

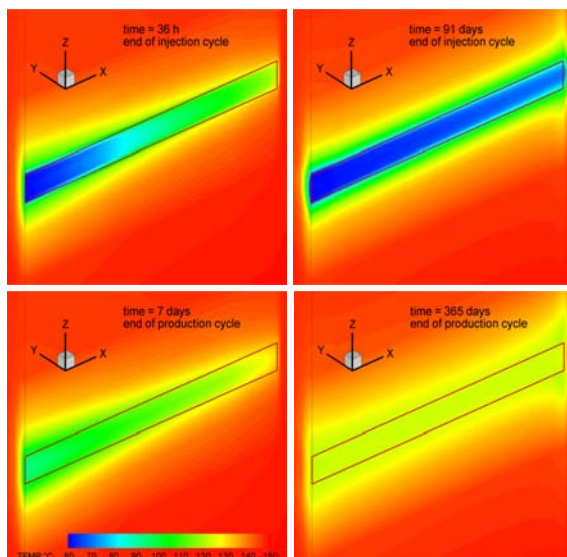
R. Schellschmidt
A. Hesshaus
H. Sulzbacher
R. Junker
T. Tischner
R. Jatho

Verbundprojekt GeneSys:

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

Abschlussbericht

zum Vorhaben FKZ 0329995



**Leibniz-Institut für
Angewandte Geophysik
Hannover**

ehemals

Institut für
Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben

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 0329995 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren:	Rüdiger Schellschmidt, Dipl.-Geophys. Annalena Hesshaus, Dipl.-Geowiss. Hans Sulzbacher, Dipl.-Phys. Ralf Junker, Dipl.-Geol. Dr. Torsten Tischner, Dipl.-Phys. Reiner Jatho, Dipl.-Ing.
Projektleiter:	Dr. Rüdiger Schulz, Dipl.-Math. (ab 01.04. 2009)
Auftraggeber:	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Projekträger Jülich (PTJ-EEN)
Förderkennzeichen:	0329995
Laufzeit des Vorhabens:	01.04.2005 – 30.06.2009
Berichtsdatum:	21.12.2009
Archivnummer:	
Tagebuchnummer:	50062/09

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Kurzdarstellung	5
A. Aufgabenstellung	5
B. Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens	10
C. Stand von Wissenschaft und Technik zu Beginn des Vorhabens	11
D. Planung und Ablauf des Vorhabens	14
E. Zusammenarbeit mit Projektpartnern und anderen Stellen	18
Ergebnisse	20
1. Testgelände und Ausstattung	20
2. Hydraulische Tests in Horstberg.....	20
2.1 Übersicht der hydraulischen Experimente	20
2.2 Hydraulische Tests	23
3. Austausch des Bohrlochpackers an der Bohrung Horstberg	38
4. Hydrogeochemische Untersuchungen.....	40
4.1 Ausfällungsprozesse und deren potentieller Einfluss auf die geothermische Nutzung	40
4.2 Korrosion an den Stahlrohren des Förderstranges.....	41
5. Untersuchungen zum Selbststützungsmechanismus von hydraulisch induzierten Rissen.....	43
5.1 Laboruntersuchungen	43
5.2 Numerische Modellierungen	46
5.3 Diskussion der Ergebnisse	47
6. Numerische Modellrechnungen	49
6.1 Modellrechnungen zur Wärmegewinnung aus künstlichen Rissen durch zyklische Injektion und Produktion.....	49
6.2 Modellkalibrierung der Modellrechnungen zum Verfahren der Tiefenzirkulation.....	61
Verwertbarkeit der Ergebnisse	72
Ergebnisse Dritter	74
Veröffentlichungen - Berichte	76

Zusammenfassung

Während des Projektes GeneSys Horstberg II wurden in der Bohrung Horstberg Z1 in den Jahren 2006 bis 2008 zahlreiche Injektions-, Produktions- und Zirkulationstests zur Charakterisierung des an die Bohrung angeschlossenen geothermischen Reservoirs und zur Umsetzung der Nutzungskonzepte durchgeführt. Zusammenfassend können folgende Aussagen getroffen werden:

- Der im Jahre 2003 im Detfurth-Sandstein erzeugte hydraulische Riss ist über mindestens 5 Jahre offen geblieben, was die Theorie eines Selbststützungsmechanismus nicht nur im kristallinen Gestein sondern auch in Sedimentgesteinen untermauert.
- Durch den Zirkulationstest im November 2006 konnte die nachhaltige hydraulische Kommunikation zwischen Detfurth und Solling nachgewiesen werden.
- Die Auswertungen der Druckanstiegskurven während der *Shut-in*-Phasen verschiedener Tests seit dem Jahr 2003 zeigen, dass das hydraulische Verhalten seit 2003 nahezu unverändert geblieben ist und somit keine „Schließungserscheinungen“ zu beobachten waren.

Im November 2008 begannen die Arbeiten zum Austausch des defekten Bohrlochpackers an der Bohrung Horstberg Z1. Die Fangarbeiten des defekten und das Setzen des neuen Packers konnten im Januar 2009 erfolgreich abgeschlossen werden. Beim Tausch ist 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. Sie wiesen eine Wandstärkenverringerng von über 20 % auf. Die Ursache, die zu den Schäden geführt hat, konnte schlussendlich nicht geklärt werden. Es wird vermutet, dass die hauptsächliche Ursache in der Säurekorrosion liegt. 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. Außerdem könnten kavitative Prozesse ebenfalls mitwirken.

Die Thermalsole der Bohrung Horstberg Z1 wurde mit der Zielstellung untersucht, 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 könnten sich ca. 250 g/h Ablagerungen ergeben. Die Menge der ausgefallenen Sulfatminerale ist relativ unabhängig davon, ob Sauerstoff zutrifft oder nicht. Sauerstoffausschluss muss aber in der gesamten Anlage gewährleistet sein, unter anderem um die Ausfällungen von Eisenmineralen (Akaganéit) zu vermeiden. Die Temperatur hat im Intervall von 20 °C bis 60 °C 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.

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 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. Nur der jahreszyklische Betrieb zeigt nach 25 Jahren Betriebsdauer noch deutlich höhere thermische Leistungen als die geforderten 2 MW. 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.

Die numerischen Modellrechnungen zum Verfahren der Tiefenzirkulation wurden mit hydraulischen und Tracer-Test-Daten kalibriert. Wegen der Mehrdeutigkeit bei der Bestimmung der Modellparameter war es notwendig, alle verfügbaren Daten mit in die Modellkalibrierung einzubeziehen. Dazu gehören neben den hydraulischen Bohrlochkopfdaten auch die Daten aus Tracerexperimenten. Temperaturmessungen standen leider nicht zur Verfügung. Das Ergebnis der hydraulischen Anpassung zeigt, dass in allen Zeitzonen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Bohrlochkopfdaten erzielt werden konnte. Dagegen ist die Anpassung der Tracerdaten an die im Detfurth durchgeführte *Shut-in*-Phase nur sehr mäßig.

Kurzdarstellung

Das Projekt „GeneSys Horstberg II – Methoden und Konzepte zur Erdwärmegewinnung aus gering permeablen Sedimentgesteinen“ ist ein Verbundprojekt; die Arbeiten des Leibniz-Instituts für Angewandte Geophysik (LIAG) – vormals Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA) – wurden gemeinsam mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) 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, Kluffzonen, 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 stellen gegenüber der üblichen Dublettenanlage eine kostengünstige Alternative dar und können die große Lücke im Leistungsbereich zwischen der tiefen Erdwärmesonde ($\ll 1 \text{ MW}_{\text{th}}$) und den Dublettensystemen ($> 5 \text{ MW}_{\text{th}}$) 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. 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.

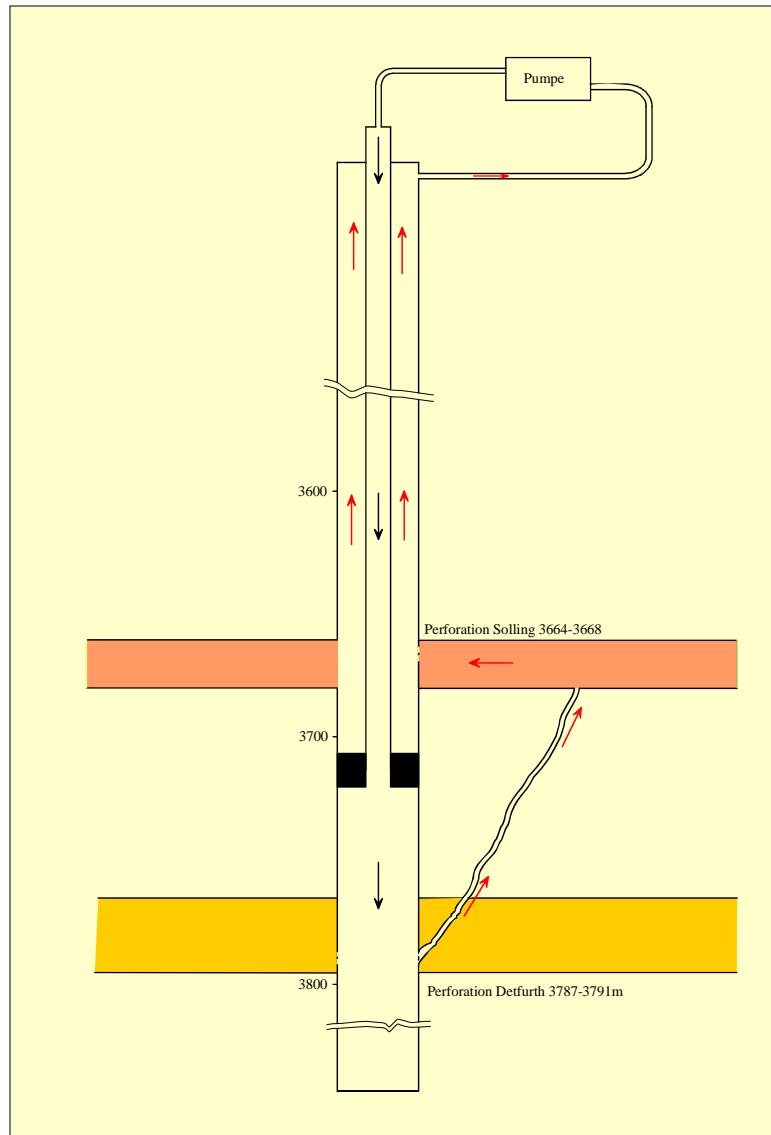


Abb. A.1: Schematische Darstellung des Ein-Bohrloch-Zirkulationssystems

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: 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.

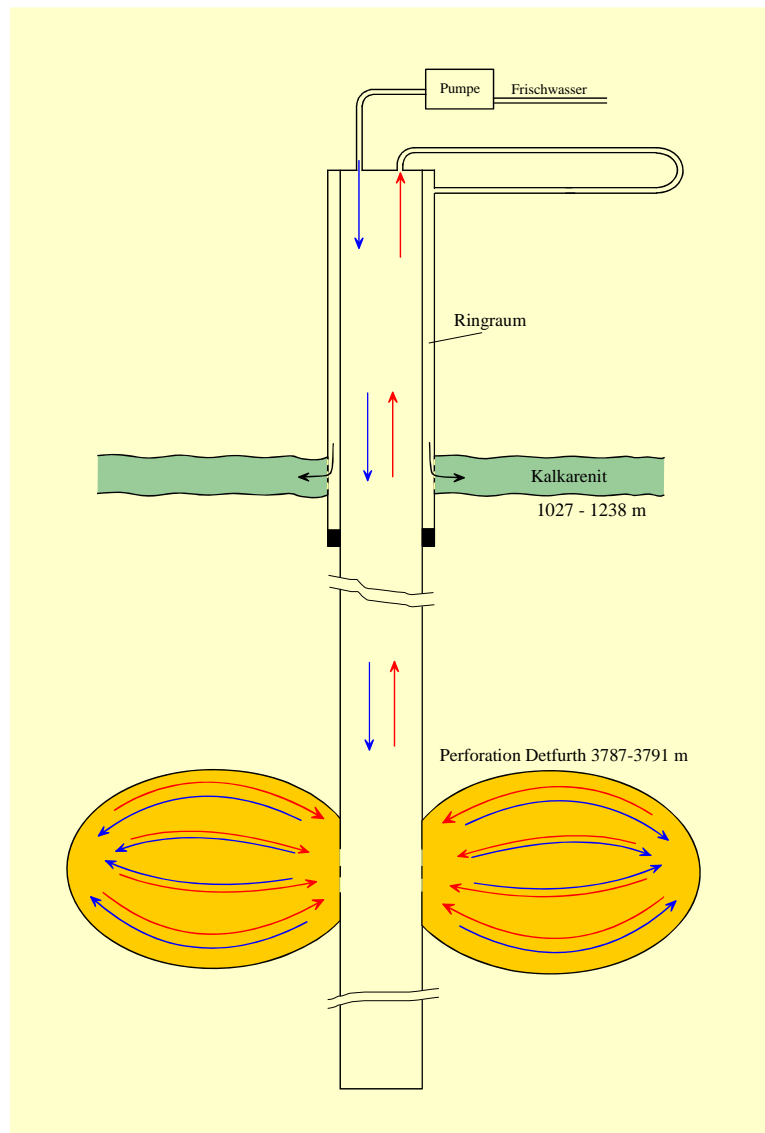


Abb. A.2: Schematische Darstellung des zyklischen Betriebs

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 Salztektonek und der Schichtung der Gesteinsformationen bestimmten Spannungsregimes betrachtet werden (Arbeitsgruppe Prof. 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 Direktwärmennutzung 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 konnte das LIAG und die BGR 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. Messwerterfassungs-

system, 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 bestehen seitens des GEOZENTRUMs Hannover bereits zu Beginn des Projektes beste 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 das LIAG und die BGR 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 von Cryden und Isostar) werden 1,5 MW_{el} ins örtliche Stromnetz einspeist.

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-/Erdgasfeldern 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 (hydraulisches Leitvermögen) 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, Klüftzonen 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 geschert.

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-Fractechnik 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 Kluffzonen vorhanden und lassen sich die stimulierten Rissysteme an diese anschließen?

Zur Beantwortung dieser Fragen wurden im Teufenbereich 3800 m der Bohrung Horstberg Z1 zwei massive Wasserfrac-Tests 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 aufweist. 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, Telefonschluß, 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. Wesentliche Elemente dieser Ausrüstung sind (Abb. D.1):

- drei leistungsstarke Hochdruckpumpen
- Hoch- und Niederdruckleitungen und Armaturen
- Pumpenkammer für den Betrieb einer Unterwasserpumpe als Zirkulationspumpe
- Lager- und Montagehalle
- Messwerterfassungssystem incl. Sensoren (Durchfluss-, Druck-, und Temperaturmessung)

Es wurde eine Detailplanung für die technische Ausrüstung des Testfeldes erstellt und die nötigen Beschaffungsmaßnahmen wurden durchgeführt. Die Einrichtung des Testgeländes unterstand, wie schon im Vorgängerprojekt, der BGR und wird im Endbericht der BGR (Tischner et al. 2009) näher beschrieben.

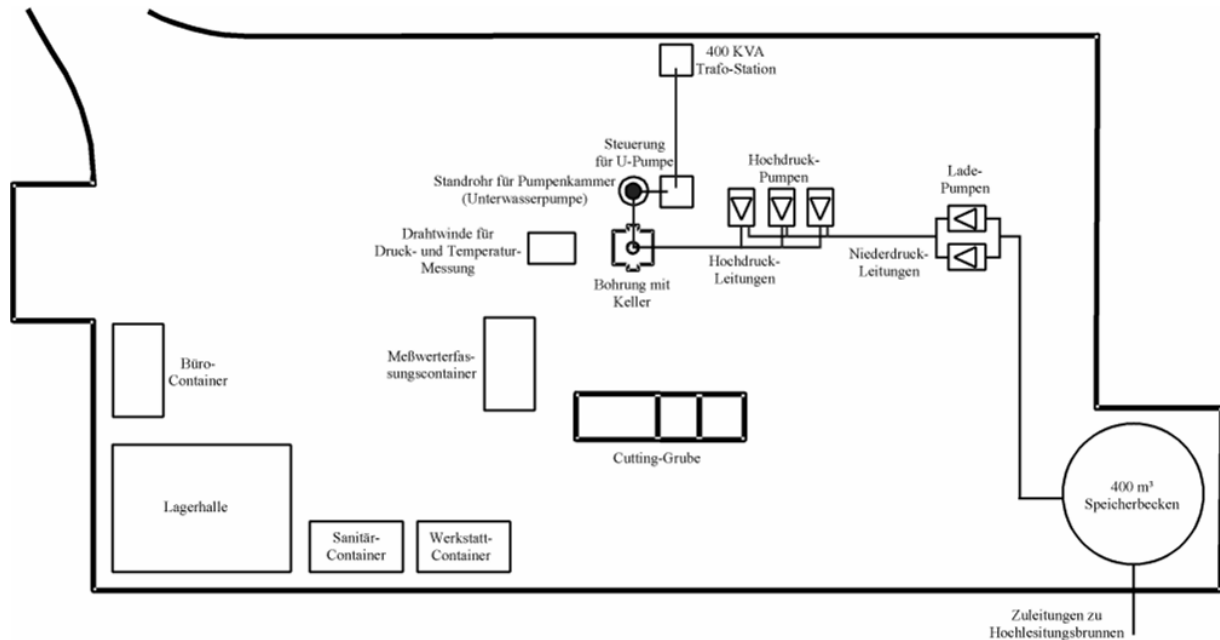


Abb. D.1: Schematischer Aufbau des Testfeldes Horstberg Z1 zum Projektbeginn.

Untersuchung des Langzeitverhaltens der Rissstransmissivität

Für die Nutzung stimulierter geothermischer Systeme ist das Langzeitverhalten der Rissstransmissivität 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 Defurth-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 Defurth-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 Wasserfractotechnik 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 themo-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. Als größte geowissenschaftliche Einrichtung in Deutschland verfügt das Geozentrum Hannover 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 NLF (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. Sauter (Universität Göttingen) wurden Tracer-Tests in der Bohrung durchgeführt. Mit dieser Arbeitsgruppe und mit der Arbeitsgruppe von Prof. Gudmundsson, ehemals Universität Göttingen, entsteht eine weitergehende Zusammenarbeit. Zum Beginn der Projektlaufzeit ergab sich eine Kooperation mit der Arbeitsgruppe von Prof. Renner (Ruhr-Universität Bochum), die im Rahmen des GeneSys Horstberg II Projekts intensiviert wurde (vgl. Kapitel 5).

Ergebnisse

1. Testgelände und Ausstattung

Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, musste der Teststandort ähnliche geologische und tektonische Verhältnisse aufweisen wie der Standort in Hannover. Darüber hinaus sollte er über eine für die Testdurchführung geeignete Infrastruktur (Zufahrtsmöglichkeit, Wasser- und Stromanschluss) verfügen. Sämtliche Bedingungen sind am Standort Horstberg Z1 in nahezu idealer Weise gegeben. Die geographische Lage des Versuchsfeldes, die geologischen und geothermischen Bedingungen am Standort Horstberg sowie der technische Ausbau der Bohrung Horstberg Z1 sind in Jung et al. (2006) eingehend beschrieben. Die Einrichtung des Testgeländes unterstand, wie schon im Vorgängerprojekt, der BGR und wird im Endbericht der BGR (Tischner et al. 2009) näher beschrieben.

2. Hydraulische Tests in Horstberg

2.1 Übersicht der hydraulischen Experimente

Im Zeitraum September 2003 bis Dezember 2004 (Vorstudie) wurden ein Vielzahl von Wasserfrac-Tests und hydraulischen Nach-Frac-Experimenten in der Bohrung Horstberg Z1 ausgeführt und insgesamt drei neuartige Erschließungskonzepte erprobt (Jung et al. 2006). Tabelle 2.1 gibt eine Übersicht über die Tests und Experimente der Vorstudie.

In dem aktuellen Projekt GeneSys Horstberg II wurden 2006 bis 2008 zahlreiche Injektions- und Produktionstests im Detfurth und Solling sowie Flowmeter- und Packertests durchgeführt. Tabelle 2.2 gibt eine Übersicht über diese Tests und Experimente.

In einem Produktionstest (Frühjahr 2008) wurde Formationswasser gefördert und Wasserproben entnommen. Untersucht werden sollte die Art und Menge der Ausfällungsprodukte, der Einfluss des Sauerstoffgehalts auf die Produkte, die Abhängigkeit von der Temperatur, sowie von der Zeit. Diese Problematik sowie Korrosionsprozesse werden gesondert im Kapitel 4 „Hydrogeochemische Untersuchungen“ 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

Zeitraum	Testhorizont	Zweck	Testart	Volumen, m ³	
				Injektion	Produktion
29.09.- 26.10.03	Volpriehausen	Risserzeugung	Wasserfrac & Rücklauf-tests	790	130
27.10.- 17.11.03	Detfurth	Risserzeugung Pro- duktionshorizont	Wasserfractests	20100	1650
17.11.03- 20.12.04	Detfurth	Einsonden- Zweischichtverfahren	Intermittierender Auslauf Det- furth, Injektion Kalkarenit	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 Det- furth, Injektion Kalkarenit	2706	
20.02.- 17.03.04	Detfurth & Solling	Einsonden- Zweischichtverfahren	Auslauf Detfurth & Solling, Injek- tion Kalkarenit	7100	
19.03.- 14.07.04	Detfurth & Solling	Risseigenschaften, hydraulische Rand- bedingungen	Druckaufbau	0	
14.07.- 23.07.04	Detfurth & Solling	Einsonden- Zweischichtverfahren	Auslauf Detfurth & Solling, Injek- tion Kalkarenit	2350	
23.07.- 07.11.04	Detfurth & Solling	Risseigenschaften, hydraulische Rand- bedingungen	Druckaufbau	0	
24.11.- 30.11.04	Detfurth & Solling	Erprobung Tiefenzir- kulationsverfahren	Injektion Det- furth, Auslauf Solling	6100	400
30.11.- 01.12.04	Solling	Risserzeugung Rein- jektionshorizont	Wasserfractest	1700	
01.12.- 13.12.04	Detfurth & Solling	Erprobung Tiefenzir- kulationsverfahren	Injektion Det- furth, 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 Detfurth, rot: Tests im Solling und Detfurth, weiß: Packer- und Sondentests; Q: maximale Fließrate, ΔP : Druckabsenkung.

Zeitraum von bis		Test- horizont	Test- name	Testart / Bemerkung	Q, l/s	ΔP , bar	Volumen, m ³ Injektion 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	Detfurth	Produktionstest	Produktionstest im Detfurth 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	Detfurth Solling	Zirkulationstest	Injektion in den Detfurth 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	Detfurth Solling	Injektion / Förderung	Injektion in den Detfurth 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	Detfurth	Injektionstest	Temperatur-Log im Kalkarenit, Muschelkalk und Buntsandstein Low rate Injection	2,0			
05.02.2008	22.02.2008	Detfurth Solling	Produktionstest	Produktionstest im Detfurth Mitproduktion aus dem Solling	10 - 2,4			5.000
10.03.2008	13.03.2008	Detfurth Solling	Produktionstest	Produktionstest im Detfurth Mitproduktion aus dem Solling	7,5			5.000
17.11.2008	31.01.2009	Tiefbohrung Horstberg Z1	Packertausch	Austausch des Bohrlochpackers				

2.2 Hydraulische Tests

Während der Projektphase GeneSys Horstberg II wurden in Horstberg in den Jahren 2006 bis 2008 zahlreiche Versuche zur Charakterisierung des an die Bohrung angeschlossenen geothermischen Reservoirs und zur Umsetzung der Nutzungskonzepte durchgeführt. In 2006 wurde die Forschungsbohrung mit zwei Hochdruckpumpen ausgestattet, welche Testarbeiten an der Bohrung Horstberg unabhängig von Mietpreisen und Verfügbarkeiten auf dem Markt ermöglichten. Ferner wurde eine große Lagerhalle errichtet, wodurch Niederdruck- und Hochdruckausrüstung vor Ort gelagert werden konnten. Eine Pumpenkammer für den Betrieb einer Tauchpumpe für die Tiefenzirkulation wurde ebenfalls errichtet.

Ziel dieser vorbereitenden Arbeiten war es, einen mehrmonatigen Langzeittest des Zweischicht-Tiefenzirkulationskonzeptes durchzuführen und somit erstmals das Langzeitverhalten des geothermischen Reservoirs zu untersuchen.

Aktionen 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.

30.7. bis 4.8.2006 – Bau der Pumpenkammer

Im Juli 2006 wurde direkt neben der Hauptbohrung eine 30 m tiefe Pumpenkammer errichtet. In die Kammer wurde die ebenfalls neu beschaffte Tauchpumpe (Electronic Submersible Pump, ESP) installiert und kurzzeitig in Betrieb genommen. Die ESP war für den Test des Tiefenzirkulationskonzeptes vorgesehen. 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.

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.

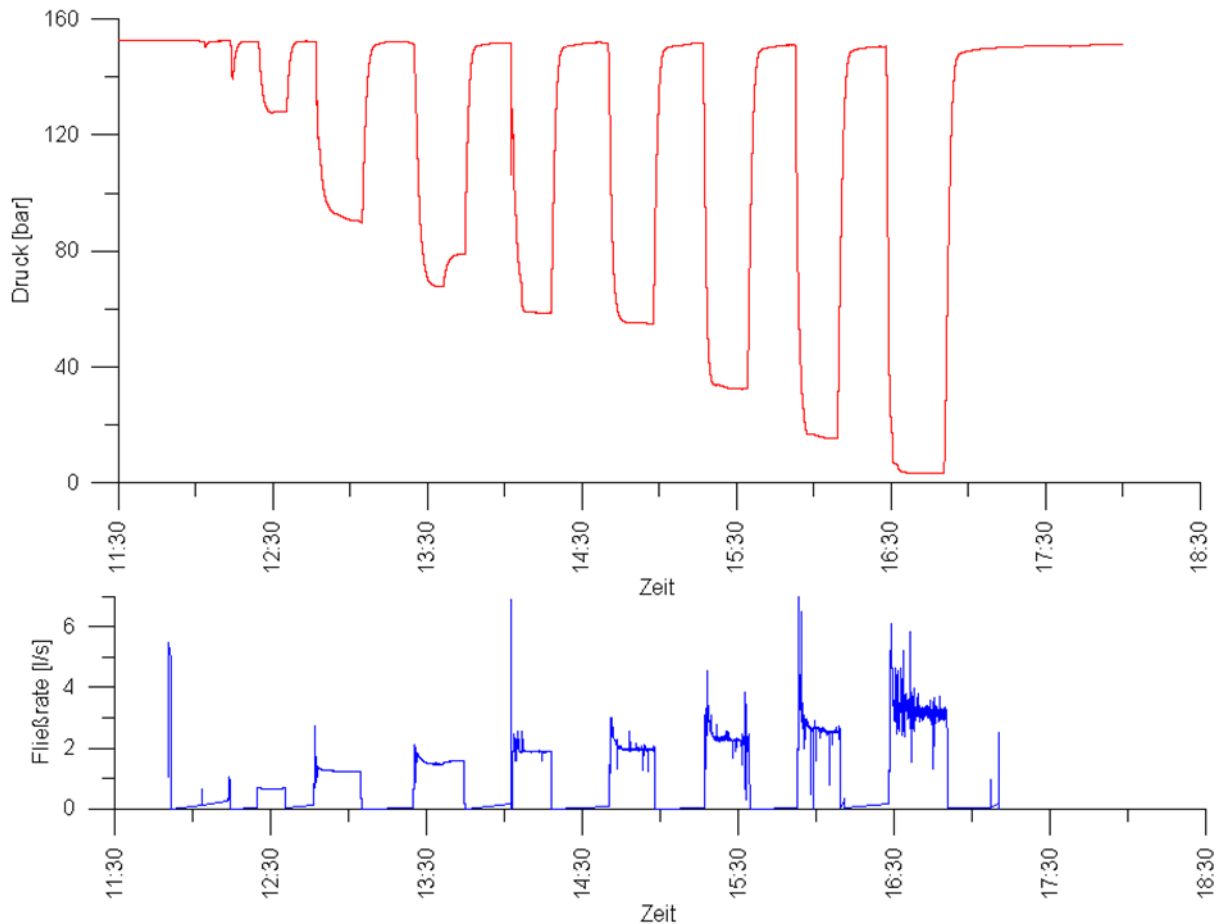


Abb. 2.1: Stufenproduktionstest im Solling am 30.08.2006

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.

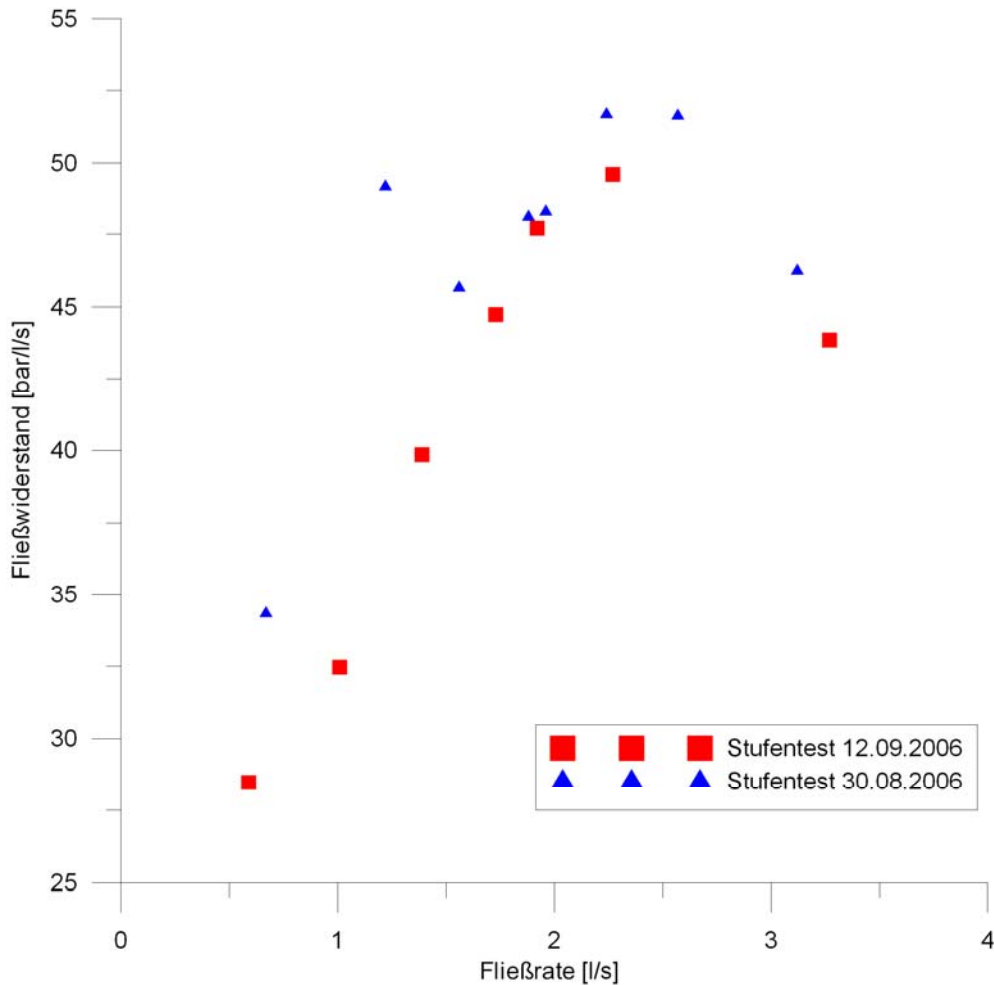


Abb. 2.2: Fließwiderstände der Stufenproduktionstests im Solling am 30.08.2006 und 12.09.2006

14.9.2006 – Inbetriebnahme temperierter Sensorenschrank

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 des Drucks nach *Shut-in* Phasen zu starken Schwankungen im Drucksignal. Dies macht eine Interpretation des hydraulischen Fernfeldes der Bohrung unmöglich.

Um dieses Problem zu umgehen wurden alle Sensoren in unmittelbarer Bohrungsnähe in einen temperierten Sensorenschrank eingebaut, der über eine elektronische Temperaturregelung verfügt. Durch diese Maßnahme konnte die Qualität der aufgezeichneten Druckdaten erheblich verbessert werden.

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.

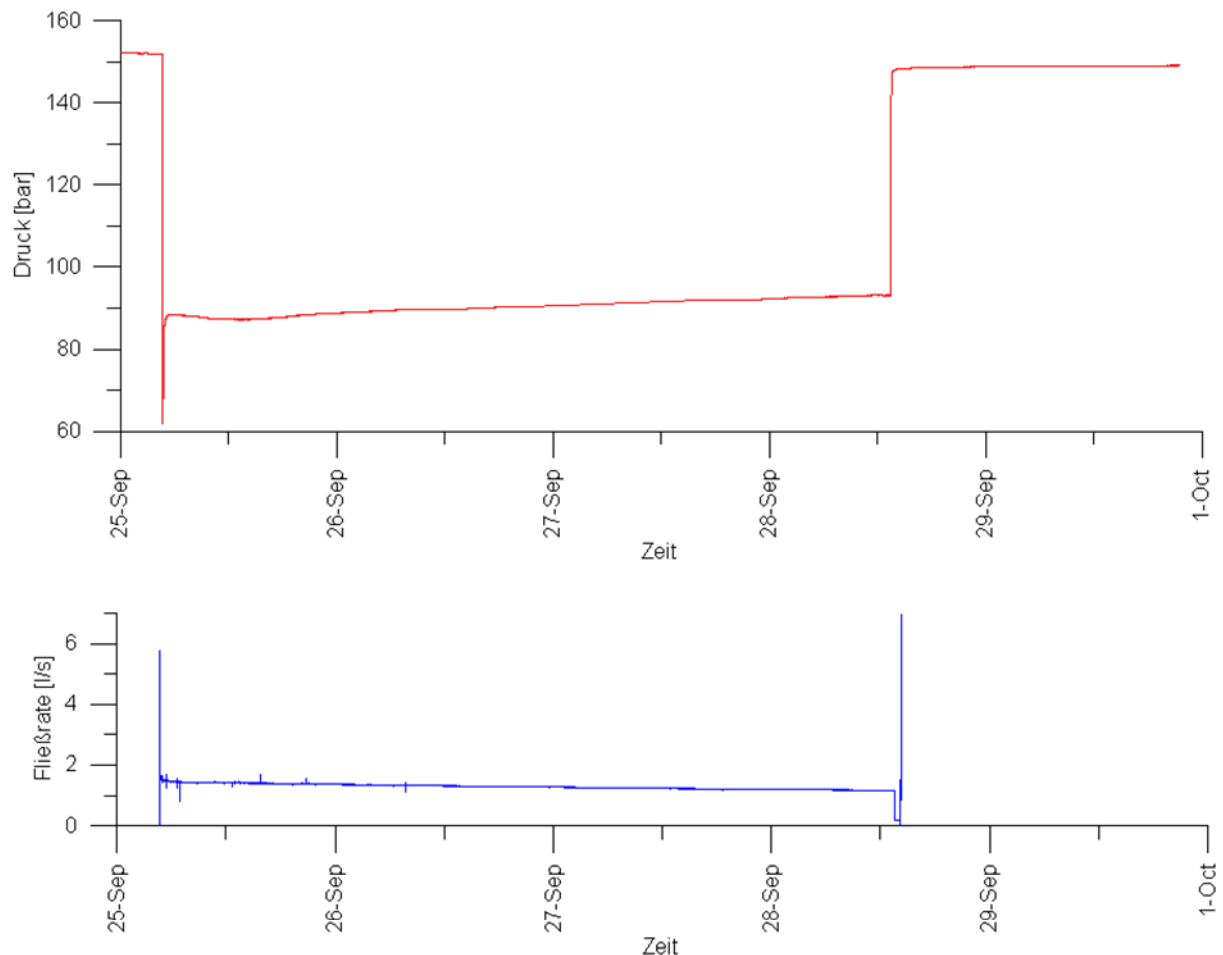


Abb. 2.3: Produktionstest im Solling vom 25.09.2006 bis 01.10.2006

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 Sedimentgesteinen 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.

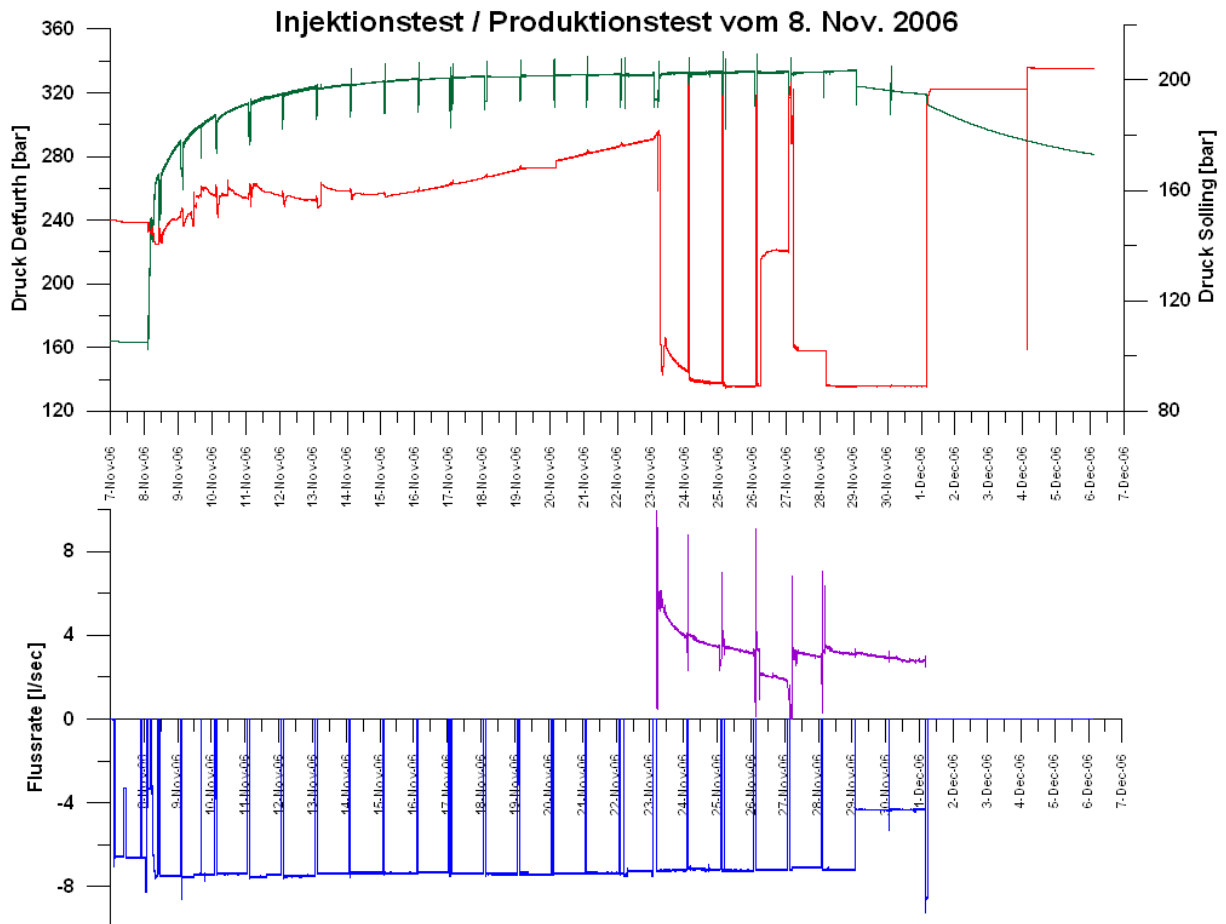


Abb. 2.4: Injektionstest Detfurth und Produktionstest Solling vom 08.11.2006 bis 01.12.2006.

Aktionen 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.

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. Zum Ende des Versuchs besaß das Fluid eine Dicht von 1,16 g/cm³, eine elektrische Leitfähigkeit von 220 mS/cm und einen pH-Wert von 5,25.

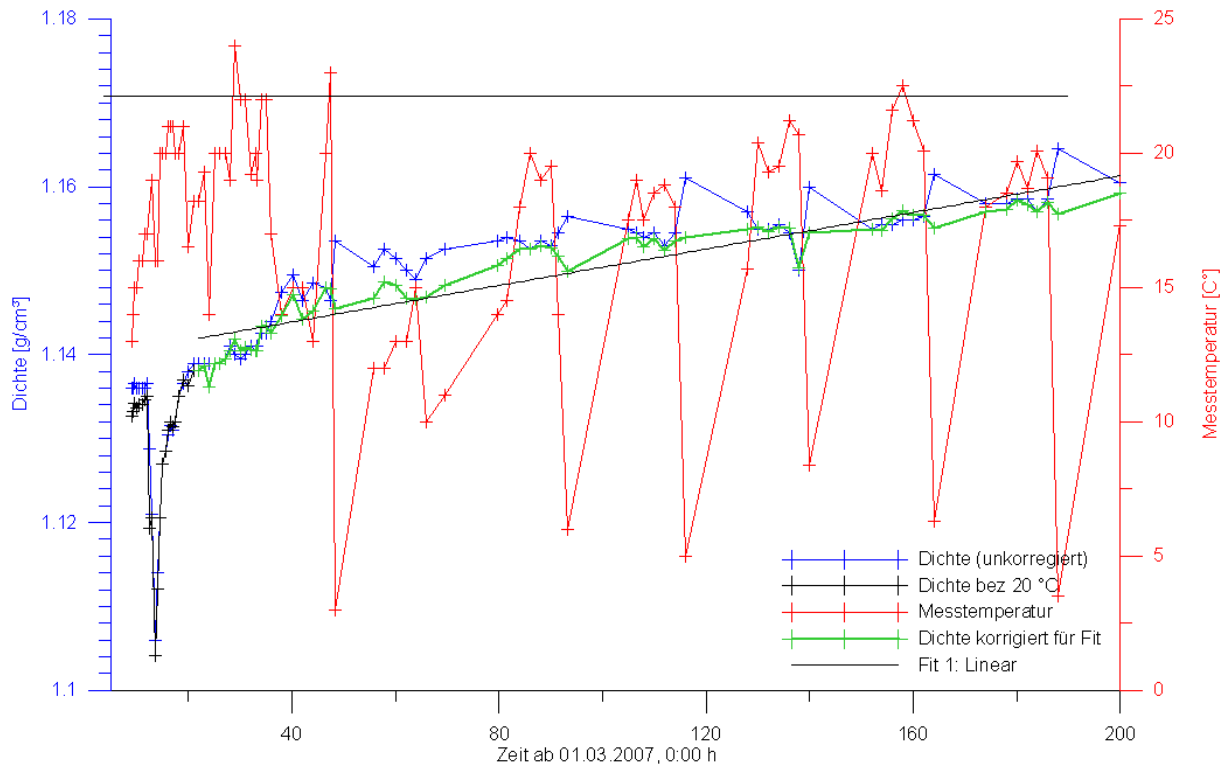


Abb. 2.5: Produktionstest im Solling vom 1.3. bis 15.3.2007; Dichtewerte gemessen und korrigiert.

27.3. bis 29.3.2007 – Injektionstest im Solling

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).

Diese „Beschädigung“ des Bohrlochs machte es unmöglich, das Tiefenzirkulationskonzept umzusetzen.

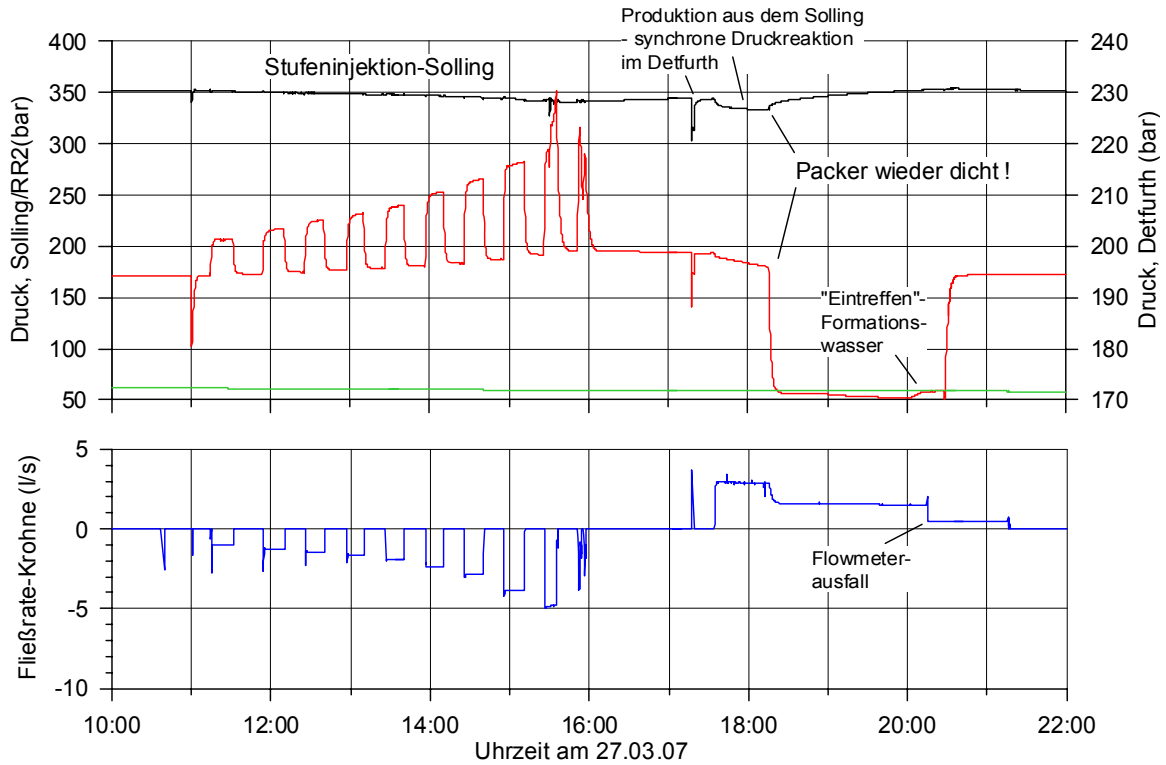


Abb. 2.6: Injektionstest im Solling vom 27.03. bis 29.03.2007; Abbildung zeigt den Verlauf für den 27.03.2007, 10 bis 22 Uhr; rote Kurve: Solling-Sandstein, schwarze Kurve Detfurth-Sandstein.

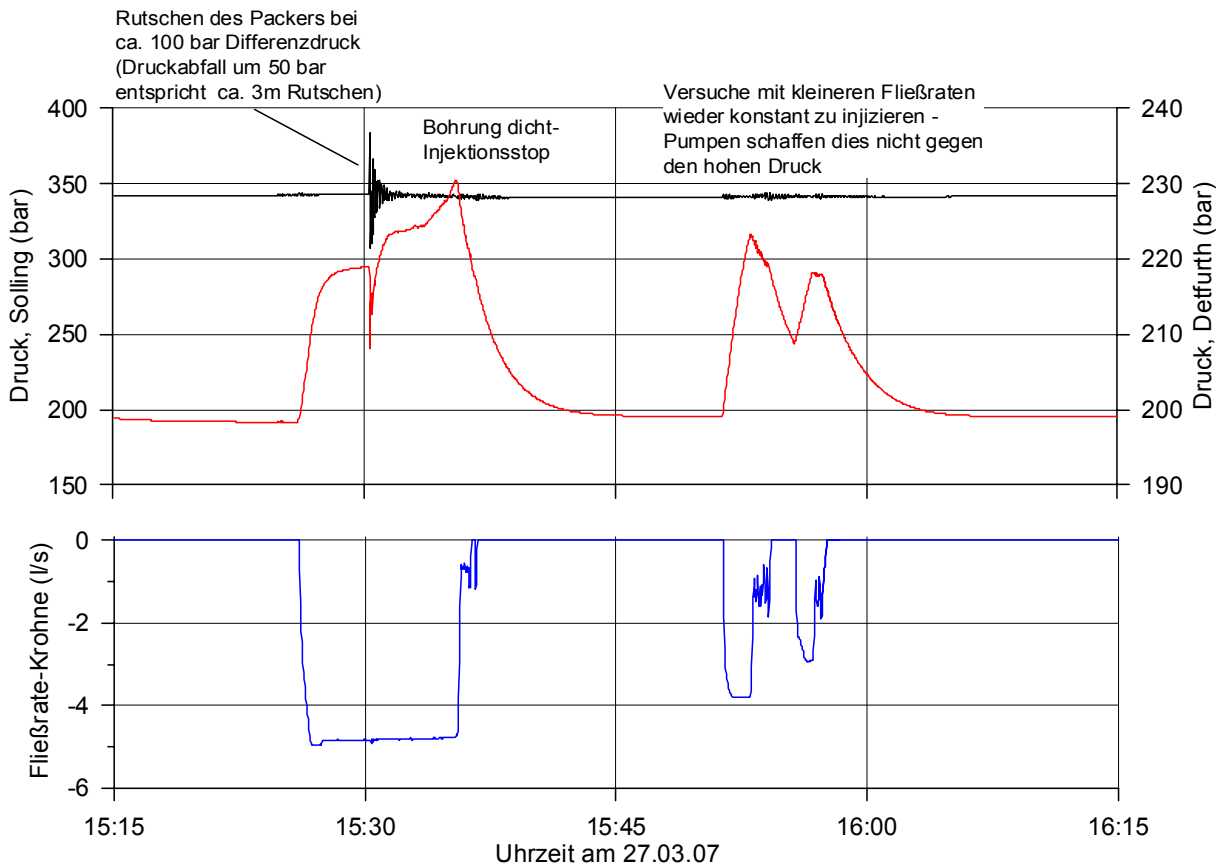


Abb. 2.7: Injektionstest im Solling vom 27.03. bis 29.03.2007; Abbildung zeigt den Verlauf für den 27.03.2007, 15:15 bis 16:15 Uhr; Ausschnitt aus Abb. 2.6; rote Kurve: Solling-Sandstein, schwarze Kurve Detfurth-Sandstein.

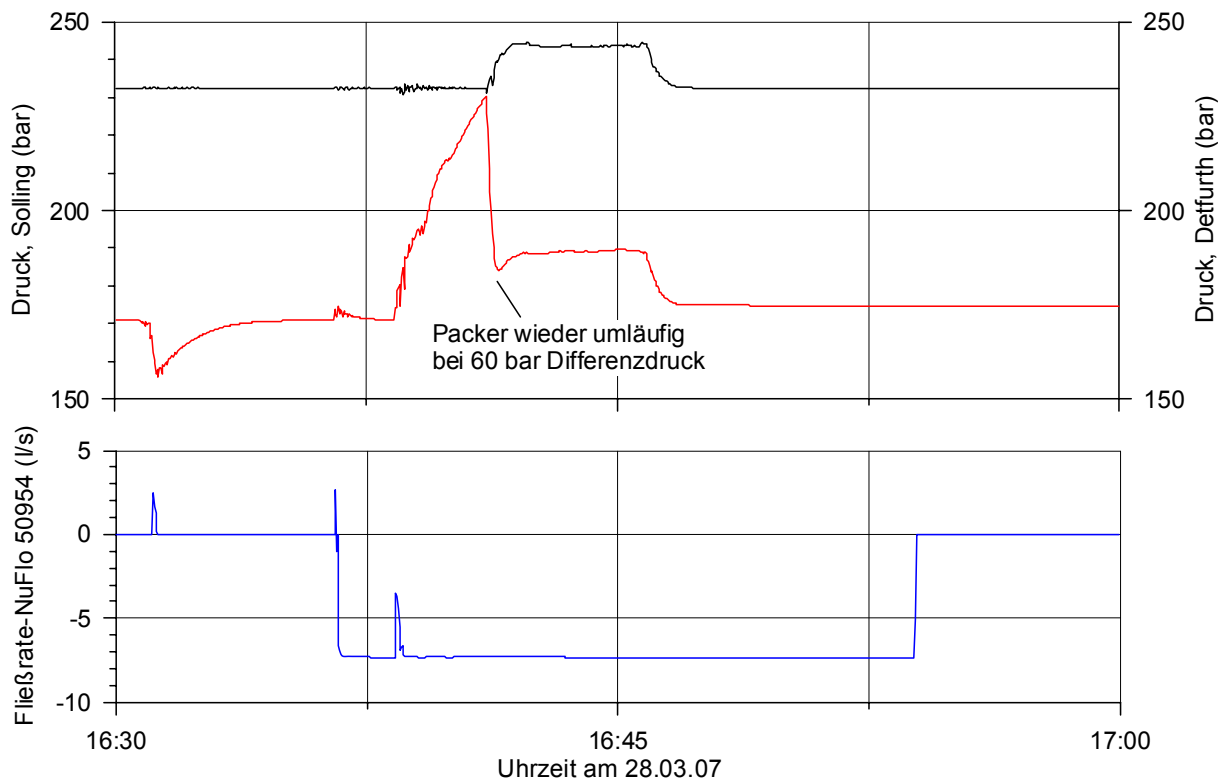
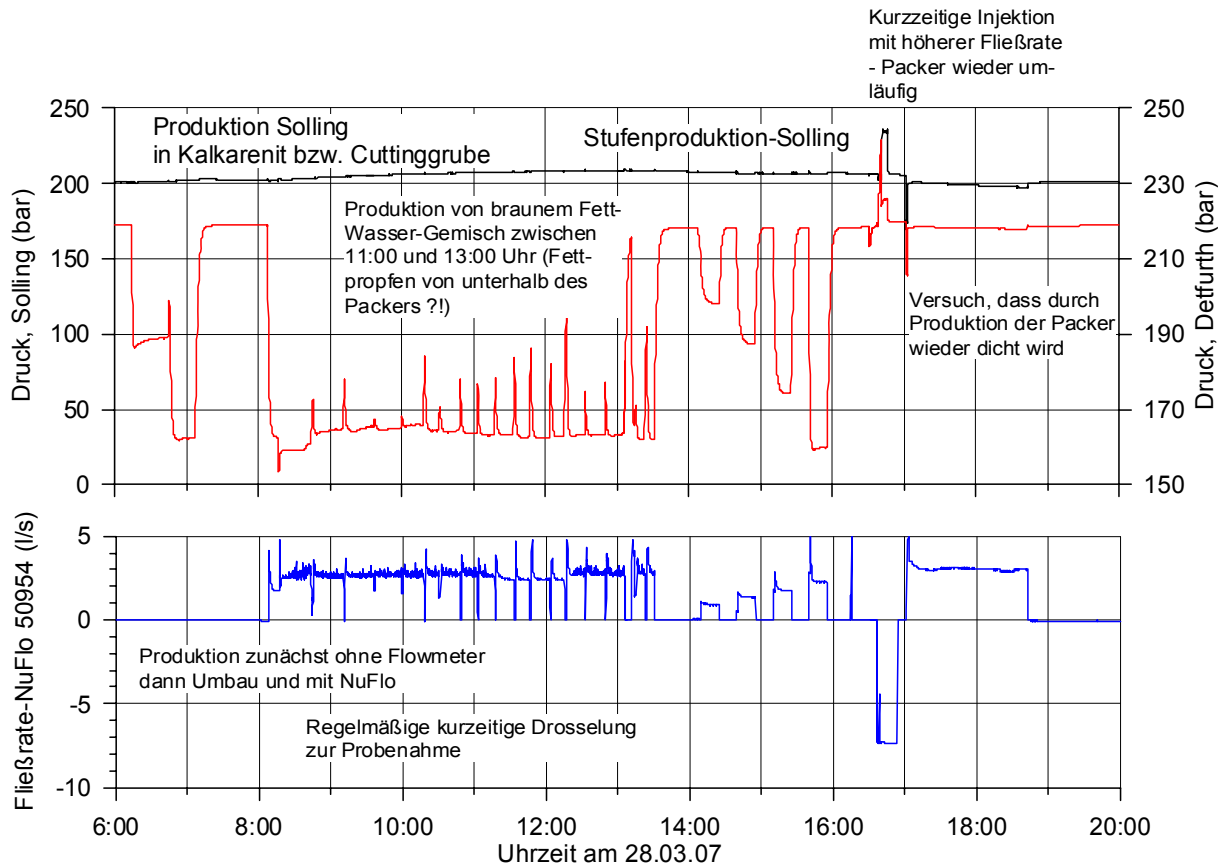


Abb. 2.8: Injektionstest im Solling vom 27.03. bis 29.03.2007), Abbildung zeigt den Verlauf für den 28.03.2007, 06 bis 20 Uhr (Bild oben) und 16:30 bis 17:00 (Bild unten); rote Kurve: Solling-Sandstein, schwarze Kurve Detfurth-Sandstein.

18.4. bis 20.4.2007 – Einbau der Schlumberger „Electric Submersible Pump“ (ESP)

Nach einer längeren Lieferfrist wurde im April 2007 die mehr-stufige Tauchpumpe (ESP, Schlumberger) in die Pumpenkammer eingebaut (Abb. 2.9) und in Betrieb genommen. Die maximal erzeugbare Druckdifferenz zwischen Einlass- und Auslassseite beträgt laut Hersteller 160 bar.

Wegen des umläufigen Bohrlochpackers konnte allerdings keine Tiefenzirkulation durchgeführt werden. Stattdessen wurde ein kurzzeitiger Testbetrieb der Tauchpumpe mit Injektion in den Detfurth-Sandstein und Speisung der Pumpe über eine Ladepumpe mit Frischwasser gefahren.



Abb. 2.9: Einbau der Schlumberger elektrischen Tauchpumpe (ESP)

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. 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).

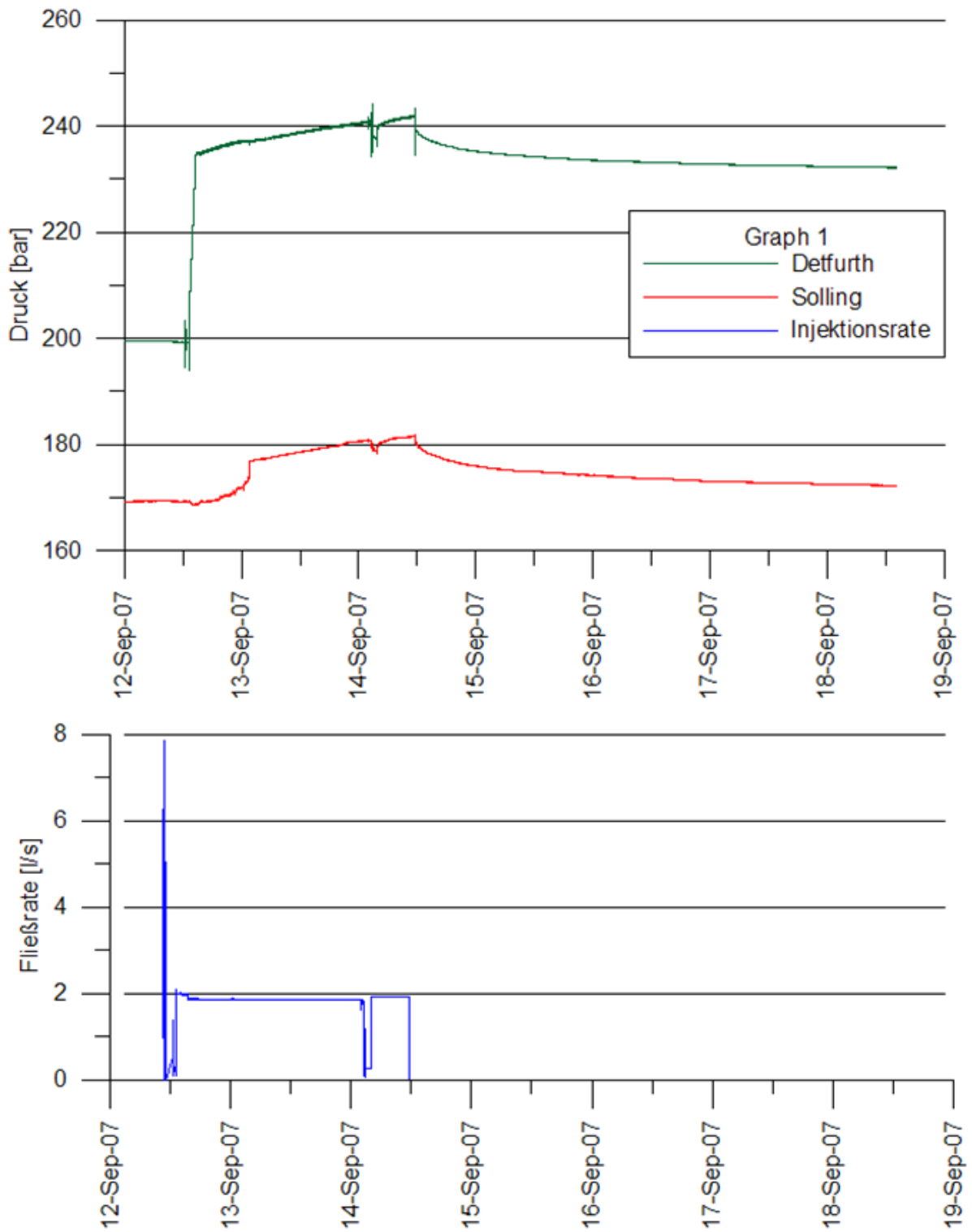


Abb. 2.10: Low Rate Injection Test im Defurth vom 11.9. bis 14.9.2007.

Aktionen 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 wissenschaftlichen 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. Zusammenfassend können folgende Aussagen getroffen werden:

- Der im Jahre 2003 im Detfurth-Sandstein erzeugte hydraulische Riss ist über mindestens 5 Jahre offen geblieben, was die Theorie eines Selbststützungsmechanismus neben kristallinem Gestein auch in Sedimentgesteinen untermauert.
- Durch den Zirkulationstest im November 2006 konnte die nachhaltige hydraulische Kommunikation zwischen Detfurth und Solling nachgewiesen werden.
- Die Auswertungen der Druckanstiegskurven während der *Shut-in* Phasen verschiedener Tests seit dem Jahr 2003 (Abb. 2.11) zeigt, dass das hydraulische Verhalten seit 2003 nahezu unverändert geblieben ist und somit keine „Schließungserscheinungen“ zu beobachten waren.
- 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 Test, die nahezu übereinander liegen. Speziell die Speichereigenschaften des Risses änderten sich durch die Erhöhung des Druckniveaus. Während der Riss-Speicherkoeffizient bei niedrigem Druckniveau bei $1,92 \cdot 10^{-4}$ m³/bar lag konnte dieser durch die Injektion von 20.000 m³ Frischwasser im November 2006 auf 36 m³/bar drastisch erhöht werden.

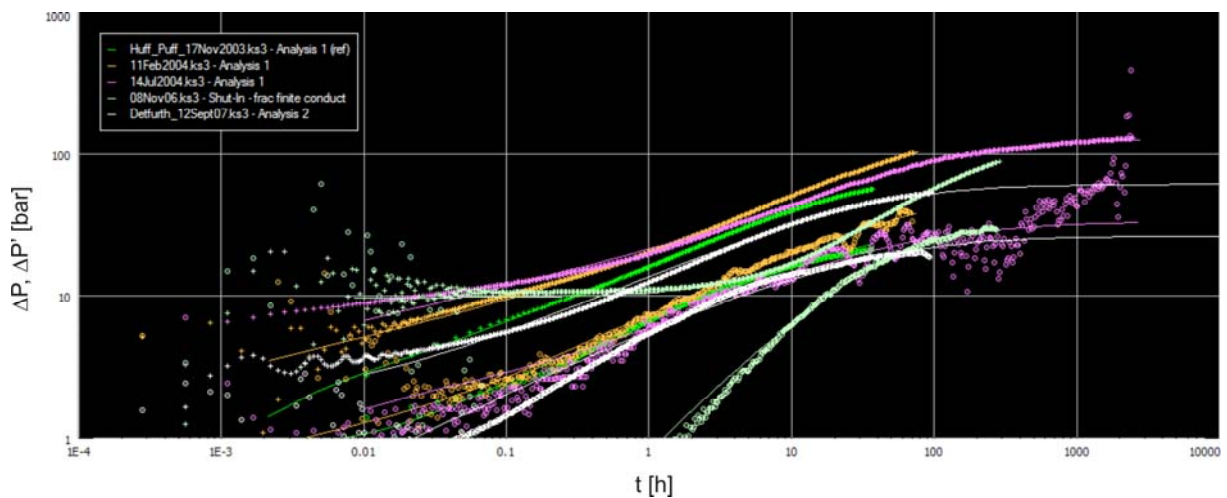


Abb. 2.11: Druckabhängigkeit des Risses und somit des Fließregimes im Detfurth-Sandstein.

3. Austausch des Bohrlochpackers an der Bohrung Horstberg

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

Folgende wesentliche Arbeiten wurden hierbei durchgeführt (Abb. 3.1 – 3.5):

- 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, erweist sich die Stabilität der Bohrspülung (Fomiat-Kreidespülung) 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 sedimentiert offenbar 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. Der Beginn des Packerwechsels und der Austausch des Bohrlochpackers an der Bohrung Horstberg dauerten länger als erwartet, sodass nicht alle geplanten hydraulischen Test wie geplant durchgeführt werden konnten. Der Packerwechsel wurde von der BGR in Auftrag gegeben und überwacht. Weitere Informationen zum Packerwechsel werden im Endbericht der BGR (Tischner et al. 2009) beschrieben.



Abb. 3.1: Bohrlochwinde in Horstberg



Abb. 3.2: Explosiv getrennter Strang aus ca. 3750 m Tiefe



Abb.3.3: Fanggarnitur für 1. Fangversuch



Abb. 3.4: Bleibaddruck vom Rohrstück oberhalb des Packers



Abb. 3.5: Ausbau des gefangenen „Fisches“ (oberer Teil) des Packers



4. Hydrogeochemische Untersuchungen

Auf die Thematik der Ausfällungsprozesse und der Korrosionsproblematik wird in den zwei folgenden Abschnitten nur zusammenfassend eingegangen. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind ausführlich in einem Fachbericht (Hesshaus 2009) dargestellt.

4.1 Ausfällungsprozesse und deren potentieller Einfluss auf die geothermische Nutzung

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 im Frühjahr 2008 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-Oxihydroxid (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. Sauerstoff-

ausschluss 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

Im März 2007 ist der Packer ist der Bohrung Horstberg Z1 umläufig geworden. Daraufhin wurde dieser im Herbst 2008/Winter 2009 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 *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 Wandstärkenverringerung von über 20 % auf. 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 Schädstellen 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.

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 durchschnittliche Tiefe der Schäden beträgt 0,14 mm, die maximale 0,28 mm.

Des Weiteren konnten 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 obertage 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. Außerdem könnten kavitative Prozesse ebenfalls mit wirken. Um die Ursache endgültig zu klären, müssten noch weitere Untersuchungen angestellt werden.

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

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 Detfurth- 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.

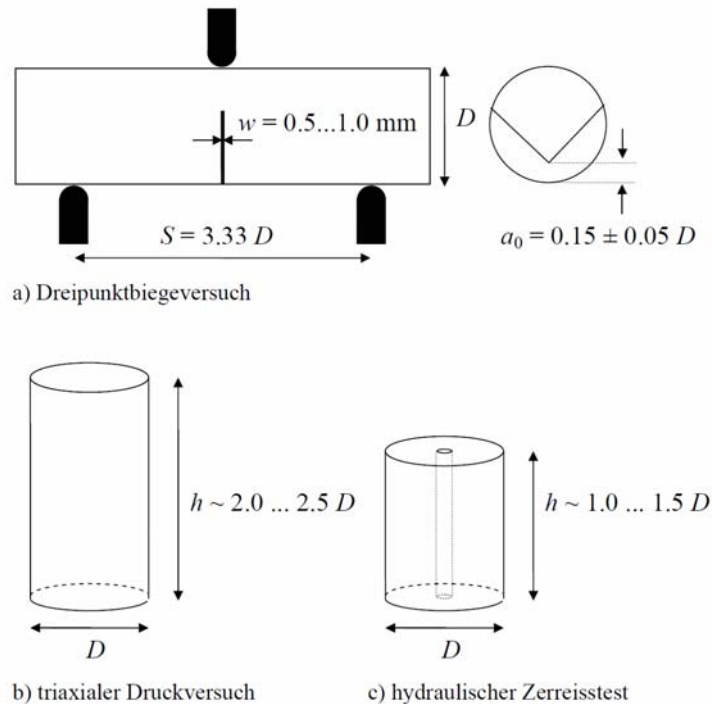


Abb. 5.1: Ideale Probengeometrie für a) Dreipunktbiegeversuche, b) triaxiale Kompressions-, und c) hydraulische Zerreißteste (Renner 2008, seine Abb. 2).

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 dinking" 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} ($\text{MPa m}^{0.5}$)	C, μ_i (MPa), (-)	τ_0, μ (MPa), (-)	T_{hyd} (MPa)
Sandstein	2500 -	schichtparallel (radial)	3900 - 4500	35 - 50 ⁺	0.4 - 1.0	175, 4*	7.9, 0.68*	28
	2600	schichtvertikal (axial)	2900 - 3700		0.9 - 1.5			29.5
Tonstein	2650 -	schichtparallel (radial)	3600 - 4000	~45	0.5 - 0.7	140, 2*	8.5, 0.54*	28
	2750	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

5.2 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.

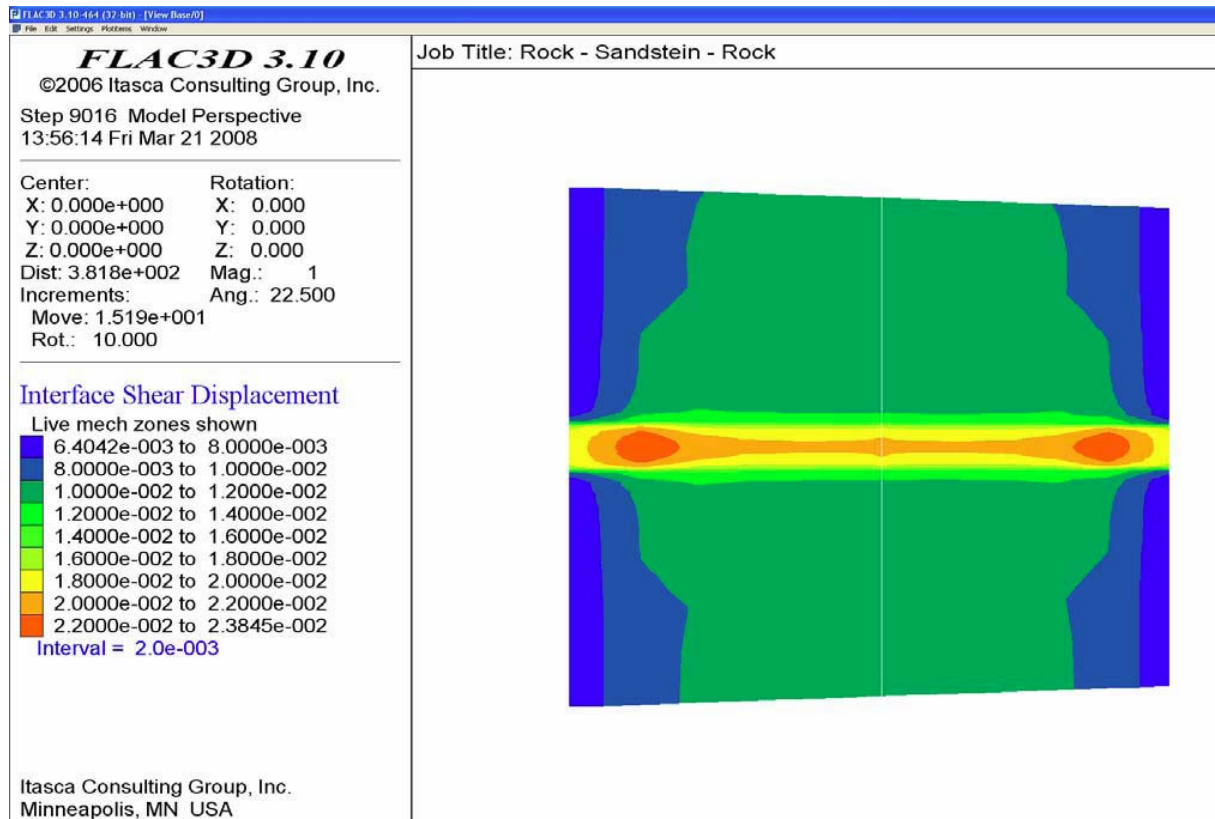


Abb. 5.2: Scherverschiebung zwischen den beiden Rissoberflächen am Beispiel eines um 15° gegenüber der größeren Horizontalspannung miss-orientierten Risses. Die Scherverschiebungen in der 10 m hohen Sandsteinschicht (Streifen in der Mitte) sind im Schnitt mehr als doppelt so groß wie in der Umgebung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

5.3 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 Riss-schließung unvollständig bleibt. Wenn die Beobachtung aus den Laborversuchen, dass hydraulisch induzierte Trennflächen in den Sandsteinproben rauer als in den Tonsteinproben er-

scheinen, auf die *in-situ* Verhältnisse übertragbar sind, sollte mit den höheren Scherver-schiebungen 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

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 Wärmegewinnung aus künstlichen Rissen durch zyklische 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 wesentli-

chen Auswirkungen der vorherigen Tests berücksichtigt. Die Rechnungen wurden für Injektionstemperaturen von 10 °C (wie im Experiment Tages- und Wochenzyklus) und für 60 °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.

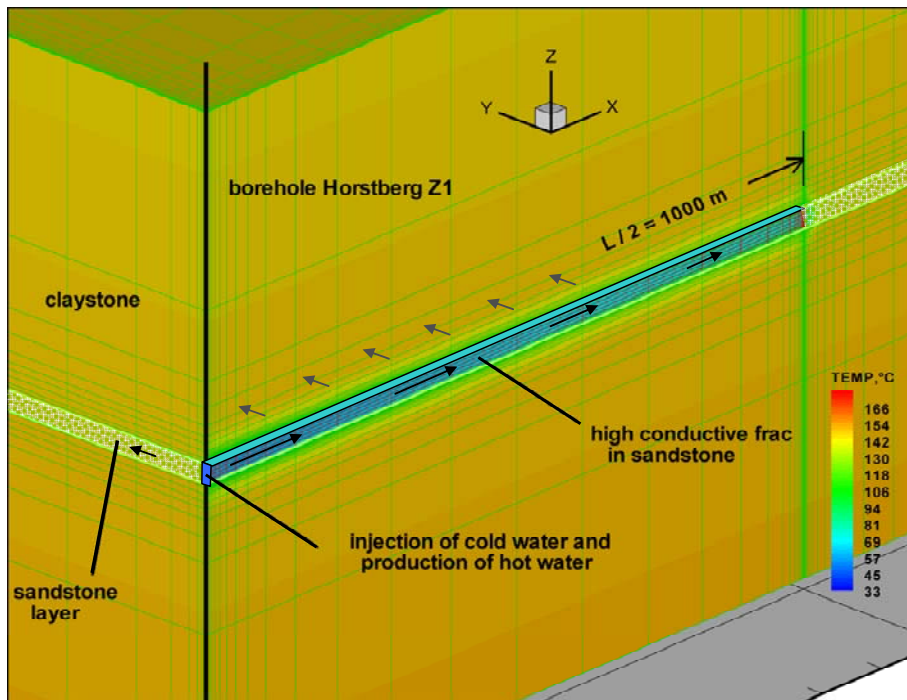


Abb. 6.1: Konzeptionelles Modell des Horstberg Z1 Wärmetauschers für wöchentliche und jährliche Reinjektions-Verfahren.

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 An-

fangsdruck wurde eine Addition aus hydrostatischen Druckbedingungen und dem beobachteten 200 bar artesischen Druck angesetzt.

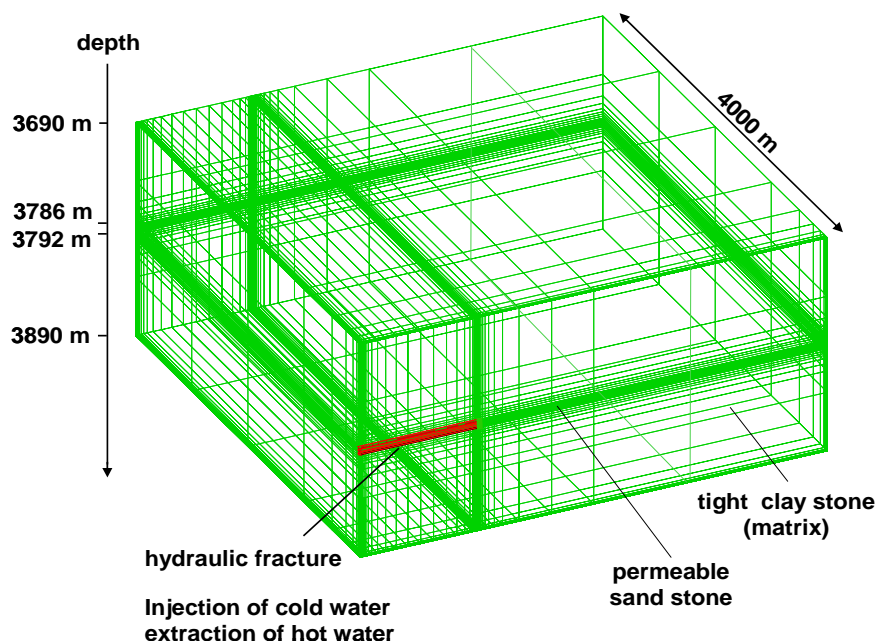


Abb. 6.2: Numerisches Modell des Horstberg Z1 Wärmetauschers für wöchentliche und jährliche Reinjektions-Verfahren. Das Modell besteht aus 19844 Elemente und 17826 Knoten.

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.

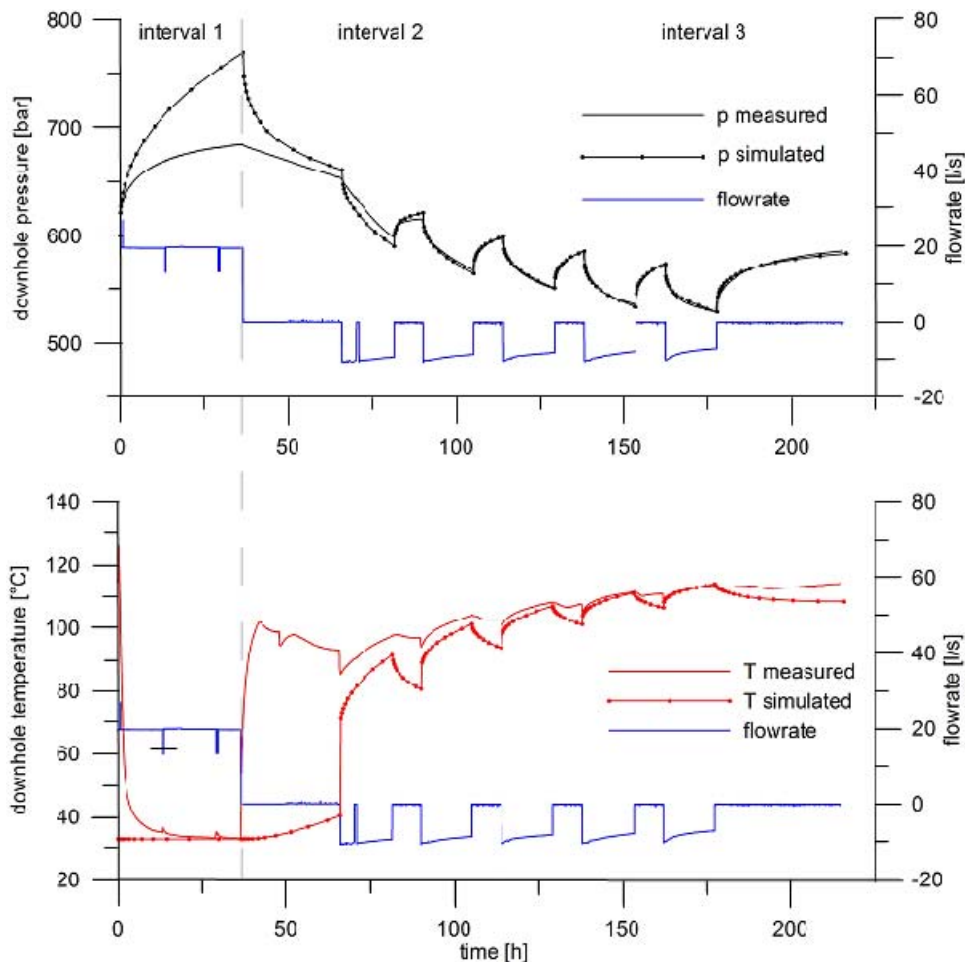


Abb. 6.3: Kalibrierung von Modellparametern des wochenzyklischen Verfahrens mithilfe von hydraulischen und thermischen Messdaten

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.

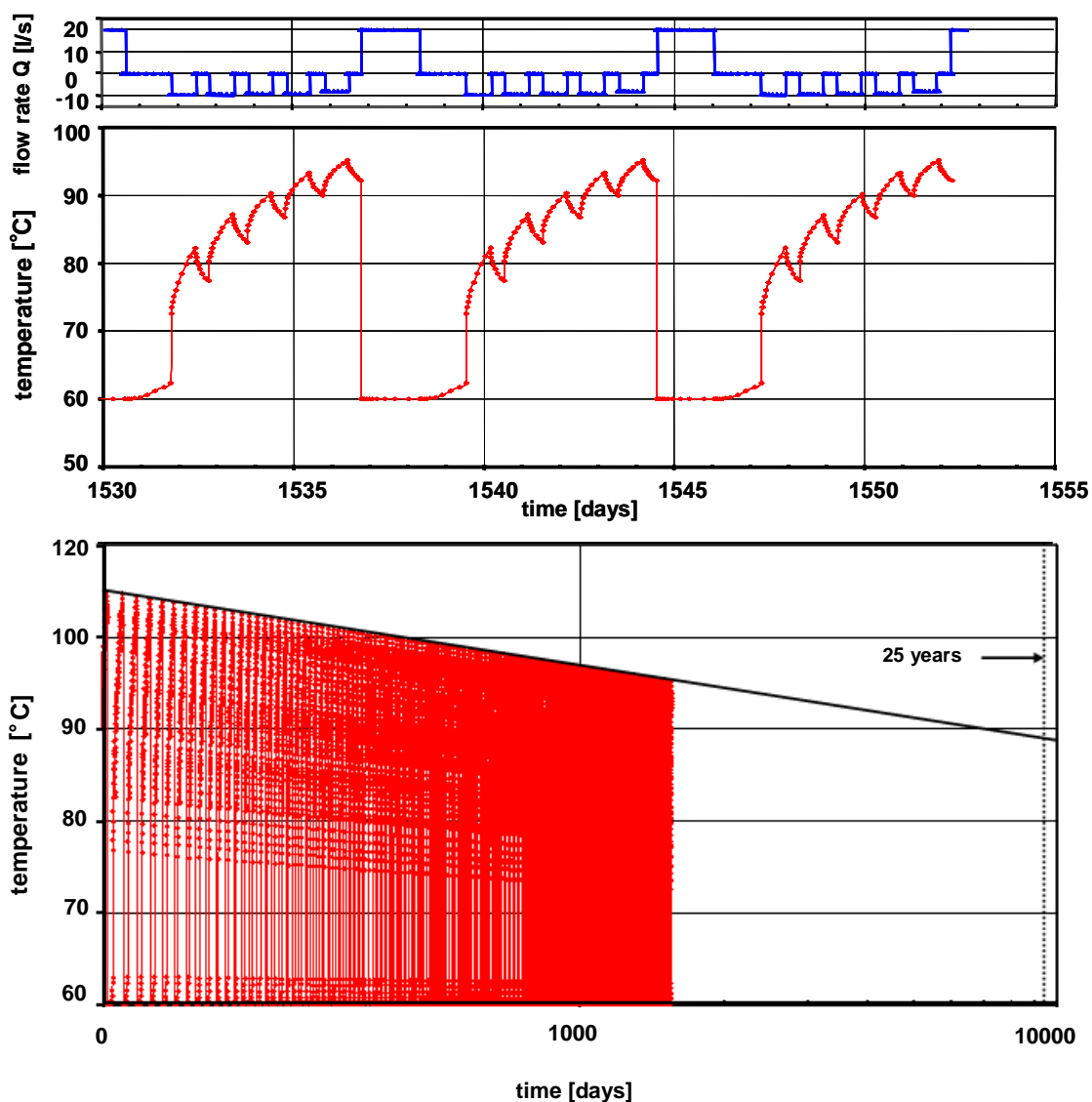


Abb. 6.4: Fließratenschema Q für den zyklischen Wochentest (Bild oben). Berechnete Produktionstemperaturen in Reservoirtiefe für 3 Wochenzyklen (Bild Mitte). Langzeitberechnung für Produktionstemperaturen (Bild unten). Die rote Kurve zeigt die Simulationsergebnisse für 4 Jahre. Einzelsystem, Riss halblänge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

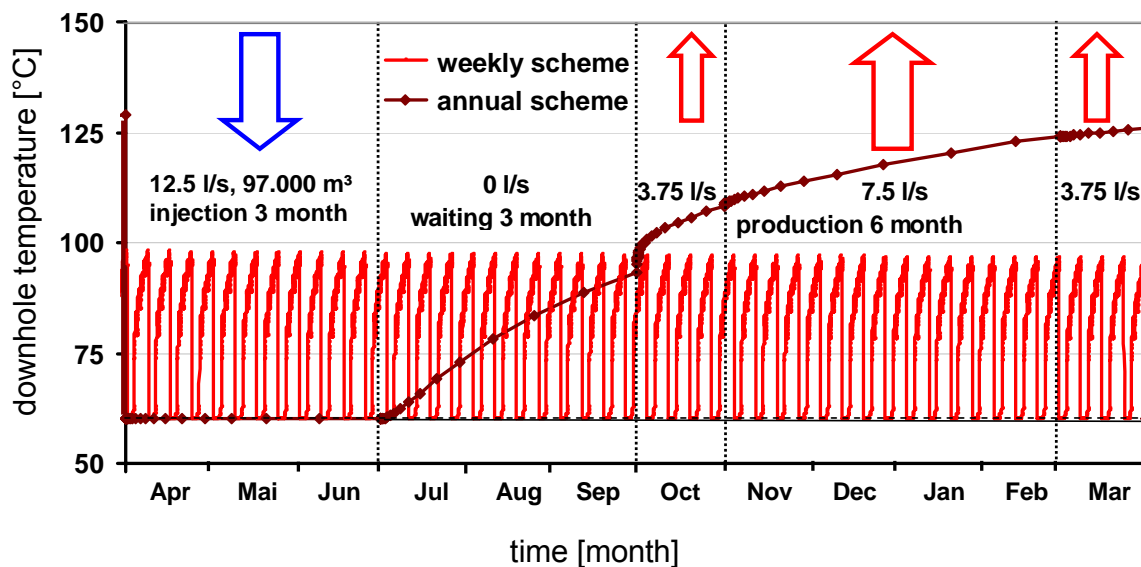


Abb. 6.5: Fließratenschema und berechnete Temperaturen während des vierten Produktionsjahres für das jahreszyklische und wochenzyklische Verfahren. Einzelrissystem, Rissshalblänge $L/2 = 1000 \text{ m}$.

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.

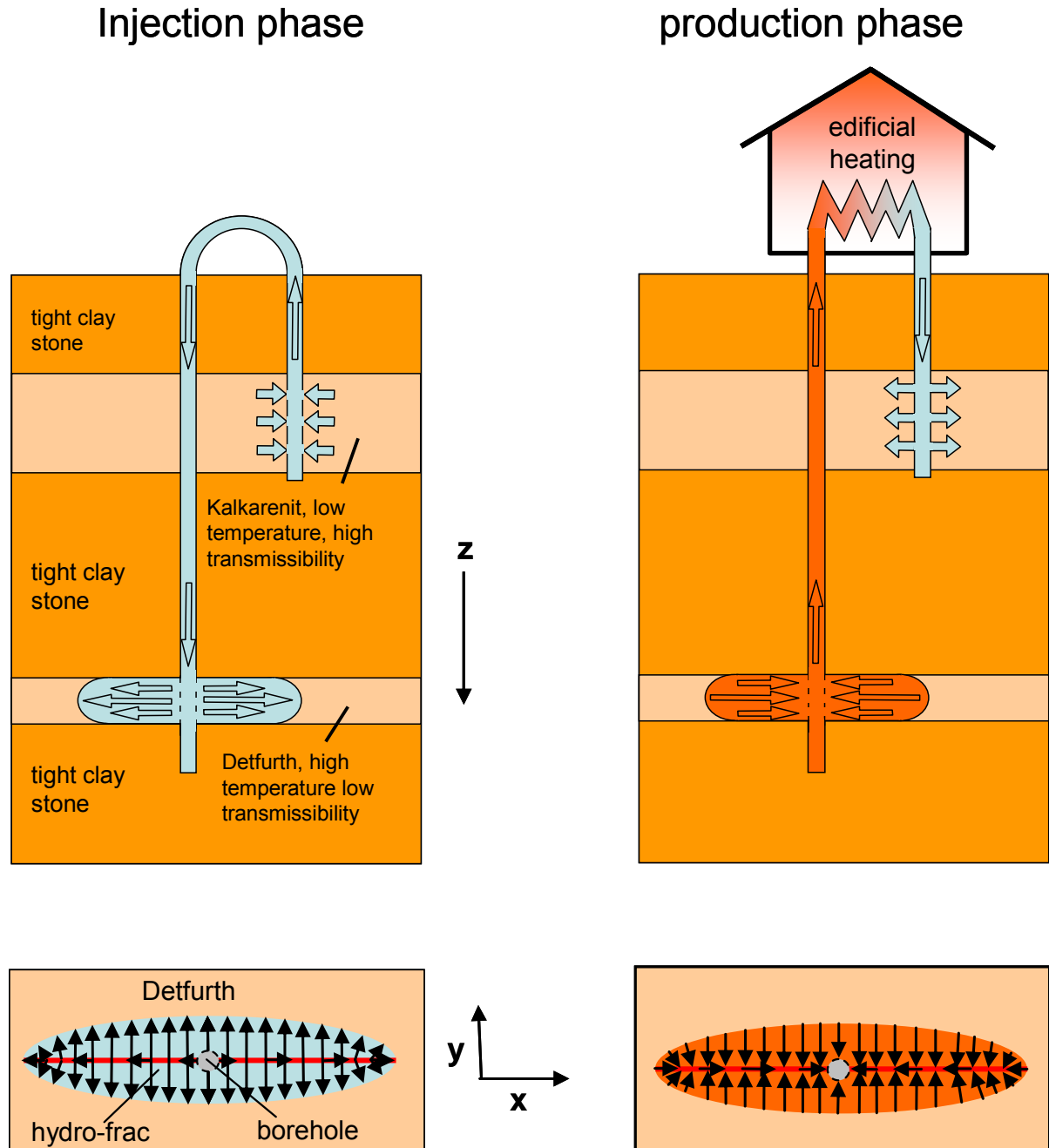


Abb. 6.6: Realisierung des jahreszyklischen Verfahrens: Während einer Periode von drei Monaten werden 100.000 m^3 kaltes Wasser dem Kalkarenit bzw. dem Wealden entzogen und in den Detfurth-Sandstein verpresst (Bild links). Nach einer dreimonatigen Ruhephase, in der sich das Wasser aufheizt, wird es im 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 jahreszyklische und wochenzyklische Verfahren

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.

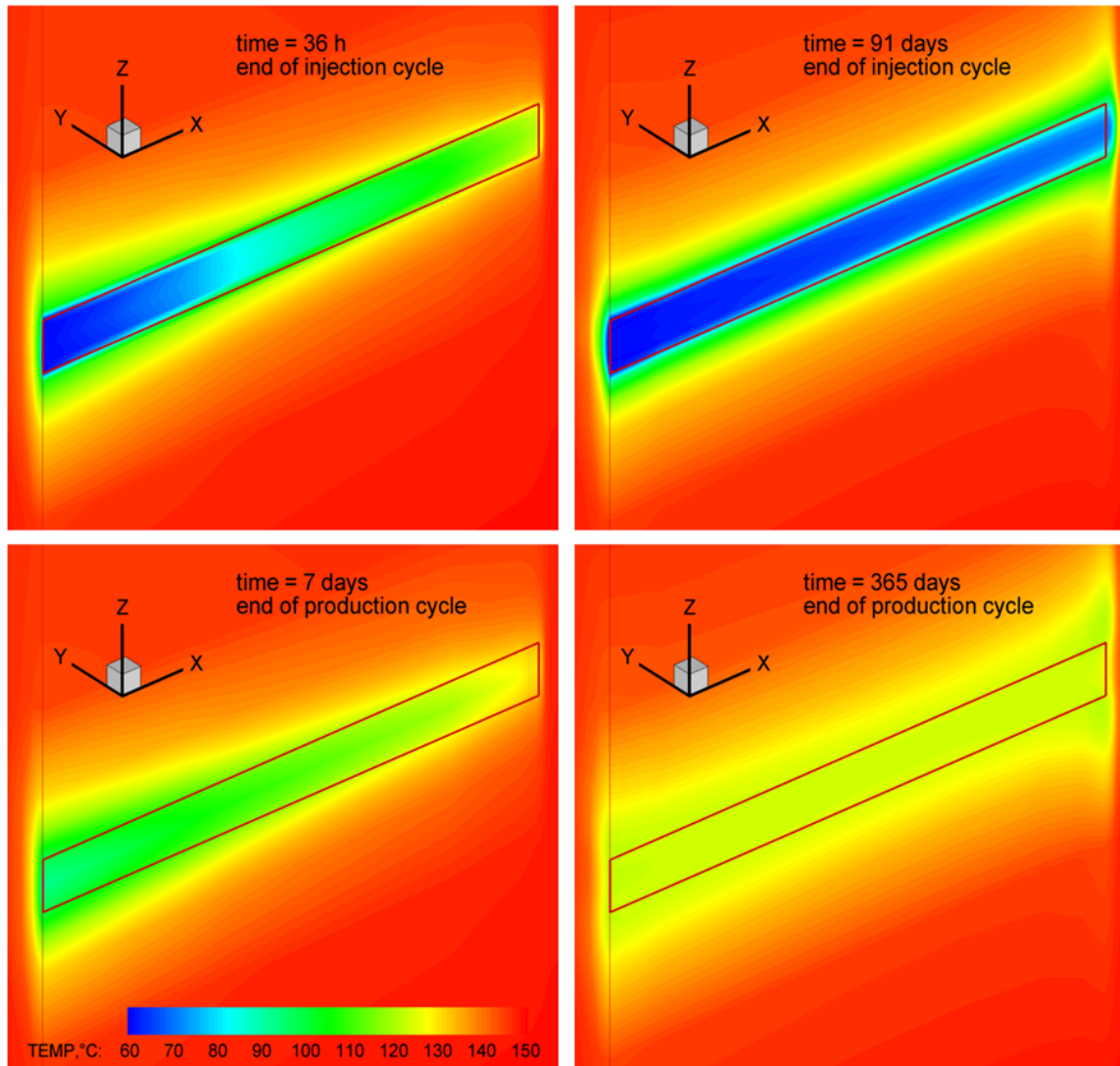


Abb. 6.7: Räumliche Temperaturverteilung für jahres- und wochenzyklisches Verfahren nach 4 Jahren Betriebsdauer, nach dem Shut in (Bild oben) und zu Ende des Produktionszyklus (Bild unten). Linke Seite wochenzyklisches Verfahren und rechte Seite jahreszyklisches Verfahren. Rissshalblänge $L/2 = 1000$ 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 Einschussphase (*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 Risspitzen 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).

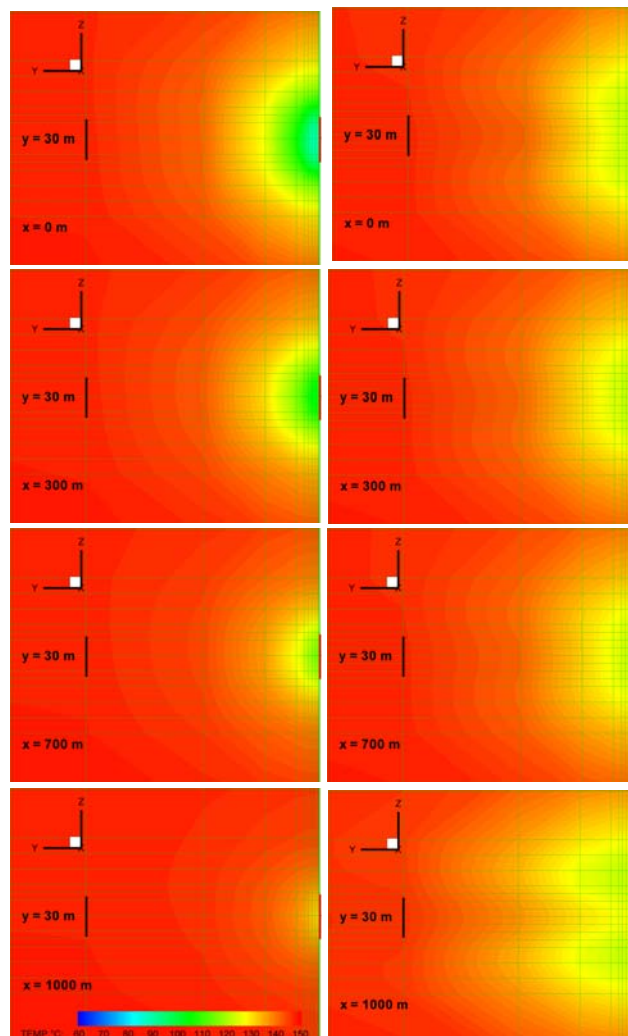


Abb. 6.8: Räumliche Temperaturverteilung für wochen- (links) und jahreszyklische (rechts) Verfahren auf verschiedenen Ebenen ($x = \text{const.}$) senkrecht zum Riss zu Ende der Produktionszeit nach 4 Jahren Betriebsdauer (Risshalbblängen $L/2 = 1000$ m für jedes Betriebschema).

Erhöhung der thermischen Leitung 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-Risssystem 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.

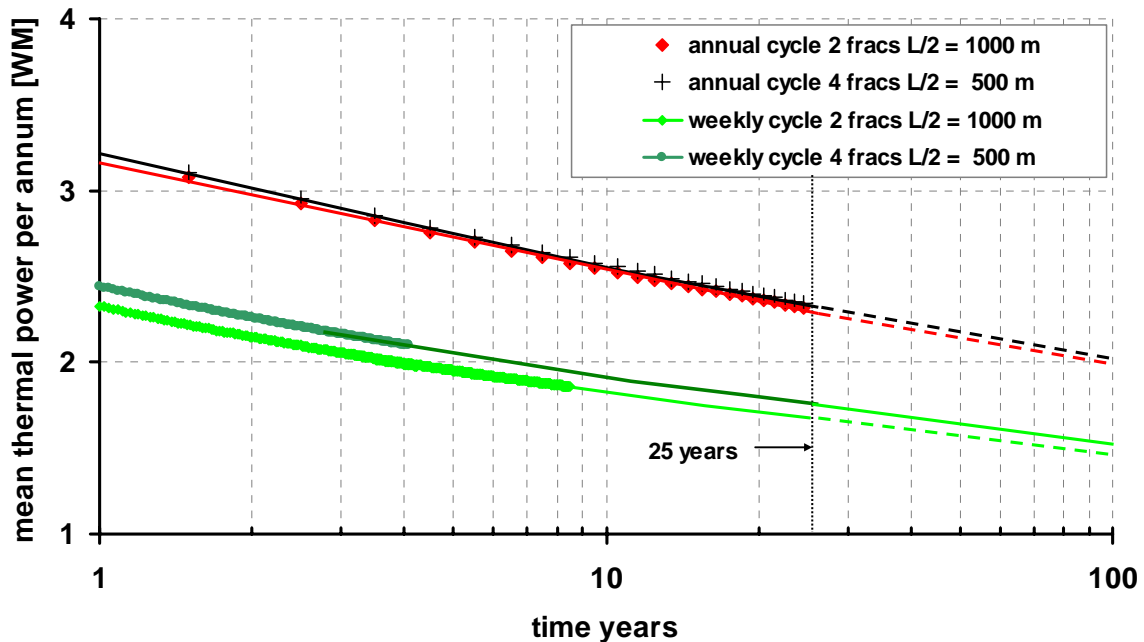


Abb. 6.9: Thermische Leistung für jahres- und wochenzyklisches Verfahren bei Verwendung von Mehrfrachrisssystemen mit unterschiedlichen Rissshälblängen (4 Risse $L/2 = 500$ m und 2 Risse $L/2 = 1000$ m).

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.

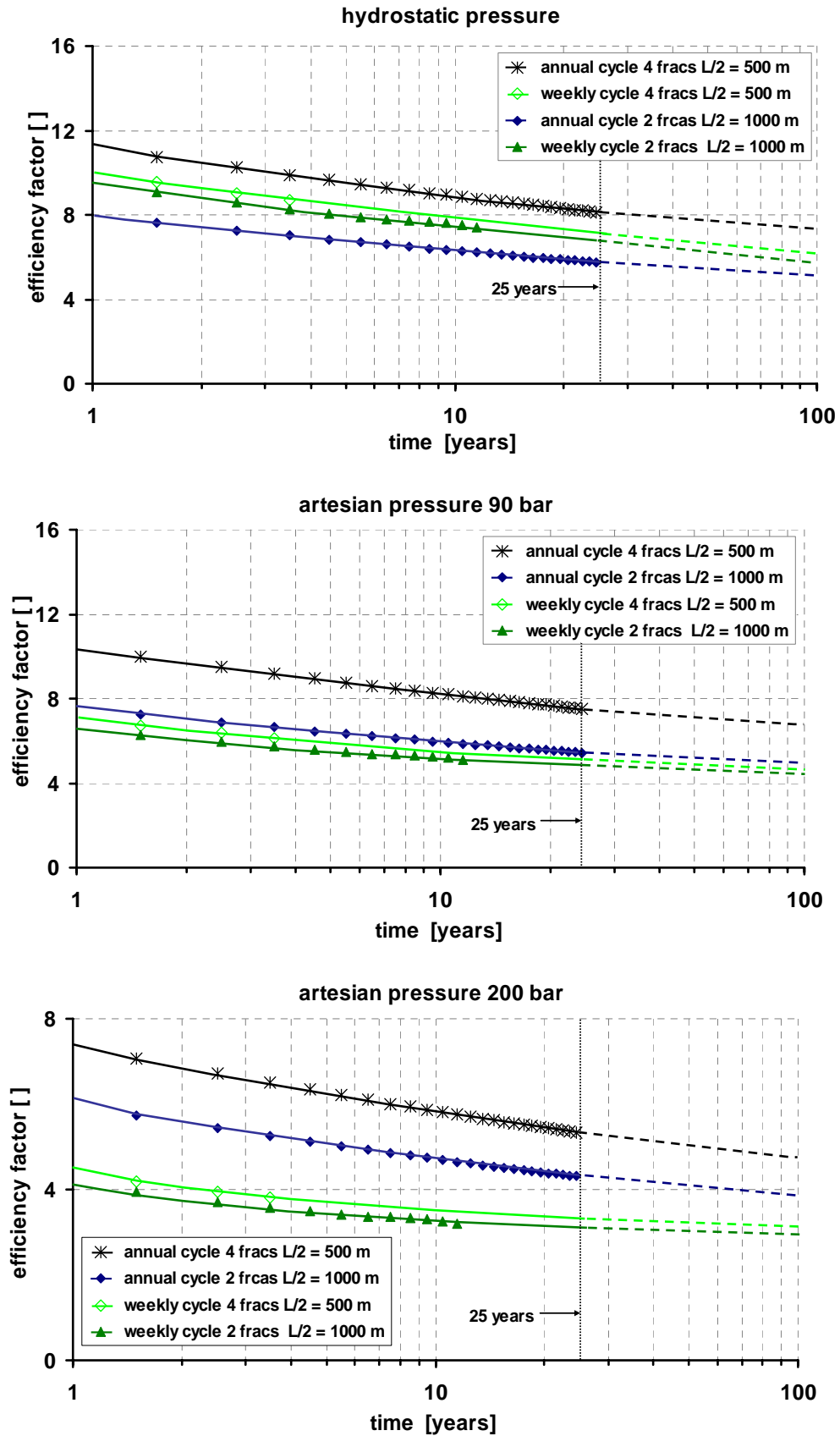


Abb. 6.10: Wirkungsgrad für Mehrrißwärmetauscher; oben hydrostatischer Druck, Mitte artesischer Überdruck von 90 bar, unten artesischer Überdruck von 200 bar.

6.2 Modellkalibrierung 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 Detfurth-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 Detfurth-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.

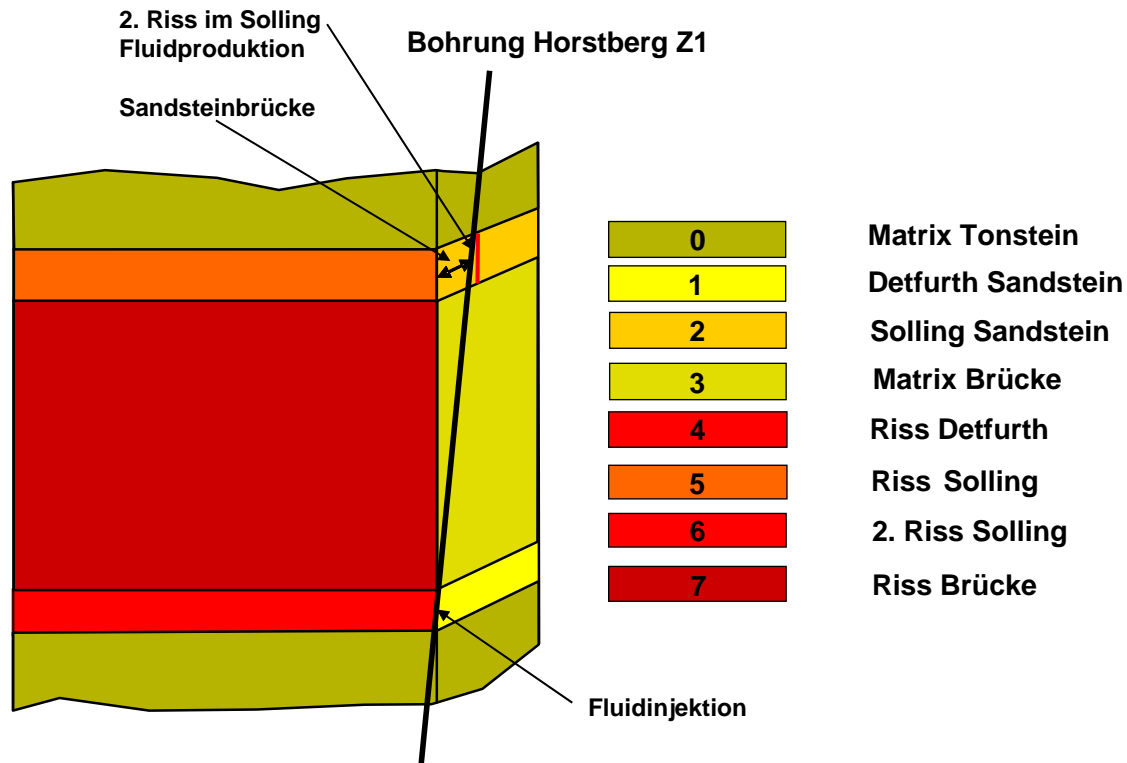


Abb. 6.11: Aufteilung in Materialgruppen (Tabelle 6.2 und 6.3) im Modell für die Modellkalibrierung. Dargestellt ist ein Viertel Ausschnitt aus dem Modell.

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

EINGABEPARAMETER	EINHEIT	WERT
Matrix und Brücke Tonstein (Materialgruppen Gruppen 0 und 3)		
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}
Detfurth-Sandstein (Materialgruppe 1)		
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]	$5 \cdot 10^{-15}$
Speicherkoeffizient S	[1/Pa]	$2 \cdot 10^{-11}$
Solling-Sandstein (Materialgruppe 2)		
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
Risse im Detfurth (Materialgruppe 4)		
Höhe	[m]	6
Spezifische Wärmeleitfähigkeit Wasser	[W/ m·K]	0.716
Spezifische Wärmekapazität Wasser	[J/ kg·K]	4128
Riss im Solling (Materialgruppe 5)		
Höhe	[m]	20
Spezifische Wärmeleitfähigkeit Wasser	[W/ m·K]	0.716
Spezifische Wärmekapazität Wasser	[J/ kg·K]	4128
Riss im Solling hinter Sandsteinbrücke (Materialgruppe 6)		
Höhe	[m]	20
Spezifische Wärmeleitfähigkeit Wasser	[W/ m·K]	0.716
Spezifische Wärmekapazität Wasser	[J/ kg·K]	4128
Risse im Tonstein (Materialgruppe 7)		
Höhe	[m]	234
Spezifische Wärmeleitfähigkeit Wasser	[W/ m·K]	0.716
Spezifische Wärmekapazität Wasser	[J/ kg·K]	4128
Fluid		
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

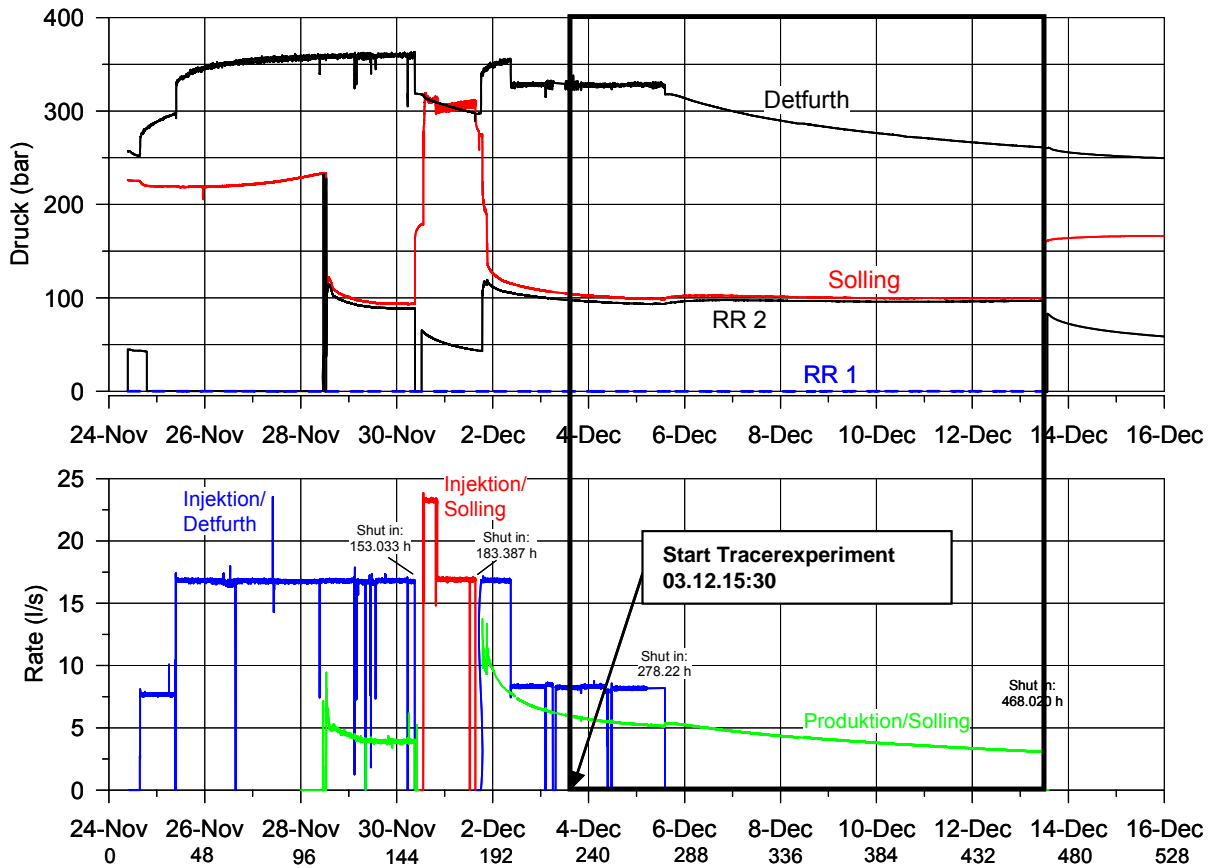


Abb. 6.12: Zirkulationstest vom 24.11.2004 – 16.12.2004 und Tracereperiment in Horstberg

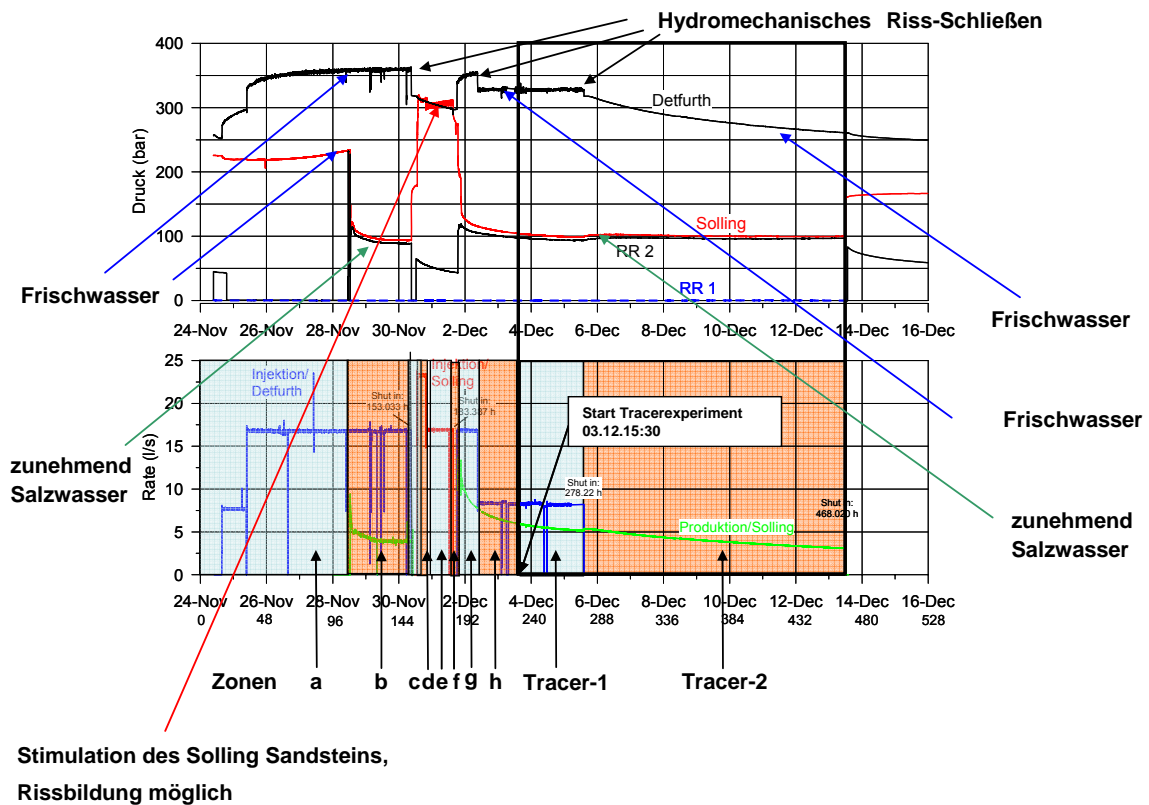


Abb. 6.13: Kalibrierung des Zirkulationsmodells, Aufteilung in Zeitzonen

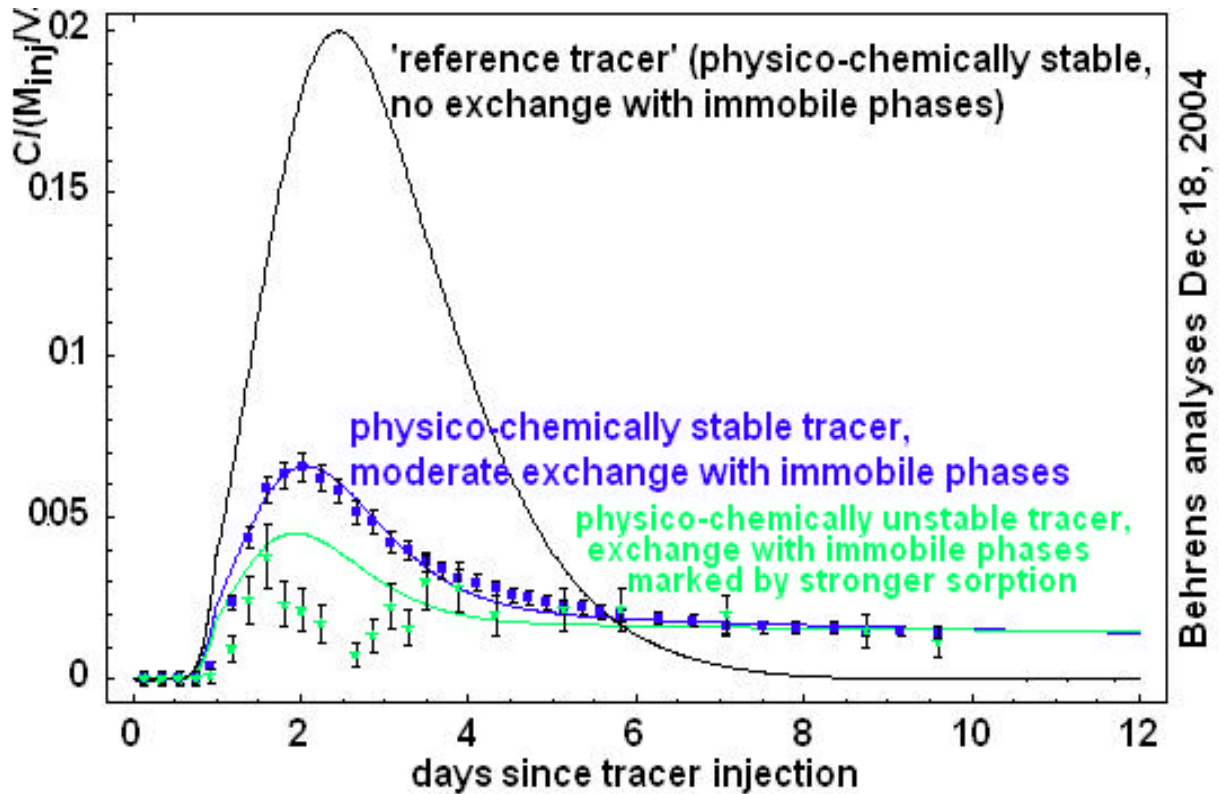


Abb. 6.14: Durchgangskurven der organischen Tracer Uranin, Naphtalendisulphat (NDS) und Tritium (Abbildung Universität Göttingen).

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, mindesten 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.

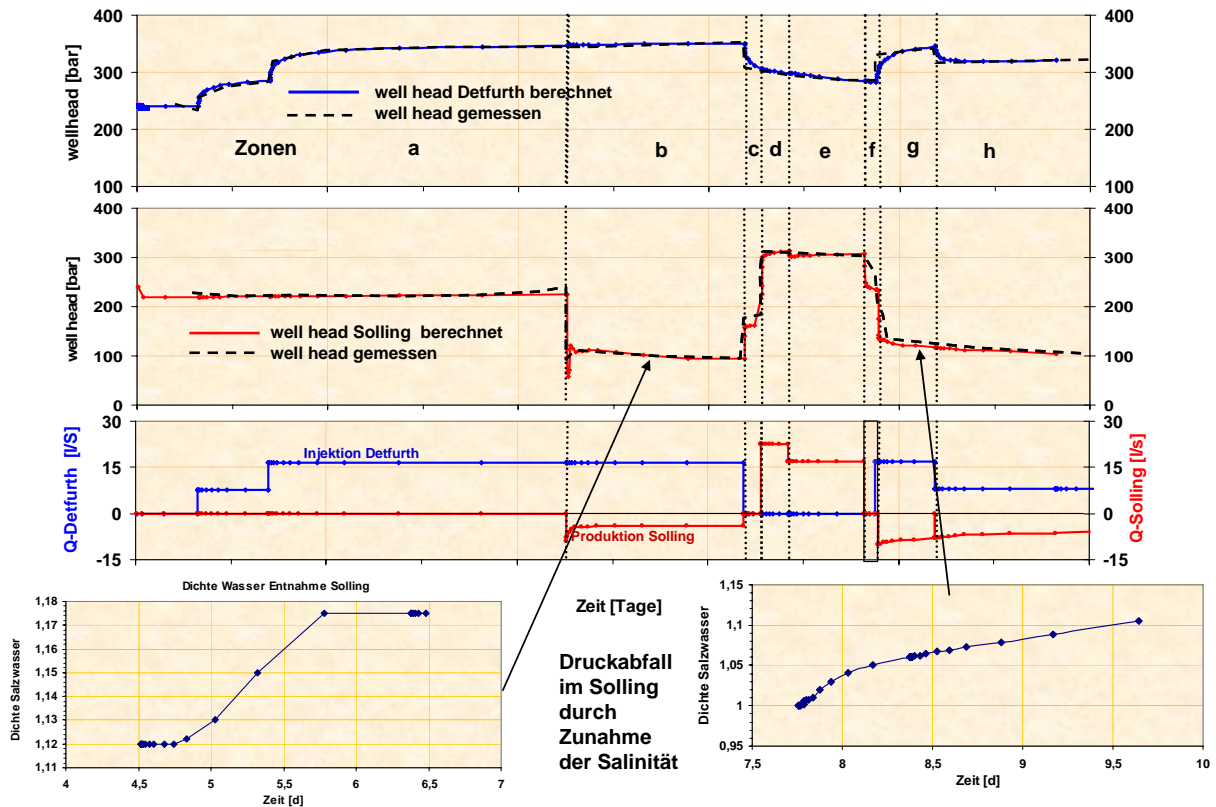


Abb. 6.15: Kalibrierung der hydraulischen Parameter des Modells mit Hilfe der hydraulischen Tests vom 24.11.2004 bis 03.12.2004.

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
Risshalbblänge = 500 m

Transmissibilität [m ³]	a	b	c	d	e	f	g	h
		Prod. Solling Injektion Detfurth	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
		Prod. Solling Injektion Detfurth	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

Modellkalibrierung mit hydraulischen Daten und Daten aus Tracermessungen

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 Ersteinsatz 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.

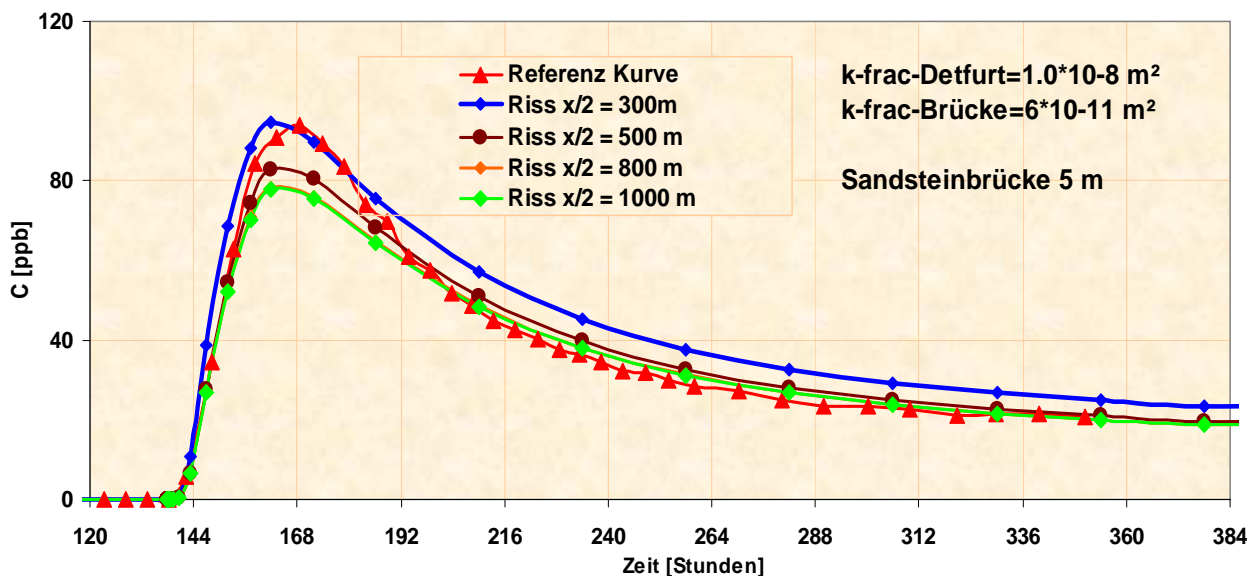


Abb. 6.16: Berechnung von Tracer-Durchgangskurven für Risshalblängen der Sandsteinhorizonte verbindenden Brückenrisses $x/2 = 300\text{ m} - 1000\text{ m}$ (das Modell wurde ohne Berücksichtigung der gemessenen Durchbruchzeiten und der hydraulischen Bohrlochkopfdaten an die Tracer-Durchgangsdaten angepasst)

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.

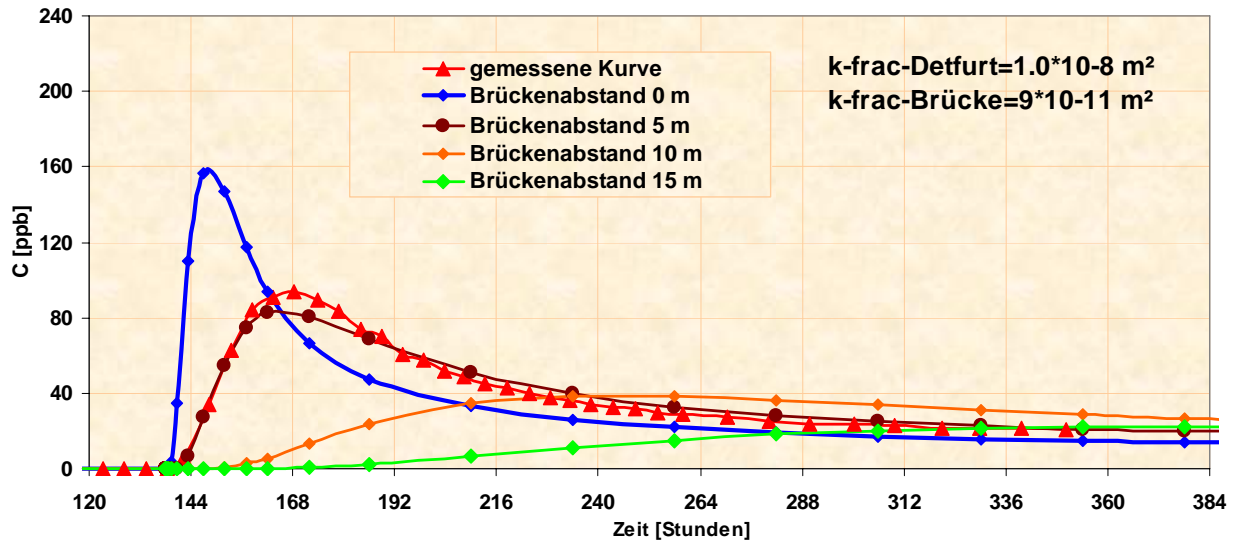


Abb. 6.17: Berechnung der Tracerdurchgangskurven für verschiedene Sandsteinbrückenabstände im Solling (0 m, 5 m, 10 m und 15 m; Rissshalblänge $x/2 = 500$ m).

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 Tracereperiment 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 Bohrlochkopfdrücke 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.

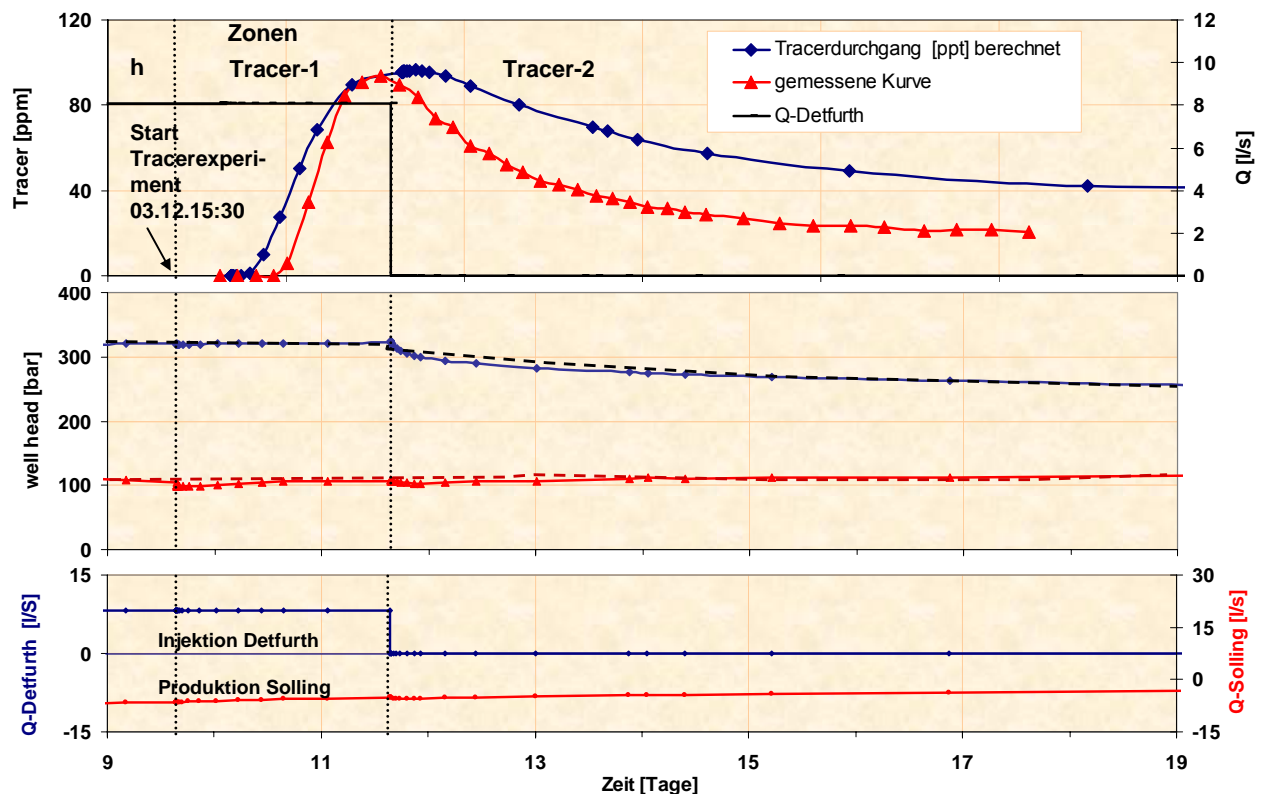


Abb. 6.18: Kalibrierung der hydraulischen Parameter des Modells mit Daten aus Wellhead-Messungen und Tracer-Versuchen

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 [m ²]	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	

Speicherkoeffizient [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	

Verwertbarkeit der Ergebnisse

Mit den in der Bohrung Horstberg Z1 durchgeführten Untersuchungen konnten neue Erkenntnisse über die Anwendbarkeit der Wasserfrac-Technik in gering-permeablen Sedimentgesteinen gewonnen werden. Wesentliche im Vorfeld seitens der KW-Industrie geäußerte Bedenken wurden widerlegt. Unter anderem wurde nachgewiesen, dass mittels Wasserfrac-Technik großflächige Zugrisse in geschichteten Sedimentgesteinen erzeugt werden können, die in ihrer Höhe nicht auf die Sandsteinhorizonte beschränkt sind, sondern sich auch durch Tonsteinhorizonte hindurch fortsetzen. Die Experimente zeigten außerdem, dass die hydraulisch erzeugten Risse in den Sandsteinhorizonten auch ohne den Eintrag von Stützmitteln offen bleiben und dort eine höhere hydraulische Leitfähigkeit besitzen als Stützmittel-gefüllte Risse. Trotz des Einsatzes modernster geophysikalischer Ortungsverfahren gelang es nicht, das Wachstum der hydraulisch erzeugten Risse von der Oberfläche aus zu verfolgen und die Orientierung der Risse zu bestimmen.

Diese Ergebnisse sind nicht nur für die geothermische Anwendung, sondern vor allem auch für die Anwendung der Wasserfrac-Technik in der KW-Gewinnung von großer Bedeutung. Auch dort versucht man seit Jahren mit wechselnden Erfolgen gering permeable Reservoirgesteine (tight gas formations) durch Frac-Behandlungen zu erschließen. Die Ergebnisse unserer Tests lassen vermuten, dass mit der Wasserfrac-Technik auch in KW-Reservoiren bei geringerem Aufwand als bei der herkömmlichen Frac-Technik hervorragende Ergebnisse zu erzielen sind.

Neben diesen Ergebnissen, die allein schon den erheblichen technischen und finanziellen Aufwand der Tests rechtfertigen, konnten drei neuartige Einbohrlochverfahren zur Wärmegewinnung aus gering-permeablen Sedimentgesteinen erprobt werden. Für zwei dieser Verfahren, das Zyklus- und das Tiefenzirkulationsverfahren, gelang der Nachweis, dass mit ihnen eine Wärmegewinnung im Leistungsbereich einiger MW über mehrere Jahrzehnte möglich ist. Für das dritte Verfahren, das Einbohrloch-Zweischichtverfahren, gelang dieser Nachweis nicht, doch legen die Ergebnisse nahe, dass es an vielen Standorten mit weniger dichtem Deckgebirge als in der Bohrung Horstberg mit größerem Erfolg eingesetzt werden kann. Diese positiven Ergebnisse sind auf weite Bereiche des Norddeutschen Beckens und anderer Beckenstrukturen in Deutschland übertragbar und sind sowohl für die Direktwärmenutzung als auch für die geothermische Stromerzeugung von Bedeutung sind. Die Einsatzmöglichkeiten der geothermischen Direktwärmenutzung werden dadurch mittelfristig erheblich erweitert.

Die erzielten Ergebnisse werden direkt in die Realisierung des GeneSys-Demonstrationsvorhabens zur geothermischen Direktwärmeversorgung des GEOZENTRUMs Hannover einfließen. Die Mittel für dieses Vorhaben sind bereits in den Bundeshaushalt 2007, 2008 und 2009 eingestellt. Das am GEOZENTRUM geplante Vorhaben soll demonstrieren, dass eine nachhaltige nahezu standortunabhängige geothermische Wärmeversorgung von Verbrauchern mittlerer Größe (Kliniken, Bürokomplexe, Industriebetriebe, u. a.) machbar und bei steigenden Energiepreisen auch wirtschaftlich ist.

Neben diesen generellen Ergebnissen wurden auch technische Erfahrungen gewonnen, die praktische Anwendungen auch in anderen Projekten finden können:

- Eine Stimulation auch mit hohen Fließraten ist durch eine Perforationsstrecke ohne erhebliche Druckverluste möglich. Dieses Vorgehen war an der Bohrung Horstberg nötig, da sie voll verrohrt war. Dieser zunächst nachteilig erscheinende Umstand erwies sich im Nachhinein als Vorteil, da dadurch zu jeder Zeit die Stabilität der Bohrung gewährleistet war. Ein solches Ausbauschema mit nachträglicher Perforierung der Teststrecken und selektivem Anschluss einzelner Formationen, könnte daher für zukünftige Geothermiebohrungen beispielhaft sein.
- Die Perforationsschüsse selbst können, soweit vorhanden, zur Kalibrierung eines seismischen Netzwerkes genutzt werden. Damit entfallen zusätzliche Kosten für einen Kalibrierschuss.
- Unter tektonisch/geologischen Bedingungen, die denen im Bereich der Bohrung Horstberg entsprechen, werden bei den Wasserfrac-Tests Zugrisse erzeugt. Die induzierte Seismizität ist um Größenordnung geringer als bei vergleichbare Tests in kristallinen Gesteinen. Das bei der Diskussion um HDR-Konzepte oft angeführte seismische Risiko besteht nicht.
- Für eine energetisch sinnvolle Betriebsweise ist der Einsatz eines thermisch isolierten Steigrohres in vielen Fällen unverzichtbar. Mit dem Einsatz von thermisch isolierten Steigrohren der hier benötigten Länge (> 3.600 m) bestehen zurzeit jedoch noch keine Erfahrungen.
- In der Bohrung Horstberg konnte einer der bestehenden Ringräume für die Reinjektion in den Kalkarenit genutzt werden, da dieser im Bereich des Kalkarenits unzementiert war. Ein solches Ausbauschema könnte für zukünftige Einbohrlochverfahren beispielhaft sein, da sich auf diese Weise der nachträglichen Einbau von Packern und Förderleitungen ersparen lässt.

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 das 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 finanzierten 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.

Leibniz-Institut für
Angewandte Geophysik

(Prof. Dr. U. Yaramanci)

Autoren:

(R. Schellschmidt)

(A. Hesshaus)

(H. Sulzbacher)

(R. Junker)

(T. Tischner)

(R. Jatho)

Veröffentlichungen - Berichte

Im Rahmen des GeneSys-Projekts entstandene Publikationen und Berichte unter Beteiligung des LIAG, der BGR 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 (accepted).
- 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.