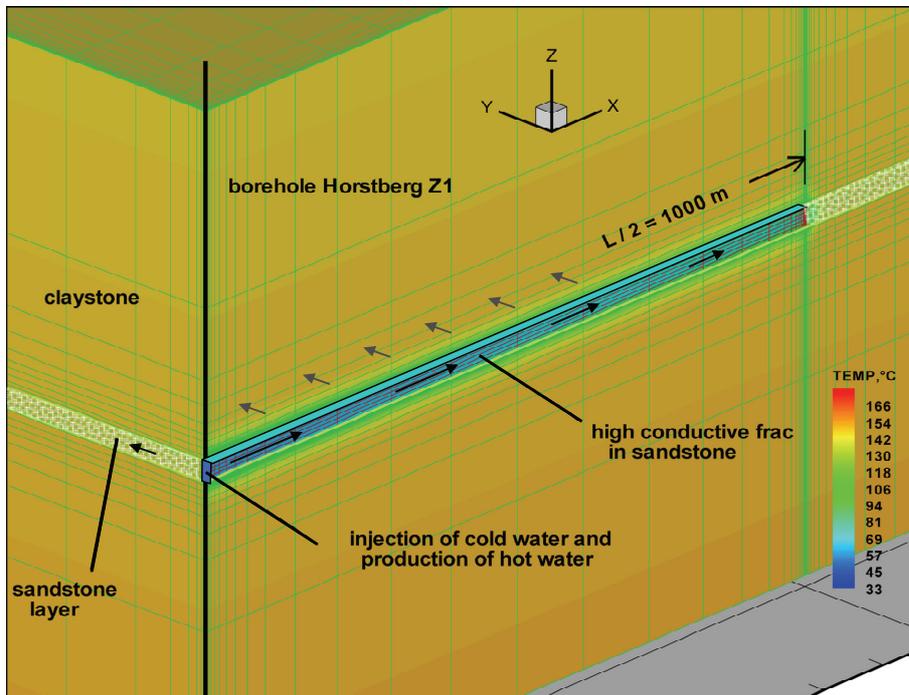


Abb. 6.1: Konzeptionelles Modell des Horstberg Z1 Wärmetauschers für wöchentliche und jährliche Reinjektions-Verfahren.

Um den Einfluss der äußeren Ränder auf die Resultate der numerischen Berechnungen klein zu halten, wurde eine Modellausdehnung von 8 km x 8 km in horizontaler Richtung und ± 100 m über und unterhalb des Detfurth-Sandsteins in vertikaler Richtung gewählt (Abb. 6.2). Die dreidimensionale Modellierung erforderte einen sehr hohen Rechenaufwand, da die Rissumgebung sehr fein diskretisiert werden musste (Abb. 6.2) und die Zeitschritte wegen der ständig wechselnden Anfangsbedingungen von Zyklus zu Zyklus nicht vergrößert werden durften. Aus Symmetriegründen brauchte nur ein Viertel des Modells betrachtet werden (Abb. 6.1 und Abb. 6.2).

Das Modell wurde in drei Materialgruppen eingeteilt: (1) Gesteinsmatrix für die Tonsteinlagen, (2) permeable Zone für den Detfurth-Sandstein und (3) Risszone für den hydraulisch erzeugten Riss. Die festen Parameter für diese drei Zonen und des Fluids sind in Tabelle 6.1 aufgelistet. Aufgrund fehlender Messwerte für die thermophysikalischen Gesteinsparameter mussten Literaturwerte verwendet werden unter Berücksichtigung der *in-situ* Bedingungen. Das Modell besteht aus 19844 Elementen und 17826 Knoten. Aus Effizienzgründen wurde das Modell so klein wie möglich und aus Genauigkeitsgründen so groß wie nötig gehalten. Die Anfangstemperatur ist die aus Messungen ermittelte, ungestörte Gebirgstemperatur. Sie beträgt im Modellgebiet (Detfurth-Sandstein, 3786 m – 3793 m) 147 °C – 149 °C. Für den Anfangsdruck wurde eine Addition aus hydrostatischen Druckbedingungen und dem beobachteten 200 bar artesischen Druck angesetzt.

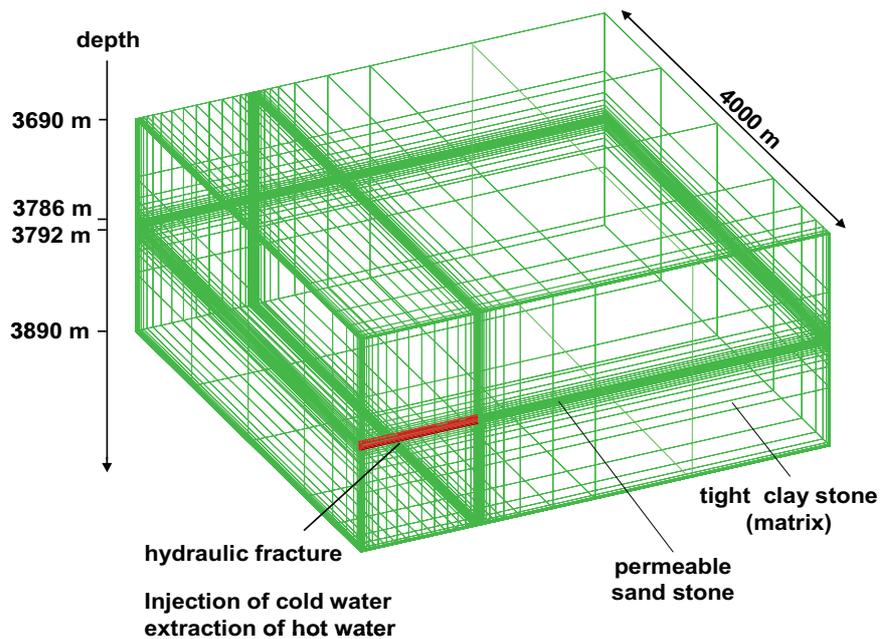


Abb. 6.2: Numerisches Modell des Horstberg Z1 Wärmetauschers für wöchentliche und jährliche Reinjektions-Verfahren. Das Modell besteht aus 19844 Elemente und 17826 Knoten.

Tabelle 6.1: Feste Parameter für Matrix, Permeable Zone, hydraulischer Riss und Fluid

INPUT PARAMETER	UNIT	VALUE
rock matrix		
density	[kg /m ³]	2660
heat conductivity	[W /m·K]	2.40
heat capacity	[J/ kg·K]	1000
porosity	[-]	0.01
permeability	[m ²]	10 ⁻¹⁸
storage coefficient	[1/Pa]	10 ⁻¹⁴
permeable zone		
density	[kg / m ³]	2660
heat conductivity	[W /m·K]	2.40
heat capacity	[J/ kg·K]	1000
thickness	[m]	6
porosity	[-]	0.05
fracture		
height	[m]	6.0
porosity	[-]	1.0
fluid		
density	[kg/m ³]	1000
heat conductivity	[W/m·K]	0.7
heat capacity	[J/ kg·K]	4100
viscosity	[Pa·s]	3·10 ⁻⁴

Dichte und Flüssigkeitsviskosität wurden während der Modellrechnungen konstant gehalten. Vorangegangene Modellrechnungen zeigten, dass beide Parameter bei der Druck- und

Temperaturentwicklung in dem betrachteten schmalen horizontalen Flüssigkeitskanal eine untergeordnete Rolle spielen.

Kalibrierung und Modellrechnungen

Die Kalibrierung des Modells für den Wochenzyklus erfolgte mit gemessenen Drücken und Temperaturen in Reservoirtiefe. Alle Annahmen über unbekannte Parameter wurden hinsichtlich konservativer Ergebnisse bezüglich Temperatur und thermische Leistung getroffen.

Die Registrierungen und Kalibrierung der Modellparameter des Wochen-Zyklus-Tests sind in Abb. 6.3 dargestellt. Während der Injektionsphase wurden innerhalb von 36 Stunden etwa 2500 m³ kaltes Frischwasser (10°C) mit Fließraten von 20 l/s injiziert. Die Bohrung wurde dann für 30 Stunden eingeschlossen und während der folgenden fünf Tage wurde täglich für 15 Stunden Heißwasser produziert und in den Kalkarenit geleitet. Am Ende des Wochenzyklus war praktisch das gesamte injizierte Volumen wieder zurück gewonnen worden. Dass dies ohne Unterwassermotorpumpe möglich war, liegt zum größten Teil an dem hohen Formationswasserdruck im Mittleren Buntsandstein.

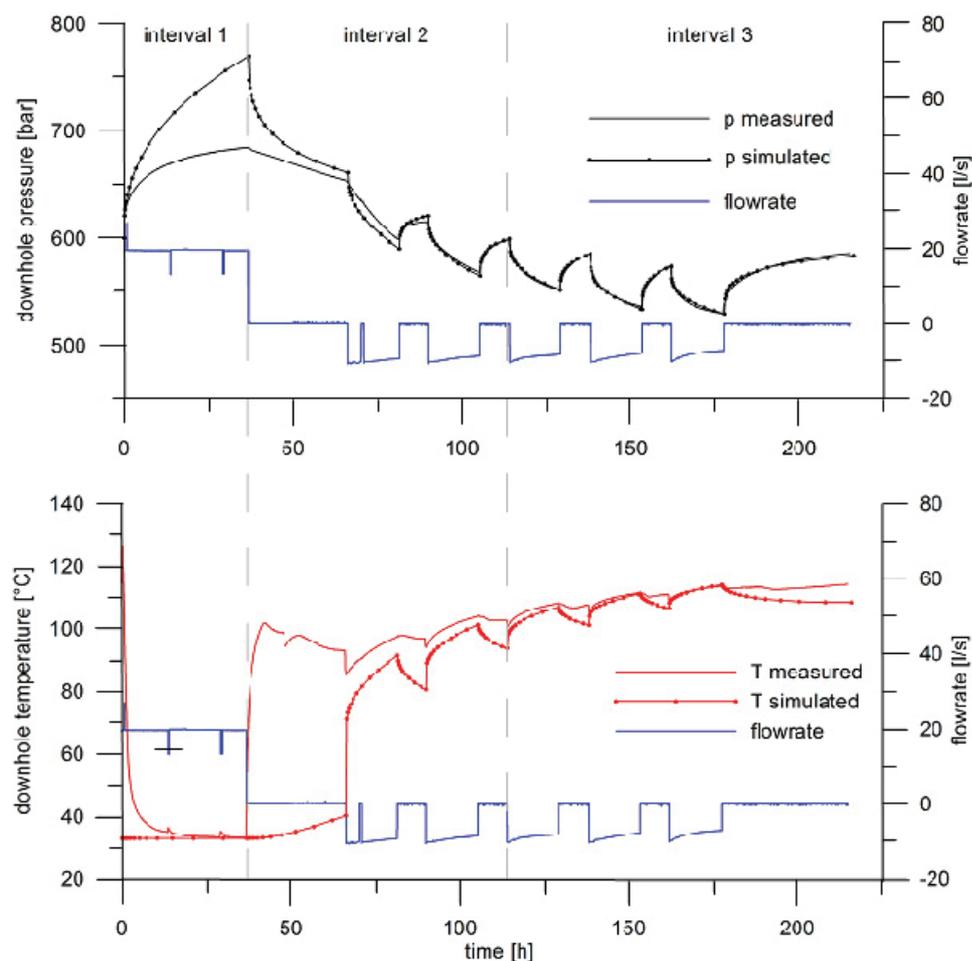


Abb. 6.3: Kalibrierung von Modellparametern des wochenzyklischen Verfahrens mithilfe von hydraulischen und thermischen Messdaten

Für die die fünf Produktionszyklen ließen sich die Drücke und Temperaturen gut anpassen. Für nähere Details der Kalibrierung siehe Sulzbacher & Jung (2004).

Das kalibrierte Modell wurde im Folgenden für Prognoserechnungen von Temperatur und Leistung des Wärmetauschers mit den Reinjektions_Schemen des zyklischen Wochen- und Jahresbetriebs verwendet. Die Prognosezeit betrug 25 Jahre. Dabei wird angenommen, dass das geförderte Heißwasser in dem oberirdischen Wärmetauscher bis auf 60 °C abgekühlt und mit dieser Temperatur reinjiziert wird.

Die Produktionstemperatur für den Wochenbetrieb wurde für 200 Zyklen (4 Jahre) berechnet. Aufgrund des halblogarithmischen Verhaltens der Abnahme des Maximums in der Temperatur, können die Ergebnisse auf die angenommenen 25 Jahre Betriebsdauer extrapoliert werden. Die Ergebnisse sind in Abb. 6.4 dargestellt.

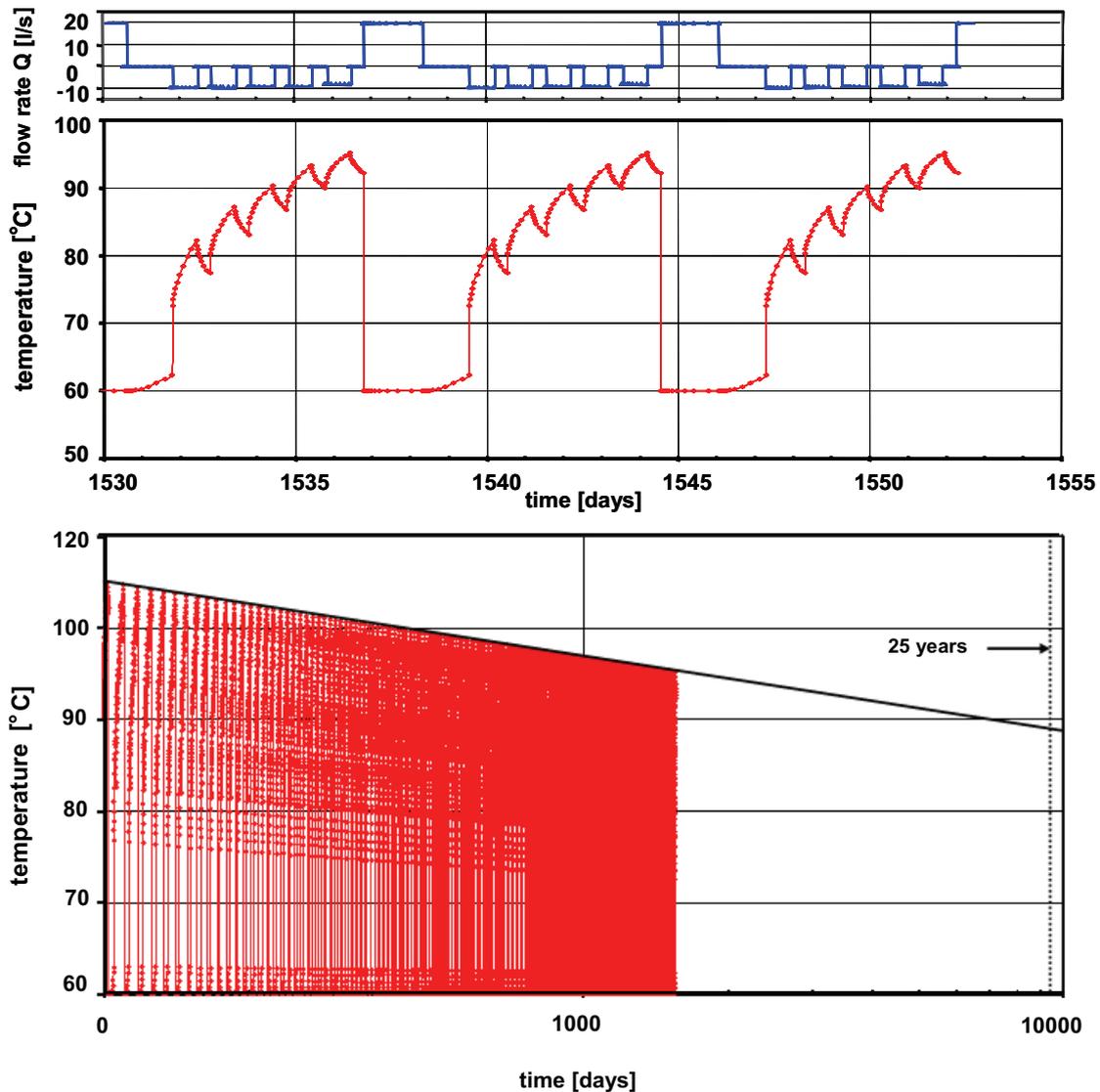


Abb. 6.4: Fließratenschema Q für den zyklischen Wochentest (Bild oben). Berechnete Produktionstemperaturen in Reservoirtiefe für 3 Wochenzyklen (Bild Mitte). Langzeitberechnung für Produktionstemperaturen (Bild unten). Die rote Kurve zeigt die Simulationsergebnisse für 4 Jahre. Einzelrissystem, Riss­halblänge $L/2 = 1000$ m.

Das Fließratenschema und die berechneten Temperaturen für den Jahresbetrieb sind in Abb. 6.5 dargestellt. Für die Berechnung des Jahresbetriebs wurde das mit dem Wochenzyklus kalibrierte Modell verwendet. Darüber hinaus sind in Abb. 6.5 die Ergebnisse des Wochenbetriebs für das vierte Produktionsjahr eingezeichnet.

Im Frühling und Sommer werden über einen Zeitraum von 3 Monaten 100.000 m³ kaltes Wasser in den Detfurth-Sandstein injiziert, gefolgt von einer dreimonatigen Aufheizphase für das injizierte Wasser. Das erwärmte Wasser kann mit einer Fließrate von 7 l/s über sechs Monate (Oktober bis März) gefördert werden. Der Vorteil des Jahresbetriebs liegt in der kontinuierlichen Verfügbarkeit des warmen Wasser am Tag und in der Nacht sowie an Wochenenden.

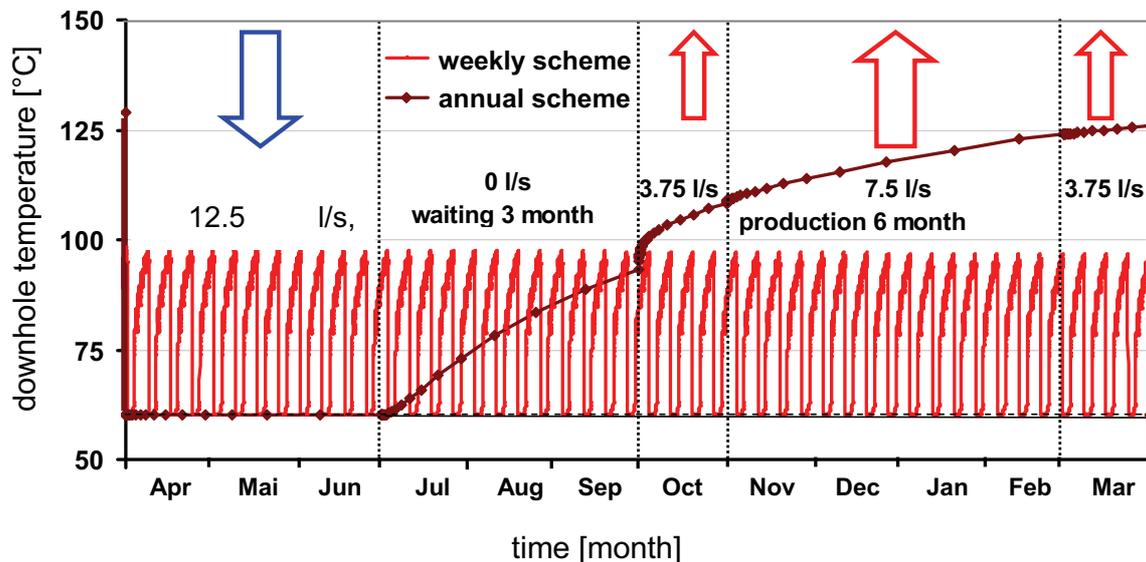
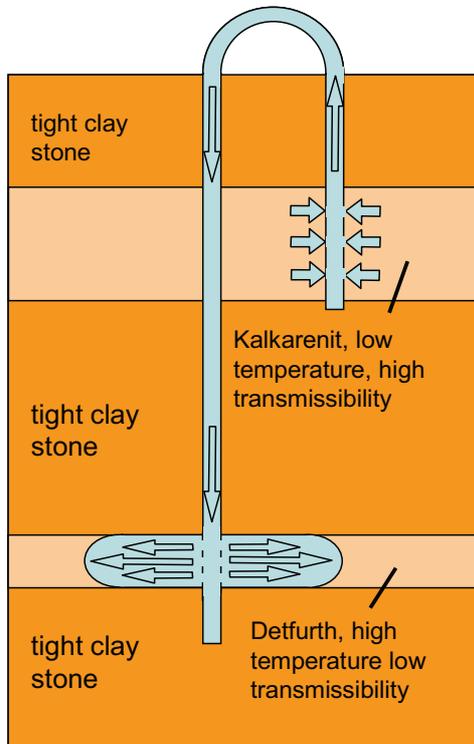


Abb. 6.5: Fließratenschema und berechnete Temperaturen während des vierten Produktionsjahres für das jahreszyklische und wochenzyklische Verfahren. Einzelrissystem, Risshalbblänge $L/2 = 1000$ m.

Prinzip des Jahresbetriebs

Abb. 6.6 demonstriert das Prinzip des Jahresbetriebs. Da für den Jahresbetrieb größere Mengen an Wasser benötigt werden, kann unter den geologischen Bedingungen wie sie in Horstberg und Hannover anzutreffen sind, eine Wärmegewinnung nur im Zwei-Schichten-Verfahren betrieben werden. Grundsätzlich ist das zyklische Konzept (Huff-Puff-Konzept) auch möglich, indem das geförderte Wasser in einem oberirdischen Tank zwischengespeichert wird, bevor die Reinjektion erfolgt. Die Zwischenspeicherung von mehreren Tausend Kubikmeter unter Druck ist aber technisch und wirtschaftlich kaum realisierbar und wird deshalb nicht weiter verfolgt. In Horstberg kann als Wasserspeicher der Kalkarenit genutzt werden. Der Aquifer ist ein ca. 220 m mächtiger hoch permeabler Horizont in ca. 1000 m Tiefe. In Hannover zeigt der Wealden ähnlich gute geologische und hydraulische Bedingungen.

Injection phase



production phase

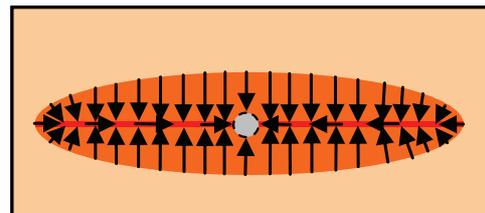
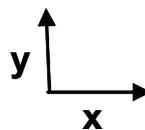
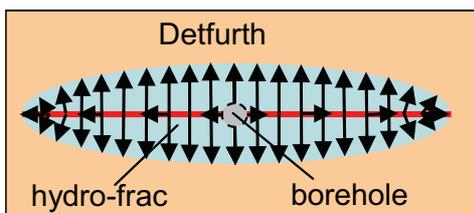
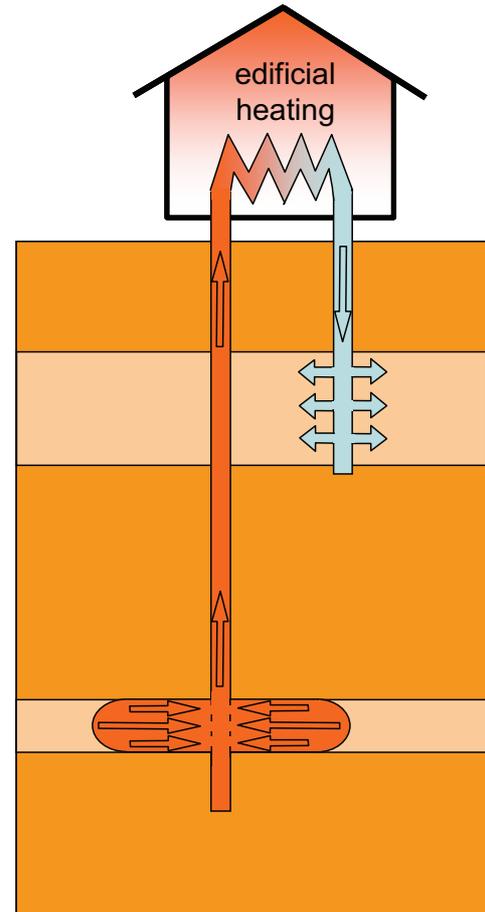


Abb. 6.6: Realisierung des jahreszyklischen Verfahrens: Während einer Periode von drei Monaten werden 100.000 m^3 kaltes Wasser dem Kalkarenit bzw. dem Wealden entzogen und in den Detfurth-Sandstein verpresst (Bild links). Nach einer dreimonatigen Ruhephase, in der sich das Wasser aufheizt, wird es im oberirdischen Wärmetauscher während der gesamten 6 Monate andauernden Heizperiode für die Produktion von Wärme verwendet und wieder dem Kalkarenit zugeführt (Bild rechts). Unten im Bild Fließratenschema während der Injektions- und Produktionsphase.

Vergleich des jahreszyklischen und des wochenzyklischen Verfahrens

Zum Vergleich des jahreszyklischen und wochenzyklischen Verfahrens wurde die räumliche Temperaturverteilung im unterirdischen Wärmetauscher nach vier Betriebsjahren für beide Zyklen berechnet und in Abb. 6.7 dargestellt.

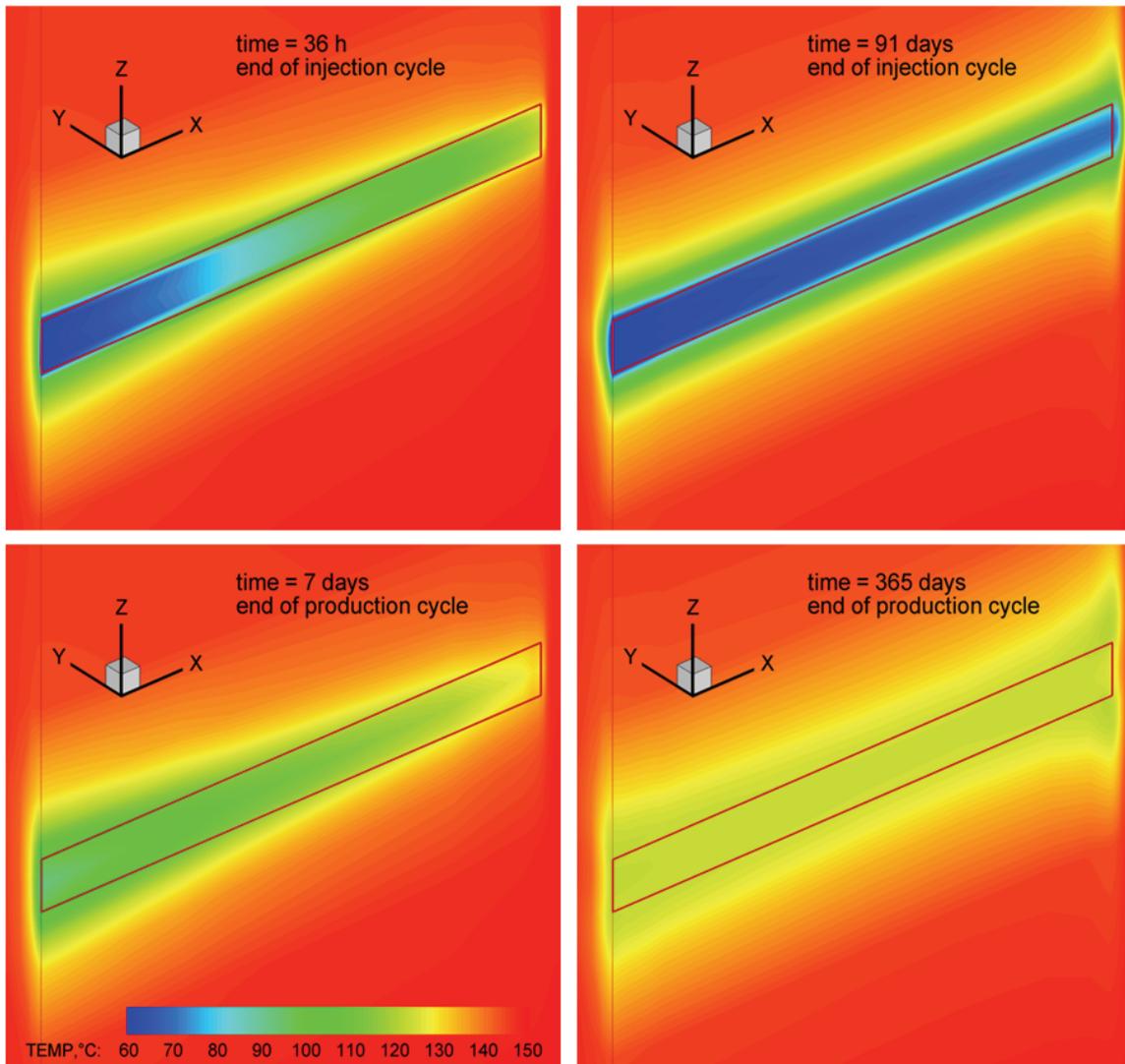


Abb. 6.7: Räumliche Temperaturverteilung für jahres- und wochenzyklisches Verfahren nach 4 Jahren Betriebsdauer, nach dem Shut in (Bild oben) und zu Ende des Produktionszyklus (Bild unten). Linke Seite wochenzyklisches Verfahren und rechte Seite jahreszyklisches Verfahren. Risslänge $L/2 = 1000$ m, Überhöhung der z-Achse = 15).

Die linke Seite der Abb. 6.7 zeigt die Temperaturen des wochenzyklischen Verfahrens und die rechte Seite des jahreszyklischen Verfahrens. Mit dem wochenzyklischen Verfahren wurden nach vier Jahren ca. 130.00 m^3 Wasser pro Jahr ausgetauscht und mit dem jahreszyklischen Verfahren ca. 100.00 m^3 Wasser pro Jahr.

Die oberen zwei Darstellungen in Abb. 6.7 zeigen die Temperaturverteilung nach der Injektion zu Beginn der Einschlussphase (*Shut-in*). Wie erwartet, sind beim jahreszyklischen Verfahren der Riss und die umgebende Gesteinsmatrix bis in größere Entfernungen vom Injektionspunkt ausgekühlt. Dies wird durch die längeren Injektionszeiten beim jahreszyklischen Verfahren im Gegensatz zum wochenzyklischen Verfahren hervorgerufen. Die unteren beiden Darstellungen in Abb. 6.7 zeigen die Temperaturverteilung nach der Produktionsphase. Hier bleibt beim jahreszyklischen Verfahren die Temperatur im Bohrlochbereich auf einem deutlich höheren Niveau als beim Wochenzyklusbetrieb. Dies deutet daraufhin, dass dem System mehr Wärme entzogen wurde. Dieser Befund wird in den folgenden Untersuchungen bestätigt (vgl. Abb. 6.8 und Abb. 6.9).

In Abb. 6.8 ist die berechnete räumliche Temperaturverteilung am Ende des Produktionszyklus nach vier Jahren Betriebsdauer für den Wochen- (linke Spalte) und Jahresbetrieb (rechte Spalte) dargestellt. Es sind die Temperaturisolinien für die Ebenen (x) senkrecht zum Riss am Injektions-/Produktionspunkt ($x = 0$ m) sowie in $x = 300$ m, $x = 700$ m und $x = 1000$ m Entfernung aufgetragen. Über den Jahresbetrieb wird der Gesteinsmatrix mehr Wärme entzogen als über den Wochenbetrieb. Der Wochenzyklus nutzt den Riss thermisch nur teilweise, wohingegen der Jahreszyklus auch die Rissspitzen thermisch nutzt. Hier wird im Gegensatz zu der vorherrschenden bilinearen Strömung (vgl. Abb. 6. 1 und 6.6) auch radiale Strömung erkannt (Sulzbacher & Jung, eingereicht). Der radiale Fluss führt in diesem Gebiet zu einem vergleichsweise höheren Wasseraustausch, verbunden mit einem höheren Wärmetransport (vgl. Abb. 6.8, $x = 1000$ m).

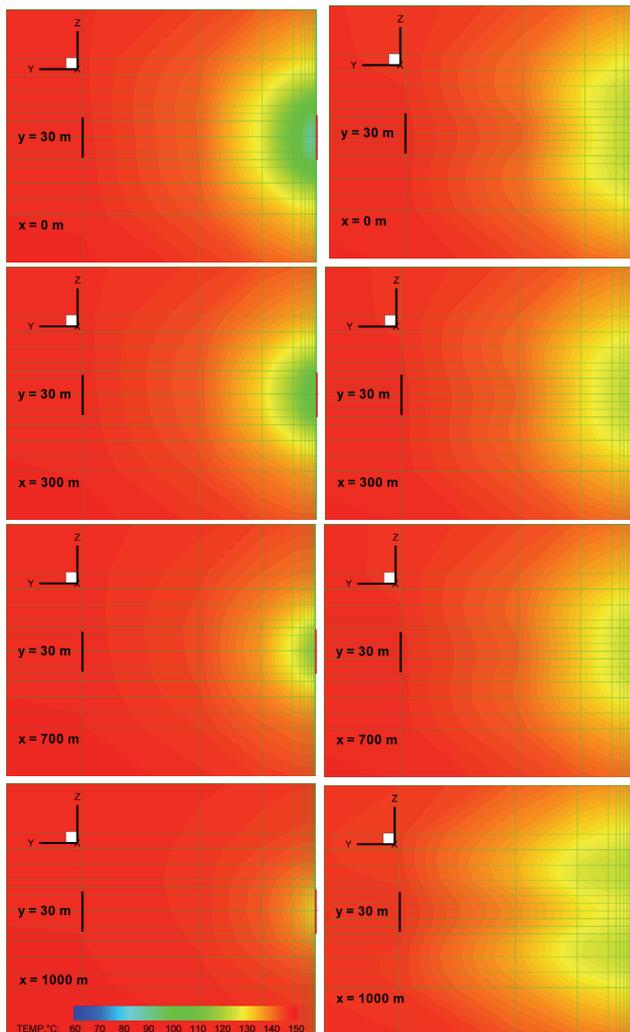


Abb. 6.8: Räumliche Temperaturverteilung für wochen- (links) und jahreszyklische (rechts) Verfahren auf verschiedenen Ebenen ($x = \text{const.}$) senkrecht zum Riss zu Ende der Produktionszeit nach 4 Jahren Betriebsdauer (Riss halblängen $L/2 = 1000$ m für jedes Betriebschema).

Erhöhung der thermischen Leistung durch Optimierung des Wärmetauschers

Ziel der Untersuchungen ist es, zu beurteilen, ob mit dem Verfahren des zyklischen Betriebs für einen Prognosezeitraum von 25 Jahren eine thermische Leistung in der Größenordnung von 2 MW erzeugt werden kann. Dies ist die erforderliche thermische Leistung zur Beheizung der Gebäude des GEOZENTRUMS Hannover. Mit den betrachteten Betriebssystemen wird diese Leistung noch nicht erreicht.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, das System auf einem erhöhten Druckniveau zu betreiben. Durch die Druckerhöhung wird der Riss auch in den Teilgebieten wieder geöffnet, die bei geringerem Druck geschlossen sind (z. B. in den Tonsteinlagen). Damit steht für den Wärmeaustausch eine größere Fläche zur Verfügung. Gleichzeitig steigen jedoch auch die Wasserverluste aus dem System, so dass ein Optimum ermittelt werden muss.

Durch relativ einfache technische Maßnahmen lässt sich die Leistung jedoch wesentlich erhöhen (Sulzbacher & Jung 2004). Zum Beispiel wurde das Fließschema bisher nicht thermisch optimiert. Technisch relativ einfach möglich ist es, den Risseinlass räumlich vom Rissauslass zu trennen. Der Riss müsste hierzu durch zwei vertikal versetzte Perforationsstrecken an die Bohrung angeschlossen werden, die durch einen Packer separiert werden. Hierdurch kann vermieden werden, dass das Heißwasser bei der Rückförderung dem am stärksten ausgekühlten Bereich am Risseinlass passieren muss.

Eine weitere, effiziente aber technisch aufwendige Maßnahme ist die Erzeugung weiterer künstlicher Risse und die Verteilung der injizierten und entnommenen Fließrate auf mehrere, übereinander liegende Teilsysteme eines größeren Wärmetauschers mit künstlichen Rissen (Sulzbacher & Jung 2004). Diese zusätzlichen künstlichen Risse müssten durch weitere Stimulationen erzeugt werden.

Mit Simulationsrechnungen sollte untersucht werden, ob die thermische Leistung eines Mehrfachrissystems unter Anwendung des wochen- und jahreszyklischen Betriebs ausreicht, um die geforderten 2 MW über 25 Jahre bereitzustellen. Für diese Modellrechnungen wurden die gleichen Riss- und gesteinsphysikalischen Parameter verwendet, wie in den vorangegangenen Modellrechnungen für den Einzelriss. Die Risse sind parallel zueinander angeordnet, mit einem ausreichenden großen Abstand zueinander, sodass sie sich nicht thermisch beeinflussen. Die Ergebnisse dieser Modellrechnungen sind in Abb. 6.9 dargestellt. Es wurden ein 2-Rissystem mit einer Risslänge von $L/2 = 1000$ m (wie Einrissystem; vgl. Abb. 6.7 und 6.8) und ein 4-Rissystem mit einer Risslänge $L/2 = 500$ m betrachtet. Abb. 6.9 zeigt, dass die thermischen Leistungen für ein 2-Riss- und ein 4-Rissystem, trotz unterschiedlicher Rissflächen, vergleichbar sind. Der Vergleich zwischen dem Wochen- und Jahreszyklus zeigt, dass die geforderten 2 MW nach 25 Jahren nur über den jahreszyklischen Betrieb erreicht werden.

Wirkungsgrad für Mehrrißwärmetauscher

Der Wirkungsgrad eines Wärmetauschers kann über das Verhältnis von zugeführter elektrischer Energie zur entzogenen thermischen Energie dargestellt werden. Die zugeführte elektrische Energie zum Betrieb der Pumpen ist vom Anfangsdruck des Systems abhängig. Die zugeführte Energie wird durch Integration des Produkts von Druck und Fließrate über die Zeit und die thermische Entzugsenergie über die Integration der thermischen Leistung (Abb. 6.9) über die Zeit berechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 6.10 für hydrostatischen Druck sowie für artesischen Überdruck von 90 bar und 200 bar dargestellt. Für Systeme unter hydrostatischen Druck zeigt das 4-Rissystem den höchsten Wirkungsgrad. Bei Systemen, die unter artesischem Druck stehen (z. B. Horstberg mit 200 bar), weist der Jahreszyklus Betrieb für $L/2 = 500$ m und $L/2 = 1000$ m, den größeren Wirkungsgrad auf.

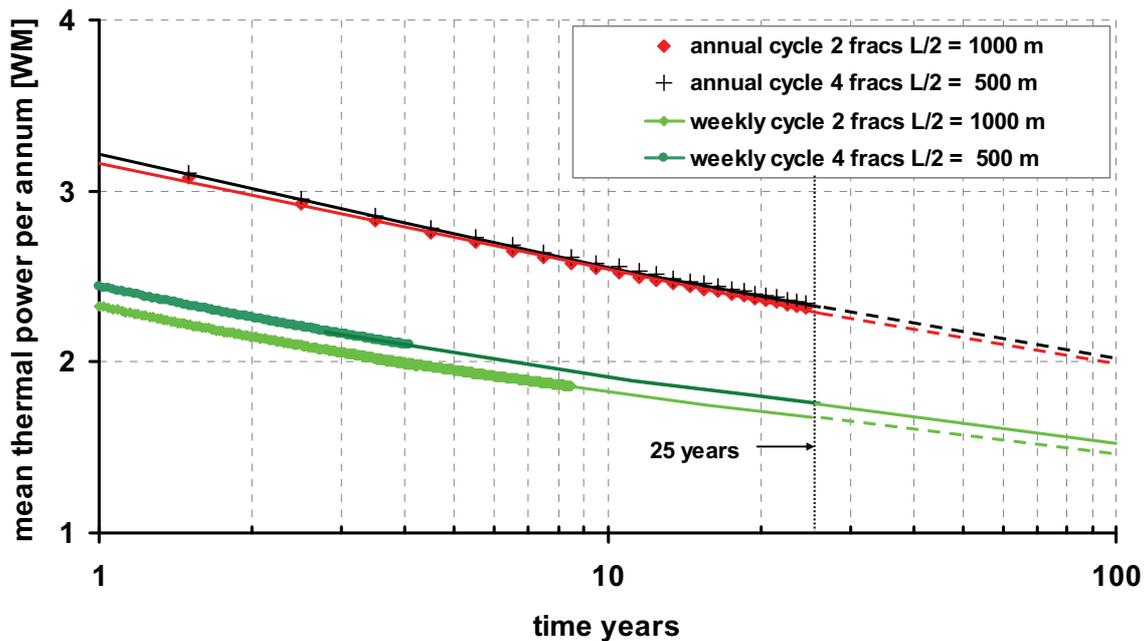


Abb. 6.9: Thermische Leistung für jahres- und wochenzyklisches Verfahren bei Verwendung von Mehrfrachrisssystemen mit unterschiedlichen Rissshälblängen (4 Risse $L/2 = 500$ m und 2 Risse $L/2 = 1000$ m).

6.2. Resümee

Die Ergebnisse der Modellrechnungen zeigen, dass mit dem zyklischen Verfahren wirtschaftlich relevante thermische Leistungen in der Größenordnung von 2 MW für die Beheizung großer Gebäudekomplexe über Betriebszeiten von mindestens 25 Jahren zu erzielen sind. Der jahreszyklische Betrieb hat, in allen betrachteten Szenarien unter erwarteten Betriebsbedingungen, gegenüber dem Wochenzyklus sowie dem Tageszyklus (vgl. Sulzbacher & Jung 2004) einen klaren Vorteil, sowohl bei der thermischen Leistung als auch beim Wirkungsgrad. Nur der jahreszyklische Betrieb zeigt nach 25 Jahren Betriebsdauer noch deutlich höhere thermische Leistungen als die für das GEOZENTRUM geforderten 2 MW (vgl. Abb. 6.9). Darüber hinaus hat der jahreszyklische Betrieb gegenüber dem tages- und wochenzyklischen Betrieb den deutlichen Vorteil, dass eine Wärmeversorgung des GEOZENTRUMS Hannover, sowohl Heizung als auch Warmwasserversorgung, unabhängig von Tages- und Nachtzeit sowie von Wochen-, Feier- und Sonntagen gewährleistet ist. Lediglich in den Sommermonaten müsste die Warmwasserversorgung über einen Gasbrenner erfolgen.

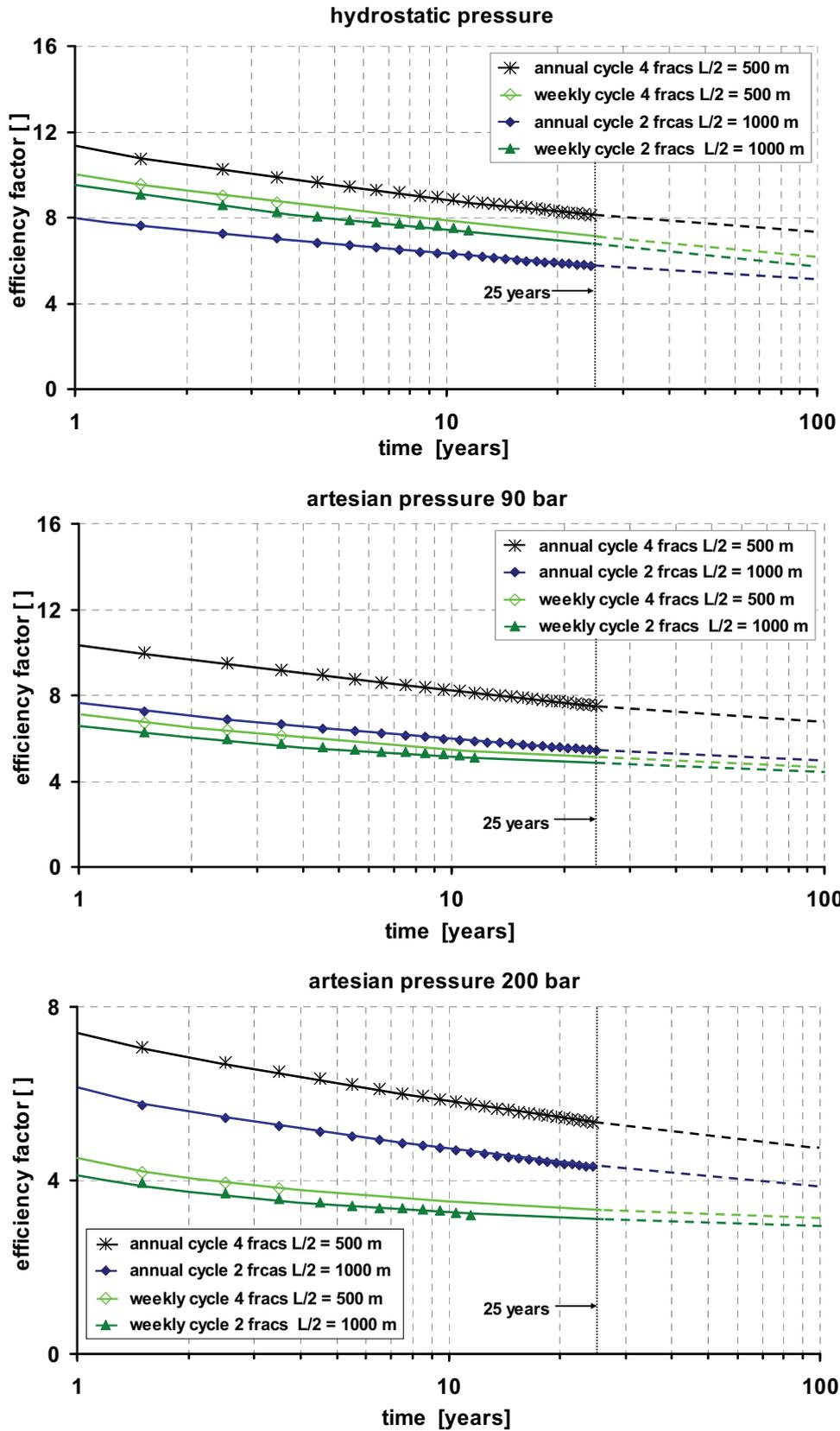


Abb. 6.10: Wirkungsgrad für Mehrrissswärmetauscher; oben hydrostatischer Druck, Mitte artesischer Überdruck von 90 bar, unten artesischer Überdruck von 200 bar.

6.3. Kalibrierung der Modellrechnungen zum Verfahren der Tiefenzirkulation

Die Parameter für Permeabilität und Speicherkoeffizient müssen für alle Materialgruppen (Abb. 6.11, Tabelle 6.2, Tabelle 6.3) aus der nachfolgend beschriebenen Kalibrierung mit Hydraulik-Daten und Daten aus Tracerversuchen ermittelt werden. Ausnahmen sind die Parameterwerte für Materialgruppen 0 und 3 (Tabelle 6.2), die der Literatur entnommen wurden und die Werte für den Defurth-Sandstein, die von Sulzbacher et. al. (2004) im Rahmen der Kalibrierung für den zyklischen Wochentest bestimmt wurden. Die Werte des Solling-Sandsteins sowie die der vier Rissmaterialgruppen (Tabelle 6.3) müssen im Rahmen der Kalibrierung ermittelt werden. Anfangswerte für die Kalibrierung waren mit dem 2-dimensionalen Auswertprogramm Saphir bestimmte Parameter (Tischner et al. 2004).

Wegen der Mehrdeutigkeit bei der Bestimmung der Modellparameter ist es notwendig, alle verfügbaren Daten mit in die Modellkalibrierung einzubeziehen. Dazu gehören neben den hydraulischen Bohrlochkopfdaten (Abb. 6.12) auch die Daten aus Tracerexperimenten (Abb. 6.12). Verwertbare Temperaturmessungen standen leider nicht zur Verfügung.

Wie Arbeiten von Wessling et al. (2008) zeigen, wird der am Bohrlochkopf gemessene Druck ganz erheblich von hydromechanischer Rissausbreitung und Rissöffnung beeinflusst. Dass solche nichtlinearen Effekte in den hier vorliegenden Daten eine ganz erhebliche Rolle spielen, kann man den Bohrlochkopfdaten des Defurth-Sandsteins entnehmen, die entsprechend auffällige *Shut-in* Ereignisse zeigen (vgl. Abb. 6.12).

Damit solche instationären Verhältnisse mit dem hier verwendeten Programm ROCKFLOW bearbeitet werden können, wurde der gesamte Datensatz entsprechend der unterschiedlichen Fließraten in verschiedene Zeitzonen a bis h (Abb. 6.13) für die Zeiten, wo nur hydraulische Daten vorlagen, und Tracer-1 und Tracer-2 (Abb. 6.13) für die Zeiten, in denen zusätzlich auch noch Tracerdaten zur Verfügung standen, zusammengefasst. Innerhalb dieser Zonen, in denen die Fließraten in etwa konstant blieben, wurde damit angenommen, dass sich die Bohrlochkopfdrucke und das Tracer-Durchgangsverhalten durch statische, hydraulische Parameter beschreiben lassen. Für jede Zone mussten Transmissibilitäten und spezifische Speicherkoeffizienten für alle Rissmaterialgruppen und die Materialgruppe des Solling-Sandsteins durch möglichst gute Anpassung der berechneten Drücke an die gemessenen bestimmt werden. Für die Zonen Tracer-1 und Tracer-2 waren zusätzlich berechnete Tracer-Durchgangskonzentrationen an die am Auslass des Sollings gemessene Tracerdurchgangskurve (Abb. 6.14) anzupassen.

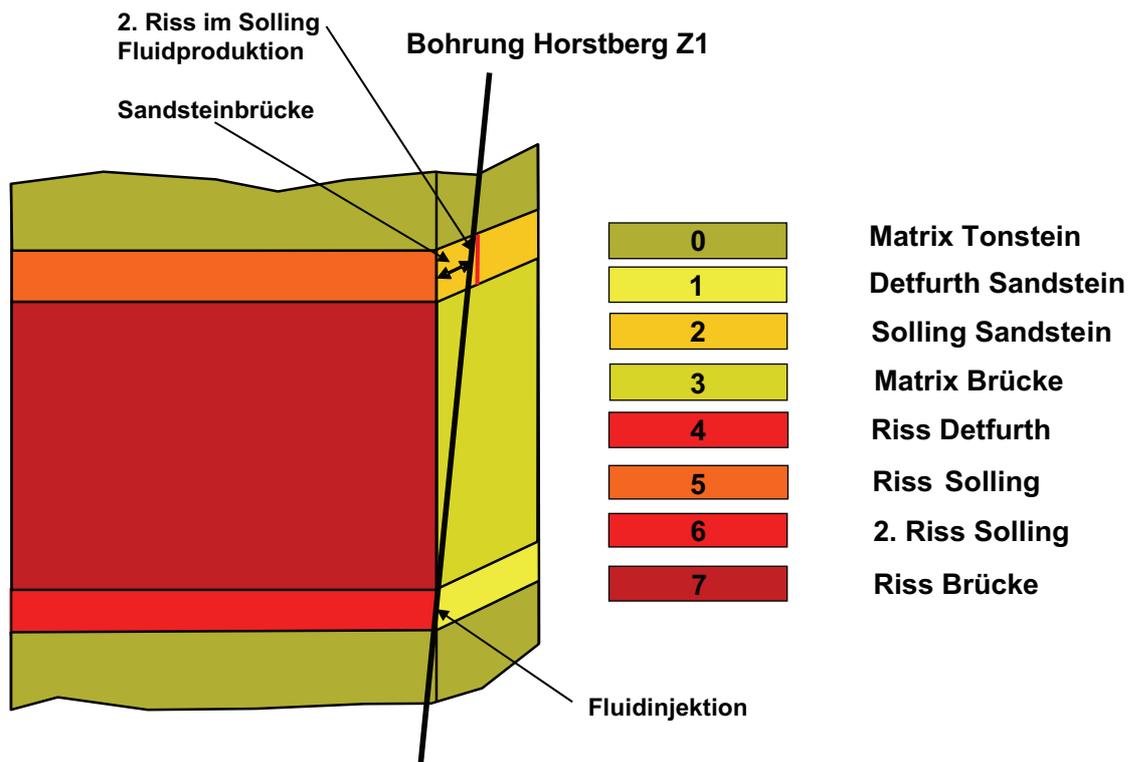


Abb. 6.11: Aufteilung in Materialgruppen (Tabelle 6.2 und 6.3) im Modell für die Modellkalibrierung. Dargestellt ist ein Viertel Ausschnitt aus dem Modell.

Tabelle 6.2: Unveränderliche Parameter für die Materialgruppen Matrix Tonstein und permeable Zonen Sandstein.

EINGABEPARAMETER	EINHEIT	WERT
<u>Matrix und Brücke Tonstein (Materialgruppen Gruppen 0 und 3)</u>		
Dichte	[kg / m ³]	2660
Spezifische Wärmeleitfähigkeit	[W / m·K]	2,40
Spezifische Wärmekapazität	[J/ kg·K]	1000
Permeabilität K	[m ²]	10 ⁻¹⁴
Speicherkoeffizient S	[1/Pa]	10 ⁻²¹
<u>Detfurth-Sandstein (Materialgruppe 1)</u>		
Dichte	[kg / m ³]	2660
Höhe	[m]	6
Spezifische Wärmeleitfähigkeit	[W / m·K]	2,40
Spezifische Wärmekapazität	[J/ kg·K]	1000
Permeabilität K	[m ²]	5·10 ⁻¹⁵
Speicherkoeffizient S	[1/Pa]	2·10 ⁻¹¹
<u>Solling-Sandstein (Materialgruppe 2)</u>		
Dichte	[kg / m ³]	2660
Höhe	[m]	20
Spezifische Wärmeleitfähigkeit	[W / m·K]	2,40
Spezifische Wärmekapazität	[J/ kg·K]	1000

Tabelle 6.3: Unveränderliche Parameter für die Materialgruppen Matrix Tonstein, permeabler Zonen Sandstein, Risse im Sandstein, Risse im Tonstein und Fluid.

EINGABEPARAMETER	EINHEIT	WERT
<u>Risse im Detfurth (Materialgruppe 4)</u>		
Höhe	[m]	6
Spezifische Wärmeleitfähigkeit Wasser	[W/ m·K]	0.716
Spezifische Wärmekapazität Wasser	[J/ kg·K]	4128
<u>Riss im Solling (Materialgruppe 5)</u>		
Höhe	[m]	20
Spezifische Wärmeleitfähigkeit Wasser	[W/ m·K]	0.716
Spezifische Wärmekapazität Wasser	[J/ kg·K]	4128
<u>Riss im Solling hinter Sandsteinbrücke (Materialgruppe 6)</u>		
Höhe	[m]	20
Spezifische Wärmeleitfähigkeit Wasser	[W/ m·K]	0.716
Spezifische Wärmekapazität Wasser	[J/ kg·K]	4128
<u>Risse im Tonstein (Materialgruppe 7)</u>		
Höhe	[m]	234
Spezifische Wärmeleitfähigkeit Wasser	[W/ m·K]	0.716
Spezifische Wärmekapazität Wasser	[J/ kg·K]	4128
<u>Fluid</u>		
Dichte Wasser	[kg/m ³]	1000
Viskosität Wasser	[Ns/m ²]	3·10 ⁻⁴
Spezifische Wärmeleitfähigkeit. Wasser	[W/m·K]	0.7126
Spezifische Wärmekapazität Wasser	[J/kg·K]	4128

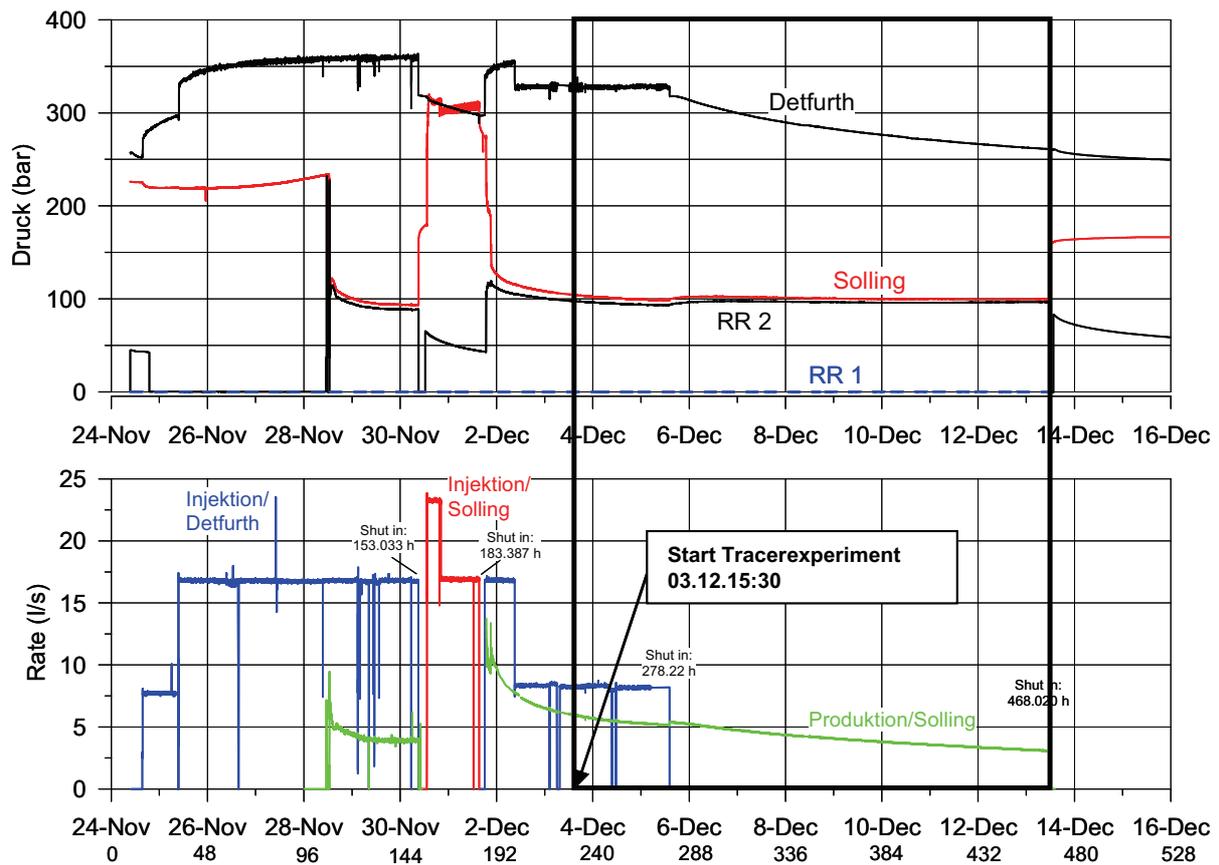


Abb. 6.12: Zirkulationstest vom 24.11.2004 – 16.12.2004 und Tracerexperiment in Horstberg

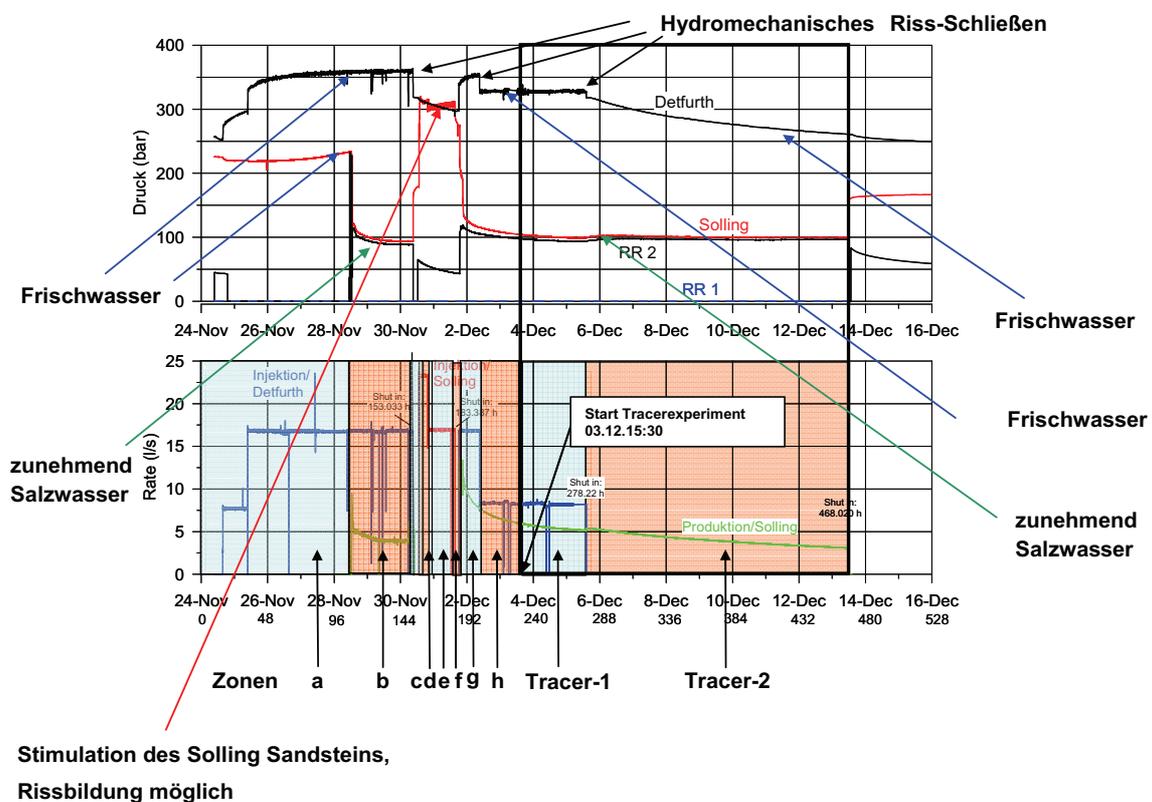


Abb. 6.13: Kalibrierung des Zirkulationsmodells, Aufteilung in Zeitzonen

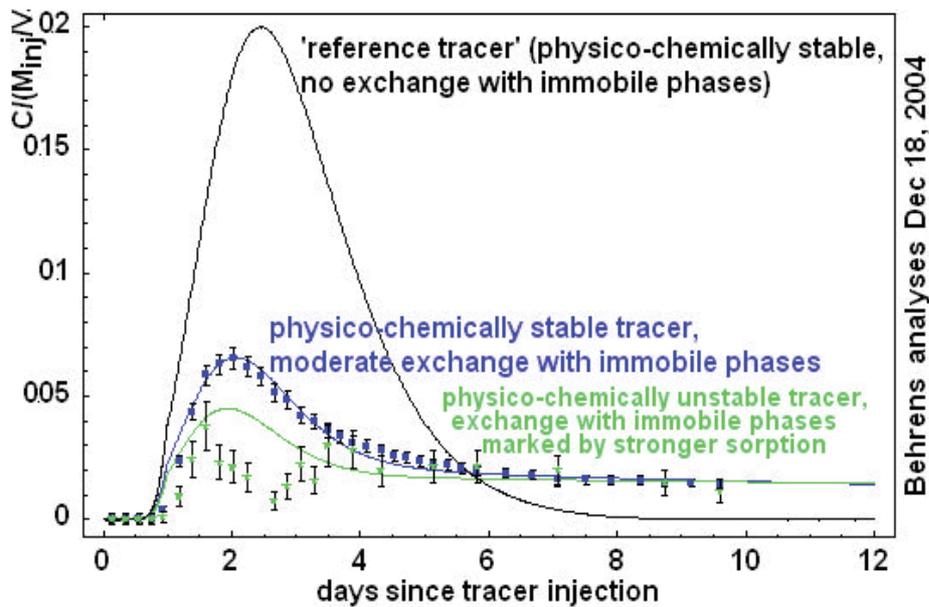


Abb. 6.14: Durchgangskurven der organischen Tracer Uranin, Naphtalendisulphat (NDS) und Tritium (Abbildung Universität Göttingen).

6.3.1. Modellkalibrierung mit Daten der Vorgeschichte des Tracer-Experimentes

Das Ergebnis der hydraulischen Anpassung wird in Abb. 6.15 veranschaulicht. Die gemessenen Hydraulik-Daten sind durch gestrichelte Linien dargestellt, während die berechneten Daten mit durchgezogenen Linien gekennzeichnet sind. Das Ergebnis verdeutlicht, dass in allen Zeitzonen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Bohrlochkopfdaten erzielt werden konnte. Es ist nicht sicher, ob der Solling-Sandstein am 02.12.2004 (Abb. 6.13, Zeitzone e) erfolgreich stimuliert werden konnte. Durch die Modellrechnung lässt sich zeigen, dass eine Anpassung in dieser Zeitzone nur dann erzielt werden kann, wenn sich hinter der Sandsteinbrücke im Modell (vgl. Abb. 6.11) ein künstlicher Riss gebildet hat. Dieser Riss wirkt während der Stimulationsmaßnahme dämpfend auf den Druckanstieg im Ringraum. Zudem lässt sich aus den berechneten Bohrlochkopfdaten für den Solling ableiten, dass die Strecke zwischen Tonsteinriss und Bohrung, dem sog. Brückenabstand, mindestens 7 m betragen muss. Aus der Kalibrierung mithilfe der Hydraulikdaten ergab sich, auch für die weiter unten beschriebene Kalibrierung mit Tracerdaten, ein optimaler Brückenabstand von 10 m. Bei der Anpassung war ebenso zu berücksichtigen, dass sich mit Beginn der Produktion aus dem Solling (Abb. 6.13, Zonen b und g) die Salinität des Wassers im Ringraum drastisch erhöht hat und durch die Zunahme des Gewichtes dort eine sehr plötzliche Druckabsenkung erfolgt ist. Wie den beiden kleineren Diagrammen im unteren Teil der Abb. 6.15 entnommen werden kann, wurde die Dichte des Salzwassers bei den hydraulischen Messungen mit aufgezeichnet. Die Dichtedaten gehen in die Rechnung mit ein.

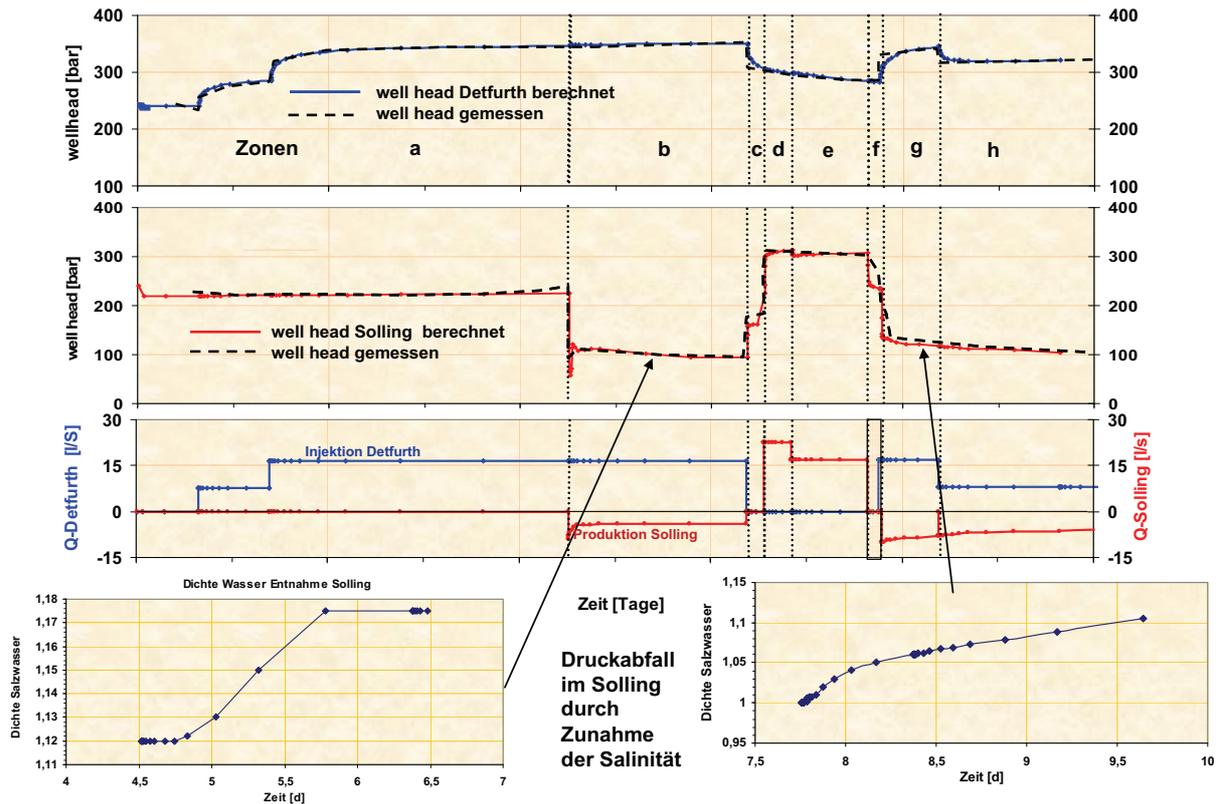


Abb. 6.15: Kalibrierung der hydraulischen Parameter des Modells mit Hilfe der hydraulischen Tests vom 24.11.2004 bis 03.12.2004.

Tabelle 6.4 zeigt die für die Zeitzonen a – h erzielten Ergebnisse für die Bestimmung der spezifischen Transmissibilitäten und Speicherkoeffizienten. Es fällt auf, dass die letzteren erwartungsgemäß sehr große Werte aufweisen, was auf eine hohe Speicherfähigkeit der Risse schließen lässt. Die Transmissibilitäten zeigen eine auffällige Druckabhängigkeit, was auf hydromechanische Effekte hindeutet. Die Risse öffnen sich unter hohem Druck und breiten sich flächenmäßig aus, d.h. sie erhöhen druckabhängig ihre Transmissibilität.

Die hydraulische Kalibrierung des Modells mit Drücken am Bohrlochkopf zeigt, dass die Modellvorstellung im Einklang steht mit diesen Daten. Die aus zweidimensionalen Abschätzungen mit dem kommerziellen Programm Saphir ermittelten Anfangswerte für die hydraulischen Parameter können nur teilweise bestätigt werden. Aufgrund von Mehrdeutigkeiten war es nicht möglich die Größe der Rissfläche zu bestimmen. Risshalbängen von 500 m – 1000 m liefern die gleichen Berechnungsergebnisse für die in Abb. 6.15 gezeigten Messergebnisse.

Tabelle 6.4: Ergebnisse der Kalibrierung für den Zeitraum 24.11 bis 3.12.2004

	Permeabilität [m ³]	Spez. Speicherkoeffizient [1/Pa]	Porosität [%]
Matrix	1,00E-21	2,00E-14	
Matrix Brücke	1,00E-21	2,00E-14	1
Sandstein Detfurth	5,00E-15	2,00E-11	5
Sandstein Solling	3,00E-14	1,00E-10	10

Brückenabstand = 10 m
Rissshalblänge = 500 m

Transmissibilität [m ³]	a	b	c	d	e	f	g	h
	Injektion Detfurth	Prod. Solling	Ruhephase	Injektion Solling		Ruhephase	Prod. Solling	Injektion Detfurth
Riss Detfurth	2,00E-11	2,00E-11	1,50E-11	1,20E-11	5,00E-12	4,00E-12	2,00E-11	2,00E-11
Riss Solling 0 m	2,00E-11	2,00E-11	1,00E-11	2,00E-11	2,00E-11	5,00E-12	2,00E-11	2,00E-11
Riss Solling 10 m				5,00E-13	2,00E-13	1,00E-14	3,00E-14	2,00E-14
Riss Brücke	2,00E-13	2,00E-13	1,00E-13	1,00E-13	1,00E-13	1,00E-13	2,00E-13	1,00E-13

Spez. Speicherkoeff. [1/Pa]	a	b	c	d	e	f	g	h
	Injektion Detfurth	Prod. Solling	Ruhephase	Injektion Solling		Ruhephase	Prod. Solling	Injektion Detfurth
Riss Detfurth	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06	5,00E-05	3,00E-05	5,00E-05
Riss Solling 0 m	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06	1,00E-05	7,00E-05	2,00E-06	5,00E-06	3,00E-05
Riss Solling 10 m				2,00E-06	2,00E-06	2,00E-09	2,00E-09	2,00E-09
Riss Brücke	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-05	5,00E-05	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06

6.3.2. Modellkalibrierung mit hydraulischen Daten und Tracerdaten

Da wichtige hydraulische Parameter nicht eindeutig bestimmbar waren und auch für die Kalibrierung geeignete Temperaturdaten nicht vorhanden waren, ist eine zusätzliche Kalibrierung des Modells mit Tracerdaten sinnvoll. Die für die Kalibrierung zur Verfügung stehenden Tracerdurchgangsdaten sind in Abb. 6.14 und die hydraulischen Daten in Abb. 6.12 dargestellt. Für die Durchführung der Kalibrierung wurde der NDS Tracer gewählt. Dieser Tracer ist ein physikalisch/chemisch, über einen langen Zeitraum weitgehend stabiler Tracer mit nur schwach adsorptiven Eigenschaften. Sein Einsatz für den Nachweis von hydraulischen Verbindungen zwischen Bohrungen, Klüften und/oder künstlich erzeugten Rissen hat sich vielfach bewährt.

In Horstberg wurde er zunächst nur zu dem Zweck eingesetzt, den Nachweis der hydraulischen Verbindung zwischen Detfurth und Solling zu erbringen. Die Messergebnisse aus Abb. 6.12 zeigen, dass dieser Nachweis gelungen ist.

Ein Vorteil der Tracerkalibrierung im Vergleich zur Kalibrierung mit hydraulischen Daten ist die größere Sensitivität des Tracerdurchgangs gegenüber Änderungen der hydraulischen Parameter. Zudem ist es im Gegensatz zur Kalibrierung mit hydraulischen Daten möglich, weitere Parameter wie die Porosität, Dispersion, Diffusion und Adsorption zu bestimmen. Die Mehrdeutigkeit bei der Bestimmung der gesuchten Parameter kann dadurch eingeschränkt werden.

Für die erzielbare thermische Leistung eines Reservoirs ist die Risshalblänge bzw. die Größe der, die beiden Sandsteinschichten Solling und Detfurth verbindenden, Rissfläche von größter Bedeutung. Diese konnte mit Hilfe der hydraulischen Kalibrierung bisher nicht bestimmt werden. Aus diesem Grunde wurde zunächst die Abhängigkeit der Tracerverteilung am Solling-Auslass von der Risshalblänge mit einem Modell untersucht, das ohne Berücksichtigung der gemessenen Durchbruchzeiten und der hydraulischen Bohrlochkopfdaten an die gemessenen Tracerdurchgangsdaten angepasst wurde (vgl. Abb. 6.16). Dabei ergibt sich die Durchbruchzeit aus der Zeit, bis zu der nach Injektion des Tracers am Einlass der Ersteintritt des Tracers am Auslass erfolgt. Es ist die Zeit, die das Markierungsmittel für den Weg von der Erdoberfläche durch den Bohrstrang in den Detfurth-Sandstein und von dort durch den Tonsteinriss und Solling-Sandstein zurück über den Ringraum der Bohrung an die Erdoberfläche benötigt. Der gemessenen Tracerdurchgangskurve kann für die Durchbruchzeit ein Wert von ca. 20 h entnommen werden.

Die Risshalblängen wurden bei den Rechnungen zwischen 300 m und 1000 m verändert und Tracerdurchgangskurven berechnet. Abb. 6.16 zeigt das Ergebnis, aus dem hervorgeht, dass es auch mit Daten aus Tracermessungen hier nicht möglich ist, die Rissgeometrie zu bestimmen.

Die Amplituden der berechneten Durchgangskurven zeigen zwar eine geringfügige Abhängigkeit von der Risslänge, diese lässt sich aber durch eine geänderte Transmissibilität des Brückenrisses (Tabelle 6.3, Materialgruppe 7) leicht wieder ausgleichen. Die Abbildung zeigt auch, dass die Größe der Rissfläche auf die Durchbruchzeit hier keinen Einfluss hat. Dies ist nur so zu erklären, dass der Tracer den Riss nicht in seiner vollen Länge durchfließt.

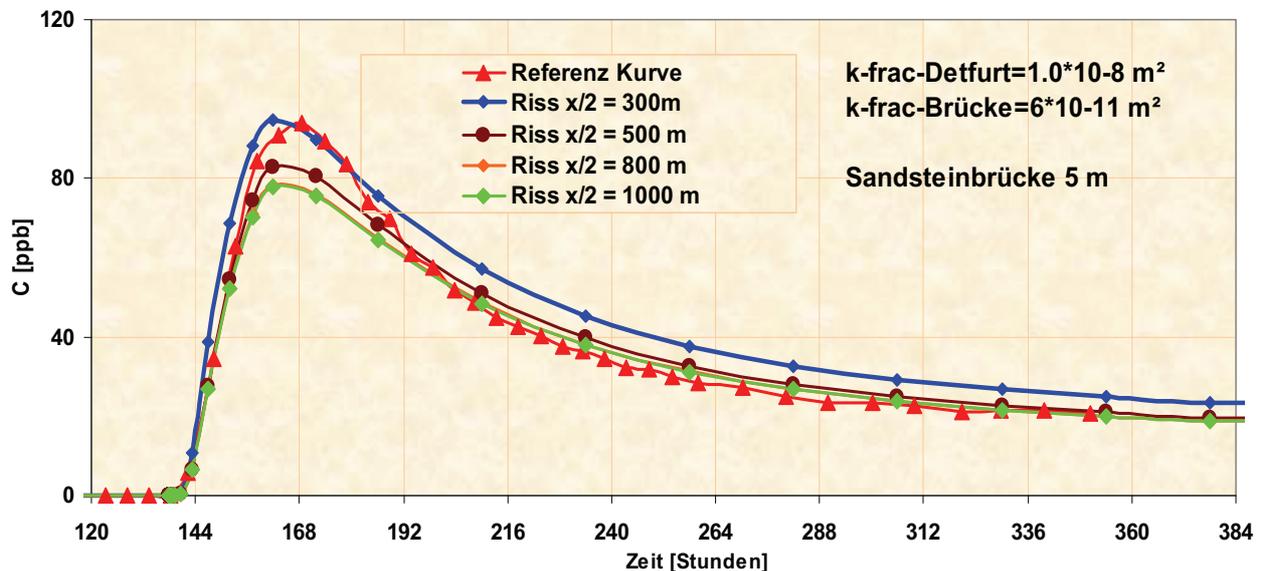


Abb. 6.16: Berechnung von Tracer-Durchgangskurven für Risshalblängen der Sandsteinhorizonte verbindenden Brückenrisses $x/2 = 300 \text{ m} - 1000 \text{ m}$ (das Modell wurde ohne Berücksichtigung der gemessenen Durchbruchzeiten und der hydraulischen Bohrlochkopfdaten an die Tracer-Durchgangsdaten angepasst)

Weiterhin ergab sich die Frage, ob es möglich ist, die mit hydraulischen Daten aus der Kalibrierung nur sehr ungenau bestimmbare Länge der Sandsteinbrücke mit Hilfe der Tracer-Kalibrierung genauer zu bestimmen. Das Ergebnis zeigt Abb. 6.17. Es wird deutlich, dass der Brückenabstand das Verhalten des Tracers hoch sensitiv beeinflusst. Erwartungsgemäß

verschiebt sich die Durchbruchzeit zu späteren Zeiten hin. Zudem werden mit zunehmendem Brückenabstand die Amplituden der berechneten Durchgangskurven kleiner, die Kurvenformen flacher und die Kurvemaxima verschieben sich wie die Durchbruchzeiten zu größeren Zeiten hin.

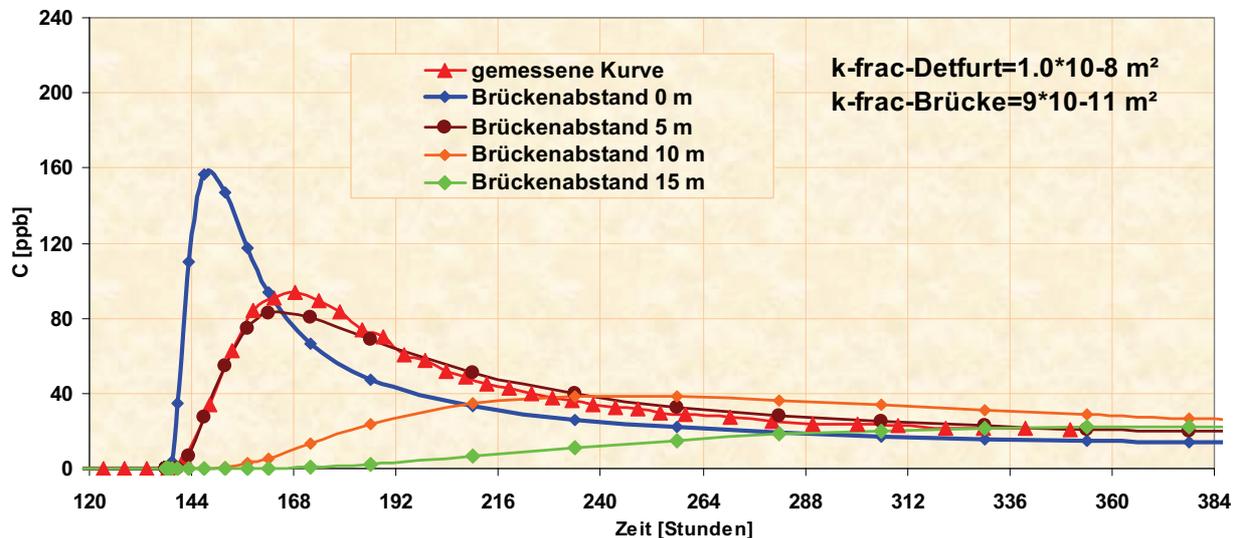


Abb. 6.17: Berechnung der Tracerdurchgangskurven für verschiedene Sandsteinbrückenabstände im Solling (0 m, 5 m, 10 m und 15 m; Rissshalblänge $x/2 = 500$ m).

Das Anpassungsergebnis der berechneten Tracerdurchgangskurve an die gemessenen Tracerdaten ist im oberen Teil der Abb. 6.18 dargestellt. Für die Durchbruchzeit wurde dabei die Laufzeit des Tracers durch den Strang von der Erdoberfläche bis zum Eintritt in den Detfurth bei einer Fließrate von 8 l/s aus den Abmessungen der Bohrung zu 0,58 h berechnet. Für die Laufzeitberechnung des Tracers vom Zeitpunkt der Entnahme am Solling bis zur Erdoberfläche ergibt sich bei einer Fließgeschwindigkeit von 6 l/s eine Zeit von 2,65 h. Zusammen mit seinem Aufenthalt im tiefen Reservoir hat der Tracer damit ca. 17 h Zeitverzögerung erfahren, wenn er erstmalig an der Entnahmestelle an der Erdoberfläche wieder beobachtet wird.

Neben der Anpassung an die Tracerdaten musste mit denselben hydraulischen Parametern eine optimale hydraulische Anpassung der berechneten an die gemessenen Bohrlochkopfdruckdaten angestrebt werden. Das Ergebnis der hydraulischen Anpassung ist im mittleren Teil der Abb. 6.18 zu sehen, während das Fließratenschema im unteren Teil der Darstellung dargestellt ist.

Wie bei der im vorigen Abschnitt beschriebenen Kalibrierung der Vorgeschichte konnte die Kalibrierung mit Hilfe der Bohrlochkopfdaten erfolgreich durchgeführt werden.

Es fällt auf, dass besonders nach der Zeit $t = 11,25$ Tage im Detfurth durchgeführten *Shut-in* die Anpassung an die Tracerdaten nur sehr mäßig ist. Als Gründe dafür kommen in Frage:

Da beim Eingeben des Tracers Tracermenge versehentlich verschüttet wurde, ist die Menge des verwendeten NDS-Tracers nur annähernd bekannt. Der Fehler beträgt ca. 20%.

Die Messungen konnten nicht wiederholt werden. Außerdem diente das Tracerexperiment ursprünglich auch nur zum Nachweis der direkten Verbindung zwischen Solling und Detfurth. Eine Modellkalibrierung mit den Durchgangsdaten war ursprünglich nicht geplant.

Während der Tracer- Aufzeichnungen wurde ein *Shut-in* der Detfurth-Injektion durchgeführt. Wie oben schon beschrieben, lässt sich aus der nur sehr schwachen Reaktion der Bohrlochkopfdücke ableiten, dass hydromechanisches Effekte, wie druckabhängiges Riss-schließen, eine bedeutende Rolle spielen müssen. Die Produktionsrate aus dem Solling nimmt zudem kontinuierlich ab. Diese Vorgänge führen während der gesamten Messphase zu einem höchst dynamischen Verhalten der räumlichen Druck- und Konzentrationsverteilung im Wärmetauscher, das durch ein statisches Programm wie ROCKFLOW aber nur sehr begrenzt dargestellt werden kann. Die Aufteilung in nur zwei Zeitzonen, wie hier geschehen, ist möglicherweise noch zu ungenau.

Ungenauigkeiten bei der Einstellung der hydraulischen Parameter, vor allem die weder mit den hydraulischen Daten noch mit den Tracerdaten eindeutig bestimmbar Permeabilitäten der künstlichen Risse, erschweren zudem die Kalibrierung und könnten eine weitere Ursache für die mäßige Anpassung sein.

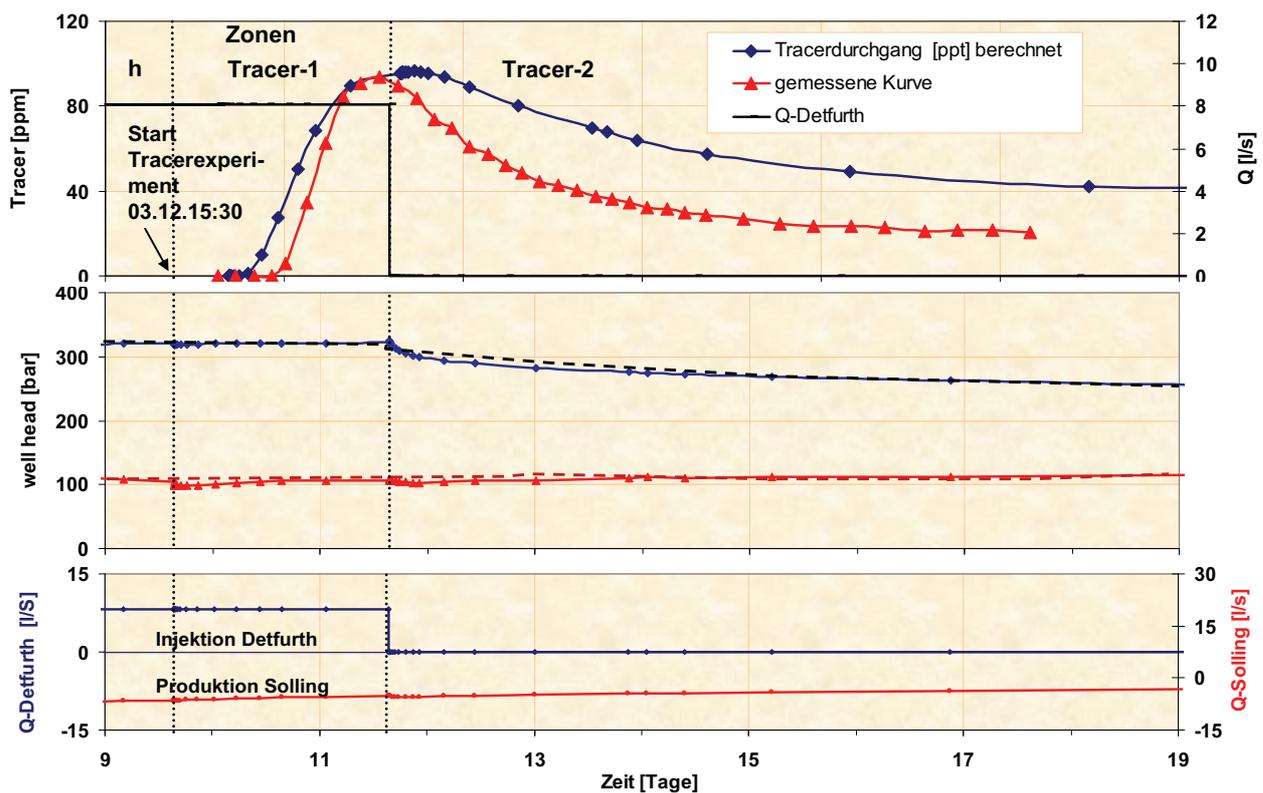


Abb. 6.18: Kalibrierung der hydraulischen Parameter des Modells mit Daten aus Wellhead-Messungen und Tracer-Versuchen

In der folgenden Tabelle 6.5 sind die Ergebnisse der Kalibrierung dargestellt. Wie bei der Kalibrierung der Daten der Vorgeschichte (voriger Abschnitt) zu beobachten war, zeigen die Transmissibilitäten der Sandsteinrisse im Detfurth und Solling ein druckabhängiges Verhalten. Auffällig sind weiterhin die großen Speicherkoeffizienten, die auf einen großflächigen Riss hindeuten.

Tabelle 6.5: Ergebnisse der Kalibrierung; Brückenabstand: 10 m und Risslänge: 500 m

Transmissibilität [m²]	Tracer-1		Tracer-2	
	Produktion Solling			
	Injektion Detfurth			
Riss Detfurth		2,00E-11		1,50E-11
Riss Solling 0 m		1,50E-11		1,00E-11
Riss Solling 10 m		1,00E-14		1,00E-14
Riss Brücke		1,00E-13		1,00E-13

Speicherkoefizient [1/Pa]	Tracer-1		Tracer-2	
	Produktion Solling			
	Injektion Detfurth			
Riss Detfurth		8,00E-05		2,00E-05
Riss Solling 0 m		8,00E-05		5,00E-05
Riss Solling 10 m		2,00E-09		2,00E-09
Riss Brücke		5,00E-05		2,00E-05

7. Verwertbarkeit der Ergebnisse

Mit den in der Bohrung Horstberg Z1 durchgeführten Untersuchungen konnten neue Erkenntnisse über die Erschließung von gering permeablen Sedimentgesteinen für die geothermische Energiegewinnung gewonnen werden. So wurde im Vorläuferprojekt gezeigt, dass mittels Wasserfrac-Technik großflächige Risse in geschichteten Sedimentgesteinen erzeugt werden können. Im aktuellen Projekt konnte durch hydraulische Tests nachgewiesen werden, dass der künstlich geschaffene Riss über einen langen Zeitraum hydraulisch wirksam bleibt. Auch 5 Jahre nach der Fracoperation verfügt dieser Riss noch über eine hohe hydraulische Leitfähigkeit, die tendenziell höher ist als bei Fracoperationen mit Stützmitteln, welche gewöhnlich in Öl- und Gasbohrungen durchgeführt werden.

Durch das im Jahr 2006 durchgeführte, zweite kurzzeitige Zirkulationsexperiment zwischen 2 Schichten der Bohrung Horstberg (Solling und Detfurth) wurde gezeigt, dass die hydraulische Kommunikation zwischen diesen beiden Schichten über den künstlich geschaffenen Riss weiterhin besteht. Es konnte eine Zirkulation mit einer Fließrate von ca. 4 l/s realisiert werden.

Modellrechnungen zeigen zudem, dass beide in Horstberg untersuchten Konzepte (Einbohrlochzirkulation, zyklische Energiegewinnung/Huff Puff) potenziell geeignet sind für die geothermische Energiegewinnung aus einer Bohrung. Mit beiden Verfahren ist grundsätzlich ein langfristiger Wärmeentzug von ca. 2 MW_{th} möglich, so wie es für die Beheizung des Geozentrums Hannover notwendig ist.

Der Austausch des Bohrlochpackers in dieser Bohrung wurde notwendig, nachdem hydraulische Tests eine Umläufigkeit des Packers angezeigt haben. Durch Einbau eines neuen robusteren Packers, besteht die begründete Hoffnung längerfristig einen stabilen Zustand der Bohrung geschaffen zu haben. Die im Zusammenhang mit dem Packertausch durchgeführten Untersuchungen haben einen erheblichen Erkenntnisgewinn hinsichtlich einer geeigneten Komplettierung der Bohrung für die Einbohrlochzirkulation gebracht.

Von großer Bedeutung für den späteren Betrieb einer geothermischen Anlage sind die hier durchgeführten geochemischen- und Korrosionsuntersuchungen. Im Norddeutschen Becken dominieren im tiefen Untergrund hochsalinare Wässer, die bei Förderung und Abkühlung zu Korrosion und Ausfällungen führen können. Insbesondere die nachgewiesenen Sulfatausfällungen (Baryt, Coelestin) sowie die Korrosion (vermutlich CO₂ bedingt) stellen eine ernsthafte Gefahr für einen kontinuierlichen Anlagenbetrieb dar. Die Auswahl geeigneter Materialien sowie die Zugabe von geeigneten Inhibitoren zur Vermeidung von Ausfällungen sind daher wichtige Punkte für die Realisierung einer geothermischen Anlage.

Derzeit existieren weltweit keine vergleichbaren Projekte, in denen gering permeable bzw. dichte Sedimentgesteine für die geothermische Energiegewinnung untersucht werden. Andererseits überwiegen in vielen Regionen Deutschlands und Mitteleuropas gering permeable Gesteine im tiefen Untergrund mit einem riesigen geothermischen Potenzial. Wenn es gelingt hier einen Weg für die Nutzung dieses Potenzials aufzuzeigen, kann perspektivisch ein bedeutsamer Beitrag für die Energieversorgung aus Erdwärme, insbesondere für die Wärmeversorgung, geleistet werden.

Für die Realisierung einer geothermischen Dublette in gering permeablen Gesteinen müssten über große Strecken (Hunderte von Metern) 2 Bohrungen über künstliche Risse

verbunden werden. Dies konnte bisher nur in kristallinem Gestein demonstriert werden (HDR-Projekt Soultz). Im Sedimentgestein steht dieser Nachweis noch aus.

Das Projekt in Horstberg zeigt grundsätzlich einen Weg zunächst über Einbohrlochkonzepte dem Ziel der Nutzung von Erdwärme aus gering permeablen Sedimentgestein näher zu kommen. Mit diesen Einbohrlochkonzepten wird im Unterschied zu Dublettensystemen vorrangig das bohrlochnahe Umfeld geothermisch genutzt. Ein Leistungsbereich von einigen MW_{th} erscheint hiermit als realistisch. Bei weiterer konsequenter Forschung und Entwicklung kann das GeneSys-Vorhaben den Ausgangspunkt darstellen für die perspektivisch flächenhafte Erstellung geothermischer Systeme in gering permeablen Sedimentgesteinen.

Die erzielten Ergebnisse aus diesem Vorhaben fließen direkt in die Realisierung des GeneSys-Demonstrationsvorhabens zur geothermischen Direktwärmeversorgung des GEOZENTRUMs Hannover ein. Die Bohrung am GEOZENTRUM wurde 2009 abgeteuft. Die ersten hydraulischen Tests und Fracoperationen sind für den Sommer 2010 geplant. Basierend auf den Erfahrungen an der Bohrung Horstberg werden hier massive Fracoperationen mit Hilfe der Wasserfrac-Technik durchgeführt. Aber auch die weiteren Erkenntnisse und Erfahrungen aus diesem Vorhaben hinsichtlich der Bohrlochkomplettierung, geochemischer Risiken (Ausfällungen, Korrosion) sowie konzeptionelle Betrachtungen und Modellrechnungen tragen unmittelbar zur Umsetzung des GeneSys-Demonstrationsprojekts sowie zur Vermeidung von Fehlentscheidungen bei.

8. Ergebnisse Dritter

Die geothermische Nutzung gering permeabler Festgesteine ist auch Gegenstand des europäischen Hot-Dry-Rock-Projekts Soultz, des Projektes in Basel und des Geothermieprojekts Groß Schönebeck des GFZ-Potsdam. Da das GEOZENTRUM an diesen Projekten beteiligt ist bzw. war, fließen die dort gewonnenen Erfahrungen und Ergebnisse unmittelbar in unser Projekt ein. Daneben besteht ein enger Kontakt zu weiteren Geothermie-Projekten wie z.B. Landau und Unterhaching. Zudem beteiligte sich BGR und LIAG an einem europäischen Projekt (ENGINE: Enhanced Geothermal Innovative Network for Europe), dessen Ziel die Vernetzung und der intensive Austausch der europäischen „Geothermie-Community“ ist.

Im Rahmen des vom GFZ Potsdam koordinierten Verbundvorhabens „Erschließung potenzieller geothermischer Speicher im Norddeutschen Becken – Wissenschaftliche Grundlagen und Experimente zur Stimulation von Vulkaniten in der Geothermiebohrung Groß Schönebeck“ (gefördert durch das BMU) wurden Stimulationsverfahren der Erdöl/Erdgas-Industrie und Wasserfracs durchgeführt. Im Laufe der Testserie wurde auch ein über dreitägiger Wasserfrac in Sandsteinen des Rotliegenden durchgeführt, bei dem mit 30 l/s injiziert wurde. Dieser Wasserfrac-Test führte zu einer deutlichen Erhöhung der Produktivität der Bohrung. Der erfolgreiche Test gab letztendlich den Ausschlag für das Abteufen der zweiten Bohrung im Frühjahr/Sommer 2006 in Groß Schönebeck.

Auch in den Geothermieprojekten Landau, Insheim und Speyer wurde das Wasserfrac-Verfahren mit Erfolg in geringpermeablen Sedimentgesteinen (Buntsandstein) eingesetzt. Die Ergebnisse dieser Tests sind uns bekannt und werden mit den Ergebnissen aus der Horstberg Z1 verglichen, um zu generellen Aussagen zu kommen. Über die Veröffentlichung solcher vergleichenden Untersuchungen muss mit den privaten Betreibern dieser Projekte noch verhandelt werden.

Aktuell werden im Oberrheingraben neben den Projekten Speyer und Landau noch weitere privat finanzierte Projekten entwickelt. Aufgrund der privaten Trägerschaft ist es jedoch kaum möglich mit den jeweiligen Projekten einen direkten Erfahrungsaustausch zu pflegen, so dass die dort gemachten Erfahrungen hier nicht berücksichtigt werden können.

Ein sehr wichtiger Schritt wurde mit der Inbetriebnahme des Geothermie-Kraftwerks in Landau gemacht, bei dem Wärme und Strom (ca. 3 MW_{el}) erzeugt werden.

9. Veröffentlichungen - Berichte

Im Rahmen des GeneSys-Projekts entstandene Publikationen und Berichte unter Beteiligung der BGR oder LIAG und Projektpartnern:

HESSHAUS, A. (2008): Ausfällungsprozesse und deren Einfluss auf die geothermische Nutzung der Bohrung Horstberg Z1. - Diplomarbeit; BGR.

HESSHAUS, A. (2009): Hydrogeochemische Untersuchungen an der Bohrung Horstberg Z1. – Bericht LIAG; Hannover.

JUNG, R., ORZOL, J., KEHRER, P. & JATHO, R. (2005): Startschuss für das Demonstrationsvorhaben GeneSys-Hannover. - Geothermische Energie, 47: 12.

JUNG, R., KEHRER, P., ORZOL, J., JATHO, R. (2006): Erdwärmenutzung: Eine Option auch für Deutschland?. - In: Tagungsbericht 2006 -1, DGMK: 17-26; Hamburg.

JUNG, R., ORZOL, J., KEHRER, P., JATHO, R. (2006): Verbundprojekt GeneSys: Vorstudie – Erprobung der Wasserfrac-Technik und des Einsonden-Zweischichtverfahrens für die Direktwärmenutzung aus gering permeablen Sedimentgesteinen. - BGR/LIAG Abschlussbericht zum Vorhaben FKZ 0327112 & 0327116, 70 S.; Hannover.

KEHRER, P., ORZOL, J., JUNG, R. & JATHO, R. (2005): Das GeneSys-Projekt: Erschließungskonzepte zur Erdwärmenutzung aus gering-permeablen Sedimentgesteinen. - Erdöl Erdgas Kohle, 121. Jg., Heft 4.

KEHRER, P., ORZOL, J., JUNG, R., JATHO, R. & JUNKER, R. (2007): The GeneSys-Project - a contribution of GEOZENTRUM Hannover to the development of Enhanced Geothermal Systems (EGS). – Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 158/1: 119-132.

ORZOL, J., JATHO, R., JUNG, R., KEHRER, P. (2006): Das GeneSys-Projekt: Geothermische Energie aus tiefen, dichten Sedimentgesteinen. - bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, 7-8: 6-11.

ORZOL, J., JUNG, R., JATHO, R., KEHRER, P. & TISCHNER, T. (2005): Aktuelles vom GeneSys-Projekt. - Geothermische Energie, 45: 15.

ORZOL, J., JUNG, R., JATHO, R., TISCHNER, T., KEHRER, P. (2005): The GeneSys-Project: Extraction of Geothermal Heat from Tight Sediments. - Proceedings World Geothermal Congress, 24.-29.4.2005; Antalya.

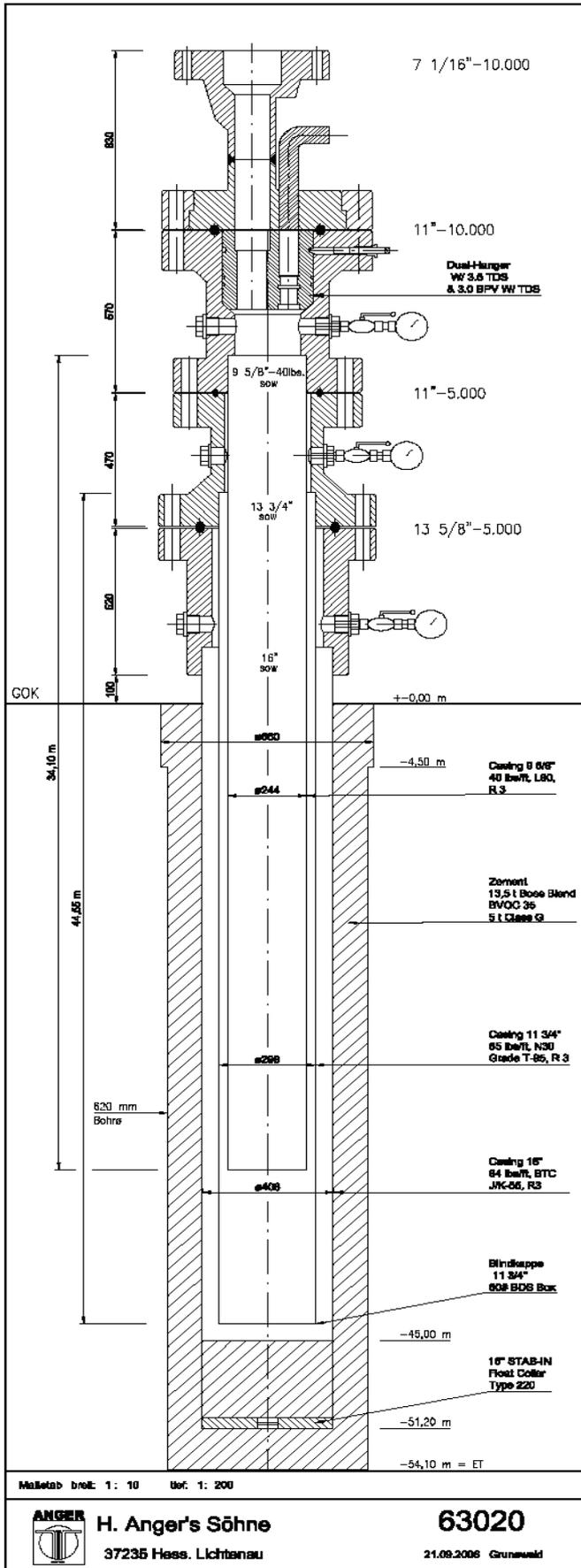
ORZOL, J., JUNG, R., KEHRER, P., JATHO, R., BINOT, F., BUNESS, H., SULZBACHER, H., JUNKER, R., HOFMEISTER, R., EVERS, H. & TISCHNER, T. (2006): Das GeneSys-Projekt des GEOZENTRUMs Hannover – Stand der Arbeiten und Ausblick für die Standorte Hannover und Horstberg. - In: Tagungsband zur 9. Geothermischen Fachtagung der GtV, 15.-17.11.2006; Karlsruhe.

ORZOL, J., JUNG, R., KEHRER, P., JATHO, R., SULZBACHER, H. & TISCHNER, T. (2005): Das GeneSys-Projekt des Geozentrums Hannover - Minderung des Fündigkeitsrisikos durch neue Erschließungskonzepte. - Tagungsband der Geothermischen Jahrestagung: Geothermie und Effizienz, 16.-17.11.2005; Unterschleißheim.

- RENNER, J. (2008): Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Selbststützungsmechanismus von hydraulisch-induzierten Rissen in geschichteten Sedimenten. - Abschlussbericht, Experimentelle Geophysik Institut für Geologie, Mineralogie, und Geophysik, Ruhr-Universität Bochum.
- SULZBACHER, H. & JUNG, R. (2004): Modellprognosen zum Wärmetauscher Horstberg Z1. – GGA Bericht, Archiv-Nr. 0127516: 1-31, Hannover.
- SULZBACHER, H. & JUNG, R. (2010): Numerical Simulation of the Heat Recovery from Hydraulic Fracture by Cyclic Injection and Production. - Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft (eingereicht).
- TISCHNER, T., EVERS, H., HAUSWIRTH, H., JATHO, R., KOSINOWSKI, M. & SULZBACHER, H. (2009): New Concepts for Extracting Geothermal Energy from one Well: The GeneSys-Project. - Proceedings World Geothermal Congress 2010 Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.
- TISCHNER, T., SULZBACHER, H., JUNG, R., ORZOL, J., JATHO, R., KEHRER, P. (2004): GeneSys: Hydraulische und thermische Charakterisierung des künstlich erzeugten Risses und Implikationen für dessen geothermische Nutzung. Tagungsband 8. Geothermische Fachtagung, Landau 10.-12. November 2004, S. 131 - 138.
- WESSLING, S., BACKERS, T., JUNKER, R. & TISCHNER, T. (2008): Stress determination and associated analysis from pressure records during the Detfurth hydraulic stimulation (Horstberg Z1, 2004). – LIAG Bericht, Archiv-Nr. 0127547: 22 S.; Hannover.
- WESSLING, S., JUNKER, R., RUTQVIST, J., SILIN, D., SULZBACHER, H., TISCHNER, T. & TSANG, C.-F. (2009): Pressure analysis of the hydromechanical fracture behaviour in stimulated tight sedimentary geothermal reservoirs. – Geothermics, 38: 211–226.

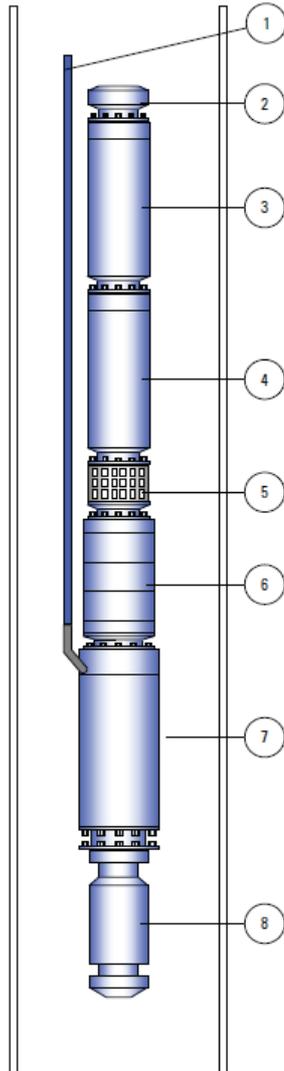
10. Anhänge

- Anlage 1.1: Aufbau und technische Daten der Pumpenkammer der Bohrung Horstberg.
- Anlage 1.2: Aufbau und technische Daten der Unterwassermotorpumpe, installiert in der Pumpenkammer der Bohrung Horstberg.
- Anlage 4.1: Messbericht 1998 der Firma Manfred Krajewski zmp. Messprotokoll der Rohre des Förderstranges aus der Bohrung Horstberg (2008).
- Anlage 4.2: Abnahmeprüfzeugnis der TPS TECHNITUBE Röhrenwerke GmbH über die Werkstoffgüte des Förderstranges, der in die Bohrung Horstberg eingebaut wurde (1995).
- Anlage 4.3: Ergebnisbericht vom Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik (VKTA) Rossendorf e.V. „Präparation und Vermessung von Stahlproben“ des Förderstranges aus der Bohrung Horstberg (2008).
- Anlage 4.4: Messbericht 2274 der Firma Manfred Krajewski zmp. Messprotokoll der erneuten Untersuchung von ausgesuchten Rohren des Förderstranges aus der Bohrung Horstberg (2009).
- Anlage 4.5: Prüfbericht: 1434.1/1: Analyse der Feststoffprobe aus dem Bailer vom Bohrlochtiefsten der Geothermiebohrung Horstberg Z1; Ergebnisbericht vom Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik (VKTA) Rossendorf e.V. vom 02.04.2004.
- Anlage 4.6: Prüfbericht 1855.1/1: Analyse der Ablagerungen auf einem T-Stück aus der Bohrung Horstberg Z1; Ergebnisbericht vom Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik (VKTA) Rossendorf e.V. vom 22.02.2008.
- Anlage 4.7: Prüfbericht 1855.2/1: Analyse von Wasserproben aus der Bohrung Horstberg Z1, Wasserprobe war ein Gemisch aus Detfurth- und Sollingformationswasser; Ergebnisbericht vom Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik (VKTA) Rossendorf e.V. vom 26.05.2008.



Anlage 1.1: Schema der Pumpenkammer für die Unterwassermotorpumpe in Horstberg

HOTLINE ESP BGR GERMANY



ITEM	SPECIFICATIONS
1	CABLE REDALEAD SIZE#4 FCE HOTLINE #4KELB - 4/1(ELB)M4F 540SER 330FT BTYPE 4KV MONEL ARMOR APPX DIMENSION: 0.525 x 1.325 IN APPX WEIGHT: 300 LBS
2	BOLT-ON DISCHARGE HEAD 540 SER,PUMP 3 1/2" OD 8RD EUE REDALLOY HOTLINE SPECS 350 LENGTH: 0.8 FT. MAX OD: 5.14 IN APPX WEIGHT: 21 LBS
3	PUMP SN 5000 CR-CT 63 STG 538/540 110 CS BTHD, 1.00 INCONEL INCONEL, MONEL-TRIM,CHEMRAZ, ARZ, SS HOTLINE 2 LENGTH: 16.2 FT MAX OD: 5.38 IN APPX WEIGHT: 731 LBS
4	PUMP SN 5000 CR-CT 63 STG 538/540 110 CS BTHD, 1.00 INCONEL, MONEL-TRIM,CHEMRAZ, ARZ, SS HOTLINE 2 LENGTH: 16.2 FT. MAX OD: 5.38 IN APPX WEIGHT: 731 LBS
5	BOLT-ON INTAKE HOTLINE 540/540 SER, HOTLINE 1,18 INCONEL SHAFT, REDALLOY MONEL-TRIM, AFLAS, ARZ-ZS LENGTH: 1.2 FT. MAX OD: 5.38 IN APPX WEIGHT: 50 LBS
6	PROTECTOR L SBPB KTB/HL 540/540 SER - MONEL-TRIM 1,18" INC SHAFT, AFLAS, 7 FLUID, HOTLINE 350 LENGTH 8.9 FT. MAX OD: 5.14 IN APPX WEIGHT: 220 LBS
7	MOTOR 562, 13, DOMINATOR SINGLE 232 HP / 50HZ / 2004V / 67A HX-S, STD, HD, HOTLINE 350, CS XD AS, SINGLE WC : F133 M-TRM LENGTH: 26.8 FT MAX OD: 5.62 IN APPX WEIGHT: 1840 LBS
8	MULTISENSOR ASSY TYPE0 DT150°C LENGTH: 2 FT MAX OD: 4.5 IN APPX WEIGHT: 40 LBS

Anlage 1.2: Aufbau und technische Daten der Unterwassermotorpumpe in Horstberg

Auftrags-Nr. 201-4500047011

Rechnungs-Nr. _____

MESSBERICHT 1998

STEIGROHRE

Datum der Messung

GEBRAUCHT

11. - 13. 12. 08

Auftraggeber Bundesanstalt für Geowissenschaften (BGR)

Arbeitsplatz Nienhagen Anfahrt von ✓

Arbeitstrupp Hilfs Kienschert Konitz

Art der Untersuchung Stangen Enden

Schlüssel Nr. 400 ZMP LOG Untersuchung 3 1/2" 434

Schlüssel Nr. 410 Gewindekontrolle 3 1/2" TDS 367

Schlüssel Nr. 430 API Kontrollenmessung 3 1/2" 367

Schlüssel Nr. 862 Steigrohre innen reinigen 3 1/2" 434

Material 850 Kappen reinigen 734 Stück

Rohrart Steigrohre

Rohr ø 3 1/2"

Wandstärke 6,45 mm

Gütegrad _____

Gewindeverbindung TDS 3 1/2"

Rohrgewicht Lbs/ft 9,20

Messergebnisse Rohrkörper

Für die Rohrkenzeichnung bitte Rückseite beachten

Gruppe Nr. 2 367 Rohre Zum unbeschränkten Einsatz empfohlen

Nr. 3 _____ Rohre Für bedingten Einsatz empfohlen Zustandsbericht

Fehler	Korrosion	Pumpgestänge-Verschleiß	gleichm. Wandstärkenverring.	mechanische Beschädigung.			
Anzahl d. Stangen							

Nr. 4 67 Rohre Nicht für den Wiedereinsatz empfohlen Zustandsbericht

Fehler	Korrosion	Pumpgestänge-Verschleiß	gleichm. wandstärkenverring.	mechanische Beschädigung.	Ein-schnürungen	Abwinklung	
Anzahl d. Stangen	x		x	x			

Nr. 5 _____ Rohre Nicht für eine Weiterverwendung empfohlen Zustandsbericht

Fehler	Korrosion	Pumpgestänge-Verschleiß	gleichm. wandstärkenverring.	mechanische Beschädigung.	Ein-schnürungen	Abknickungen	Risse
Anzahl d. Stangen							

434

Gesamtzahl der gemessenen Rohre

Gruppe Nr. 2

Gruppe Nr. 3

Ergebnisse der Gewindeüberprüfung

<u>353</u>	Rohre	Muffe	einsatzfähig		Rohre	Muffe	einsatzfähig
<u>353</u>	Rohre	Zapfen	einsatzfähig		Rohre	Zapfen	einsatzfähig
<u>11</u>	Rohre	Muffe	nicht einsatzfähig		Rohre	Muffe	nicht einsatzfähig
<u>6</u>	Rohre	Zapfen	nicht einsatzfähig		Rohre	Zapfen	nicht einsatzfähig

Bemerkungen:

<u>367</u>	Gruppe 2:	0-10 % Wandstärkenverringung	gelb
	Gruppe 3:	% Wandstärkenverringung	✓
<u>67</u>	Gruppe 4:	über 10 % Wandstärkenverringung	rot
	Gruppe 5:	% Wandstärkenverringung	

ZMP Inspektor JMS

Datum 15. 12. 2008

Auftraggeber Jalco

Abnahmeprüfzeugnis Test-Certificate

(gem./acc. to DIN 50 049 - Bescheinigung
über Werkstoffprüfungen - 3.1.B)

TPS TECHNITUBE

Postbox 1360 · D-5568 Daun · (F.R.-Germany)

Tel.: 06592/712-0 · Tlx.: 4729937 · Fax.: 06592/1305 · Teletex: 659294

Besteller: Abnahmeprüfzeugnis gem. EN10204
Customer: Wintershall AG

Bestell-Nr.:
Order-No. 20/481/45004026

Prüfgegenstand: Tubing Cross Overs
Inspected Article

Werks-Nr.: API-A-1.623
Job-No.

Prüfbedingungen: API 5 CT / TPS Spezifikation
Requirements

Werkstoff: C 95
Material Grade

entsprechend: API 5 CT
according to

Ausgabe: 1995
Edition

Kennzeichnung: gem. Norm
Marking

Zeichen d. Lieferwerks:
Works Brand Mark



Umfang der Lieferung: Tubing Cross Overs, beidseitig phosphatiert, Gewindeschützer,
Extent of delivery: API Gewindefett und aussen korrosionsgeschützt.

Pos.-Nr. Item No.	Stückzahl Pieces	Abmessung mm Dimension mm	Menge · Quantity		Bemerkungen Remarks
			m	kg	
020	4	Cross Overs 3 1/2" x 9,3 lbs/ft TS-8 Muffe x 3 1/2" x 9,2 lbs/ft TDS Zapfen			
030	3	3 1/2" x 9,3 lbs/ft TS-8 Zapfen x 3 1/2" x 9,2 lbs/ft TDS Zapfen			

Pos. Item	Schmelze-Nr. Heat No.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo		Probe Nr.
	Cross Overs 565621	0,32	0,26	0,77	0,012	0,003	1,00	Ni 0,12	Cu 0,24	4100

Ergebnis der Prüfungen: siehe Anlage 97/2288/02/AC
Result of Inspection: see Enclosure

Die Rohre entsprechen den oben angeführten Lieferbedingungen.
The tubes conform to the above mentioned Specification.

Reg. Nr. 587.97
Best. Nr. 481/45004026
WEM
Mat. Nr. Pos 3/3 St.

TPS TECHNITUBE
Werkstoffverständige
RÖHRENWERKE GmbH

Industriegebiet
54550 Daun
Germany

Daun, den 29.08.1997

Anlagen: 1) Ergebnis der Prüfungen.

**ERGEBNIS
DER PRÜFUNGEN
TEST RESULT**

TPS TECHNITUBE
RÖHRENWERKE · GMBH
Postbox 1360 · D-5568 Daun · (F.R.-Germany)
Tel.: 06592/712-0 · Tlx.: 4729937 · Fax.: 06592/1305 · Teletex: 659294

1. Besichtigung und Ausmessung: o.B.
Dimensional & Visual Inspection
2. Wasserdruckprüfung: 690 Bar
Hydraulic Pressure Test
3. Dornprobe: o.B.
Drift-Test
4. Technologische Prüfung:
Technological Test
- Ringfaltversuch: Ringaufdornversuch
Flattening Test Drift-Expanding Test
- Bördelversuch: Bördelwinkel:
Flange Test Angle
- Aufweitversuch:
Flaring Test
5. Zerstörungsfreie Prüfungen: Die Cross Overs sind MPI geprüft: o.B.
Non-Destructive Inspection
6. Zugversuch: siehe Tafel
Tensile Test

Anlage 1 Blatt 1 von 1
Enclosure Sheet of

Prüf-Nr.: 97/2288/02/AC
Cert.-No. API-A-1.623

Probe Nr. Specimen-No.	Abmessungen des Probestabes Dim. of Specimen	Streckgrenze Yield point R _p	Zugfestigkeit Tensile Strength R _m	Dehnung Elongation Lo = 2"	Kerbschlag- arbeit Impact Test	Bemerkungen Remarks
	mm	N/mm ²	N/mm ²	%	J	
	Anforderungen Requirements					
4100	<u>Cross Overs</u>	655 -758 701	min. 724 810	min. 13,5 21		Schmelz Nr. 565621

29.08.1997

Daun, _____

TPS TECHNITUBE
RÖHRENWERKE · GMBH
Works Inspector
Industriegebiet
54550 Daun
Germany

Abnahmeprüfzeugnis Test-Certificate

(gem./acc. to DIN 50 049 - Bescheinigung
über Werkstoffprüfungen - 3.1.B)

TPS TECHNITUBE

RÖHRENWERKE · GMBH
Postbox 1360 · D-5568 Daun · (F.R.-Germany)
Tel.: 06592/712-0 · Tlx.: 4729937 · Fax.: 06592/1305 · Teletex: 659294

Besteller: Abnahmeprüfzeugnis gem. EN10204
Customer: Wintershall AG

Bestell-Nr.:
Order-No. 20/481/45004026

Prüfgegenstand: Tubing Cross Overs
Inspected Article

Werks-Nr.: API-A-1.623
Job-No.

Prüfbedingungen: API 5 CT / TPS Spezifikation
Requirements

Werkstoff: C 95
Material Grade

entsprechend: API 5 CT
according to

Ausgabe: 1995
Edition

Kennzeichnung: gem. Norm
Marking

Zeichen d. Lieferwerks:
Works Brand Mark



Umfang der Lieferung: Tubing Cross Overs, beidseitig phosphatiert, Gewindeschützer,
Extent of delivery: API Gewindefett und aussen korrosionsgeschützt.

Pos.-Nr. Item No.	Stückzahl Pieces	Abmessung mm Dimension mm	Menge · Quantity		Bemerkungen Remarks
			m	kg	
020	4	<u>Cross Overs</u> 3 1/2" x 9,3 lbs/ft TS-8 Muffe x 3 1/2" x 9,2 lbs/ft TDS Zapfen			
030	3	3 1/2" x 9,3 lbs/ft TS-8 Zapfen x 3 1/2" x 9,2 lbs/ft TDS Zapfen			

Pos. Item	Schmelze-Nr. Heat No.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo		Probe Nr.
	<u>Cross Overs</u> 565621	0,32	0,26	0,77	0,012	0,003	1,00	Ni 0,12	Cu 0,24	4100

Ergebnis der Prüfungen: siehe Anlage 97/2288/02/AC
Result of Inspection: see Enclosure

Die Rohre entsprechen den oben angeführten Lieferbedingungen.
The tubes conform to the above mentioned Specification.

Reg. Nr. 586.97
Best. Nr. 481/45004026
WEM
Mat. Nr. Pos 2 / 14jt

TPS TECHNITUBE
Der Werkssachverständige
RÖHRENWERKE GmbH

Industriegebiet
54550 Daun
Germany

Daun, den 29.08.1997

Anlagen: 1) Ergebnis der Prüfungen.

**ERGEBNIS
DER PRÜFUNGEN
TEST RESULT**

TPS TECHNITUBE
RÖHRENWERKE · GMBH
Postbox 1360 · D-5568 Daun · (F.R.-Germany)
Tel.: 06592/712-0 · Tlx.: 4729937 · Fax.: 06592/1305 · Teletex: 659294

1. Besichtigung und Ausmessung: o.B. Anlage 1 Blatt 1 von 1
Dimensional & Visual Inspection Enclosure Sheet of
2. Wasserdruckprüfung: 690 Bar Prüf-Nr.: 97/2288/02/AC
Hydraulic Pressure Test Cert.-No. API-A-1.623
3. Dornprobe: o.B.
Drift-Test
4. Technologische Prüfung: Bördelversuch: Bördelwinkel:
Technological Test Flange Test Angle
Ringfaltversuch: Flattening Test
Ringaufdornversuch Flaring Test
Drift-Expanding Test
5. Zerstörungsfreie Prüfungen: Die Cross Overs sind MPI geprüft: o.B.
Non-Destructive Inspection
6. Zugversuch: siehe Tafel
Tensile Test

Probe Nr. Specimen-No.	Abmessungen des Probestabes Dim. of Specimen	Streckgrenze Yield point R _p	Zugfestigkeit Tensile Strength R _m	Dehnung Elongation Lo = 2"	Kerbschlag- arbeit Impact Test	Bemerkungen Remarks
	mm	N/mm ²	N/mm ²	%	J	
	Anforderungen Requirements					
4100	<u>Cross Overs</u>	655 -758 701	min. 724 810	min. 13,5 21		Schmelz Nr. 565621

29.08.1997

Daun, _____

TPS TECHNITUBE
Der Werkstoffverantwortliche
Works Inspector
Industriegebiet
54550 Daun
Germany

Abnahmeprüfzeugnis Test-Certificate

(gem./acc. to DIN 50 049 - Bescheinigung
über Werkstoffprüfungen - 3.1.B)

TPS TECHNITUBE

RÖHRENWERKE · GMBH
Postbox 1360 · D-5568 Daun · (F.R.-Germany)
Tel.: 06592/712-0 · Tlx.: 4729937 · Fax.: 06592/1305 · Teletex: 659294

Besteller: Abnahmeprüfzeugnis gem. EN10204
Customer: Wintershall AG

Bestell-Nr.:
Order-No. 20/481/45004026

Prüfgegenstand: TPS MULTISEAL Tubing
Inspected Article

Werks-Nr.: API-A-1.623
Job-No.

Prüfbedingungen: API 5 CT / TPS Spezifikation
Requirements

Werkstoff: C 95
Material Grade

entsprechend: API 5 CT
according to

Ausgabe: 1995
Edition

Kennzeichnung: gem. Norm
Marking

Zeichen d. Lieferwerks:
Works Brand Mark



Umfang der Lieferung: TPS MULTISEAL TS 8 Tubing mit Integral verbinder, beidseitig
Extent of delivery phosphatiert, Gewindeschützer, API Gewindefett und aussen
korrosionsgeschützt.

Pos.-Nr. Item No.	Stückzahl Pieces	Abmessung mm Dimension mm	Menge · Quantity		Bemerkungen Remarks
			m	kg	
	297	Tubing 3 1/2" x 9,3 lbs/ft 88,9 x 6,45 mm. Range 2	2855,64	40840	

Pos. Item	Schmelze-Nr. Heat No.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo		Probe Nr.
	Tubing							Ni	Cu	
	568819	0,31	0,25	0,76	0,013	0,003	1,01	0,09	0,20	8895
	568820	0,33	0,24	0,75	0,012	0,002	0,99	0,09	0,21	8896
	568821	0,31	0,25	0,74	0,016	0,002	0,99	0,09	0,24	8897

Ergebnis der Prüfungen: siehe Anlage 97/2288/01/AC
Result of inspection see Enclosure

Die Rohre entsprechen den oben angeführten Lieferbedingungen.
The tubes conform to the above mentioned Specification.

Reg. Nr. 585.97
Best. Nr. 481/45004026
WEM
Mat. Nr. 297H/2855,64m

TPS TECHNITUBE
Röhrenwerkstätten
RÖHRENWERKE GmbH

Industriegebiet
54550 Daun
Germany

Daun, den 29.08.1997

Anlagen: 1) Ergebnis der Prüfungen.

ERGEBNIS DER PRÜFUNGEN TEST RESULT

TPS TECHNITUBE
RÖHRENWERKE · GMBH
Postbox 1360 · D-5568 Daun · (F.R.-Germany)
Tel.: 06592/712-0 · Tlx.: 4729937 · Fax.: 06592/1305 · Teletex: 659294

- | | | | | | | | |
|--|---|---------------------------------|------------------------------|------------------------|---|-----------|---|
| 1. Besichtigung und Ausmessung:
Dimensional & Visual Inspection | o.B. | Anlage
Enclosure | 1 | Blatt
Sheet | 1 | von
of | 1 |
| 2. Wasserdruckprüfung:
Hydraulic Pressure Test | 690 Bar | Prüf-Nr.:
Cert.-No. | 97/2288/01/AC
API-A-1.623 | | | | |
| 3. Dornprobe:
Drift-Test | o.B. | | | | | | |
| 4. Technologische Prüfung:
Technological Test | | Bördelversuch:
Flange Test | | Bördelwinkel:
Angle | | | |
| Ringfaltversuch:
Flattening Test | | Aufweitversuch:
Flaring Test | | | | | |
| Ringaufdornversuch
Drift-Expanding Test | | | | | | | |
| 5. Zerstörungsfreie Prüfungen:
Non-Destructive Inspection | Die Rohre sind zerstörungsfrei geprüft: o.B.
Die Upsetenden sind MPI geprüft: o.B. | | | | | | |
| 6. Zugversuch: siehe Tafel
Tensile Test | | | | | | | |

Probe Nr. Specimen-No.	Abmessungen des Probestabes Dim. of Specimen	Streckgrenze Yield point R _p	Zugfestigkeit Tensile Strength R _m	Dehnung Elongation Lo = 2"	Kerbschlag- arbeit Impact Test	Bemerkungen Remarks
	mm	N/mm ²	N/mm ²	%	J	
	Anforderungen Requirements					
	<u>Tubing</u>	655 -758	min. 724	min. 13,5		Schmelz Nr.
8895		655	791	22		568819
8896		668	787	22		568820
8897		703	833	22		568821

FORM-No.: EDP1/OCTG-09/88

29.08.1997

Daun, _____

TPS TECHNITUBE
RÖHRENWERKE GmbH
Werkstoffprüfingenieur
Works Inspector
Industriegebiet
54550 Daun
Germany

Ergebnisbericht

„Präparation und Vermessung von Stahlproben“

Auftraggeber: Leibniz Institut für angewandte Geophysik (LIAG)
Stilleweg 2
30655 Hannover

Auftragnehmer: Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik
Rossendorf e.V.
PF 510 119
01314 Dresden

Leistungszeitraum: 29.05. – 16.06.2008

Bearbeiter: Dipl.- Chem. H. – J. Friedrich
Dipl.-Ing. M. Roßner (FZD, Metallografie)

1 Veranlassung und Arbeitsumfang

Gemäß VKTA-Leistungsangebot Nr. 3.510.2077-2009-1 vom 15.05.2009 waren für den Auftraggeber (AG) folgende Leistungen zu erbringen:

- (1) Fertigung von 10 Stck. Messproben für die REM-Untersuchung beim AG und Ermittlung der mittleren und maximalen Abtragstiefe an mindestens 5 Materialproben
- (2) Durchführung einer metallografischen Untersuchung an zwei Materialproben

Nach Information des AG befanden sich die Rohre, aus denen die Proben gewonnen wurden, fünf Jahre lang in der Bohrung Horstberg im Einsatz und wurden anschließend übertage zwischengelagert. Der konkrete Werkstofftyp ist dem Auftragnehmer nicht bekannt. Es wird vermutet, dass es sich um einen un- oder niedrig legierten Stahl gemäß API 5 CT handelt.

Die Bearbeitung begann unmittelbar nach Auftragseingang am 29.05.2009 und wurde am 16.06.2009 abgeschlossen.

2. Ergebnisse

2.1 Fertigung Messproben und Ermittlung der Abtragstiefe

Probenfertigung

Die 10 Proben für die REM-Untersuchungen wurden durch Kaltsägen aus dem übergebenen Probenmaterial an den vom AG markierten Stellen herausgetrennt, die Plan- bzw. Auflageflächen überfräst und sodann jeweils zwei orthogonal zueinander angeordnete Seitenflächen entlang der Korrosionsnarben bis zur Körnung 2000 mit SiC-Papier nass geschliffen. Die anschließende Reinigung erfolgte in deionisiertem Wasser (18 M Ω) und in n-Heptan jeweils im Ultraschallbad. Die gefertigten Proben wurden am 10.06.2009 an den AG zurückgeschickt (Postausgang).

Ermittlung der Abtragstiefe

Die zu bewertenden Proben wiesen deutliche Anzeichen von Mulden- und Lochfraßkorrosion auf, wobei die Angriffsstellen überwiegend, jedoch keinesfalls ausschließlich, bänderförmig koaxial angeordnet waren. Einzelne Probensegmente wiesen auch eine stochastische Verteilung auf. An 6 der 9 übergebenen Probensegmente waren an der Rohrrinnenwand neben den Spuren verstärkter lokaler Korrosionsprozesse auch Anzeichen für einen gleichmäßigen korrosiven Angriff feststellbar, was die Hypothese des AG in Bezug auf eine Säurekorrosion stützen würde. Das Gesamtbild spricht jedoch eher für eine Überlagerung mehrerer Korrosionsarten. An weiteren 3 Proben war eine erhebliche Scalebildung mit Unterrostung sowohl an der Innen- als auch an der Außenwandung feststellbar. Allerdings ist in diesem Fall nicht zweifelsfrei abzugrenzen, in welchem Umfang die Lagerung des Materials unter atmosphärischen Bedingungen (Sauerstoff, Luftfeuchte, Niederschlagswasser) zur Bildung der Korrosionsnarben beigetragen hat.

Die Ermittlung der Abtragstiefe erfolgte vorzugsweise entlang der Transsekten der Korrosionsnarben an insgesamt 6 Einzelproben. Dabei wurden -soweit im Einzelfall möglich- die Parameter Wanddicke, Loch-/Muldentiefe, Loch-/Muldenfläche, Fläche bezogen auf die untersuchte Probenoberfläche sowie jeweils Standardabweichung, Maximalwert und Median ermittelt. Die Ermittlung der Flächenanteile erfolgte bei ca. 10-facher Vergrößerung unter

einem Mikroskop, für die Ermittlung der Lochtiefe wurde eine Mikrometerschraube mit speziellen Messspitzen verwendet. Dabei wurden jeweils 10 - 20 Korrosionsmulden/-Löcher je Probe einzeln ausgemessen. Die Ermittlung der Wanddicke als Bezugspunkt für die Ermittlung der Eindringtiefe war mit Unsicherheiten verbunden, da die Rohrsegmente bereits fertigungsbedingt eine ungleichförmige Oberfläche aufwiesen. Ultraschallmessungen zu Wanddickenbestimmung erwiesen sich als zu unempfindlich.

Die Ermittlung der Dicke der Scales erfolgte auf ähnliche Weise an drei weiteren Proben.

Die Ergebnisse sind in den Tabellen 1 und 2 zusammengefasst.

Tabelle 1: Auswertung der Messungen / Eindringtiefe

Parameter	Probennummer					
	1	2	3	4*	5	6*
ausgewertete Fläche mm ²	400	200	900	400	770	800
Anzahl Mulden/Löcher	17	31	16	14	10	20
Fläche mm ² , gesamt	40,8	19,2	12,82	40,7	28,8	89,6
Anteil %	10,0	9,60	1,43	10,2	3,73	11,2
mittlerer Querschnitt mm ²	2,4	0,62	0,80	0,37	2,87	4,48
Standardabweichung mm ²	1,09	0,33	0,33	0,30	2,80	0,19
maximale Größe mm ²	5,34	1,72	1,33	1,43	9,30	20,5
Median mm ²	2,30	0,66	0,78	0,57	1,37	0,40
Wanddicke mm	6,43	6,43	6,41	6,70	6,33	6,54
mittlere Tiefe mm	0,13	0,09	0,16	0,06	0,28	0,10
Standardabweichung mm	0,06	0,05	0,08	0,04	0,10	0,05
maximale Tiefe mm	0,24	0,23	0,30	0,15	0,40	0,26
Median mm	0,13	0,09	0,16	0,05	0,28	0,09
Korrosionsrate mm/a	0,026	0,018	0,032	0,012	0,056	0,020
maximale Korrosionsrate mm/a	0,048	0,046	0,06	0,03	0,08	0,052

*einzelne große längliche Korrosionsnarben blieben bei Ermittlung von Mittelwert, Standardabweichung und Median unberücksichtigt. Unter statistischen Gesichtspunkten wurden sie wie Ausreißer behandelt.

Aus den Messungen ergibt sich eine mittlere Eindringrate/Korrosionsrate im Bereich von 0,02 – 0,03 mm/a, wenn eine Einsatzdauer von 5 Jahren zu Grunde gelegt wird und die Rohrrinnenwand vor dem Einsatz glatt war. Die maximale Korrosionsrate beläuft sich auf 0,05 – 0,08 mm/a, so dass nach einer Einsatzdauer von ca. 12 Jahren ein Materialabtrag

von 1 mm eintreten würde, gleiche Expositionsbedingungen und gleiche Korrosionsgeschwindigkeit vorausgesetzt.

Tabelle 2: Auswertung der Messungen / Scaledicke

Parameter	Probennummer*		
	7	9	10
Zahl der Messpunkte	8	8	10
mittlere Wanddicke vor dem Schleifen mm	6,84	6,86	7,10
mittlere Wanddicke nach dem Schleifen mm	6,52	6,37	6,48
Dicke des Belags mm	0,32	0,29	0,61

*Probe 8 nicht vorhanden

Nach etwa 20 - 25 Jahren Einsatzzeit könnte die Schwächung der Wanddicke ein Ausmaß erreicht haben, das sich auf die mechanische Integrität der Verrohrung auswirken kann. An Schwächungszonen (Gewinde, Bearbeitungsriefen) kann es bereits früher zu Schäden kommen. Ist der Werkstoff infolge Loch- oder Muldenkorrosion erst einmal perforiert (was im Einzelfall Untertage nicht unmittelbar zu einem völligen Verlust der Gebrauchseigenschaften führen wird), kann ein beidseitiger Angriff mit wesentlich rascherem Fortschreiten der Korrosion und anschließendem Bauteilversagen erfolgen.

Die Scalebildung würde (konstante Bildungsraten vorausgesetzt) innerhalb von 20 Jahren Einwirkungsdauer zu einem Querschnittsverlust von 2,3 % führen (5,5“-Rohr), was gegenüber der möglichen Schädigung durch Korrosion weit weniger bedenklich erscheint.

2.2 Metallografische Untersuchung

Die metallografische Untersuchung an zwei Werkstoffproben aus den Segmenten 1 und 6 wurde nach Vorgaben des Auftragnehmers vom Institut für Sicherheitsforschung des Forschungszentrums Dresden-Rossendorf (FZD) durchgeführt. Ziel dabei war es festzustellen, ob die häufig zu beobachtende Vorzugsorientierung der Korrosionsmulden entlang der Fließrichtung in einem Zusammenhang mit der Orientierung des Gefüges steht.

Die Proben wurden bis zur Körnung 1200 mit SiC-Schleifpapier und anschließend in Diamantsuspension bis zur Körnung 1 µm geschliffen. Das Ätzen des Gefüges erfolgte in 3 %iger alkoholischer HNO₃. Neben der Gefügeuntersuchung wurden auch Härtemessungen und eine EDX-Analyse durchgeführt. Laut dieser Analyse handelt es sich um einen Stahl mit 1,5 % Mn-Gehalt, was der Spezifikation API 5 L X-60 nahe kommen würde.

Die Gefügestruktur ist als Zwischenstufengefüge anzusehen und wies eine Härte von 250 HV10 auf. Beide Proben wiesen Seigerungsstreifen in Walzrichtung auf, die sich zur Rohrrinnenwand hin verdichten. In diesen Bereichen war auch eine Randentkohlung, wahrscheinlich mit verursacht durch korrosionsbedingten Gefügezerfall, nachweisbar. Die Härte lag in diesen Bereichen bei 200 HV10 (HV-Vickers-Härte).

Wie in Abbildung 1 und 2 (Probe 2) bzw. 3 und 4 (Probe 6) erkennbar ist, weisen die Seigerungszone im Gefüge eine lamellenartige Struktur parallel zur Walzrichtung/Durchflussrichtung auf (dunkle bandförmige Strukturen). Das Mikrogefüge zeigt innerhalb der Lamellen eine im Wesentlichen gleichförmige Ausrichtung der Kristallite ohne erkennbare Vorzugsrichtung. Unmittelbar entlang der Seigerungen ist jedoch eine Vorzugsorientierung quer zu den Lamellen zu beobachten, was zu einer Häufung energetisch exponierter Korngrenzen führt. Diese Zonen sind dann für Korrosion stärker anfällig als das umgebende Material und daher bevorzugter Ausgangspunkt für Korrosionsprozesse. Inwieweit andere Faktoren, wie hydrodynamische Effekte (Kavitation) zur Ausprägung des Schadensbildes beigetragen haben, kann weder sicher ausgeschlossen noch eindeutig belegt werden.

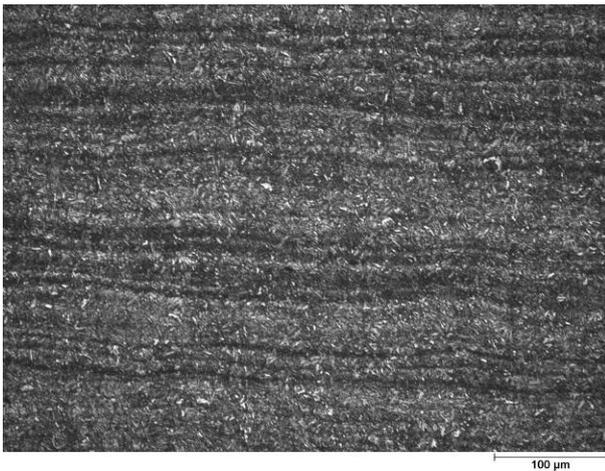


Abbildung 1:
Lamellenartige Seigerungen
Probe 2

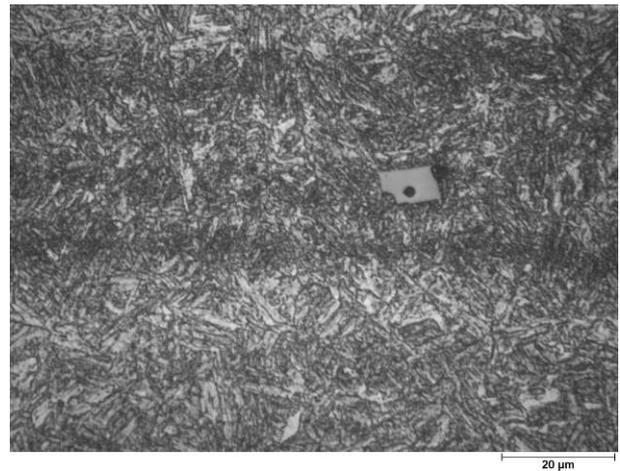


Abbildung 2:
Mikrogefüge Probe 2

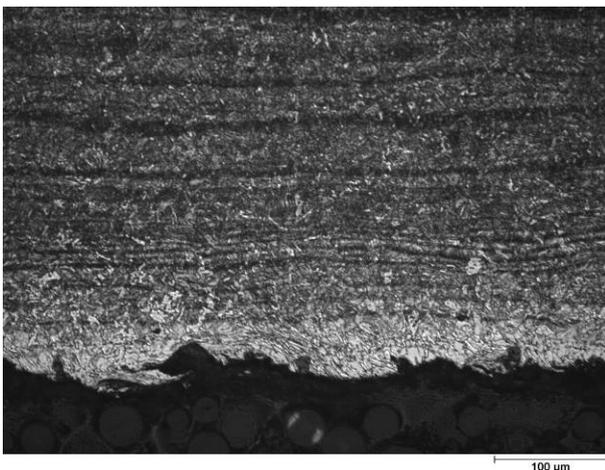


Abbildung 3:
Lamellenartige Seigerungen
Probe 6

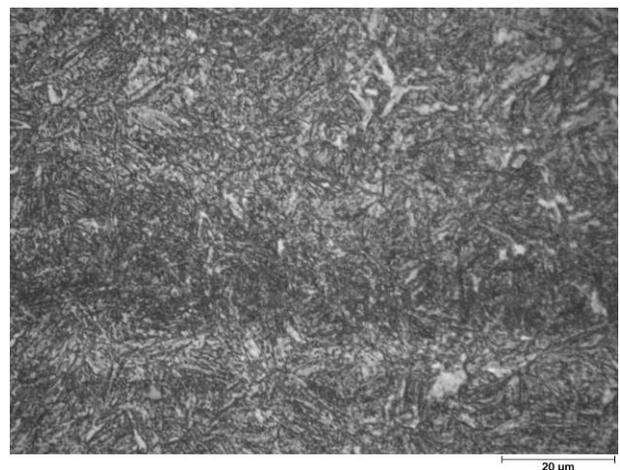


Abbildung 4:
Mikrogefüge Probe 6

In der folgenden Abbildung 5 ist zu erkennen, dass die Korrosionsnarben in ihrem Tiefenprofil annähernd der Ausrichtung der Seigerungszonen folgen.

Es wird empfohlen, die Mess- und Analysenergebnisse durch weitere Untersuchungen abzusichern.

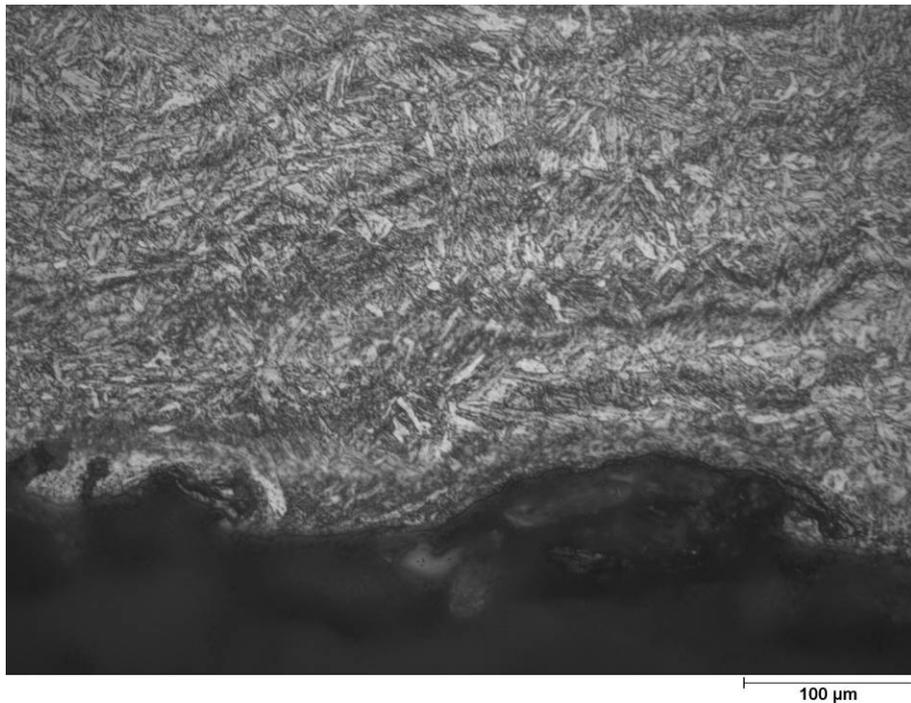


Abbildung 5: Verlauf von Korrosionsmulden und Seigerungen, Probe 2

Auftrags-Nr. 201-4500049098

Rechnungs-Nr. 165/09

MESSBERICHT 2274 *

**STEIGROHRE
GEBRAUCHT**

Datum der Messung
26.03.2009

Auftraggeber GBR

Arbeitsplatz NIENHAGEN-ZMP Anfahrt von /

Arbeitstrupp Hilfs Nienschicht Kowitz

Art der Untersuchung

Stangen Enden

Schlüssel Nr. 400 ZMP LOG Untersuchung 3/4" Tab. 18

Schlüssel Nr. 877 Steigrohre aussen reinigen 10

Schlüssel Nr. 160 - An 5 Steigrohren fiktivehafte

Schlüssel Nr. stellen austrennen 1 Prüfer 5 Stunden

Material

Rohrart Steigrohre

Rohr ø 3/4"

Wandstärke 6,45mm

Gütegrad C 95

Gewindeverbindung TDS

Rohrgewicht Lbs/ft 920

Messergebnisse Rohrkörper

Für die Rohrkennzeichnung bitte Rückseite beachten

Gruppe

Nr. 2 Rohre Zum unbeschränkten Einsatz empfohlen

Nr. 3 Rohre Für bedingten Einsatz empfohlen Zustandsbericht

Fehler	Korrosion	Pumpgestänge-Verschleiß	gleichm. Wandstärkenverring.	mechanische Beschädigung.			
Anzahl d. Stangen							

Nr. 4 18 Rohre Nicht für den Wiedereinsatz empfohlen Zustandsbericht

Fehler	Korrosion	Pumpgestänge-Verschleiß	gleichm. wandstärkenverring.	mechanische Beschädigung.	Ein-schnürungen	Abwinklung	
Anzahl d. Stangen	<u>18</u>						

Nr. 5 Rohre Nicht für eine Weiterverwendung empfohlen Zustandsbericht

Fehler	Korrosion	Pumpgestänge-Verschleiß	gleichm. wandstärkenverring.	mechanische Beschädigung.	Ein-schnürungen	Abknickungen	Risse
Anzahl d. Stangen							

18

Gesamtzahl der gemessenen Rohre

Gruppe Nr. 2

Gruppe Nr. 3

Ergebnisse der Gewindeüberprüfung

<p>_____ Rohre Muffe einsetzfähig</p> <p>_____ Rohre Zapfen einsetzfähig</p> <p>_____ Rohre Muffe nicht einsetzfähig</p> <p>_____ Rohre Zapfen nicht einsetzfähig</p>	<p>_____ Rohre Muffe einsetzfähig</p> <p>_____ Rohre Zapfen einsetzfähig</p> <p>_____ Rohre Muffe nicht einsetzfähig</p> <p>_____ Rohre Zapfen nicht einsetzfähig</p>
---	---

Bemerkungen:

Gruppe 2:	% Wandstärkenverringung	
Gruppe 3:	% Wandstärkenverringung	
<u>18 x</u> Gruppe 4:	<u>40 bis 100</u> % Wandstärkenverringung	<u>tot</u>
Gruppe 5:	% Wandstärkenverringung	

ZMP Inspektor [Signature]

Datum 26.03.2009

Auftraggeber _____

VKTA Rossendorf e. V. FB Analytik Labor für Umwelt- und Radionuklidanalytik	Prüfbericht	Seite	1 von 4
		Revision	0
	1434.1 / 1	vom	02.04.2004

Anschrift des Labors: Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e.V.
 Labor für Umwelt- und Radionuklidanalytik
 PF 510119, 01314 Dresden
 Bautzner Landstraße 128 (B6), 01328 Dresden
 Tel.: 0351 / 260 3489, Fax: 0351 / 260 3190

Auftraggeber: GGA
 Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben
 PF 51 01 53
 D-30631 Hannover

Auftragsnummer: ohne

Auftragsdatum: 22.03.2004

Auftragsgegenstand: Probe aus Bohrung Horstberg Z1

Probenzahl: 1

Probenahme durch: AG

Probeneingang: 24.03.2004

Prüfzeitraum: 24.03.2004 – 01.04.2004

Analysenverfahren: γ -Spektrometrie

Bemerkungen: keine

freigegeben:

Name: Köhler
Funktion: Abteilungsleiter
Unterschrift:

K. Köhler

*Feststoffprobe aus
 Bailer von Bohrlöch-
 sumpf !*

¹⁾ nicht akkreditiertes Verfahren ²⁾ vom Nachauftragnehmer durchgeführt

Die Prüfergebnisse beziehen sich nur auf die Prüfgegenstände.

Ohne Genehmigung des Labors darf der Prüfbericht nicht auszugsweise vervielfältigt werden.

Durch die DAP Deutsches Akkreditierungssystem Prüfwesen GmbH nach
 DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium.

Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.

Die DAP GmbH ist Mitglied des Multilateralen Abkommens von EA und der gegenseitigen
 Anerkennungsvereinbarung von ILAC.



VKTA Rossendorf e. V. FB Analytik Labor für Umwelt- und Radionuklidanalytik	Prüfbericht		Seite	2 von 4
			Revision	0
	1434.1 / 1		vom	02.04.2002

Analysenergebnisse:

Probe	²³⁸ U	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	²²⁸ Ra	²²⁸ Th	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs	Detektor, Geometrie	t _m	
	[Bq/g]	[Bq/g]	[Bq/g]	[Bq/g]	[Bq/g]	[Bq/g]	[Bq/g]	Masse / [g]	[ks]	Meßzeitpunkt

Z1	a _i	< 0,11	6,8	44	9,0	1,14	< 0,16	< 0,013	5, Dose	85	
	1* s _g		0,7	4	0,6	0,08			24,59		29.03.2004
	s _g /a _i		10 %	10 %	7,0 %	7,0 %					
	g*	0,053	0,0094	0,057	0,017	0,011	0,081	0,0065			Köhler

Legende:

- a_i spezifische Aktivität
- s Gesamtunsicherheit
- s/a_i relative Gesamtunsicherheit
- g* Erkennungsgrenze nach DIN 25 482

Für ein Vertrauensniveau von 90% ist der Vertrauensbereich durch $c_i \pm 1,645 s$ gegeben.

Die Probe enthält erwartungsgemäß Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen. Dabei dominieren die Radium-Nuklide ²²⁶Ra und ²²⁸Ra sowie das ²¹⁰Pb. Das ebenfalls nachgewiesene ²²⁸Th wird durch den radioaktiven Zerfall des ²²⁸Ra nachgebildet. Generell ist das radioaktive Gleichgewicht ist signifikant gestört.

VKTA Rossendorf e. V. FB Analytik Labor für Umwelt- und Radionuklidanalytik	Prüfbericht	Seite	3 von 4
		Revision	0
	1434.1 / 1	vom	02.04.2002

Bewertung:

Grundlage der Bewertung der Analysenergebnisse ist die

Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung, kurz: StrlSchV) vom 20. Juli 2001, geändert durch Verordnung zur Änderung der Röntgenverordnung und anderer atomrechtlicher Verordnungen vom 18. Juni 2002 (BGBl I, S. 1869 - 1903).

In der oben genannten Strahlenschutzverordnung sind erstmalig im

Teil 3 Schutz von Mensch und Umwelt vor natürlichen Strahlenquellen bei Arbeiten

Strahlenschutzgrundsätze für natürliche Radionuklide geregelt. Dabei wird zwischen der

Exposition der Arbeitnehmer (Kapitel 2: Anforderungen bei terrestrischer Strahlung an Arbeitsplätzen)

und dem

Schutz der Bevölkerung bei der Beseitigung von Rückständen (Kapitel 3: Schutz der Bevölkerung bei natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffen)

unterschieden.

Aussagen zum Schutz der Beschäftigten vor natürlichen Strahlenquellen bei Arbeiten sind nicht Gegenstand dieser Bewertung.

Für die hier analysierten Materialien werden im folgenden Aussagen zu deren Beseitigung getroffen. Die Festlegungen der StrlSchV hierzu dienen dem Schutz der Bevölkerung.

A) Einordnung als zu berücksichtigender Rückstand

Bei den analysierten Materialien handelt es sich um zu berücksichtigende Rückstände, da sie alle spezifischen Aktivitäten $> 0,2 \text{ Bq/g}$ aufweisen und im weitesten Sinne der Gruppe der zu berücksichtigten Rückstände angehören.

B) Einordnung als überwachungsbedürftiger Rückstand

Die untersuchten Materialien sind als überwachungsbedürftige Materialien im Sinne der StrlSchV einzuordnen, da sie sowohl die für die übertägige als auch überwiegend für die untertägige Beseitigung gültigen Überwachungsgrenzen überschreiten.

C) Umgang mit überwachungsbedürftigen Rückständen

Der Betreiber der Anlage, in denen die Materialien angefallen sind hat die Rückstände vor ihrer Beseitigung gegen Abhandenkommen und vor dem Zugriff durch Unbefugte zu sichern. Sie dürfen an andere Personen nur zum Zwecke der Beseitigung oder Verwertung abgegeben werden

VKTA Rossendorf e. V. FB Analytik Labor für Umwelt- und Radionuklidanalytik	Prüfbericht	Seite	4 von 4
		Revision	0
	1434.1 / 1	vom	02.04.2002

D) Beseitigung von überwachungsbedürftigen Rückständen

Sind die Überwachungsgrenzen überschritten, so können die Materialien aus der Überwachung entlassen werden, wenn sichergestellt ist, dass ein 1 mSv a^{-1} für die Bevölkerung unterschritten werden.

In einem vereinfachten Verfahren ist eine Beseitigung bei gemeinsamer Verbringung mit anderen Abfällen auf einer Deponie möglich, wenn bestimmte Aktivitätsmengen pro eingebrachter Masse nicht überschritten werden.

Über die Beseitigung der Rückstände muss gemeinsam mit Besitzer der Rückstände, Gutachter, zuständiger Behörde und einem entsprechenden Deponiebetreiber befunden werden.

---- Ende des Prüfberichtes ----

VKTA Rossendorf e. V. FB Analytik Labor für Umwelt- und Radionuklidanalytik	<h1>Prüfbericht</h1>	Seite	1 von 6
		Revision	0
	<h2>1855.1 / 1</h2>	vom	22.02.2008

Anschrift des Labors: Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e.V.
 Labor für Umwelt- und Radionuklidanalytik
 PF 510119, 01314 Dresden
 Bautzner Landstraße 128 (B6), 01328 Dresden
 Tel.: 0351 / 260 3489, Fax: 0351 / 260 3190

Auftraggeber: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
 Herrn K. Hofmeister
 Stilleweg 2
D-30655 Hannover

Auftragsnummer: 200-4500038477

Auftragsdatum: 28.09.2008

Auftragsgegenstand: Probennahme, Analyse von Rohstück, Bewertung

Probenzahl: 3

Probenahme durch: Auftragnehmer

Probeneingang: 11.10.2007

Prüfzeitraum: 25.10.2007 – 05.11.2007

Analysenverfahren: γ -Spektrometrie

Bemerkungen: -

freigegeben:

Name: Dr. M. Köhler

Funktion: Abteilungsleiter

Unterschrift:

¹⁾ nicht akkreditiertes Verfahren ²⁾ vom Nachauftragnehmer durchgeführt

Die Prüfergebnisse beziehen sich nur auf die Prüfgegenstände.

Ohne Genehmigung des Labors darf der Prüfbericht nicht auszugsweise vervielfältigt werden.

Durch die DAP Deutsches Akkreditierungssystem Prüfwesen GmbH nach
 DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium.

Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.

Die DAP GmbH ist Mitglied des Multilateralen Abkommens von EA und der gegenseitigen
 Anerkennungsvereinbarung von ILAC.



VKTA Rossendorf e. V. FB Analytik Labor für Umwelt- und Radionuklidanalytik	Prüfbericht	Seite	2 von 6
		Revision	0
	1855.1 / 1	vom	22.02.2008

1 Probenahme

Vom Auftraggeber wurde ein Rohr-T-Stück zugesandt, welches einen Innendurchmesser von ca. 5,5 cm hatte.

Der Versuch, die eventuell an den Innenflächen anhaftenden Beläge mit einem Skalpell abzukratzen schlug fehl, da keine signifikanten Probenmengen entnommen werden konnten. Stattdessen wurde an den jeweiligen Rohrenden bis in eine Tiefe von 7 cm je ein Wischtest ausgeführt und dieser anschließend γ -spektrometrisch analysiert. Wie allgemein üblich, wurde für die Bewertung der Analysenergebnisse ein DIN-konformer konservativer Entnahmefaktor von 0,1 angenommen [1, 2]. Die Wischfläche betrug 38,5 cm².

Die Zuordnung der Proben 1 bis 3 zu den Entnahmeorten, ist durch eine Beschriftung des T-Stückes gegeben.

2 Analysenergebnisse

Die Wischtests wurden je 38 h auf einem low-level-Detektor im unterirdischen Niederniveaumesslabor Felsenkeller des VKTA analysiert (s. Tabelle 1). In Kenntnis der Herkunft des Untersuchungsgegenstandes wurden die langlebigen Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen ²³⁸U (²³⁸U, ²²⁶Ra, ²¹⁰Pb) und ²³²Th (²²⁸Ra, ²²⁸Th) ausgewertet.

Das künstliche Nuklid ¹³⁷Cs kann normalerweise in Thermalwasserrohrleitungen nicht auftreten. Dieses Nuklid dient hier als Indikator für eventuell auftretende Kontaminationen des Untersuchungsmaterials. Da bezüglich ¹³⁷Cs nur eine Nachweisgrenze angegeben werden konnte, ist somit eine Kontamination ausgeschlossen.

Das Nuklid ⁴⁰K ist keiner Zerfallskette zugehörig, jedoch in der Natur omnipresent. Dieses Nuklid gehört zum Standard-Untersuchungsprogramm, ist jedoch nicht Gegenstand strahlenschutzrechtlicher Überlegungen.

VKTA Rossendorf e. V. FB Analytik Labor für Umwelt- und Radionuklidanalytik	Prüfbericht						Seite	3 von 6
							Revision	0
	1855.1 / 1						vom	22.02.2008

Tabelle 1 Aktivität der natürlichen Radionuklide in den Wischtests von den Innenflächen des T-Stückes

Probe		²³⁸ U	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	²²⁸ Ra	²²⁸ Th	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs	Detektor, Geometrie	t _m	
		[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]		[ks]	Messzeitpunkt
			Rn-T.								

1	A _i	< 0,039	0,035	< 0,048	< 0,021	0,0102	< 0,074	< 0,0061	GMX1, Filter	136	
Wischtest	1* s		0,006			0,0018			1		01.11.2007
	s/A _i		16%			17%					
	g*	0,019	0,0056	0,024	0,011	0,0037	0,037	0,0030			Degering

2	A _i	< 0,037	0,022	< 0,056	< 0,020	0,0068	< 0,066	< 0,0061	GMX4, Filter	136	
Wischtest	1* s		0,005			0,0021			1		01.11.2007
	s/A _i		21%			31%					
	g*	0,018	0,0038	0,028	0,010	0,0033	0,033	0,0031			Degering

3	A _i	< 0,089	0,061	0,09	< 0,020	0,011	< 0,068	< 0,0081	GMX5, Filter	136	
Wischtest	1* s		0,008	0,03		0,004			1		01.11.2007
	s/A _i		14%	30%		38%					
	g*	0,045	0,0089	0,045	0,010	0,0078	0,034	0,0041			Degering

Legende: A_i Aktivität
 s Gesamtunsicherheit
 s/A_i relative Gesamtunsicherheit
 g* Erkennungsgrenze nach DIN 25 482

Für ein Vertrauensniveau von 90% ist der Vertrauensbereich durch A_i ± 1,645 s gegeben.

Bei den hier angegebenen Aktivitäten ist der Entnahmefaktor **nicht** berücksichtigt.

Das Bezugsdatum für alle Aktivitätsangaben ist der 01.11.2007 12:00.

VKTA Rossendorf e. V. FB Analytik Labor für Umwelt- und Radionuklidanalytik	Prüfbericht	Seite	4 von 6
		Revision	0
	1855.1 / 1	vom	22.02.2008

3 Bewertung

3.1 Normierung der Ergebnisse

Entsprechend des Auftrages sollen anhand der Analysenergebnisse Arbeitsschutz- bzw. Strahlenschutzmassnahmen für die Handhabung der Rohrstücke abgeleitet werden. Dazu wurden die Rohdaten unter Verwendung des Entnahmefaktors auf die Wischfläche normiert (s. Tabelle 2). Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurde auf Angabe von Unsicherheiten und Erkennungsgrenzen verzichtet.

Tabelle 2 Flächenbezogene Aktivität der natürlichen Radionuklide auf den Innenflächen des T-Stückes

Probe		²³⁸ U	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	²²⁸ Ra	²²⁸ Th	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs
		[Bq/cm ²]						
1	a _i	< 0,010	0,009	< 0,013	< 0,006	< 0,003	< 0,019	< 0,002
2	a _i	< 0,010	0,006	< 0,014	< 0,005	< 0,002	< 0,017	< 0,002
3	a _i	< 0,023	0,016	< 0,024	< 0,005	< 0,003	< 0,018	< 0,002

Legende: a_i flächenspezifische Aktivität
 Das Bezugsdatum für alle Aktivitätsangaben ist der 01.11.2007 12:00.

3.2 Maßnahmen bei der Beseitigung der Rohrstücke

In diesem Abschnitt soll die Fragestellung beantwortet werden, ob das untersuchte Rohrstück oder vergleichbare Baugruppen unter Einbeziehung von strahlenschutzrechtlichen Regelungen beseitigt werden müssen. Diese Abschätzung zielt vorrangig auf die potentielle Gefährdung der **Bevölkerung** durch die radioaktiven Kontaminationen durch das Einbringen des untersuchten Materials in den Wirtschaftskreislauf.

Dazu wurden im vorliegenden Fall sinngemäß die Festlegungen zur Freigabe entsprechend der aktuellen Strahlenschutzverordnung [3] (StrlSchV, §29, Abs.2), auf die mit natürlichen Radionukliden kontaminierten Rohrstücke angewandt. Die Regelungen der Freigabe sind im strengen Sinne nur auf Tätigkeiten bei der zielgerichteten Nutzung von ionisierender Strahlung anwendbar und basieren auf einer tolerierbaren Dosis von einigen 10 µSv pro Jahr. Da im Gegensatz hierzu beim Umgang mit natürlichen radioaktiven Stoffen eine jährliche effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung von 1 mSv als akzeptabel gilt, wird mit der hier praktizierten Vorgehensweise ein wesentlich schärferes Kriterium angewendet.

Die Freigabe und damit die uneingeschränkte Nutzung kann erfolgen, wenn für die Bevölkerung maximal eine effektive Dosis im Bereich von 10 µSv im Kalenderjahr mit Sicherheit unterschritten ist. Dies ist der Fall, wenn sowohl die Werte der Oberflächenkontamination (StrlSchV, Anlage III, Tabelle 1, Spalte 4) als auch die massespezifischen Aktivitäten (StrlSchV, Anlage III, Tabelle 1, Spalte 9) eingehalten sind.

Der Nachweis zur Einhaltung der flächenspezifischen Grenzwerte für eine Freigabe ist in der Tabelle 3 geführt. Auf einen äquivalenten Nachweis der Einhaltung der massespezifischen

VKTA Rossendorf e. V. FB Analytik Labor für Umwelt- und Radionuklidanalytik	Prüfbericht		Seite	5 von 6
			Revision	0
	1855.1 / 1		vom	22.02.2008

Freigabewerte kann an dieser Stelle verzichtet werden, da es sich hier um äußerst kleine Aktivitäten handelt und erfahrungsgemäß bei Rohren und ähnlichen Baugruppen das Verhältnis der Masse zur Oberfläche die Einhaltung der massebezogenen Grenzwerte begünstigt. Die Summe der Verhältniszahlen zu den Freigabegrenzwerten (StrlSchV, Anlage III, Tabelle 1, Spalte 4) in der Tabelle 3 ist kleiner als 1. Damit ist bei Anwendung der StrlSchV eine Freigabe und eine uneingeschränkte Nutzung des Materials mit Sicherheit möglich.

Tabelle 3 Flächenbezogene Aktivität der natürlichen Radionuklide auf den Innenflächen des T-Stückes und Angabe der berechneten Summe der Verhältniszahlen zu den Freigabegrenzwerten

Probe		U-238+	Ra-226++	Pb-210++	Ra-228+	Th-228+	Summe
		[Bq/cm ²]					Spalte 4
1	a _i	< 0,010	0,009	< 0,013	< 0,006	< 0,003	0,064
2	a _i	< 0,010	0,006	< 0,014	< 0,005	< 0,002	0,053
3	a _i	< 0,023	0,016	< 0,024	< 0,005	< 0,003	0,096

In der Spalte „Summe, Spalte 4“ ist die berechnete Summe der Verhältniszahlen aus der Aktivität je Flächeneinheit und den nuklidspezifischen Grenzwerten für die Oberflächenkontamination angegeben (StrlSchV, Anlage III, Erläuterungen zu Tabelle 1). Als Grenzwerte wurden folgende Werte (StrlSchV, Anlage III Tabelle 1, Spalte 4) herangezogen: U-238+, Ra-226++, Pb-210++, Ra-228+: 1 Bq / cm²; Th-228+: 0,1 Bq / cm²

3.3 Maßnahmen beim Umgang

In diesem Abschnitt soll die Frage beantwortet werden, ob bei der Handhabung des Rohrstückes oder verwandter Materialien durch **Beschäftigte** seitens des Strahlenschutzes Restriktionen zu beachten sind.

Im vorherigen Abschnitt wurde ausgesagt, dass das untersuchte Material ohne Restriktionen weiter verwendet werden kann. Wenn für beliebige Umgangsszenarien keine Dosis größer als 10 µSv a⁻¹ für die Bevölkerung zu erwarten ist, gilt dies auch für den Umgang durch Beschäftigte. Nach aktueller StrlSchV §95 „Natürlich vorkommende radioaktive Stoffe an Arbeitsplätzen“ muss die zuständige Behörde durch den Arbeitgeber nur dann informiert werden, wenn die zu erwartende effektive Dosis 6 mSv a⁻¹ überschreiten könnte. Das ist hier nicht der Fall, da gezeigt wurde, dass die Dosis unterhalb einiger 10 µSv a⁻¹ liegt.

Somit entstehen aus strahlenschutzrechtlicher Sicht keine Restriktionen bei der Handhabung der untersuchten Rohrstücke.

Da die Ablagerungen auch Schwermetalle wie zum Beispiel Pb enthalten können, sollten bei Laborarbeiten die allgemeinen Schutzvorschriften beachtet werden.

3.4 Zusammenfassung

Es brauchen bei der Handhabung der Rohrstücke keinerlei strahlenschutzrechtliche Restriktionen beachtet werden. Eine gesundheitliche Gefährdung der Bevölkerung und der Beschäftigten auf Grund der radioaktiven Beläge der Rohrstücke kann bei bestimmungsgemäßem Umgang ausgeschlossen werden.

---- Ende des Prüfberichtes ----

VKTA Rossendorf e. V. FB Analytik Labor für Umwelt- und Radionuklidanalytik	Prüfbericht	Seite	6 von 6
		Revision	0
	1855.1 / 1	vom	22.02.2008

-
- [1] DIN ISO 7503-1:1990-07, Bestimmung der Oberflächenkontamination; Beta-Strahler, Beuth-Verlag
 - [2] Fachanweisung Nr. 2: Bestimmung von Oberflächenkontaminationen, VKTA, 07.06.2007, S. 10
 - [3] Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung, kurz: StrlSchV) vom 20. Juli 2002 (Bundesgesetzblatt I, 2001, S. 1714, Bundesgesetzblatt I, 2002, S. 1459)

VKTA Rossendorf e. V. FB Analytik Labor für Umwelt- und Radionuklidanalytik	<h1>Prüfbericht</h1>	Seite	1 von 2
		Revision	0
	<h2>1855.2 / 1</h2>	vom	26.05.2008

Anschrift des Labors: Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e.V.
 Labor für Umwelt- und Radionuklidanalytik
 PF 510119, 01314 Dresden
 Bautzner Landstraße 128 (B6), 01328 Dresden
 Tel.: 0351 / 260 3489, Fax: 0351 / 260 3190

Auftraggeber: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
 Herrn K. Hofmeister
 Stilleweg 2
D-30655 Hannover

Auftragsnummer: 200-4500042512

Auftragsdatum: 18.04.2008

Auftragsgegenstand: Wasser aus Geothermiebohrung Horstberg

Probenzahl: 1

Probenahme durch: Auftragnehmer

Probeneingang: 21.04.2008

Prüfzeitraum: 21.04.2008 – 26.05.2008

Analysenverfahren: doppelte γ -Spektrometrie im zeitlichen Abstand

Bemerkungen: -

freigegeben:

Name: Dr. M. Köhler
Funktion: Abteilungsleiter
Unterschrift:

¹⁾ nicht akkreditiertes Verfahren ²⁾ vom Nachauftragnehmer durchgeführt

Die Prüfergebnisse beziehen sich nur auf die Prüfgegenstände.

Ohne Genehmigung des Labors darf der Prüfbericht nicht auszugsweise vervielfältigt werden.

Durch die DAP Deutsches Akkreditierungssystem Prüfwesen GmbH nach
 DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium.

Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.

Die DAP GmbH ist Mitglied des Multilateralen Abkommens von EA und der gegenseitigen
 Anerkennungsvereinbarung von ILAC.



VKTA Rossendorf e. V. FB Analytik Labor für Umwelt- und Radionuklidanalytik	Prüfbericht										Seite	2 von 2
											Revision	0
	1855.2 / 1										vom	26.05.2008

1 Analysenergebnisse

Probe	²³⁸ U	²³⁴ Th	²³⁰ Th	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	²³⁵ U	²³¹ Pa	²²⁷ Ac	²²⁷ Th	²²³ Ra	²²⁸ Ra	²²⁸ Th	²²⁴ Ra	⁴⁰ K	Detektor, Geometrie	Probenahme
	[Bq/l]	[Bq/l]	[Bq/l]	[Bq/l]	[Bq/l]	[Bq/l]	[Bq/l]	[Bq/l]	[Bq/l]	[Bq/l]	[Bq/l]	[Bq/l]	[Bq/l]	[Bq/l]	Volumen	
															[ml]	Bearbeiter

Probe 1	c _i	< 10	< 4,6	< 47	26,1	31,3	< 1,7	< 5,2	< 1,0	< 1,1	< 0,50	28,0	0,92	40	133	3, Mari	17.4.08 15:30
	1 * s				0,9	2,2						1,0	0,10	8	9	450	
	s/c _i				3,3%	7,0%						3,5%	10%	20%	6,6%		
	g*	5,0	2,3	24	0,14	3,4	0,84	2,6	0,50	0,55	0,25	0,27	0,14	0,12	0,80		Degering

Legende:

c_i Aktivitätskonzentration
 s Gesamtunsicherheit
 s/c_i relative Gesamtunsicherheit
 g* Erkennungsgrenze nach DIN 25 482

Für ein Vertrauensniveau von 90% ist der Vertrauensbereich durch $c_i \pm 1,645 s$ gegeben.

Das Bezugsdatum für alle Aktivitätsangaben ist der Zeitpunkt der Probenahme.

2 Radiologische Bewertung

Eine Bewertung im Hinblick auf den Strahlenschutz, die im Auftrag vom 18.04.2008 gefordert wurde und die sich an der Bewertung der Feststoffe aus dem beprobten Rohrstück (Prüfbericht 1855.1 vom 22.02.2008) orientieren sollte, wird hier aus folgenden Gründen nicht vorgenommen:

1. Es wird davon ausgegangen, dass sich das Thermalwasser in einem geschlossenen Kreislauf befindet, und deshalb eine Aufnahme des Wassers in den Verdauungstrakt weitgehend ausgeschlossen werden kann. Der verbleibende Expositionsbedarf über Wirkung der γ -Direktstrahlung auf die Beschäftigten an der Anlage kann als vernachlässigbar eingeschätzt werden. Eine radiologisch relevante Exposition durch das Thermalwasser im geschlossenen Kreislauf der Geothermieanlage Horstberg kann daher ausgeschlossen werden.
2. Die hohe Salinität des Wassers verhindert ohnehin die Ableitung des Wassers über das Abwasser bzw. über Oberflächenwasser. Aus diesem Grunde ist es nicht sinnvoll, eine mögliche Strahlenexposition bei der Ableitung des Wassers über verschiedene Pfade abzuschätzen.

3 Bemerkungen

Die Ergebnisse der Analyse des Thermalwassers würden die Erwartung stützen, dass sich radioaktive Ablagerungen in der Anlage bilden. Dies steht jedoch vorerst in Widerspruch zum eher unauffälligen Befund bei der Untersuchung des Rohrstückes (Prüfbericht 1855.1 vom 22.02.2008). Zur Aufklärung der Zusammenhänge wird deshalb weiterer Untersuchungsbedarf gesehen.

---- Ende des Prüfberichtes ----