

R. Jung
J. Orzol
P. Kehrer
R. Jatho

Verbundprojekt: GeneSys

**Vorstudie – Erprobung der Wasserfrac-Technik und des
Einsonden-Zweischichtverfahrens für die Direktwärmenut-
zung aus gering permeablen Sedimentgesteinen**

Abschlussbericht

zum Vorhaben FKZ 0327112 & 0327116



Verbundprojekt GeneSys

Vorstudie – Erprobung der Wasserfrac-Technik und des Einsonden-Zweischichtverfahrens für die Direktwärme- nutzung aus gering permeablen Sedimentgesteinen

Abschlußbericht

Abschlußbericht zu den Vorhaben FKZ 0327112 & 0327116

**Gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktor-
sicherheit**

Projektträger: PT Jülich

Zuwendungsempfänger:

- **Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA-Institut),
Stilleweg 2, 30 655 Hannover, Projektleiter: Dr. R. Jung**
- **Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Stilleweg 2,
30 655 Hannover, Projektleiter: Prof. Dr. P. Kehrler**

Autoren: R. Jung, J. Orzol, P. Kehrler, R. Jatho

Laufzeiten:

BGR: 1.10.2002 – 31.12.2005

GGA-Institut: 1.10.2002 – 30.9.2005

Berichtsdatum: Juli 2006

Inhaltsverzeichnis

1 KURZDARSTELLUNG	4
1.1 Aufgabenstellung.....	4
1.2 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens.....	5
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	7
1.4 Wissenschaftlich-technischer Stand zu Beginn des Vorhabens.....	8
1.5 Zusammenarbeit mit Projektpartnern	11
2 EINGEHENDE DARSTELLUNG DES PROJEKTES	13
2.1 Erzielte Ergebnisse.....	13
2.1.1 Geographische Lage des Versuchsfeldes.....	13
2.1.2 Geologische und geothermische Bedingungen am Standort Horstberg ...	16
2.1.3 Technischer Ausbau der Bohrung Horstberg Z1	19
2.1.4 Versuchsfeld und Versuchsaufbau.....	20
2.1.5 Übersicht der hydraulischen Experimente in der Bohrung Horstberg Z1..	24
2.1.6 Wasserfrac-Tests	25
2.1.7 Frac-Tests im Volpriehausen-Sandstein.....	26
2.1.8 Frac-Tests im Detfurth-Sandstein.....	27
2.1.9 Geophysikalisches Frac-Monitoring.....	31
2.1.10 Erprobung des Einsonden-Zweischicht-Verfahrens.....	38
2.1.11 Zyklisches Verfahren	46
2.1.12 Tiefenzirkulationsverfahren	53
2.2 Verwertbarkeit der Ergebnisse	62
2.3 Ergebnisse anderer Stellen.....	64
2.4 Veröffentlichungen, Berichte, Vorträge	65

1 KURZDARSTELLUNG

1.1 Aufgabenstellung

Konventionelle Verfahren zur Erdwärmenutzung (Dublekken-Systeme) sind an das Vorhandensein hydraulisch hochdurchlässiger Gesteine, wie z.B. hochporöse Sandsteine und Karstgesteine geknüpft. Diese machen nur einen geringen Teil der bohrtechnisch erschließbaren Krustengesteine aus. Ihre Vorkommen sind regional begrenzt und nur in seltenen Fällen treffen sie mit einer geeigneten Abnehmerstruktur zusammen. Dies gilt besonders für die Direktwärmenutzung, für die die Nähe zum Verbraucher wesentlich wichtiger ist als für die geothermische Stromerzeugung. Konventionelle Dublettenverfahren haben darüber hinaus den Nachteil, dass sie wegen der hohen Kosten für ein Bohrlochpaar erst im Leistungsbereich oberhalb etwa 5 MW_{th} wirtschaftlich betrieben werden können. Der Absatz derart hoher Wärmeleistungen benötigt im Allgemeinen ein Verteilernetz, dessen Aufbau ähnlich kostenaufwändig ist wie das Erstellen der Bohrungen. Selbst die absehbaren Kostensteigerungen für konventionelle Energierohstoffe dürften deshalb kurzfristig zu keinem raschen Ausbau der geothermischen Direktwärmenutzung führen. Zumal zu der nur schwer erreichbaren Wirtschaftlichkeit noch ein erhebliches Fündigkeitsrisiko hinzukommt, das vor allem darin besteht, dass die erforderliche hydraulische Ergiebigkeit der Speicherschichten nicht angetroffen wird. Benötigt werden deshalb Erschließungskonzepte, die bereits im Leistungsbereich weniger MW_{th} wirtschaftlich sind und geringere Anforderungen an Abnehmerstruktur und Durchlässigkeit der Gesteine stellen. Die „Tiefe Erdwärmesonde“, die nicht auf permeable Speichergesteine angewiesen ist und als Einbohrlochverfahren auch kostengünstiger zu erstellen ist als eine Bohrlochdublette, zielt zwar in diese Richtung, stellt aber wegen ihrer zu geringen Leistung (meist deutlich unter 1 MW_{th}) keine attraktive Alternative dar.

Ziel des GeneSys-Projekts (Generierte Geothermische Energiesysteme) ist die Entwicklung von Erschließungsverfahren, die die Vorzüge der Tiefen Erdwärmesonde (Einbohrlochverfahren, Nutzung gering permeabler Gesteine) mit der höheren Leistungsfähigkeit der Dublettensysteme verbinden. Um dies zu erreichen, muss die geringe Wärmeaustauschfläche der Tiefen Erdwärmesonde, die Bohrlochwand, die maximal wenige tausend Quadratmeter beträgt, um ein bis zwei Größenordnungen vergrößert werden. Diese Möglichkeit bietet die Wasserfrac-Technik. Bei diesem Verfahren werden mit hohem Druck und hohen Fließraten große Wasservolumina in die Bohrung verpresst und auf diese Weise großflächige, von der Bohrlochwand ausgehende, Gesteinsrisse geschaffen. Dieses Verfahren wurde in den Hot-Dry-Rock-Projekten erfolgreich angewandt. Mit seiner Hilfe gelang es, in kristallinen Gesteinen Rissflächen von mehreren Quadratkilometern Größe zu schaffen und als Wärmeaustauschflächen zu nutzen. Im GeneSys-Projekt sollten auf diese Weise Gesteinsrisse

in den gering durchlässigen Sedimentgesteinen des Buntsandsteins erzeugt und untersucht werden, in welcher Weise sich diese für die Wärmeerschließung nutzen lassen.

Dabei standen folgende Fragen im Vordergrund:

- Lassen sich in geschichtetem Sedimentgestein ausreichend große Rissflächen schaffen?
- Sind die Risse in der Lage, die Tonsteinlagen im Hangenden und Liegenden der Sandsteinschichten zu durchschlagen?
- Welche Frac-Drucke werden benötigt?
- Welche Ausbreitungsrichtung haben die Risse?
- Bleiben die Risse auch ohne Stützmittelzugabe offen und reicht ihr hydraulisches Leitvermögen für die geforderten Förderfließraten aus?
- Wie gut ist der hydraulische Zulauf aus dem Gebirge und welche Förderfließraten lassen sich aufgrund dieses Zulaufs dauerhaft erzielen?

1.2 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens

Ein erster Projektvorschlag zur geothermischen Direktwärmeversorgung des Geozentrums Hannover wurde infolge einer Initiative des damaligen BMWi zur Energieeinsparung und Nutzung erneuerbarer Energien 1999 formuliert (Jung et al. 1999). Zur weiteren Vorbereitung eines entsprechenden Förderantrages wurden in 2000 und 2001 geologische und geophysikalische Standorterkundungen im Umfeld des Geozentrums Hannover durchgeführt (Röhling, 2000, 2001). Ebenfalls in 2001 wurde von der Firma GTN, Neubrandenburg eine „Verfahrenstechnische Konzeptstudie zur geothermischen Wärmeversorgung des GeoZentrums Hannovers“ angefertigt. In dieser Studie wurden zunächst die geologische Situation und der Wärmebedarf am Standort analysiert. Darauf aufbauend wurden standortbezogene Varianten einer geothermischen Wärmeversorgung erarbeitet. Berücksichtigung fanden dabei auch verschiedene Abnehmerkonstellationen, sowie ausführliche Betrachtungen der Wirtschaftlichkeit.

Auf der Grundlage der GTN-Studie wurde dann ein Vorschlag für ein Demonstrationsprojekt zur Gewinnung geothermischer Energie aus gering permeablen Sedimentgesteinen erarbeitet und ein Förderantrag beim BMWi gestellt. Das BMWi machte seine Förderbereitschaft vom Nachweis der Wirtschaftlichkeit und von einer substantiellen finanziellen Beteiligung der Industrie abhängig. Voraussetzung dafür war eine Bewertung der GTN-Studie nach den in der KW-Industrie üblichen Kriterien.

Auf Vorschlag des BGR-Kuratoriums wurde dazu ein siebenköpfiges Expertenteam mit Vertretern von BEB, Preussag-Energie, Buderus und der BGR eingesetzt.

Das Expertenteam identifizierte erhebliche geologische und frac-technische Risiken und konnte die Wirtschaftlichkeit des Demonstrationsprojektes nicht feststellen. Das Team schlug vor, zur Verringerung des Risikos die Schlüsseltechnologie des Wasser-Fracens ohne Stützmittel in einer zur Verfüllung anstehenden Erdgasbohrung zu testen.

In Zusammenarbeit mit der BEB, Hannover wurde nach Sichtung umfangreicher geologischer und geophysikalischer Daten die im Besitz der BEB befindliche Tiefbohrung Horstberg Z1 als Versuchsbohrung für die vorgeschlagenen Experimente ausgewählt. In 2002 wurde dann gemeinsam von der BGR und dem GGA-Institut beim BMWi ein Förderantrag für ein Forschungs- und Entwicklungsvorhaben mit dem Titel „Verbundprojekt: GeneSys – Vorstudie – Erprobung der Wasserfrac-Technik und des Einsonden-Zweischichtverfahrens für die Direktwärmenutzung aus gering permeablen Sedimentgesteinen“ gestellt. Dieser wurde Ende 2002 bewilligt.

Seitens des Geozentrums Hannover bestanden bereits zu Beginn des Projektes 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.

Neben diesen Erfahrungen konnten die BGR und das GGA-Institut auch eine umfangreiche instrumentelle Ausstattung in das Projekt einbringen. So verfügt die BGR über Einrichtungen für hydraulische Tests, die zum Teil genutzt werden konnten, wie z. B. Messwerterfassungssystem, Hochdruckpumpe, Hoch- und Niederdruckleitungen, Mess-Sensoren für Durchfluss, Druck, Temperatur. Ein beim GGA-Institut vorhandenes Bohrlochmessfahrzeug konnte für Temperaturmessungen in der Bohrung eingesetzt werden. Das GGA-Institut verfügt außerdem über Finite-Elemente-Programme und entsprechende Erfahrungen zur Berechnung des Fluid- und Wärmetransports in geothermischen Systemen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die ersten Planungen sahen folgenden Ablauf der operativen Arbeiten vor:

- Rückzementation der Bohrung (um einen sicheren Abschluss der Gasführenden Horizonte zu gewährleisten)
- Vorbereitung der Tests
- Aufbau der Testeinrichtung
- Installation von Neigungsmessern, Eigenpotenzial-Messprofilen und eines mikro-seismischen Netzwerkes für die Rissortung
- Durchführung von Frac- und Hydrauliktests im Buntsandstein (Produktionshorizont)
- Test des Kalkarenits (Reinjektionshorizont)
- Vorbereitung und Durchführung eines dreimonatigen Zirkulationstests.

Die ursprüngliche Planung sah vor, die Tests in enger Kooperation mit der BEB durchzuführen. Dabei sollte die Bohrung Horstberg Z1 im Eigentum und in der bergrechtlichen Verantwortung der BEB bleiben. Aufgrund einer betrieblichen Umstrukturierung der BEB wurde jedoch eine Übertragung der Eigentumsrechte und der bergrechtlichen Verantwortung auf die BGR notwendig. Die damit verbundenen rechtlichen und organisatorischen Probleme führten zu einer Verzögerung des Versuchsbeginns um mehrere Monate. Die Übernahme der Bohrung durch die BGR wirkte sich auf den weiteren Verlauf des Projektes jedoch günstig aus, da damit der Zwang zu einer raschen Verfüllung der Bohrung unmittelbar nach Ablauf der geplanten Tests entfiel und die Bohrung somit für weitere Experimente zur Verfügung stand.

Da der Ausgang der Experimente nicht vorhersehbar war, der weitere Ablauf der Folgeexperimente aber von den Ergebnissen der vorherigen Tests abhing, musste der Zeit- und Testplan entsprechend flexibel gestaltet und gehandhabt werden. Aufgrund der jahrelangen Erfahrungen mit ähnlichen Testserien im Kristallin gelang es dem Projektteam, in rascher Folge ein sehr umfangreiches und logisch stringentes hydraulisches Versuchsprogramm einschließlich der begleitenden Untersuchungen zur Rissortung abzuwickeln. Der tatsächliche Ablauf des Projektes ist in unten stehender Tabelle 1 dargestellt. Auf einzelne Punkte wird im Abschnitt 2.1 näher eingegangen.

Aktivität	2003												2004												2005											
	Ja	Fe	Mä	Ap	Ma	Ju	Ju	Au	Se	Ok	No	De	Ja	Fe	Mä	Ap	Ma	Ju	Ju	Au	Se	Ok	No	De	Ja	Fe	Mä	Ap	Ma	Ju	Ju	Au	Se	Ok	No	De
Vorbereitung	■	■	■	■	■	■																														
Übernahme der Bohrung	■																																			
Teilzementation							■																													
Einrichten Testfeld/seism. Netzwerk								■	■																											
Perforation & erste Hydrauliktests									■	■																										
Wasserfrac-Tests									■	■																										
Produktionstest										■	■																									
Zyklische Tests											■	■																								
Produktionstest												■							■	■																
Vorbereitung Tiefenzirkulation																				■	■	■	■													
Tiefenzirkulation																					■	■														
Auswertungen									■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Numerische Modellierungen																																				
Zwischenberichte	■						■						■												■											

Tab. 1: Übersicht über den Ablauf des Projekts

Die Projektlaufzeit war ursprünglich bis zum 31.3.2004 geplant. Die bereits oben angegebenen Gründe und eine deutliche Erweiterung des Testprogramms erforderten jedoch eine Verlängerung der Projektlaufzeit bis zum 31.9.2005 (GGA-Institut), bzw. bis zum 31.12.2005 (BGR). Den entsprechenden Förderanträgen (Verlängerungsanträge) wurde stattgegeben. Im Rahmen des erweiterten Testprogramms wurden zusätzlich zu dem im ursprünglichen Projektantrag beschriebenen Erschließungskonzept zwei weitere Einbohrloch-Konzepte getestet, deren Realisierbarkeit sich erst aus den Ergebnissen der Untersuchungen ergab. Dem erhöhten Mittelbedarf, wurde durch zwei Aufstockungen Rechnung getragen. Die Aufstockungen enthielten u.a. auch Investitionsmittel für die Beschaffung einer elektrischen Unterwasserpumpe sowie eines Mess-Systems zur Erfassung von Bohrlochsohlentemperatur und –druck. Diese Investitionen verringerten die laufenden Kosten für den Betrieb des Versuchsfeldes, erhöhten die Flexibilität bei der Durchführung weiterer Tests im Rahmen des bereits bewilligten Folgevorhabens und senkten die Kosten dieser Tests erheblich.

1.4 Wissenschaftlich-technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Der vorgeschlagene Ansatz der Erdwärmeerschließung aus gering permeablen Sedimentgesteinen basiert weitgehend auf den Ergebnissen und Erfahrungen der Hot-Dry-Rock-Forschung, die die geothermale Stromproduktion aus kristallinen Tiefengesteinen (Granit, Gneis) zum Ziel hat. In seiner einfachsten Form sieht das Hot-Dry-Rock-Konzept vor, zwei Tiefbohrungen durch hydraulisch erzeugte Gesteinsrisse zu verbinden und auf diese Weise einen großflächigen unterirdischen Wärmetauscher zu schaffen. Zur Wärmegewinnung wird über eine der Bohrungen Kaltwasser in das Risssystem eingepresst und das im Risssystem erhitzte Wasser in der zweiten Bohrung wieder zur Oberfläche geleitet werden.

Mehrere wissenschaftliche Projekte, Falkenberg (Deutschland), Bad Urach (Deutschland), Le Mayet de Montagne (Frankreich), Hachimantai (Japan), Fjällbacka (Schwe-

den) befassten sich mit den Grundlagen dieses Verfahrens. Einige Großprojekte, Los Alamos (U.S.A.), Camborne (England), Hijiori und Ogachi (Japan), bemühten sich um eine Realisierung des Verfahrens im großtechnischen Maßstab. Die bisher besten Ergebnisse wurden im Europäischen Hot-Dry-Rock-Projekt Soultz erreicht, an dem die BGR und das GGA-Institut seit dem Beginn im Jahr 1987 beteiligt ist. 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 im Jahr 1997 wurden mit einer Fließrate von 90 m³/h und einer thermischen Leistung von 10 MW erstmals wirtschaftlich relevante Werte erreicht.

Der 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 wird seit ihrer Einführung vor mehr als 50 Jahren in Erdöl/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 der Flüssigkeit als Stützmittel Keramikkügelchen, 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 bei der geothermischen Nutzbarmachung auf den Einsatz teurer Gels und Stützmittel verzichtet werden muss und der Weg zum Erfolg nur über die einfache *Wasserfrac-Technik* führen kann. In den Hot-Dry-Rock-Projekten wurden daher fast ausschließlich Wasserfrac-Tests 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 bisher i.a. über mehrere hundert Meter lange unverrohrte Bohrlochabschnitte. Diese enthalten in der Regel eine Vielzahl natürlicher Gesteinsrisse in Form von Einzelklüften, Kluffzonen oder Störungen. Der Frac-Vorgang ist unter diesen Bedingungen sehr viel komplexer und noch nicht vollständig geklärt. Offensichtlich entstehen dabei nicht nur künstliche Risse, sondern es werden auch vorhandene Gesteinsrisse aufgeweitet oder gesichert.

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.

Während der Frac-Tests entstehen Bruchsignale, die mit Hilfe hochempfindlicher Bohrlochgeophone in benachbarten Bohrungen, z.T. 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.

Im Frühjahr 2003 wurden vom GFZ-Postdam in Kooperation mit den Berichterstatern Stimulationstest in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 durchgeführt. Neben klassischen Stützmittelfracs wurden hier auch Wasserfrac-Tests durchgeführt. Das insgesamt verpresste Wasservolumen lag bei etwa 4.300 m³. Diese ersten Tests wurden, ähnlich wie im Soultz-Projekt, in einem mehrere hundert Meter langen unverrohrten Bohrlochabschnitt durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Tests waren in

mehrerer Hinsicht für die geplanten Untersuchungen des GeneSys-Projekts interessant.

1. Es zeigte sich, dass bei den Wasserfrac-Tests ein sehr hoher Vertikalriss erzeugt wurde, der die Bohrlochwand über eine Strecke von mehr als hundert Metern auftrennt. Dies weist nach, dass die Wechsellagerung von Sand- und Schluffsteinen das Höhenwachstum des hydraulischen Risses nicht aufhalten konnte.
2. Der hydraulisch erzeugte Riss behielt auch nach Druckentlastung eine gewisse Öffnungsweite, die jedoch für die geforderten Fließraten noch zu gering ist.
3. Die Wasserfrac-Tests waren hinsichtlich der Steigerung der Ergiebigkeit effektiver als die zuvor ausgeführten klassischen Stützmittelfracs.
4. Es zeigte sich, dass die enormen hydraulischen Wechselbelastungen, denen die Sand- und Schluffsteine während der Tests ausgesetzt waren, Bohrlochwandausbrüche auslösten und die Bohrung destabilisierten. Daher ist die Stimulation langer unverrohrter Bohrlochabschnitte in Sedimentgesteinen deutlich problematischer als in den standfesteren und dichteren Kristallingesteinen.

Diese Erfahrungen aus Großschönebeck waren insgesamt ermutigend und bildeten eine wichtige Basis für die Experimente im GeneSys-Projekt. Für generelle Aussagen, vor allem im Hinblick auf die Machbarkeit des im GeneSys-Projekt verfolgten Einbohrlochkonzepts reichen die dort gemachten Erfahrungen jedoch nicht aus.

1.5 Zusammenarbeit mit Projektpartnern

Das GeneSys-Projekt ist ein Gemeinschaftsprojekt der BGR und des GGA-Instituts, 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), Großschönebeck (GFZ-Potsdam) und Prometheus (Uni Bochum) zu nennen. Die am Projekt beteiligten und mit dem Projekt kooperierenden Arbeitsgruppen sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Institution - AG	Status	Aufgabe
BGR - B1	Projektpartner	Operative Projektleitung
GGA - S4	Projektpartner	Wissenschaftliche Projektleitung
BGR/GGA – Z	Projektpartner	Organisation, Beschaffung
BGR – B1.15	Projektpartner	Hydraulische Testauswertung, Messwerterfassung
GGA – S4	Projektpartner	Test-Planung, - Überwachung, - Auswertung
GGA – S4	Projektpartner	Temperaturlogs, Geophysikalische Bohrlochlogs
GGA – S1	Projektpartner	Geologie & Tektonik
GGA – S1	Projektpartner	Mikroseismisches Frac-monitoring
GGA – S2	Projektpartner	Eigenpotenzial – Frac-monitoring
GGA – Ltg.	Projektpartner	Neigungsmesser - Frac-monitoring
GGA – S3	Projektpartner	Fluid-Altersbestimmung
BGR – B4.15	Projektpartner	Geochemische und röntge- nographische Analysen
NLFB	Kooperationspartner	Abteufen der Geophonbohrungen
Uni Göttingen – AG Sauter	Kooperationspartner, Kontraktor	Tracertests
Uni Göttingen – AG Gudmundsson	Kooperationspartner	Geotektonik
Uni Bochum – AG Rummel	Kooperationspartner	Erfahrungsaustausch mit Prome- theus-Projekt
Uni Bochum – AG Renner	Kooperationspartner	Planung von Laboruntersuchungen zum Selbststützungseffekt in Ris- sen
GFZ – AG Huenges	Kooperationspartner	Erfahrungsaustausch mit Groß- schönebeck-Projekt
EMPG	Kooperationspartner	Beratung Frac-Technik, Geologie, technische Unterstützung
Wintershall AG	Kooperationspartner	Beratung Frac-Technik, Geologie, technische Unterstützung

Drill-Tec	Kontraktor	Kontraktor Hochdruckpumpenservice
Precision Drilling	Kontraktor	Kontraktor Perforation
Schulze Druckmessung	Kontraktor	Kontraktor Basisdruck- und -temperaturmessungen
Q-Con	Kontraktor	Kontraktor mikroseismische Rissortung

Tab. 2: Partner und Beteiligte des GeneSys-Projekts

Der BGR oblag die operative Leitung und dem GGA-Institut die wissenschaftliche Leitung. In zahlreichen Fällen wurde auf verschiedene im GeoZentrum Hannover vorhandene Kompetenzen und Ausstattung zurückgegriffen. So wurden z.B. die Flachbohrungen für das mikroseismische Netzwerk zur Beobachtung der induzierten Mikroseismizität mit dem Bohrgerät des damaligen NLFb (jetzt: LBEG) abgeteuft und Materialproben aus der Bohrung chemisch und röntgenografisch untersucht. Bei den hydraulischen Tests konnte die am Geozentrum Hannover aus Vorgängerprojekten vorhandene Ausstattung eingesetzt werden. Das umfangreiche Messprogramm zum geophysikalischen Frac-Monitoring konnte nur durch einen erheblichen Personalaufwand seitens des GGA-Institutes 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, ebenfalls Universität Göttingen, entsteht eine weitergehende Zusammenarbeit. Zum Ende der Projektlaufzeit ergab sich eine Kooperation mit der Arbeitsgruppe von Prof. Renner (Ruhr-Universität Bochum), die im Rahmen des Folgeprojekts intensiviert werden wird.

2 EINGEHENDE DARSTELLUNG DES PROJEKTES

2.1 Erzielte Ergebnisse

2.1.1 Geographische Lage des Versuchsfeldes

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.

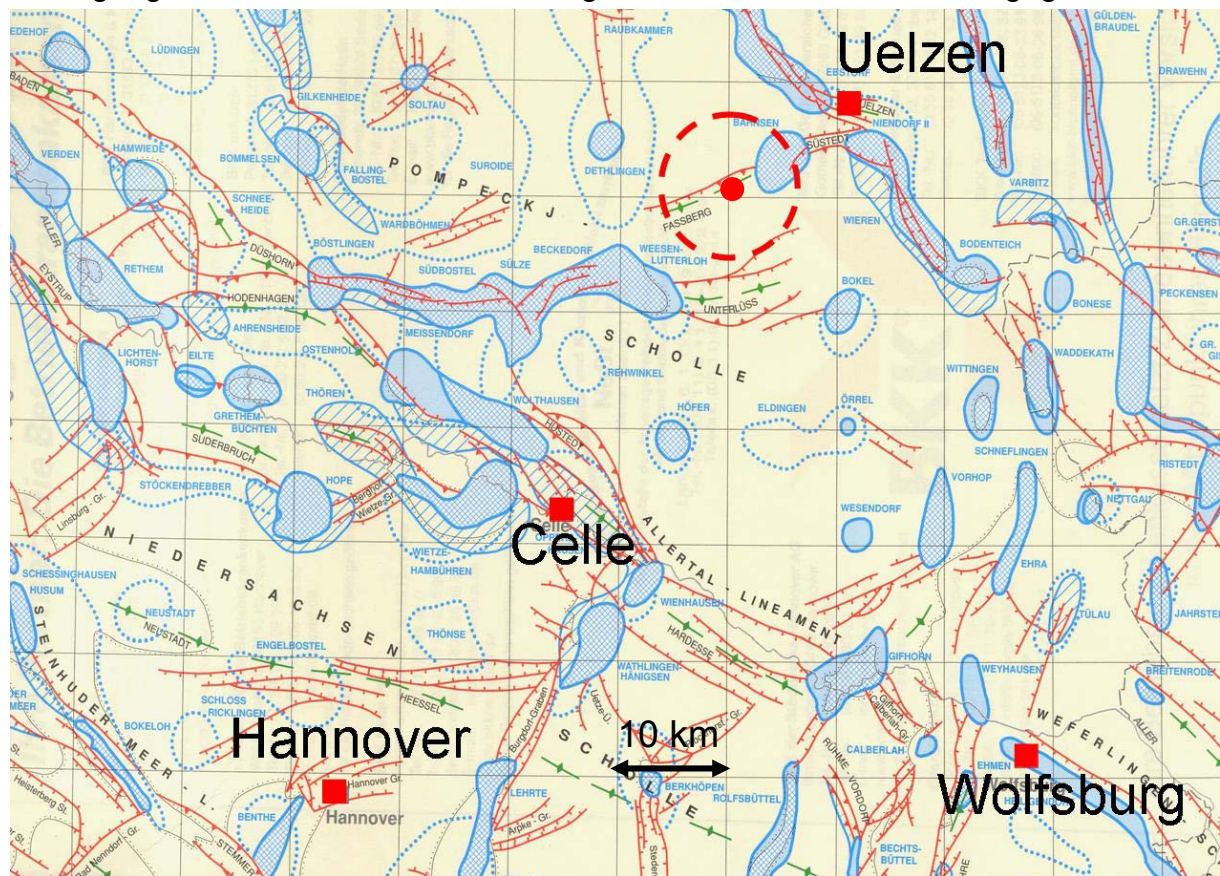


Abb. 1: Lage der Bohrung Horstberg Z1 (roter Punkt). Blaue und gestrichelte Flächen: Salzdiapire, Linien: Störungen.

Die ehemalige 4918 m tiefe Erdgaserkundungsbohrung Horstberg Z1 liegt etwa 70 km nordöstlich von Hannover in einem Erdgasfeld des Rotliegenden (Abb. 1). Circa 800 m östlich befindet sich die etwa gleich tiefe Erdgasproduktionsbohrung Dreilingen Z1 der Wintershall AG, aus der derzeit noch gefördert wird. Die Bohrlokation Horstberg Z1 wird nach Norden, Westen und Osten von Feldern und nach Süden von einem weitläufigen Waldgebiet begrenzt (Abb. 2). Die nächste Ortschaft ist etwa 2 km entfernt. Die relativ große Entfernung zur nächsten Bebauung macht Lärm-schutzmaßnahmen vor allem während der Fractests überflüssig. Trotz der abge-schiedenen Lage ist die Bohrung verkehrsmäßig gut erschlossen und kann problem-los auch von schweren LKW und Sonderfahrzeugen erreicht werden. Der Bohrplatz hat Anschluss an das örtliche Strom- und Wassernetz.

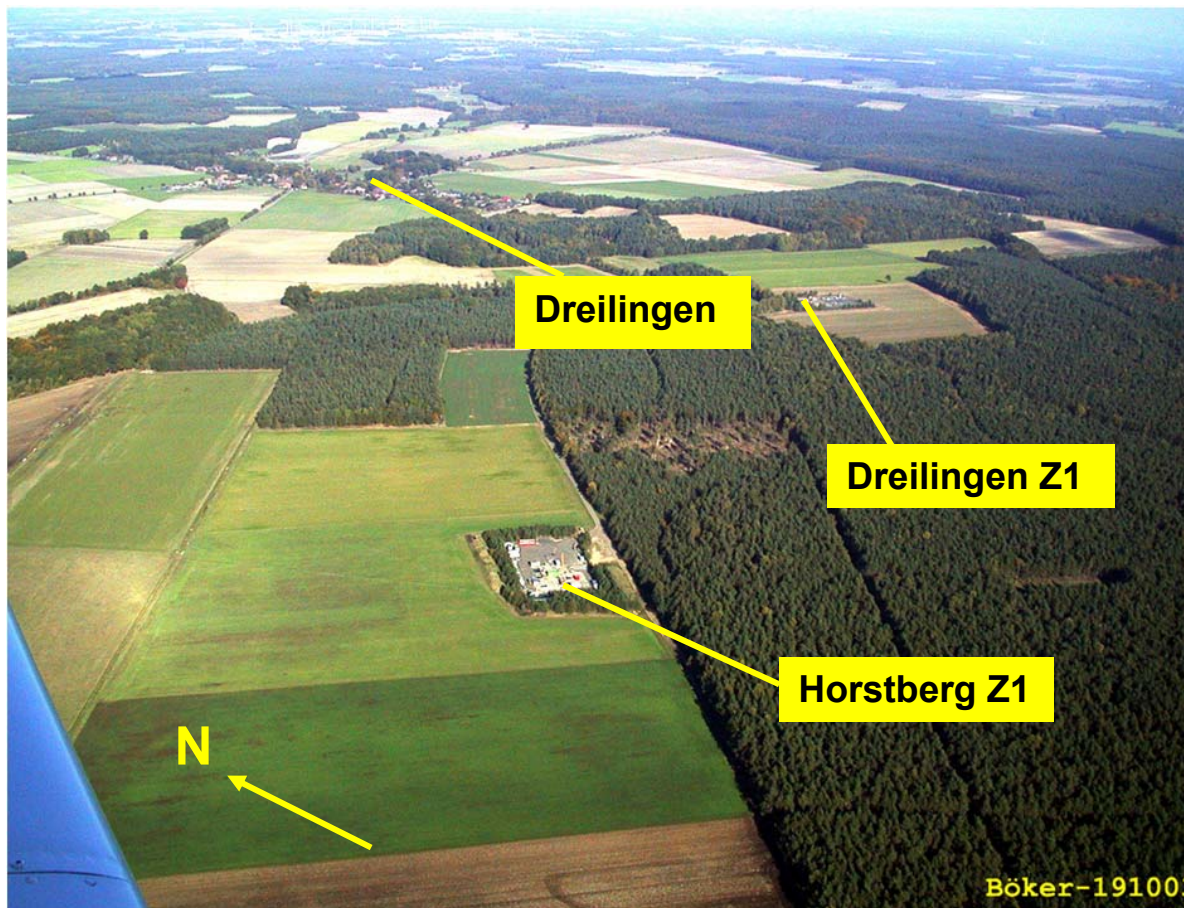


Abb. 2: Luftbild der Bohrstellen Horstberg Z1 und Dreilingen Z

Die Lokation Horstberg ist nach der gleichnamigen weit gestreckten Anhöhe benannt, die an der Bohrung eine Höhe von 105 m über NN aufweist. Aufgrund der Hochlage liegt der Wasserspiegel rund 24 m tief unter der Geländeoberfläche, so dass es in der näheren Umgebung keine Oberflächengewässer gibt. Dieser für die geplanten Frac-Experimente, die einen weit über der Kapazitätsgrenze des Netzan schlusses liegenden Wasserbedarf haben, zunächst nachteilig erscheinende Um stand erwies sich im Nachhinein als ein Vorteil, da die Landwirte zur Beregnung ihrer Felder im Umfeld der Bohrung mehrere Hochleistungsbrunnen installiert haben. Diese konnten für die Wasserversorgung während der Frac- und Hydrauliktests genutzt werden. Aus diesem Grund konnte auf die Anlage großer Speicherbecken, wie sie etwa am Standort Soultz für ähnliche Frac-Tests angelegt wurden, verzichtet werden.

2.1.2 Geologische und geothermische Bedingungen am Standort Horstberg

Die Bohrung Horstberg Z1 befindet sich im zentralen Teil des Norddeutschen Beckens. Ihre Geologie ist für weite Teile dieses Beckenbereiches repräsentativ und ähnelt den geologischen Bedingungen am Standort Hannover, der im südlichen Teil des zentralen Beckenbereichs liegt. Die Bohrung Horstberg Z1 durchteuft im Bereich der Kreide und des Jura eine SWW-NNO-streichende ca. 15 km lange prominente tektonische Störung. Auch in dieser Hinsicht gibt es Ähnlichkeit zum Standort Hannover, der ebenfalls über einer SWW-NNO streichenden tektonischen Störungszone liegt (Abb. 1).

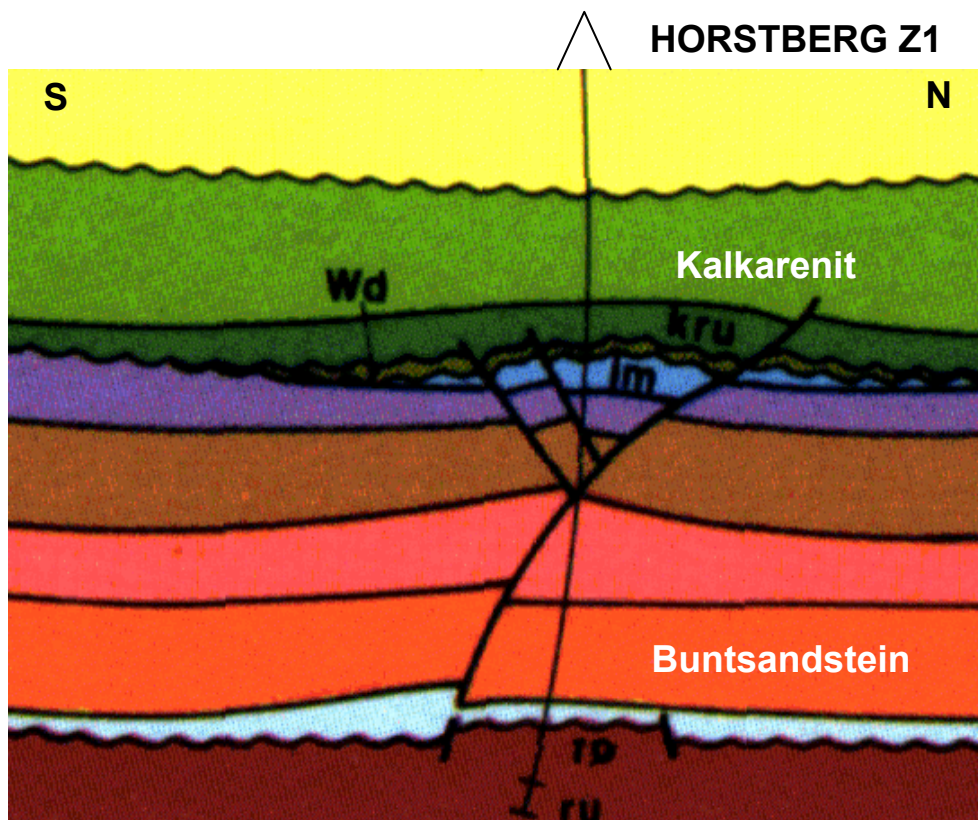


Abb. 3: N-S-Schnitt der Geologie an der Bohrung Horstberg Z1 und Trajektorie der Bohrung. Geplanter Produktionshorizont: Buntsandstein, geplanter Reinjektionshorizont: Kalkarenit

Die Störung an der Bohrung Horstberg wurde zunächst als Abschiebung angelegt, wobei sich die südlich gelegene Krustenscholle gegenüber der nördlichen abgesenkt hat. Ab der Oberkreide hat sich diese Bewegungsrichtung evtl. im Zusammenhang mit der Salztektonik umgekehrt hat, d.h. die südlich der Störung gelegene Scholle hebt sich nun relativ zur nördlichen. Diese Bewegungsumkehr passt zu dem aktuellen Spannungsfeld. Nach Röckel und Lempp (Erdöl, Erdgas, Kohle, 119(2), 73-80, 2004) ist anzunehmen, dass die großregionale maximale horizontale Hauptspannung im zentralen Teil des Norddeutschen Beckens N-S gerichtet ist. Dies gilt zumindest für den prä-salinaren, d.h. unter dem Zechsteinsalz gelegenen Krustenbereich. Im post-salinaren Krustenbereich variieren die Spannungsrichtungen und -beträge be-

einflusst durch die aufwärts drängenden Salzstöcke lokal stark und die minimale horizontale Hauptspannung ist im Mittel signifikant erhöht (Röckel, 2004). Da die Störung an der Bohrung Horstberg nach Westen und Osten durch zwei Salzstrukturen, die Salzstöcke Bahnsen und Dethlingen, begrenzt ist, war zu vermuten, dass dies auch für die Lokation Horstberg gilt. Eine Analyse von Bohrlochwandausbrüchen bestätigte diese Vermutung insofern als diese keine klar erkennbare Vorzugrichtung erkennen ließen. Da die minimale horizontale Hauptspannung sowohl für die Orientierung der hydraulischen erzeugten Risse als auch für die Höhe des Frac-Drucks entscheidend ist, waren Prognosen hinsichtlich der Ausbreitungsrichtung der Risse und des aufzuwendenden Frac-Drucks vor den Experimenten in der Bohrung Horstberg nicht möglich.

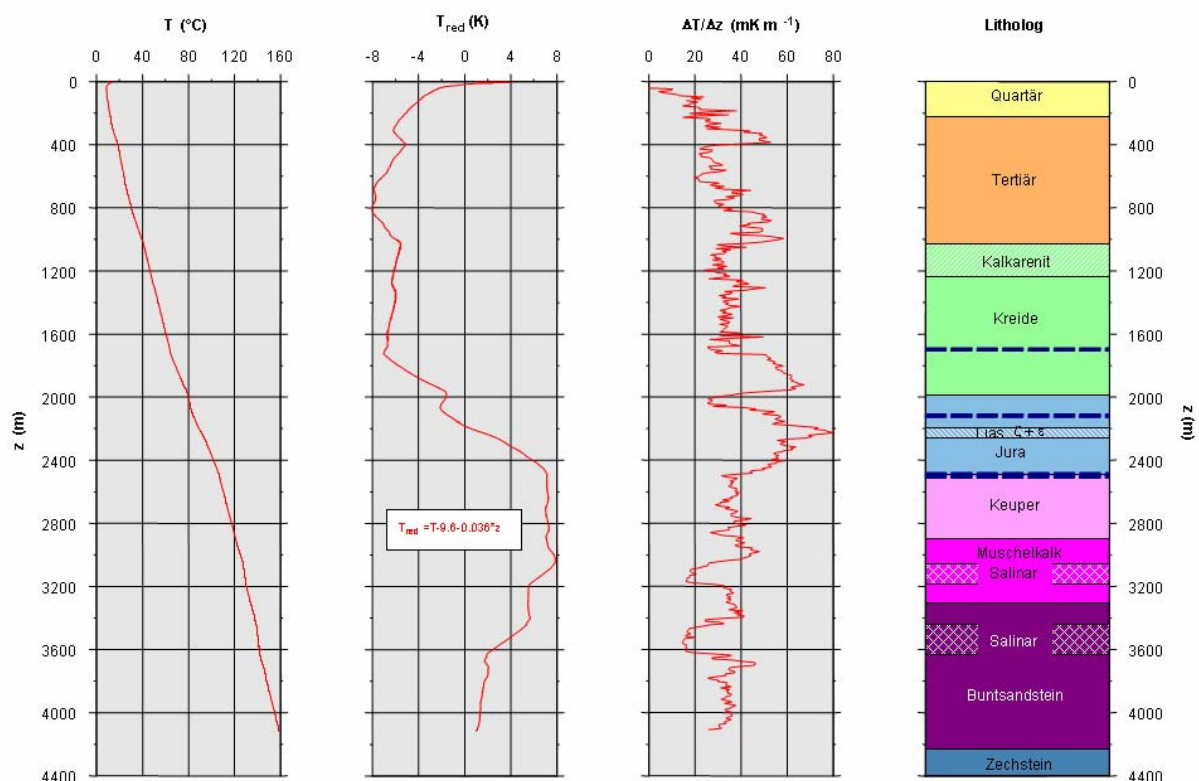


Abb. 4: Tiefenprofile der Gebirgstemperatur, der reduzierten Temperatur und des vertikalen Temperaturgradienten sowie der stratigraphischen Einheiten in der Bohrung Horstberg Z1. Temperaturmessung durch GGA-Institut (Schellschmidt, 2004).

Hinsichtlich der Untergrundtemperaturen weist die Bohrung Horstberg Z1 sehr günstige Bedingungen auf (Abb. 4). Der vertikale Temperaturgradient ist über weite Strecken deutlich höher als 30 K/km. In zwei mächtigen Abschnitten der unteren Kreide und des Jura erreicht er mit Werten um 60 K/km das Doppelte des normalen Wertes in Deutschland. Die sehr hohen Gradienten sind wahrscheinlich auf die geringe Wär-

meleitfähigkeit der Gesteine in diesen Tiefenbereichen zurückzuführen. Die gut leitenden Salzhorizonte, das Salinar des Mittleren Buntsandstein und des Mittleren Muschelkalk, weisen entsprechend geringe Temperaturgradienten von rund 20 K/km auf. Insgesamt ist daher davon auszugehen, dass der Wärmestrom am Versuchsstandort nicht außergewöhnlich hoch ist und die hohen Untergrundtemperaturen vorwiegend auf die geringe Wärmeleitfähigkeit einzelner Horizonte zurückzuführen ist. An der Untergrenze des Buntsandsteins bei 4100 m erreicht die Temperatur annähernd 160 °C und ist damit 30 K höher als die mittlere Temperatur in Deutschland für diesen Tiefenbereich.

Die genannten Salzhorizonte des Muschelkalk und Buntsandstein sowie das unterhalb 4200 m anstehende Zechsteinsalz können geohydraulisch bedeutsam sein, da sie als hydraulische Barrieren den Fluidtransport in vertikaler Richtung stark behindern oder verhindern können. Daher kann der Porenwasserdruck in den dazwischen liegenden Gesteinsformationen signifikant vom normalen hydrostatischen Druck in diesen Tiefen abweichen kann. In den Bohrberichten der Bohrung Horstberg Z1 werden für den Mittleren Buntsandstein trotz einer Spüldichte von 1600 kg/m³ Fluidzutritte zur Bohrung erwähnt.

Der für die Frac-Experimente vorgesehene Mittlere Buntsandstein hat eine Gesamtmächtigkeit von knapp 300 m und enthält vier bedeutendere Sandsteinbänke, den Solling-, Hardeggen-, Detfurth- und Volpriehausen Sandstein (Abb. 5). Diese sind im unteren Teil bis hinauf zum Detfurth-Sandstein in feinsandigen Schluffstein eingelagert. Im oberen Teil werden die Sandsteinhorizonte durch mächtige Tonsteinlagen getrennt.

Der knapp 20 m mächtige Solling-Sandstein verfügt mit 11 % über die höchste Porosität und ist über seine gesamte Mächtigkeit homogen aufgebaut. Die Porositäten der übrigen Sandsteinbänke liegen unter 10 %, zum Teil unter 5 %. Aufgrund dieser geringen Porosität kann davon ausgegangen werden, dass die Permeabilität der Sandsteinbänke gering ist und vielleicht mit Ausnahme des Solling-Sandsteins unter 1 mD liegen dürfte. Permeabilitätswerte von Bohrkernen liegen für den Bereich der Bohrung Horstberg Z1 nicht vor. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass der Mittlere Buntsandstein für die Wärmegegewinnung mit konventioneller Erschließungstechnik nicht geeignet ist. Dies gilt in noch stärkerem Maße für den Unteren und Oberen Buntsandstein, in denen prominente Sandsteinbänke fehlen.

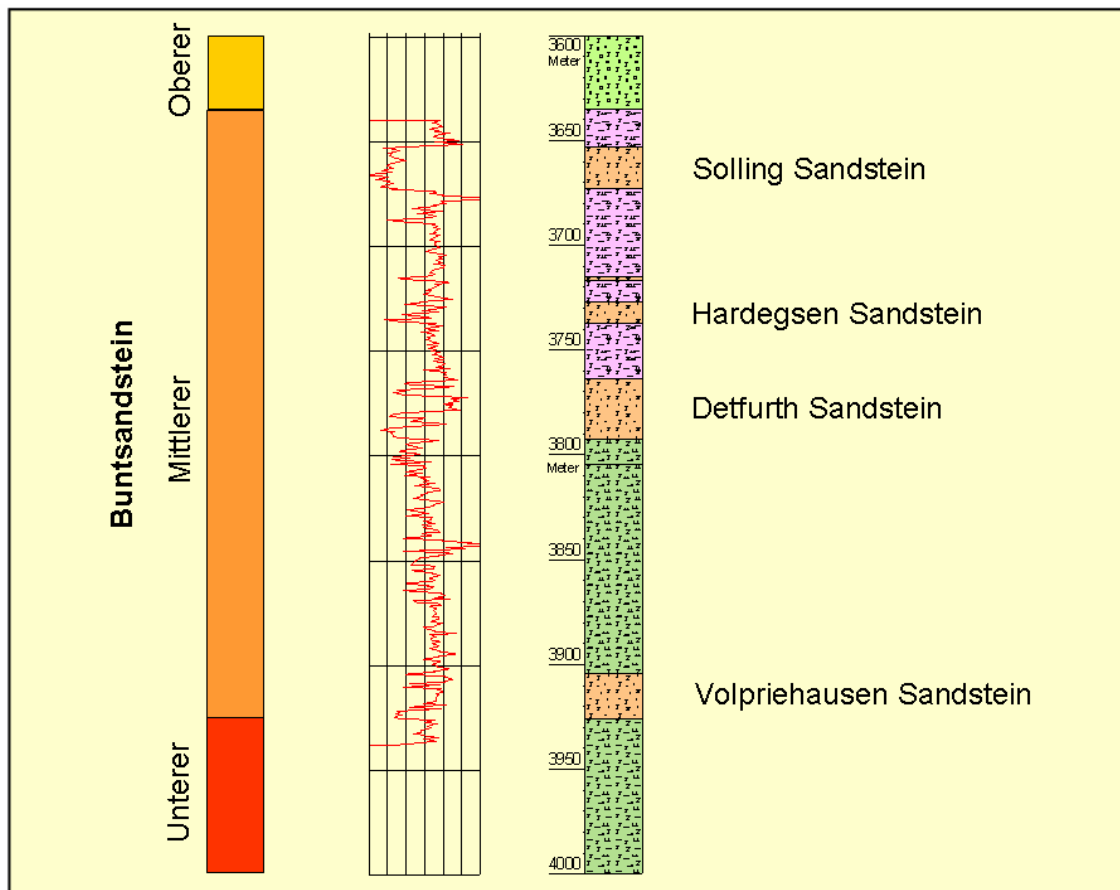
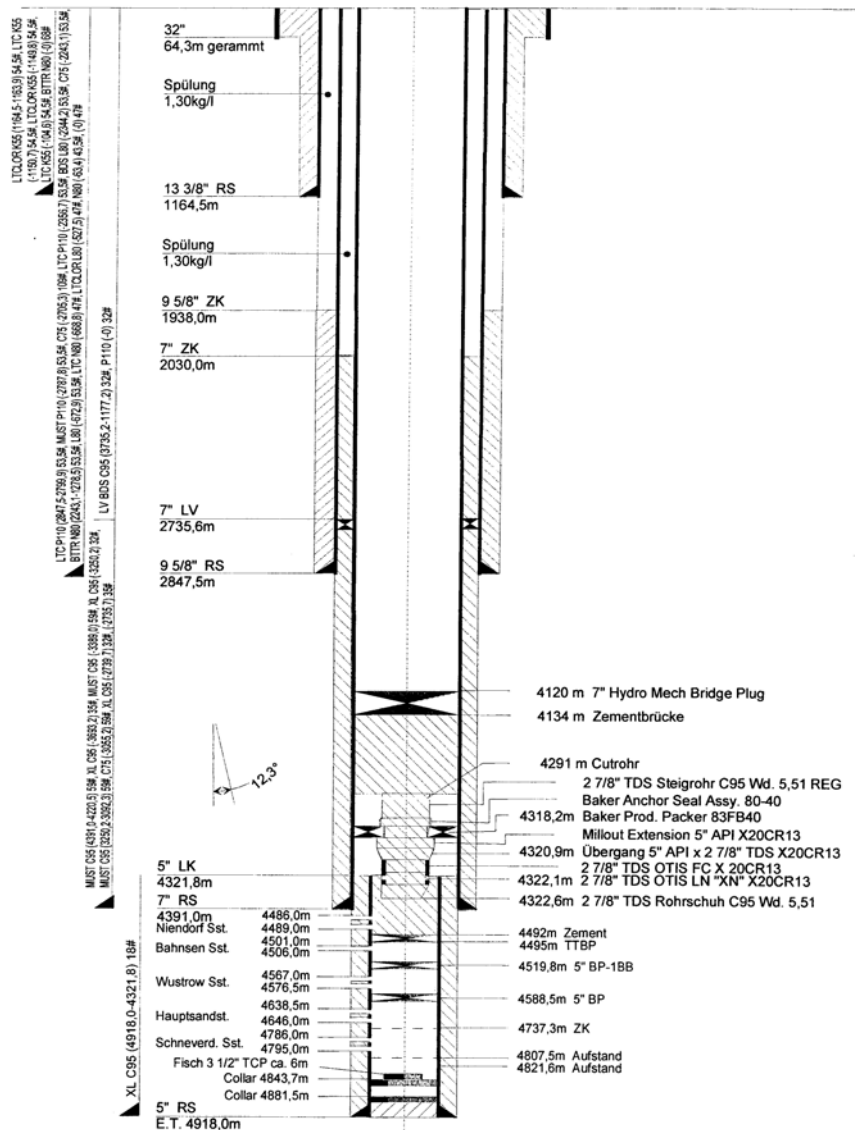


Abb. 5: Feinstratigraphie des Mittleren Buntsandsteins in der Bohrung Horstberg Z1. In der Mitte: Gamma-Log

2.1.3 Technischer Ausbau der Bohrung Horstberg Z1

Die ursprünglich 4918 m tiefe Bohrung Horstberg Z1 wurde vor den Experimenten bis in eine Tiefe von 4134 m aufzementiert. Um einen sicheren Abschluss gegen die Gas-führenden Horizonte des Rotliegenden zu gewährleisten, wurde der Zementkopf zusätzlich durch einen mechanischen Packer (Bridge-Plug) gesichert. Das Ausbauschema der Bohrung ist in Abb. 6 dargestellt. Die Bohrung ist bis zum Bohrlochtiesten mit einer 7“-Verrohrung ausgekleidet, deren Ringraum bis 2030 m zementiert ist. Für die Frac-Experimente musste die Verrohrung im Bereich der Testintervalle perforiert werden. Ein günstiger Umstand war, dass der als Reinjektionshorizont vorgesehene Kalkarenit bei 1200 m über den Ringraum zwischen der 9 5/8“- und der 13 3/8“-Verrohrung zugänglich war, so dass auf eine Perforation der 7“- und der 9 5/8“-Verrohrung in diesem Tiefenbereich und den anschließenden Einbau eines Packers und eines Förderstrangs verzichtet werden konnte. Da die Bohrung als Gasexplorationsbohrung vorgesehen war, waren sämtliche Armaturen einschließlich Bohrlochkopf für einen Nenndruck von 10.000 psi entsprechend ca. 700 bar ausgelegt.



RigonMobil
Development

Horstberg Z1

Teilverfüllung Juli 2003

gez.: DRSL / Hildebrandt
Hannover, d. 25.06.2003
geändert R. Witte 3.09.03
DREN-Fischer, 1162
HORBZ1.dsf

Abb. 6: Schematische Darstellung des Ausbaus der Bohrung nach Rückzementation

2.1.4 Versuchsfeld und Versuchsaufbau

Abb. 7 zeigt eine Luftaufnahme des Bohrplatzes während der Aufbauarbeiten für die Wasserfrac- und Hydraulik-Tests. Der rund 1 ha große Bohrplatz ist betonierte und asphaltiert und verfügt über Entwässerungsgräben und Ölabscheider. Der Bohrplatz hat über einen Mittelspannungstransformator Anschluss an das örtliche Stromnetz. Die Anschlussleistung von 400 kVA reicht außer für die Infrastruktur des Bohrplatzes auch für den Betrieb einzelner Hochdruckpumpen oder Unterwassermotorpumpen

aus. Für den Trink- und Brauchwasserbedarf stand eine Wasserversorgungsleitung zur Verfügung.

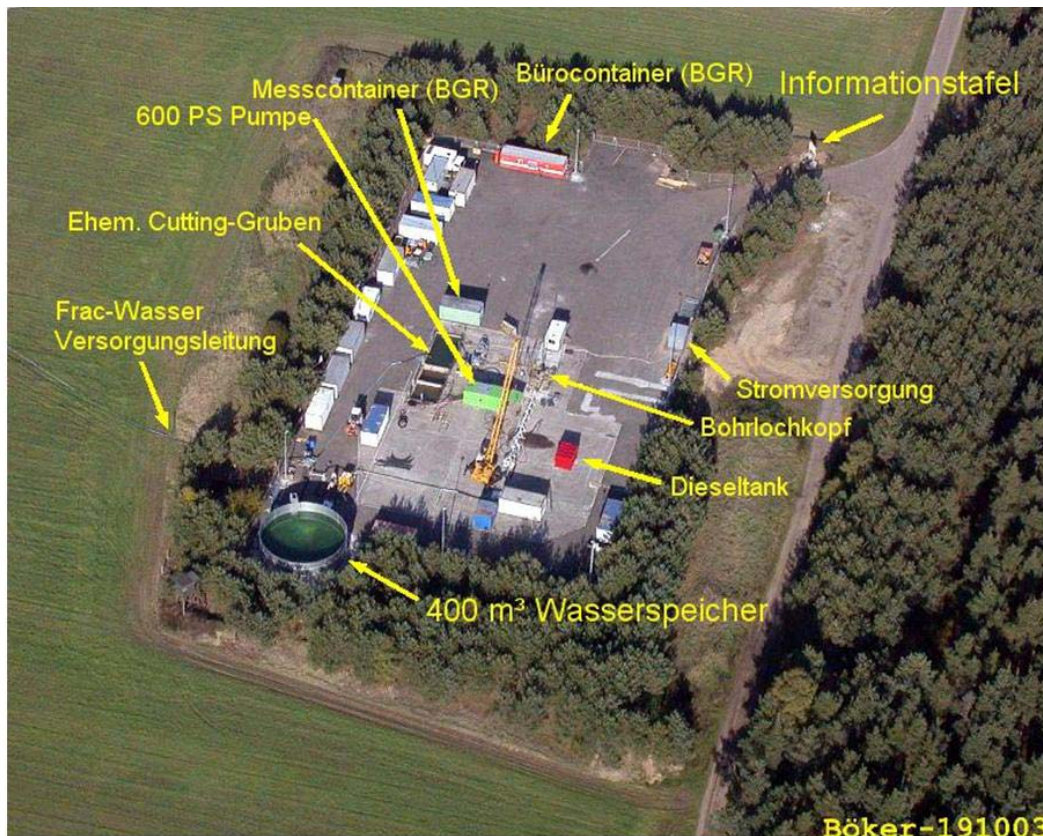


Abb. 7: Versuchsfeld an der Bohrung Horstberg Z1.

Der Bohrlochkopf der Bohrung Horstberg Z1 liegt im Zentrum des Bohrplatzes. Die Wasserversorgung für die Wasserfrac-Tests und hydraulischen Experimente erfolgte aus zwei ca. 2 km nordwestlich des Versuchsfeldes gelegenen Hochleistungsbrunnen des Beregnungsverbandes Dreilingen mit einer Kapazität von je 90 m³/h, die über temporär verlegte Leitungen mit dem Versuchsfeld verbunden waren und über Mobiltelefon zu- und abgeschaltet werden konnten. Die Wasserentnahme wurde während der Tests mit zwei Wasseruhren gemessen und in regelmäßigen Zeitabständen registriert. Als Zwischenspeicher diente ein ca. 400 m³ fassender Edeltank, aus dem das Wasser mittels Niederdruckpumpen über Filter zu den Hochdruckpumpen geleitet wurde. Der Wasserspiegel im Tank wurde kontinuierlich mit einem Pegelstandsmesser (Druckaufnehmer) gemessen. In unmittelbarer Nähe zur Bohrung befanden sich weitere Wasserspeicher in Form von Betonrinnen mit einem Fassungsvermögen von ca. 100 m³, die für den Rücklauf aus der Bohrung genutzt wurden. Der Bohrplatz konnte mit mehreren auf Masten installierten Scheinwerfern ausgeleuchtet werden. Zur Versorgung der Hochdruckpumpen befand sich ein Dieseltank mit einem Fassungsvermögen von 10 m³ auf dem Bohrplatz. Mehrere auf

dem Bohrplatz aufgestellte Container dienen als Büro-, Registrier-, Lager-, Werkstatt- und Aufenthaltsräume.



Abb. 8: Bohrlochkopf und Hochdruckpumpen während eines massiven Wasserfrac-Tests in der Bohrung Horstberg Z1.



Abb. 9: Filter und Ansaugleitungen für die Hochdruckpumpen. Im Hintergrund ist das Niederdruckmanifold zu erkennen.

Während der Wasserfrac-Tests waren bis zu zehn dieselgetriebene Hochdruckpumpen eines Kontraktors im Einsatz (Hersteller: Halliburton, Typ: HT 400, Abb. 8). Die Gesamtmotorleistung dieser Pumpen betrug rund 3 MW und ermöglichte Dauerfließraten bis zu 50 l/s bei einem Maximaldruck von 350 bar. Die Regelung der Fließrate erfolgte über eine ferngesteuerte Drehzahlregelung der Pumpen (Abb.10). Die Pumpen wurden über eine Zentrifugalpumpe mit Frischwasser aus dem Speicherbecken beschickt. Zwischengeschaltete Filtereinheiten (Kerzenfilter, 3 µm, Abb. 9) sorgten für eine kontinuierliche Filterung des Frischwassers, das jedoch weitgehend frei von Feststoffen war, so dass die Filtereinsätze während der Wasserfrac-Tests nicht gewechselt werden mussten. Die Durchflussmessung erfolgte mit einem magnetisch-induktiven Durchflussmesser im Niederdruckmanifold der Ansaugseite. Die Injektion erfolgte über ein Hochdruckmanifold, in dem die Druckleitungen der Hochdruckpumpen zusammengeführt waren.

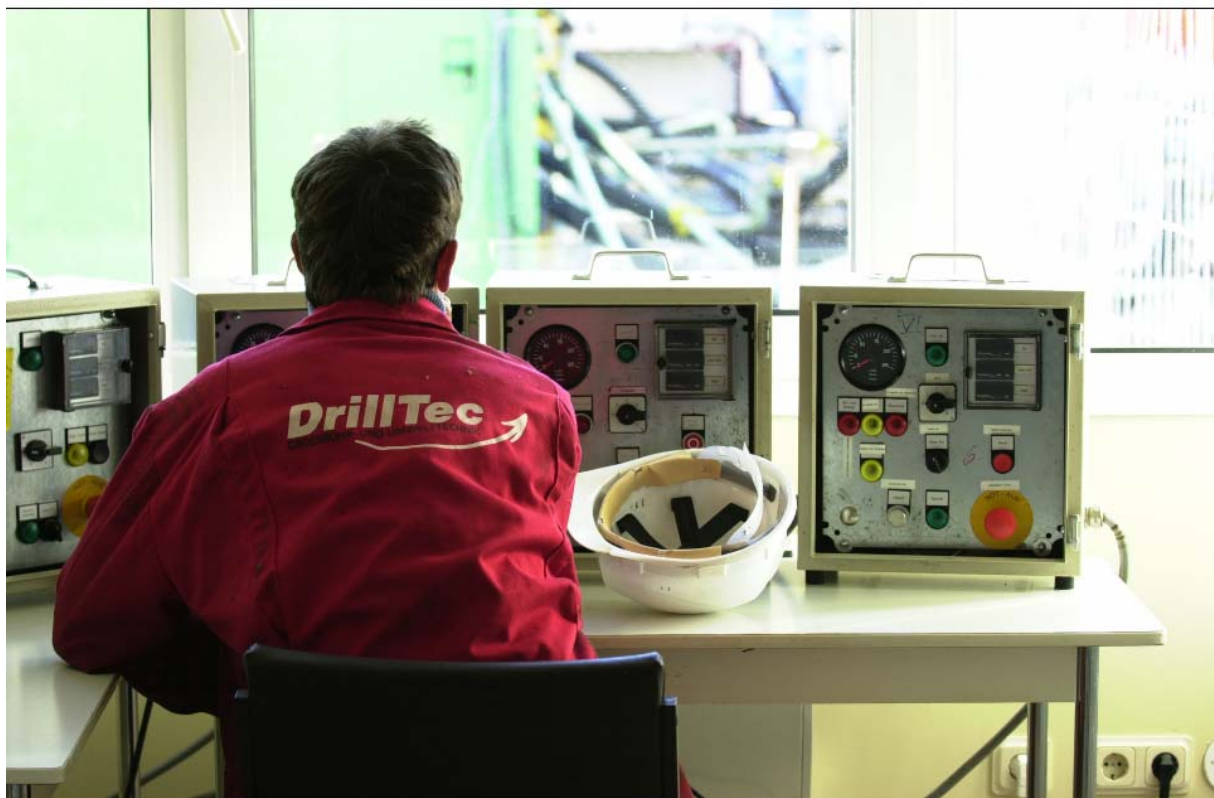


Abb. 10: Steuereinheiten für die Drehzahlregelung der Hochdruckpumpen.

Während der Tests wurden am Bohrlochkopf der Druck in der 7“-Verrohrung und in den beiden Ringräumen gemessen und kontinuierlich mittels einer rechnergesteuerten Messwerterfassungsanlage registriert. Ebenso wurde die Temperatur des injizierten und rückgeführten Wassers gemessen und registriert. Zur Messung von Bohrlochsohlendruck und -temperatur war bei den meisten Tests eine selbstregistrierende Druck-Temperatursonde dicht oberhalb des jeweiligen Injektionsintervalls in der Bohrung abgesetzt.

2.1.5 Übersicht der hydraulischen Experimente in der Bohrung Horstberg Z1

Im Zeitraum September 2003 bis Dezember 2004 wurden ein Vielzahl von Wasserfrac-Tests und hydraulischen Nach-Frac-Experimenten in der Bohrung Horstberg Z1 ausgeführt und insgesamt drei neuartige Erschließungskonzepte erprobt. Tabelle 3 gibt eine Übersicht über diese Tests und Experimente.

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 Produktionshorizont	Wasserfractests	20100	1650
17.11.03- 20.12.04	Detfurth	Einsonden-Zweischichtverfahren	Intermittierender Auslauf Detfurth, 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 Detfurth, Injektion Kalkarenit	2706	
20.02.- 17.03.04	Detfurth & Solling	Einsonden-Zweischichtverfahren	Auslauf Detfurth & Solling, Injektion Kalkarenit	7100	
19.03.- 14.07.04	Detfurth & Solling	Risseigenschaften, hydraulische Randbedingungen	Druckaufbau	0	
14.07.- 23.07.04	Detfurth & Solling	Einsonden-Zweischichtverfahren	Auslauf Detfurth & Solling, Injektion Kalkarenit	2350	
23.07.- 07.11.04	Detfurth & Solling	Risseigenschaften, hydraulische Randbedingungen	Druckaufbau	0	
24.11.- 30.11.04	Detfurth & Solling	Erprobung Tiefenzirkulationsverfahren	Injektion Detfurth, Auslauf Solling	6100	400
30.11.- 01.12.04	Solling	Risserzeugung Reinjektionshorizont	Wasserfractest	1700	
01.12.- 13.12.04	Detfurth & Solling	Erprobung Tiefenzirkulationsverfahren	Injektion Detfurth, Auslauf Solling	2900	5200

Tab. 3: Experimente in der Bohrung Horstberg Z1. Blau hinterlegt: Wasserfrac-Tests, hellgrün: Tests zum Einbohrloch-Zweischichtverfahren, gelbgrün: Tests zum Zyklischen Verfahren, grün: Tests zum Tiefenzirkulations-Verfahren

2.1.6 Wasserfrac-Tests

Im Oktober und November 2003 wurde eine Serie massiver Wasserfrac-Tests in der Bohrung Horstberg Z1 ausgeführt mit dem Ziel großflächige Gesteinsrisse in gering permeablen triassischen Gesteinsformationen zu erzeugen, um auf diese Weise eine ausreichende Produktivität der Bohrung herzustellen. Zur Beobachtung der Rissausbreitung wurden während der Wasserfrac-Tests sämtliche in Vorläuferprojekten erfolgreichen oder zumindest Erfolg versprechenden Verfahren des Frac-Monitoring: Messung der Mikroseismizität, Eigenpotenzialmessungen und Neigungsmessungen eingesetzt. Außerdem wurde die Risshöhe indirekt durch Bohrlochtemperaturlogs in den Teufenintervallen der Fractests bestimmt.

Da die Bohrung Horstberg Z1 vollständig verrohrt ist, wurde die Bohrung für die Frac-Tests nacheinander in verschiedenen Abschnitten über jeweils 4 bis 6 m Länge mit jeweils etwa 200 Schuslöchern perforiert:

- 3920,5 – 3926,5 m, Volpriehausen-Sandstein
- 3787,0 – 3791,0 m, Detfurth-Sandstein
- 3037,5 – 3041,5 m, Oberer Muschelkalk

Die Wasserfrac-Tests erfolgten in drei Testserien mit der Absicht, in den drei Perforationsintervallen Risse zu erzeugen. Da erwartet werden konnte, dass der Frac-Druck mit geringer werdender Tiefe abnimmt, wurde mit der tiefsten Perforationsstrecke begonnen.

Nacheinander wurden dann die beiden höheren Perforationsstrecken geschossen und behandelt. Auf diese Weise sollte der kostspielige Einsatz von Bohrlochpackern vermieden werden. Diese Vorgehensweise bewährte sich in den unteren beiden Perforationsstrecken. Im Muschelkalk führte sie jedoch nicht zum Erfolg, obwohl die dortige Perforationsstrecke mehr als 700 m höher lag und hier ein deutlich niedrigerer Frac-Druck erwartet werden konnte.

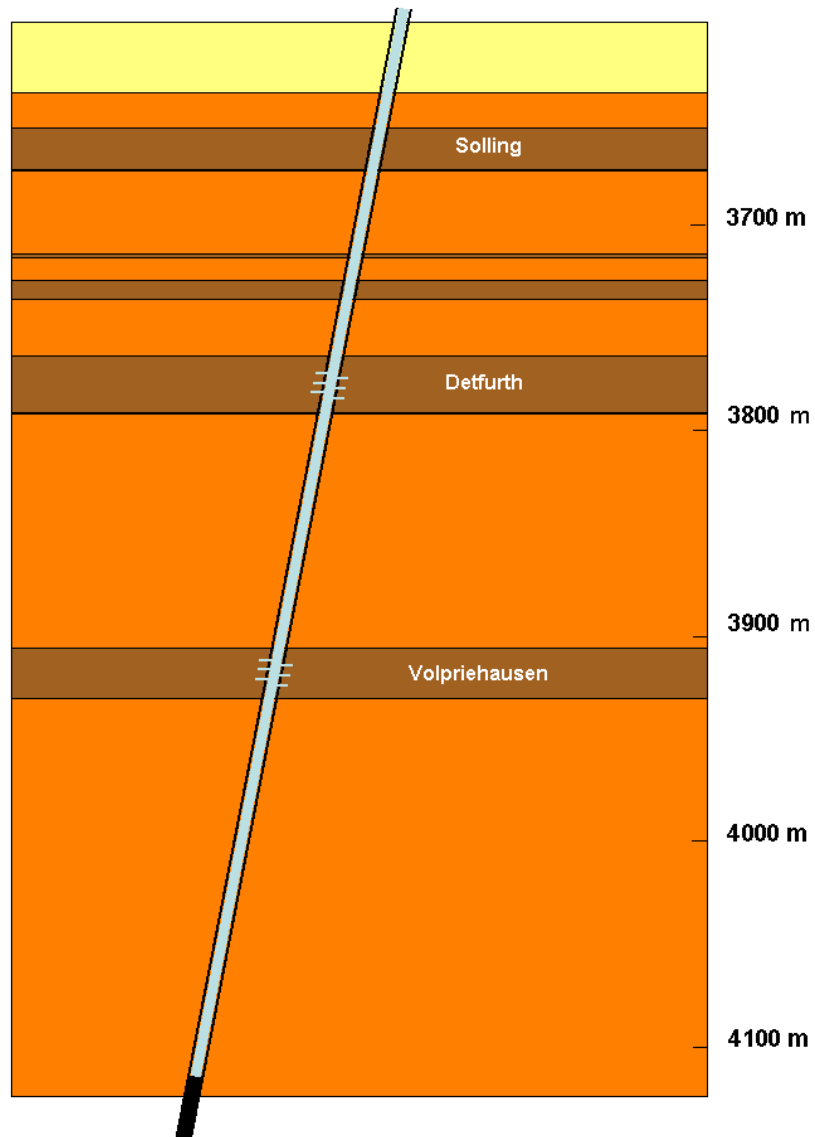


Abb. 11: Schematische Darstellung der Untergrundbedingungen im Mittleren und Unteren Buntsandstein. Die Frac-Tests wurden in den perforierten Bohrlochabschnitten des Volpriehausen- und Dethfurt-Sandsteins ausgeführt. Bei den heller gefärbten Flächen handelt es sich um Ton- und Schluffstein. Der Obere Muschelkalk befindet sich weit oberhalb des dargestellten Bereiches.

2.1.7 Frac-Tests im Volpriehausen-Sandstein

Im Bereich des Volpriehausen-Sandsteins wurden zur Rissinitiierung zunächst Frac-Tests mit sehr geringen Pumpleistungen und Fließraten ausgeführt. Die dabei aufgezeichneten Druckkurven zeigten, dass im Volpriehausen-Sandstein ein Zugriss erzeugt wurde. Dieser wurde dann durch die Injektion von etwa 1.000 m³ Wasser mit Fließraten bis zu 25 l/s vergrößert. Bei allen Tests wurde ein außerordentlich hoher Frac-Druck beobachtet, der in der Spitze ca. 460 bar (Bohrlochkopfdruk) erreichte

(Abb. 12). Ähnlich hohe Werte wurden nur in seltenen Fällen im Norddeutschen Becken beobachtet. Die technische Ausstattung reichte bei diesen extremen Bedingungen nicht für einen massiven Wasserfrac-Test aus.

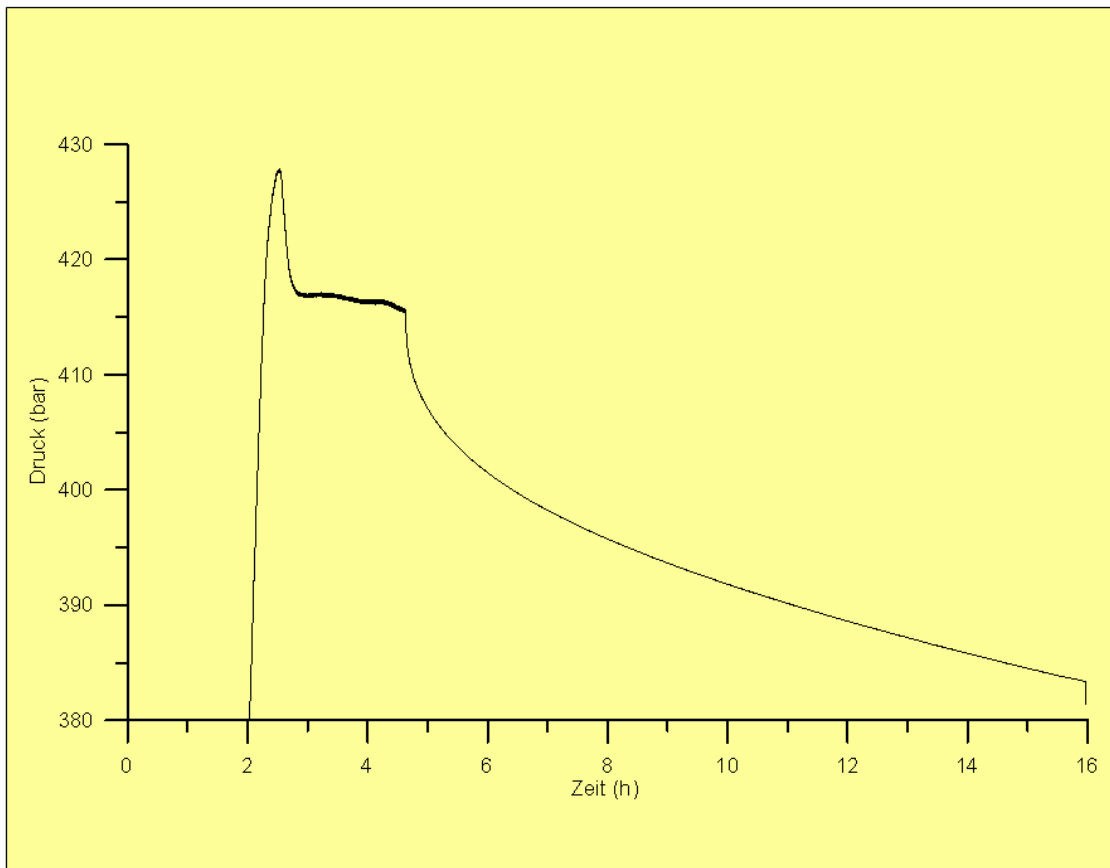


Abb. 12: Registrierung des Bohrlochkopfdruckes während der Riss-Initiierung im Volpriehausen-Sandstein. Das gut ausgeprägte Druckmaximum weist auf die Entstehung eines Zugrisses hin.

Obwohl durch die Injektion eine beachtliche Rissgröße erreicht wurde, zeigte ein Auslauftest jedoch, dass sich der Riss bei Druckentlastung weitgehend wieder schloss und nur in einem sehr engen Druckbereich unterhalb des Frac-Drucks günstige hydraulische Eigenschaften aufwies. Daher wurde hier auf die Durchführung weiterer Tests verzichtet und die Bohrung im ca. 130 m höher gelegenen Detfurth-Sandstein erneut perforiert.

2.1.8 Frac-Tests im Detfurth-Sandstein

Die Rissinitiierung im ca. 130 m höher gelegenen Detfurth-Sandstein erfolgte nach der Perforation dieses Abschnitts selbständig durch den noch vorhandenen Restdruck des Volpriehausen-Fracs bei ca. 340 bar Bohrlochkopfdruck (entsprechend einem Druck von 770 bar im Perforationsintervall). Der Riss im Detfurth-Sandstein

wurde in vier massiven Frac-Tests durch Injektion von insgesamt 20.000 m³ Wasser mit Fließraten bis zu 50 l/s vergrößert (Abb. 13). Der in Relation zum Volpriehausen-Sandstein niedrige Frac-Druck liegt im regionalen Vergleich immer noch im oberen Bereich der beobachteten Frac-Drücke.

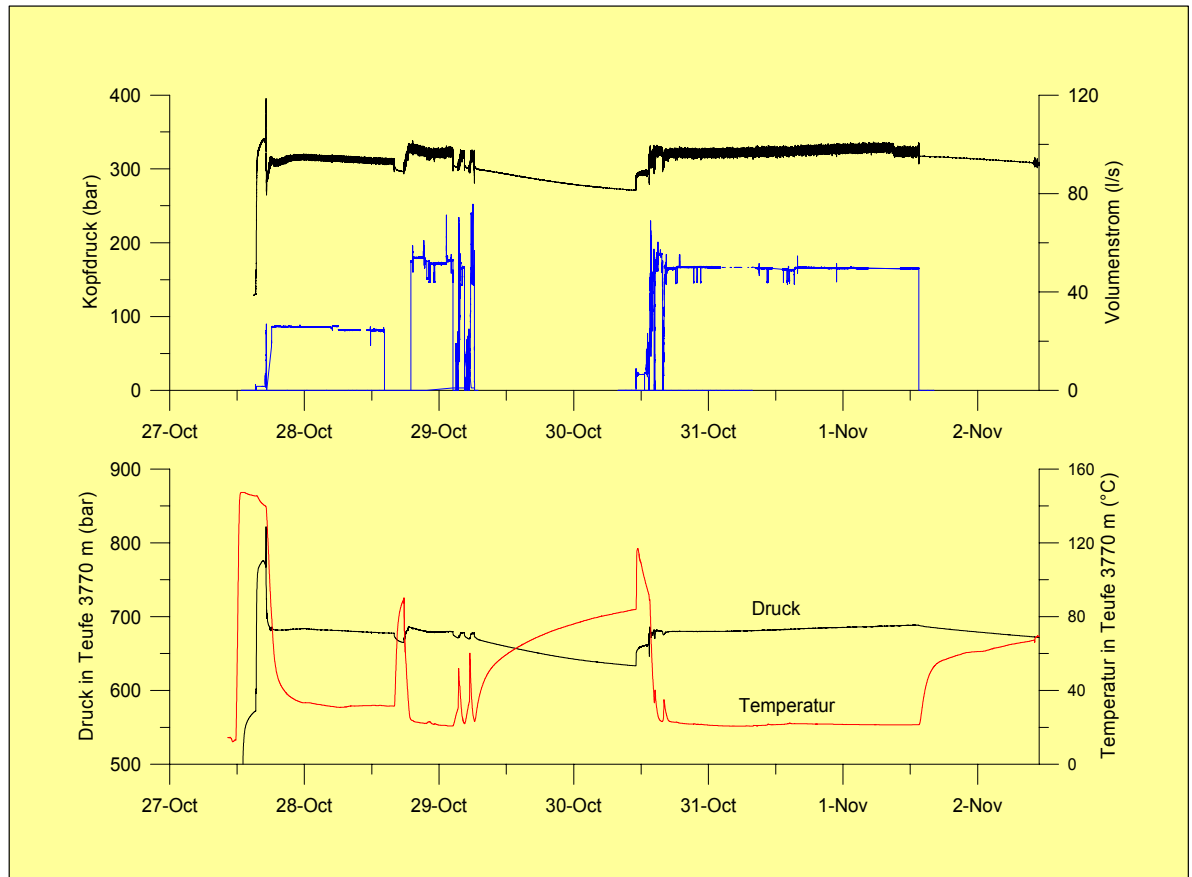


Abb. 13: Verlauf von Bohrlochkopfdruck und Injektionsrate (oben) während der ersten drei Wasserfrac-Tests im Detfurth-Sandstein. Die in einer Teufe von 3770 m (ca. 10 m oberhalb des Perforationsintervalls) aufgezeichneten Verläufe von Druck und Temperatur sind im unteren Bereich dargestellt. Die vierte Versuchsphase ist hier nicht dargestellt.

Nach Rissinitiierung fällt der Rissausbreitungsdruck von 770 bar (Basisdruck) auf ca. 680 bar ab und ändert sich während der folgenden Frac-Phasen nur wenig. Jedoch ist außer während des ersten Tests eine ansteigende Tendenz zu erkennen. Dies gilt auch für die Einschlussdrücke (Druck unmittelbar nach Pumpenstop). Diese steigen von Frac-Test zu Frac-Test von etwa 674 bar auf etwa knapp 700 bar an. Dies deutet darauf hin, dass der Riss sich in Bereiche höherer Spannungen ausgebreitet hat. Da die Horizontalspannungen in den Tonsteinlagen gewöhnlich höher sind als in den Sandsteinschichten, kann dies als Hinweis darauf gewertet werden, dass der Riss in die Tonsteinlagen hineingewachsen ist. Der instantane Druckabfall nach Pumpenstop (gemessen am Risseinlass, Basisdruck) ist ein Maß für die Fließwiderstände im

Riss. Dieser ist bereits nach dem ersten Frac-Tests sehr gering (ca. 4 bar) und ist nach den letzten beiden Frac-Tests nur noch in der Größenordnung von 1 bar. Dies bedeutet, dass selbst bei den hohen Fließraten von 50 l/s ein kaum messbarer Fließwiderstand im Riss herrscht und dass insbesondere auch am Risseinlass einschließlich der Perforation nur ein äußerst geringer Reibungsdruckverlust auftritt. Eine grobe Abschätzung zeigt, dass die Transmissibilität des Risses am Ende der beiden letzten Frac-Tests deutlich höher war als 100 Dm. Dies ist mehr als die Transmissibilität eines sehr guten Heißwasseraquifers. Dies gilt natürlich nur für den Zustand der Rissausbreitung. Nach Druckentlastung kann die Riss-Transmissibilität deutlich geringer sein.

In der Einschlussphase zur dritten Stimulation (Abb. 13, 1.Nov.) fällt der Druck über lange Zeit beinahe linear ab. Aus diesem Druckabfall kann die Speicherfähigkeit des Risses abgeleitet werden. Die enorm hohe Speicherfähigkeit von weit über 100 m³/bar, die sich aus der Druckkurve ermitteln lässt, ist ein weiteres Indiz dafür, dass es sich um einen Zugriss handelt. Mit einfachen bruchmechanischen Modellen kann aus der Speicherfähigkeit die Größe der Rissfläche zu einigen Hunderttausend Quadratmetern (Größenordnung 10⁵ m²) abgeschätzt werden.

Die oben ausgesprochene Vermutung, dass der Riss sich bis in die Ton- und Schluffsteinhorizonte des Hangenden und Liegenden ausgebreitet hat, bestätigt sich beim Vergleich eines ungestörten Temperatur-Logs, das vor den Stimulationsarbeiten in der Bohrung aufgenommen wurde, mit einem Temperaturlog, das etwa 10 Monate nach den Stimulationsarbeiten aufgenommen wurde (Abb. 14). Es ist zu erkennen, wie die durch die Stimulationsarbeiten erzeugte Kühlzone vom Detfurth-Sandstein bis in den Solling-Sandstein reicht. Die Form des Temperaturminimums lässt darauf schließen, dass bei den Wasserfrac-Tests im Detfurth-Sandstein ein etwa 180 m hoher Vertikalriss entstanden ist, der sich bis in den ca. 120 m höher gelegenen Solling-Sandstein ausgebreitet hat. Der im Volpriehausen-Sandstein erzeugte Riss hat dagegen eine sehr viel geringere Höhe.

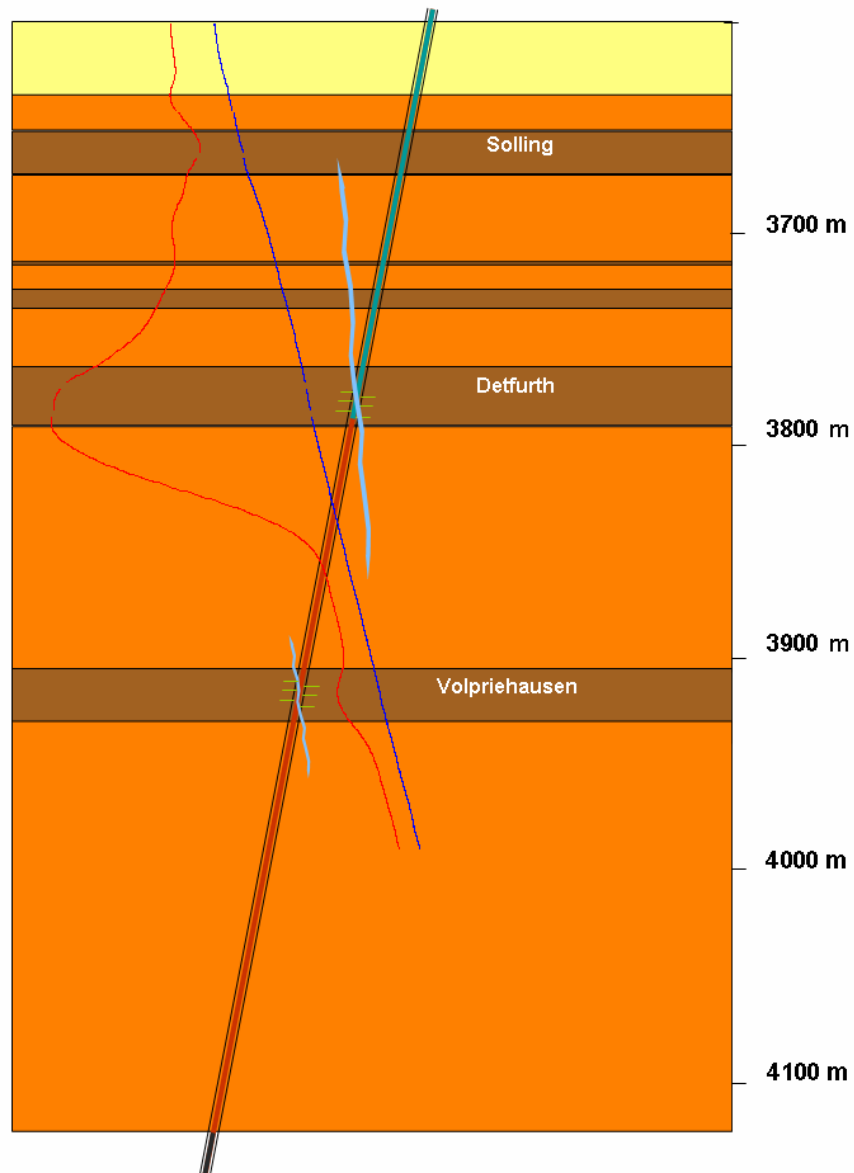


Abbildung 14: Temperatur-Logs vor (24.9.2003) und nach (13.07.2004) den Wasserfrac-Tests im Volpriehausen- und Detfurth-Sandstein und daraus abgeleitete Rissgeometrien(-höhen).

Bildgebende Bohrlochmess-Verfahren (FMI, FMS, BHTV o.ä.) zur Bestimmung der vertikalen Ausdehnung oder der Weite des Risses konnten nicht eingesetzt werden, da die Bohrung voll verrohrt ist.

2.1.9 Geophysikalisches Frac-Monitoring

Zur Beobachtung des Risswachstums und zur Ermittlung der Rissorientierung wurde ein umfangreiches geophysikalisches Messprogramm durchgeführt.

2.1.9.1 Beobachtung der induzierten Mikroseismizität

Aus Erfahrungen anderer Projekte konnte abgeleitet werden, dass bei den vorgesehenen Wasserfrac-Tests mikroseismische Ereignisse erzeugt werden würden. Die induzierte Seismizität sollte durch ein mikroseismisches Beobachtungsnetz überwacht werden. Die Ausgangslage für dessen Konzeption war:

- es standen keine tiefen Bohrungen für Aufzeichnungen mit Bohrlochgeophonen zur Verfügung (im Gegensatz zu den entsprechenden Experimenten an der KTB oder in Soultz),
- die geologische Situation (ca. 100-200 m Quartär, meist aus lockeren Sanden bestehend, und ca. 1000 m Tertiär) ließ eine starke Dämpfung der mikroseismischen Signale durch die oberflächennahen Schichten und eine starke Bodenunruhe erwarten.

Dies führte zu dem Konzept, die Registrierungen in eigens abgeteuften, ca. 100 m tiefen Bohrungen vorzunehmen, die mit einem Bohrgerät des NLfB (jetzt LBEG) realisiert werden konnten. Die insgesamt acht Stationen wurden auf zwei Ringen mit Radien von 0,9 km und 1,8 km installiert (Abb. 15). Als Messaufnehmer wurden Dreikomponenten 4,5 Hz Geophone, die in einem kurzen PVC-Rohr vergossen wurden, eingesetzt. Zur Datenregistrierung wurden acht Earth Data Logger (Leihgabe der FU Berlin) verwendet.

Das für die Lokalisierung induzierter Ereignisse notwendige Geschwindigkeitsmodell konnte mit Hilfe der bereits oben beschriebenen Perforationsschüsse kalibriert werden. Zudem lieferten die Registrierungen der Perforationsschüsse einen Hinweis auf die Empfindlichkeit des Netzes. Eine präzise Quantifizierung des Detektionsvermögens im Sinne einer unteren Magnitudengrenze konnte nicht vorgenommen werden. Die Tatsache, dass die Signale der Perforationsschüsse registriert wurden, deutet allerdings auf eine ausreichende Empfindlichkeit des Netzwerks hin, um Signale in dem typischen Magnitudenbereich zu detektieren, wie er in einer Vielzahl von Injektionsexperimenten im Kristallingestein beobachtet wurde

Das seismische Netzwerk konnte ohne wesentliche Probleme über die Dauer der Wasserfrac-Tests und darüber hinaus betrieben werden. Die Daten wurden während der Wasserfrac-Tests zweimal täglich ausgelesen und von Wissenschaftlern des

GGA-Institutes aufgearbeitet. Die Daten wurden dann einem Serviceunternehmen (Q-Con) übergeben, das sie vor Ort auf das Auftreten von Mikroseismizität hin untersuchte. Trotz einwandfreien Betriebs des Netzwerkes, beeinträchtigten Störeinflüsse die Aufzeichnung einiger der acht Stationen erheblich. Dies waren vor allem die Vibrationen der Hochdruckpumpen, zahlreiche Einschläge von Testgeschossen auf dem nahe gelegenen Testgelände eines Rüstungsunternehmens sowie Zugdurchfahrten auf der etwa vier Kilometer entfernten Bahnlinie. Während letztere die Messungen

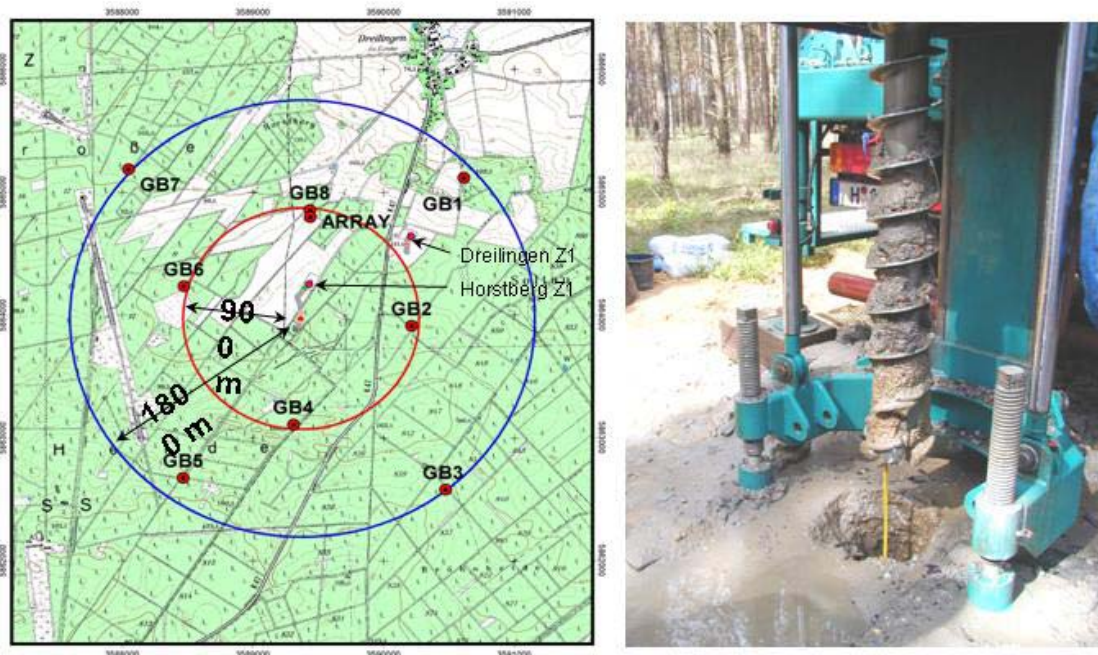
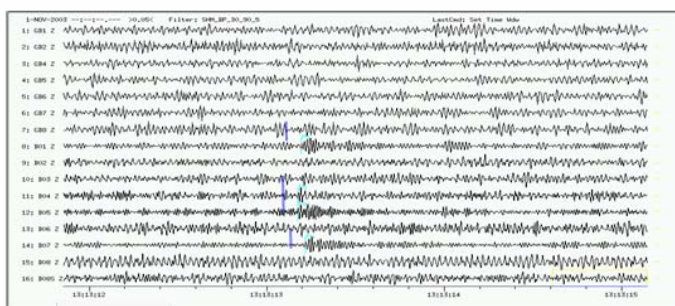
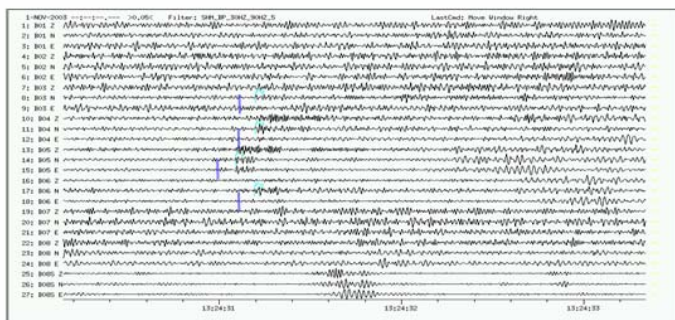


Abb. 15: Netzwerk zur Registrierung der induzierten Seismizität. Oben links: Lage der seismischen Stationen, oben rechts: Bohren einer seismischen Beobachtungsbohrung mit dem Gerät des LBEG, unten links: Aufbau einer Registrierstation, unten rechts: Dreikomponenten-Geophonsonde

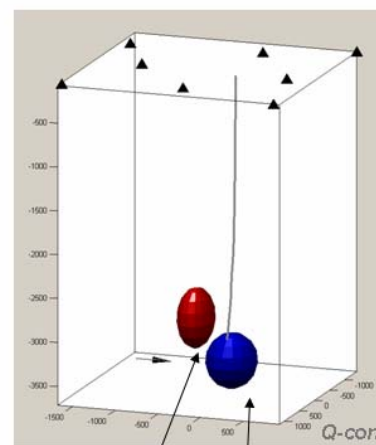
in bestimmten Zeitfenstern beeinträchtigt, waren die Vibrationen der Hochdruckpumpen während der gesamten Testdauer präsent, allerdings nur an den bohrloch-nahen Stationen. Um den Störeinfluss zu verringern, wurden die Pumpen nach den ersten Tests mit Hilfe eines Krans auf flach gelegte Gummireifen gestellt. Die Maßnahme führte jedoch nur zu einer geringfügigen Verbesserung. Mit Ausnahme der erwähnten Zeitfenster, während der die meisten der Stationen von den Einschlägen und den Zugdurchfahrten gestört waren, waren jedoch ausreichend viele Stationen so wenig gestört, dass eine einwandfreie Registrierung und Ortung mikroseismischer Signale mit einer Magnitude größer als etwa 0,5 möglich gewesen wäre.



Seismisches Ereignis am 1.11. um 13:13:11. Alle Stationen, z-Komponenten



Seismisches Ereignis am 1.11. um 13:24:29. EDL - Stationen, alle Komponenten, Bandpass 30 – 90 Hz.



Ereignis 13:13:11 / 13:24:29

Abb. 16: Registrierungen und Herdlokationen der beiden lokalisierbaren mikroseismischen Ereignisse.

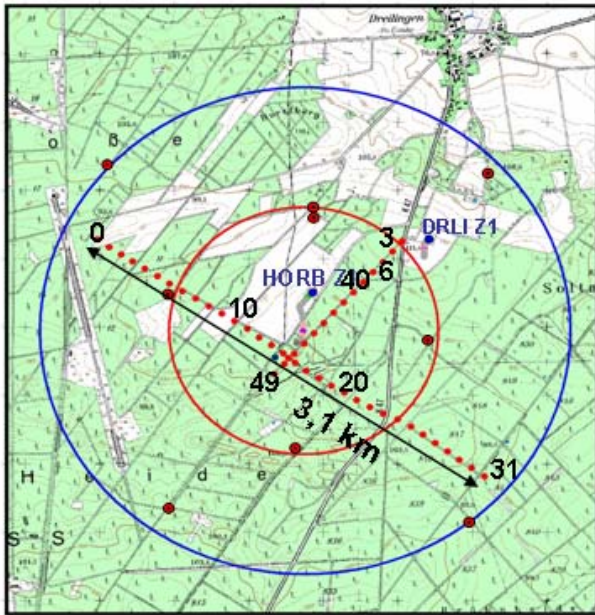
Trotz des großen Messaufwands und der relativ hohen Empfindlichkeit des seismischen Netzwerkes wurden insgesamt nur 11 induzierte Ereignisse registriert und von diesen waren lediglich zwei genügend energiestark, um geortet werden zu können (Abb. 16). Die Ermittlung der Rissorientierung war deshalb nicht möglich. Dieses insgesamt enttäuschende Ergebnis steht in krassem Gegensatz zu den Beobachtungen, die an den HDR-Standorten im Kristallin gemacht wurden. Hier wurden bei vergleichbaren Wasserfrac-Tests zehntausende mikroseismischer Ereignisse registriert

und geortet und auf diese Weise ein detailliertes Bild der raumzeitlichen Rissausbreitung gewonnen.

Die Dämpfung der seismischen Wellen liefert keine geeignete Erklärung für diesen krassen Unterschied. Die Empfindlichkeit des Netzwerkes und die Übertragungseigenschaften des Untergrundes hätten ausgereicht, um mindestens mehrere tausend mikroseismische Ereignisse zu detektieren, wenn solche in ähnlicher Stärke und Anzahl wie z.B. bei den Wasserfrac-Tests in Soultz ausgelöst worden wären. Die wahrscheinlichste Erklärung liegt darin, dass bei den Wasserfrac-Tests an der Lokation Horstberg reine Zugrisse erzeugt wurden, während in Soultz und wohl auch an den anderen HDR-Standorten durch die Wasserinjektion auch Scherungen auf den neu geschaffenen oder auf bereits vorhandenen Bruchflächen im Gestein ausgelöst wurden. Für eine reine Zugrissausbreitung in Horstberg spricht auch die außerordentlich hohe Speicherkapazität und hydraulische Leitfähigkeit der Risse während und unmittelbar nach den Wasserfrac-Tests. Beides zeigt, dass die Risse durch den Wasserdruck gegen den Gebirgsdruck offen gehalten werden, so dass die Rissoberflächen nicht mehr in Kontakt stehen. Die Rissoberflächen können in diesem Fall reibungsfrei und damit aseismisch gegeneinander verschoben werden. Bei den Wasserfrac-Tests im Kristallin scheinen die Rissoberflächen dagegen auch während der Rissausbreitung den Kontakt nicht zu verlieren. Jede Scherbewegung muss daher Reibung überwinden und die auf den Rissoberflächen vorhandenen Unebenheiten und Rauigkeiten abscheren, was mit stärkerer Seismizität verbunden sein kann. Als Ursachen für diesen Unterschied im Rissausbreitungsprozess kommen eine starke Spannungsanisotropie (Soultz) oder große Spannungsunterschiede in den Schichten (Horstberg) in Betracht.

2.1.9.2 Messung des Eigenpotentials

Motiviert durch positive Erfahrungen im HDR-Projekt Soultz, wurden auch in Horstberg während der Wasserfrac-Tests Messungen des elektrischen Eigenpotentials durchgeführt. Sie sollten zeigen, ob die Fluidinjektion zu messbaren und interpretierbaren Änderungen des Eigenpotentials an der Erdoberfläche führt. Insgesamt wurden 46 Kupfer-Kupfersulfat-Sonden auf zwei senkrecht zueinander verlaufenden Profilen in Abständen von je 100 m angeordnet (Abb. 17). Jede Sonde war mit einer zentralen Messeinheit verbunden, die regelmäßig die Potentialdifferenz zwischen benachbarten Sonde und bezogen auf eine Basissonde erfasste. Zwei Sonden wurden als Basissonden ausgewählt. Von ca. 90 % der insgesamt verfügbaren Messzeit liegen Daten vor, die Fehlzeiten von 10% ergeben sich durch täglich erforderliche Wartungsarbeiten.



Cu/CuSO₄-Sonde

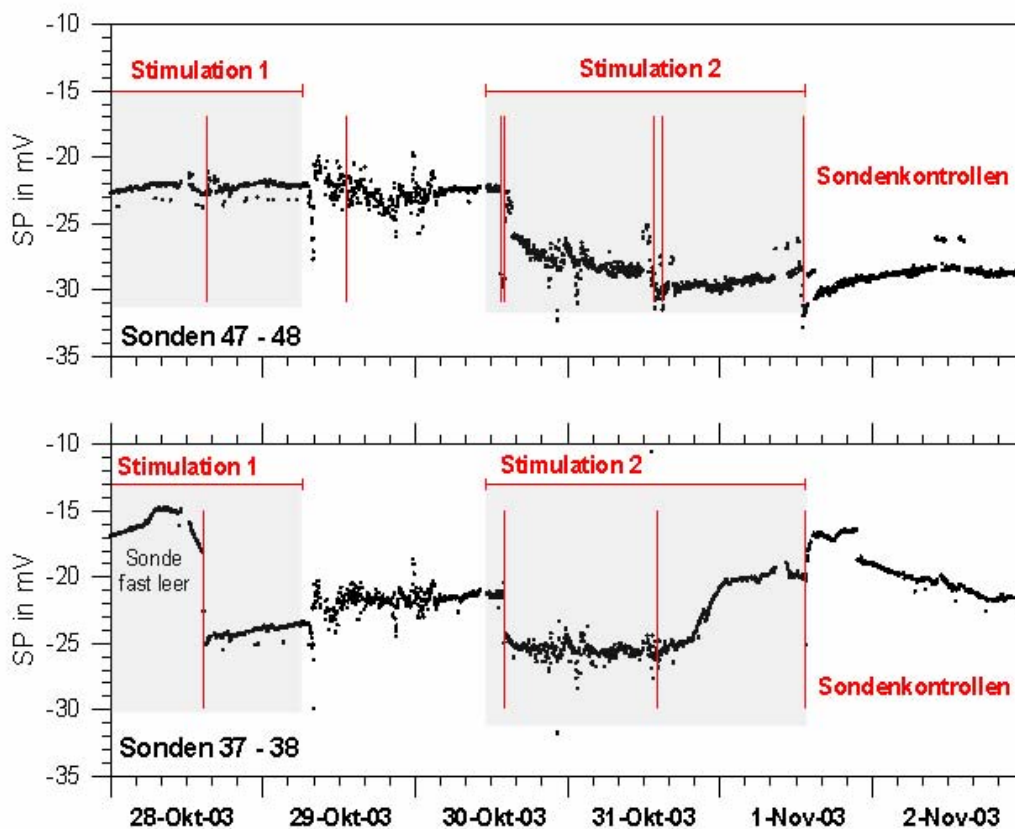


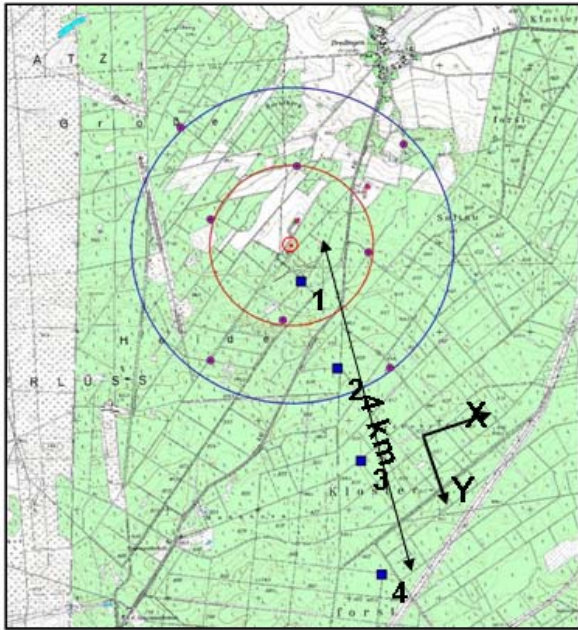
Abb. 17: Aufbau und Registrierungen der Eigenpotenzialmessungen. Oben links: Sondenstrecken (kleine rote Punkte), oben rechts: Kupfersulfatsonde, unten: Registrierungen von zwei Sondenpaaren während der Wasserfractests (Stimulationen) im Detfurth-Sandstein.

In größerer Entfernung zur Lokation Horstberg wurde an zwei Orten das Erdmagnetfeld registriert, um potentielle Störeinflüsse zu identifizieren. Während der Testphase traten mehrere geomagnetische Stürme auf, die einen deutlichen Einfluss auf die Messungen hatten. Dagegen konnten in den Registrierungen keine Änderungen des Eigenpotenzials identifiziert werden, die eindeutig mit der Wasserinjektion während der Frac-Tests korrelieren.

2.1.9.3 Messungen der Oberflächendeformation

Bohrloch-Neigungsmesser zur Messung der Gesteinsdeformation bei Frac-Tests werden routinemäßig von der KW-Industrie eingesetzt. Aus den Signalen können Rückschlüsse über die Orientierung und Größe der erzeugten Risse angeleitet werden. Dazu müssen jedoch mehrere Bohrungen im Umfeld der zu beobachtenden Bohrung zur Verfügung stehen.

Hier sollte erstmals der Einsatz von Neigungsmessern an der Erdoberfläche zur Rissortung erprobt werden. Senkrecht zur erwarteten Rissausbreitungsrichtung wurden daher entlang eines Profils (Länge 4 km) vier Neigungsmesser installiert. Zur Reduktion von oberflächennahen Effekten wurden sie in etwa 3 m tiefe Bohrungen eingebaut. Die Geräte messen die Auslenkungen in zwei zueinander orthogonalen Richtungen und weisen eine hohe Empfindlichkeit von $0.1 \mu\text{m}/\text{m}$ auf. Sie sind mit Datenloggern ausgerüstet, die einmal wöchentlich ausgelesen wurden. Die Daten der vier Stationen enthielten nur während der Frac-Tests im Volpriehausen-Sandstein kohärente Signale, die jedoch nicht eindeutig mit der Wasser-Injektion korrelieren (Abb. 18).



Installation der Neigungsmesser
(Empfindlichkeit 0,1 μ rad)

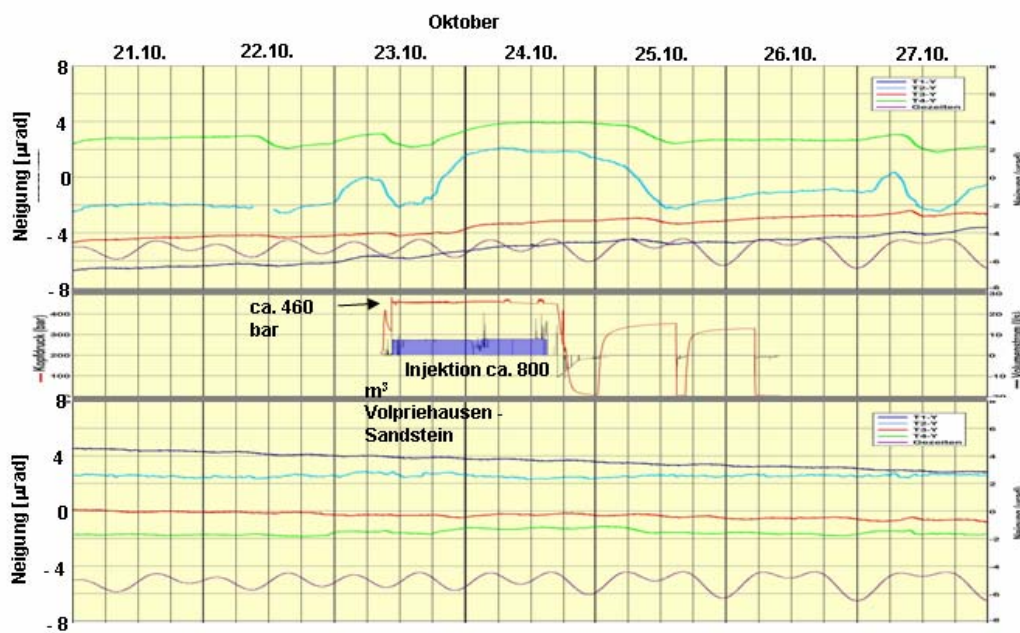


Abb. 18: Aufbau und Registrierungen der Deformationsmessungen. Oben links: Lage der Flachbohrungen für die Neigungsmesser (blaue Quadrate), oben rechts: Einbringen eines Neigungsmessers in eine der Flachbohrungen, unten: Registrierungen der vier Neigungsmesser während des massiven Wasserfrac-Tests im Volpriehausen-Sandstein.

2.1.9.4 Pegelmessungen in Brunnen

Zur Erfassung möglicher hydraulischer Fernwirkungen (v.a. Reinjektion in den höher gelegenen Kalkarenit) wurden Pegelstandsmesser in Brunnenbohrungen eingebaut. Zudem sollten die Messungen zeigen, ob eine Beeinflussung der Pegelstände durch

die Wasserentnahme aus den Beregnungsbrunnen stattfindet. In den Aufzeichnungen diese Langzeitbeobachtungen, die seit den Haupttests ununterbrochen durchgeführt wurden, waren jedoch keine Auffälligkeiten zu erkennen.

2.1.10 Erprobung des Einsonden-Zweischicht-Verfahrens

Konzept

Bei dem Einbohrloch-Zweischicht-Verfahren soll die Bohrung mittels künstlich erzeugter großflächiger Risse an Wasser-führende Kluffzonen, Störungen oder Schichten angeschlossen werden, um den Zulauf zur Bohrung auf wirtschaftlich relevante Raten zu steigern (Abb. 19). Das geförderte Thermalwasser wird nach seiner thermischen Nutzung über den Ringraum derselben Bohrung in einen höher liegenden Horizont reinjiziert. Da für den angestrebten Leistungsbereich moderate Produktionsraten genügen, ist eine hydraulische Verbindung zwischen Produktions- und Reinjektionshorizont nicht zwingend erforderlich.

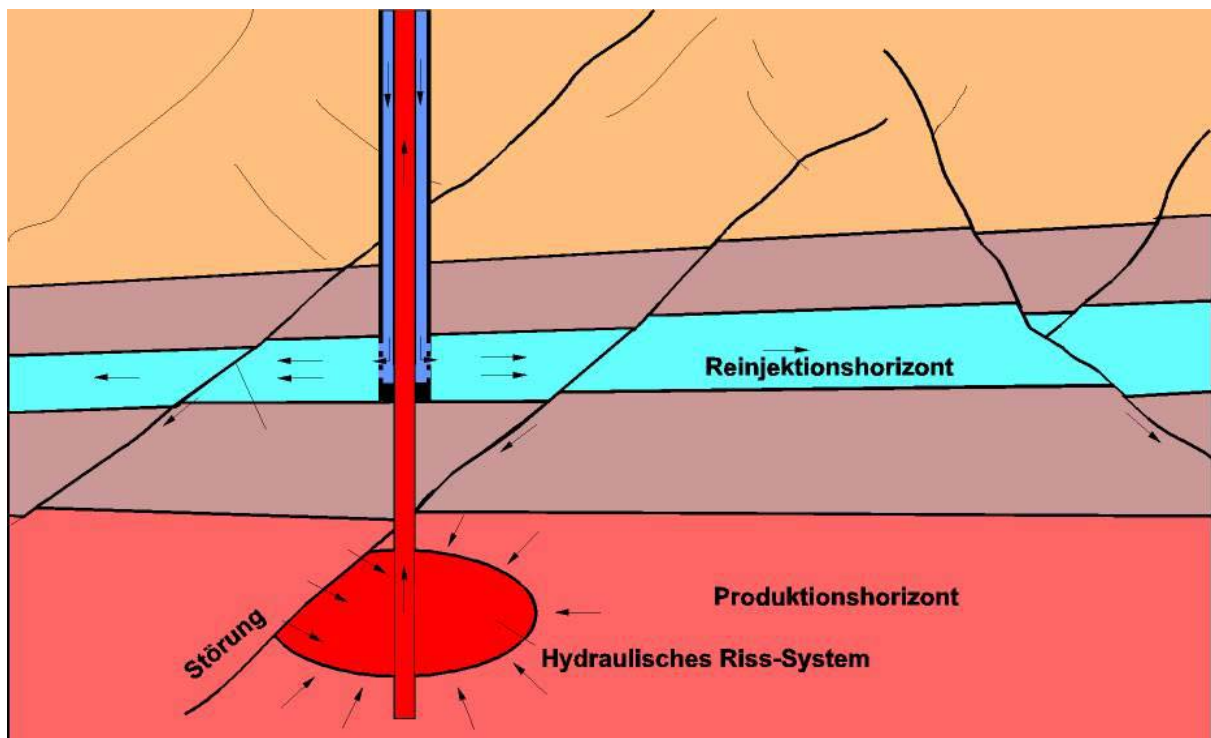


Abb. 19: Schematische Darstellung des Einbohrloch-Zweischicht-Verfahrens.

Tests Übersicht

Zur Erprobung des Konzeptes wurden mehrere meist einige Wochen lange Tests in der Bohrung Horstberg Z1 ausgeführt. Produktionshorizont war der Mittlere Bunt-sandstein, wobei vorwiegend aus dem im Detfurth-Sandstein geschaffenen Riss, in späteren Tests zusätzlich aus dem Solling-Sandstein gefördert wurde, nachdem auch in diesem Horizont die Verrohrung perforiert worden war. Ein unbedeutender Anteil wurde auch aus dem Riss im Volpriehausen Sandstein gefördert. Als Re-Injektionshorizont diente der bei ca. 1200 m anstehende Kalkarenit, eine Unterformation der Kreide. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die durchgeführten Tests.

Test	Datum	Prod. Volumen	Produktionshorizont	Typ/Bemerkung
27Okt03	02.11.2003 – 05.11.2003	1.654 m ³	Detfurth	Vor dem letzten Wasserfrac-Test
17Nov03	17.11.2003 – 20.12.2003	6.650 m ³	Detfurth	intermittierend
11Feb04	12.02.2004 – 19.02.2004	2.706 m ³	Detfurth	
20Feb04	20.02.2004 – 13.07.2004	7.100 m ³	Detfurth & Solling	nach Perf. Solling
14Jul04	14.07.2004 – 07.11.2004	2.350 m ³	Detfurth & Solling	
	Summe:	20.460 m ³		

Tabelle 4: Übersicht über die Produktionstests zur Untersuchung des Einbohrloch-Zweischichtverfahrens. Reinjektionshorizont war in allen Fällen der Kalkarenit.

Test des Reinjektionshorizontes

Als für die Testdurchführung sehr günstig erwies sich, dass der äußere Ringraum der Bohrung (Abb. 6) direkt ohne Zementation an den Kalkarenit angebunden ist. Der Kalkarenit wird im Norddeutschen Becken flächendeckend von der KW-Industrie zur Reinjektion mitgeförderter Formationsfluide genutzt.

Obwohl der Kalkarenit an der Bohrung Horstberg Z1 prinzipiell über den äußeren Ringraum zugänglich war, war anfangs zweifelhaft, ob es gelingen würde, dort Wasser zu verpressen, da der Ringraum mit Spülung gefüllt war und die äußere Verrohrung nur eine Innendruckfestigkeit von 150 bar aufwies. Um dies zu testen, wurde nach den Wasserfrac-Tests die 7“-Verrohrung der Bohrung über eine Hochdruckleitung mit dem zum Kalkarenit führenden Ringraum kurzgeschlossen. Mittels eines Drosselventils wurde dann kontrolliert Wasser bzw. Sole aus dem noch unter Druck stehenden Frac im Detfurth-Sandstein in den Ringraum abgelassen. Bei diesem Test zeigte sich, dass bei einem Druck von ca. 110 bar Sole mit ausreichend hohen Fließraten verpresst werden konnte. Erst dadurch wurde die Durchführung von länger dauernden Produktionstests ermöglicht. Damit war eine wesentliche Voraussetzung für den erfolgreichen Test des Einsondenzweischicht-Konzeptes gegeben.

Durch Temperatur-Logs konnte die Tiefe des Reinjektions-Horizonts bestimmt werden (Abb. 20). Die Hauptabflusszone befindet sich demnach im zentralen Bereich des Kalkarenits (Tiefe ca. 1027 m - 1320 m).

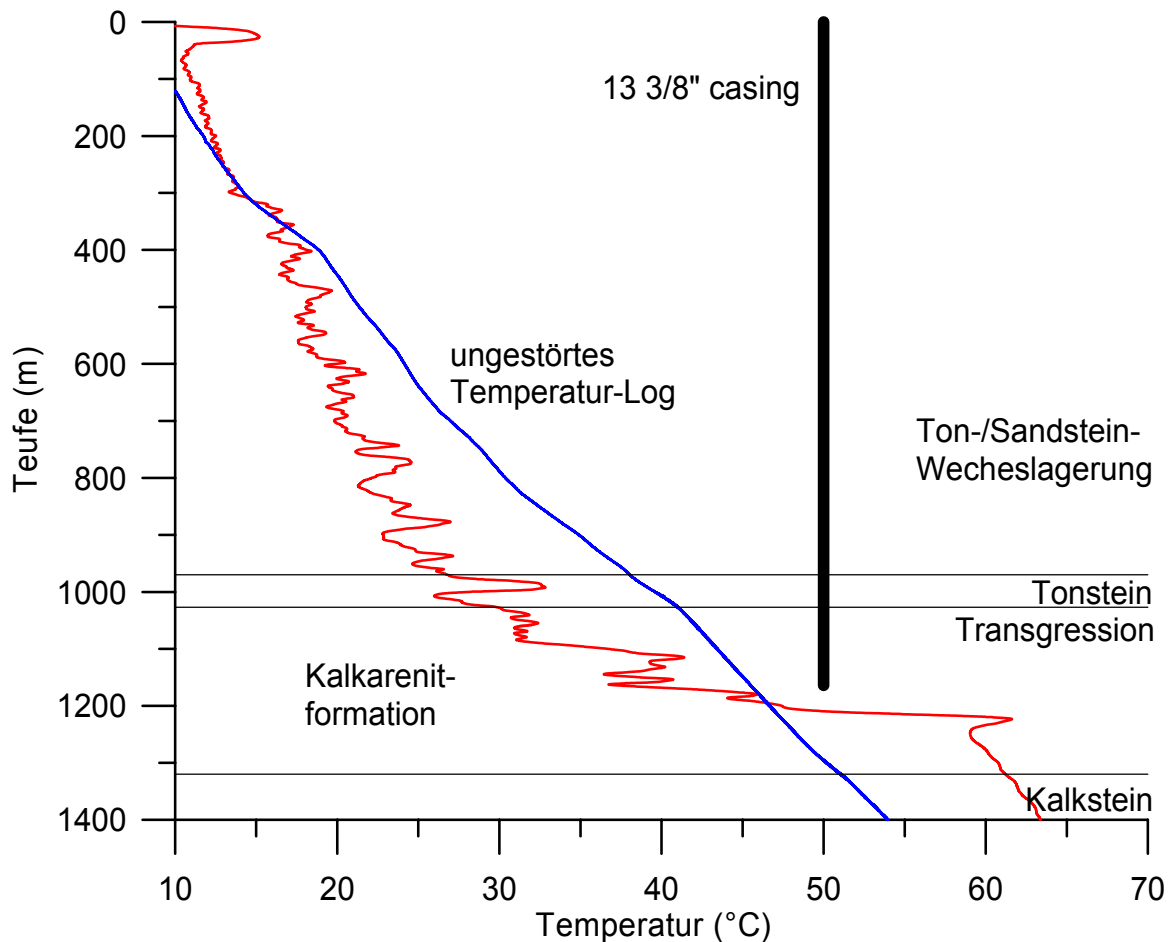


Abb. 20: Temperatur-Log zur Bestimmung der Tiefenlage des Reinjektionshorizonts. Kurz vor der Messung wurden etwa 100 m³ kaltes Frischwasser durch den Ringraum verpresst um eine deutliche Temperatursignatur zu erzeugen.

Test des Produktionshorizontes

Eine der wichtigsten Voraussetzungen für den Erfolg des Einsonden-Zweischichtverfahrens ist, dass der durch die Wasserfrac-Tests geschaffene Riss sich nach Druckentlastung nicht vollständig schließt, sondern eine ausreichende „Restdurchlässigkeit“ behält. Zur Untersuchung dieser Fragestellung wurde ca. zehn Tage nach dem letzten Wasserfrac-Test im Detfurth-Sandstein, nachdem der Druck im Riss während der Einschlussphase bereits deutlich unter den Rissöffnungsdruck abgefallen war, ein Produktionstests ausgeführt. Die Produktion erfolgte intermittierend, wobei über insgesamt 21 Tage jeweils tagsüber rund 300 m³ Wasser gefördert und die

Bohrung dann über Nacht eingeschlossen wurde. Auf diese Weise wurden rund 6.500 m³ der 20.000 m³ Wasser, die während der Wasserfrac-Tests zur Risserzeugung injiziert wurden, rückgefördert.

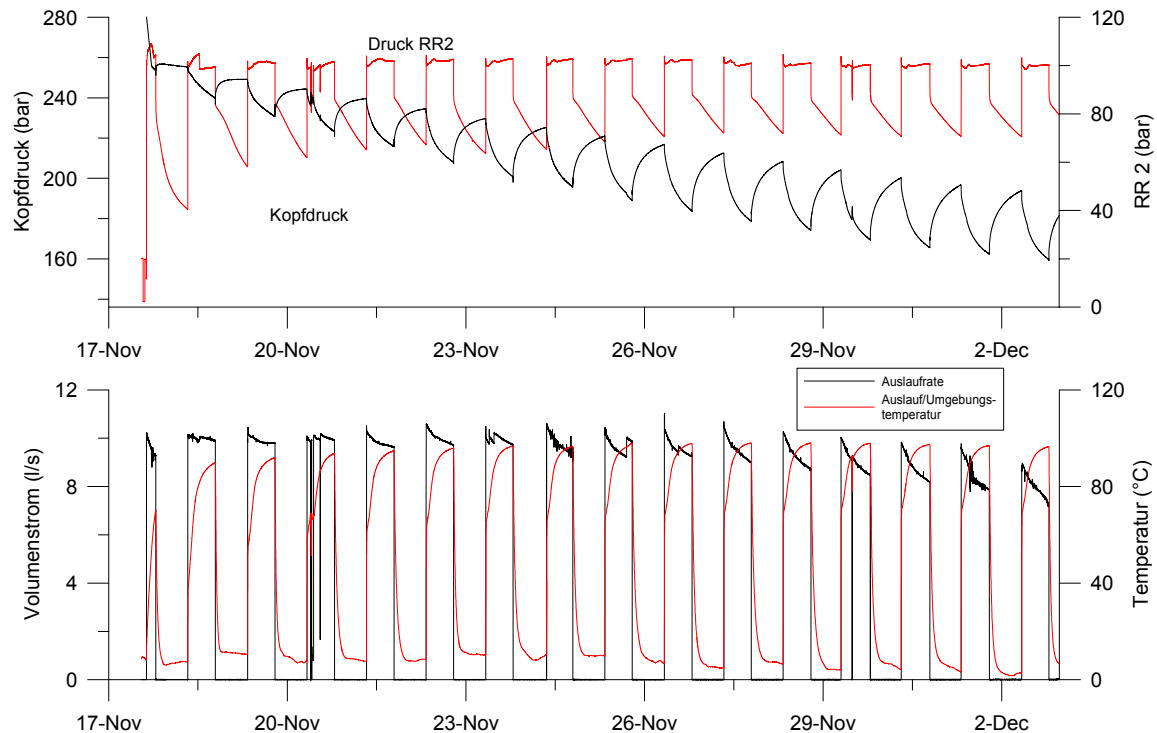


Abb. 21: Registrierungen der Bohrlochkopfdrucke im Detfurth-Sandstein (Kopfdruck) und im Kalkarenit (RR2) sowie der Rücklauftemperatur und des Volumenstroms (Fließrate) während des intermittierenden Rücklauftests.

Die Druckaufzeichnungen des Tests zeigen, dass während der ersten Rücklaufphasen der Riss noch relativ weich reagiert und dass ein hoher Anteil des gefördert Wasser aus dem als Speicher wirkenden Riss stammt (Abb. 21). Danach reagiert der Riss rigide, der Großteil des gefördert Wasser stammt nun aus der Matrix. Der Riss wirkt jetzt nur noch als hydraulischer Leiter, der das aus der Matrix stammende Wasser zur Bohrung transportiert. Das Druckverhalten während der Einschussphasen ist nun proportional zur Wurzel aus der Zeit. Dieses Verhalten ist typisch für ein formationslineares Fließregime: Die Druckreaktion wird von einem senkrecht zur Rissfläche in die Formation gerichteten Fluidstrom dominiert. Das Auftreten dieses Fließregimes bedeutet, dass der Druckabfall über den Riss vernachlässigbar ist im Vergleich zum Druckabfall über die Formation und dass der Riss eine sehr gute hydraulische Leitfähigkeit aufweist. Diese übersteigt deutlich die Riss-Leitfähigkeit, die in der KW-Industrie durch den Einsatz von Stützmitteln erreicht werden.

Der Mechanismus, der das Offenbleiben des Risses auch bei geringeren Drücken bewirkt, ist zurzeit noch nicht bekannt. Im Nachfolgeprojekt befasst sich bereits im Rahmen eines Auftrages eine Arbeitsgruppe des Instituts für Geologie, Mineralogie und Geophysik der Ruhr-Universität Bochum mit dieser Frage. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Wechsellagerung von sandigen und tonigen Abschnitten hier eine wesentliche Rolle spielt. Ein mögliches Modell ist in Abb. 22 dargestellt. Dieses Modell geht davon aus, dass der Riss innerhalb der Sandsteinlagen eine größere Öffnungsweite besitzt als in den Tonsteinlagen, da hier die Horizontalspannung höher ist. Beim Rückgang des Flüssigkeitsdrucks schließt sich der Riss zunächst in den Tonsteinlagen und erst später in den Sandsteinlagen. Kommt es in den Tonsteinlagen zu irreversiblen Vorgängen z.B. durch Quellen oder Desintegration des Tonsteins, so wird sich der Riss in den Sandsteinlagen nicht mehr vollständig schließen können. Der Riss behält eine Restdurchlässigkeit, die im Fall des Detfurth-Risses für unsere Zwecke ausreicht und deutlich höher ist als die eines mit Stützmitteln offen gehaltenen Risses. Dieser Befund zeigt, dass das Wasserfrac-Verfahren auch in dichten Sedimentgesteinen erfolgreich angewendet werden kann. Dies ist für die geothermische Energiegewinnung aus Sedimentgesteinen von großer Bedeutung.

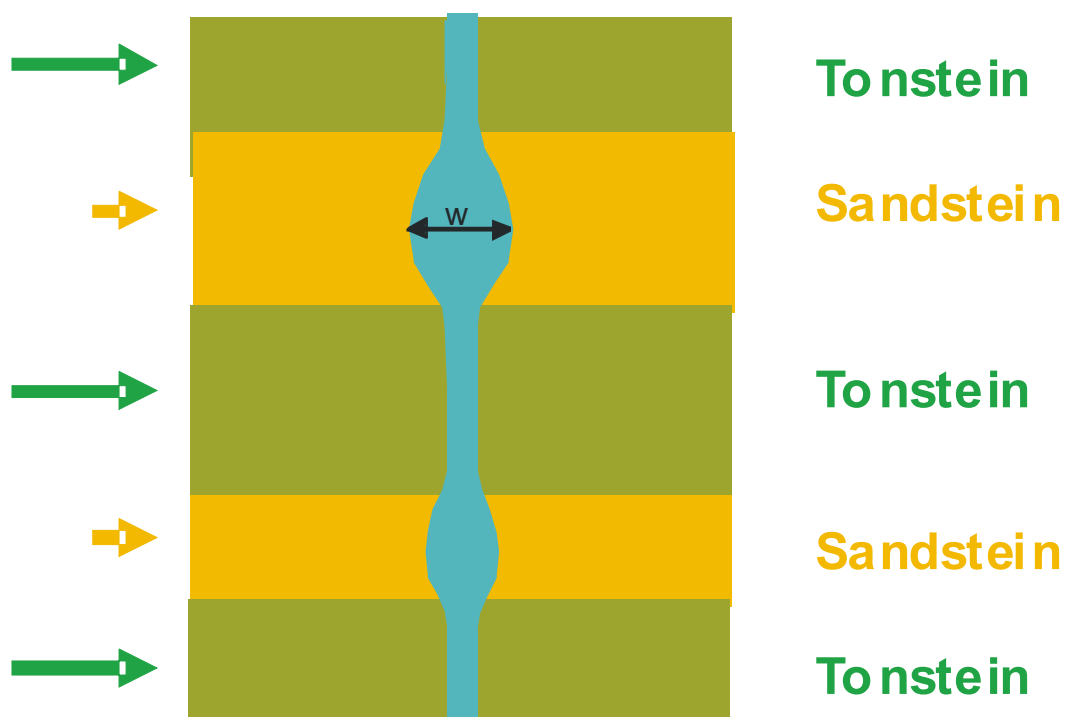


Abb. 22: Schematische Darstellung einer Wechsellagerung aus Sandstein und Tonstein und Veranschaulichung der sich mit der Lithologie ändernden Rissweite w .

Eine weitere interessante Beobachtung war, dass die Temperatur des geförderten Wassers Werte von über 90°C und gegen Versuchsende von über 100°C am Bohrlochkopf erreichte. Dicht oberhalb der Zulaufstelle in 3770 m Teufe lagen die Temperaturwerte bei über 120°C. Dies ist insofern bemerkenswert, als nur wenige Tage zuvor während des zweiten Frac-Tests in diesem Horizont 11.000 m³ Kaltwasser mit 10°C injiziert worden waren.

Kontinuierliche Produktionstests

Nachdem die grundsätzliche Eignung des Reinjektions-Horizontes und des im Detfurth-Sandstein erzeugten hydraulischen Risses festgestellt worden war, wurden mehrere Produktionstests ausgeführt, um die Machbarkeit des Einsondenzweischichtverfahrens zu untersuchen. Die wichtigste noch zu klärende Frage war, ob durch den Riss ausreichend ergiebige Wasserleiter in Form von Sandsteinschichten oder von permeablen Störungen an die Bohrung angeschlossen worden waren, um eine dauerhafte Wasserproduktion aus dem Riss bei gleichzeitiger Reinjektion in den Kalkarenit zu ermöglichen.

Zu Beginn dieser Tests war noch ein hoher Druck im Riss vorhanden, der zum Zeitpunkt der Tests noch als „Restdruck“ der vorhergehenden Wasserfrac-Tests gedeutet wurde. Erst nachdem das gesamte während der Wasserfrac-Tests injizierte Volumen rückgefördert worden war und der Druck immer noch einen statischen Wert von 160 bar (gemessen am Bohrlochkopf während gesättigte Sole in der Bohrung stand) erreichte, wurde klar, dass im Buntsandstein ein außergewöhnlich hoher Formationswasserdruck herrscht. Aufgrund dieses hohen Druckes konnte auf den Einsatz einer Unterwasser-Motorpumpe, wie er in der Testplanung vorgesehen war, verzichtet werden. Dies machte die Versuchsdurchführung technisch sehr einfach, da lediglich die 7“-Verrohrung, an die der Buntsandstein angeschlossen war, mit dem 13 3/8“ - Ringraum, der Verbindung zum Kalkarenit, über eine Hydraulikleitung kurzgeschlossen werden musste. Mit einem Drosselventil in der Verbindungsleitung konnte die Fließrate geregelt bzw. begrenzt werden.

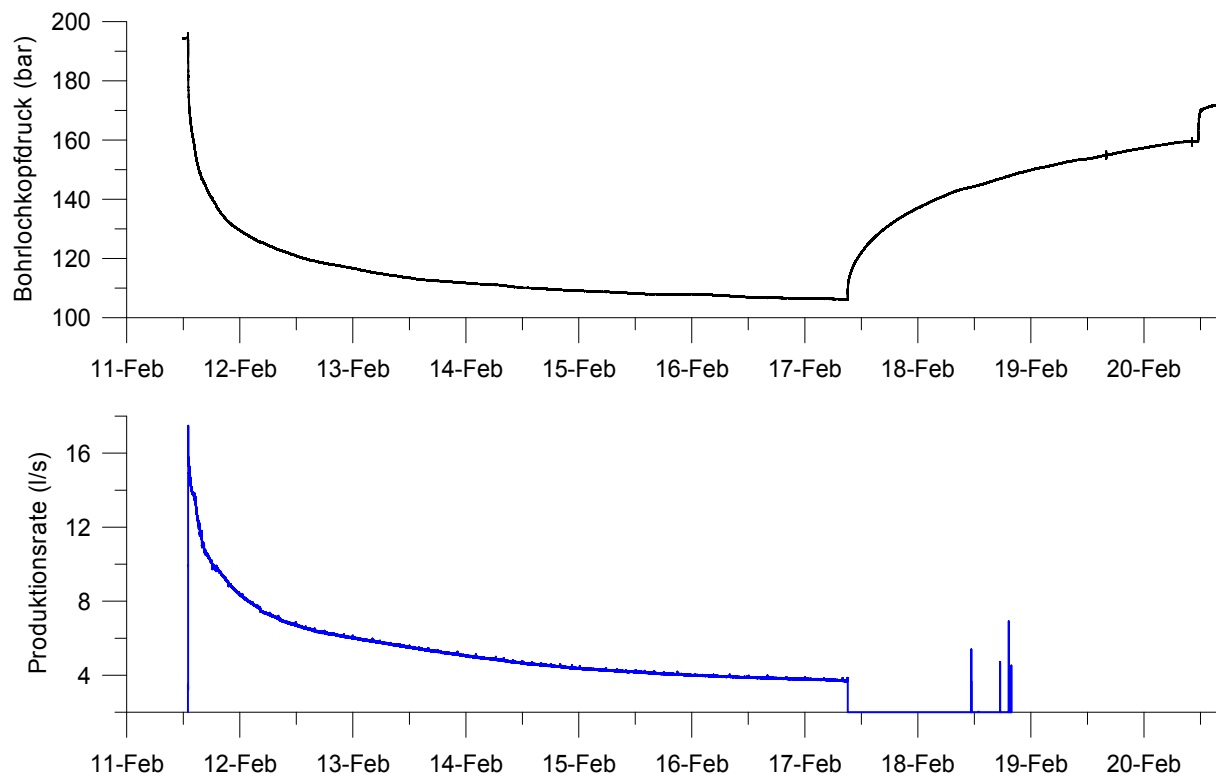


Abb. 23: Verlauf von Bohrlochkopfdruck und Produktionsrate für den Produktionstest 11Feb04 während Produktion und Einschlußphase

Die Registrierungen von Druck- und Fließrate eines solchen Tests sind in Abb. 23 dargestellt. Die Aufzeichnungen dieses Tests zeigen, dass zwar in der Anfangsphase des Tests die angestrebte Fließrate von 25 m³/h entsprechend 7 l/s erreicht bzw. übertroffen wurde, dass aber bereits nach weniger als einem Tag diese Fließrate nicht mehr aufrechterhalten werden konnte. Am Ende des sechstägigen Experiments lag die Fließrate unter 4 l/s bei weiter fallender Tendenz.

Um die Produktivität der Bohrung zu steigern, wurde die 7“-Verrohrung zusätzlich im Bereich des Solling-Sandsteins perforiert. Diese Formation wurde ausgewählt, da aus einer Log-Analyse eine relativ hohe Porosität von 11 % abgeleitet wurde und daher eine Steigerung der Produktivität der Bohrung erwartet werden konnte. Die Perforation, die während des nächstfolgenden Produktionstests ausgeführt wurde, erhöhte die Produktionsfließrate auch tatsächlich. Die Wirkung war jedoch nur kurzfristig. Auf den Langzeittrend wirkte sich die Maßnahme kaum aus. Ganz im Gegenteil war die Langzeit-Fließrate nach der Perforation des Sollings sogar geringfügig niedriger als zuvor. Dieser Effekt kann jedoch dadurch verursacht sein, dass bei dem vorherigen Produktionstest noch ein Überdruck von den Wasserfrac-Tests vorhanden war. Eine Extrapolation der Fließraten zeigte, dass auch mit einer Unterwassermotor-Pumpe die angestrebte Fließrate von 7 l/s nicht dauerhaft zu erreichen gewesen wäre (Abb.24). Die Durchführung eines über mehrere Monate dauernden Tests

unter dem Einsatz einer in der Bohrung installierten Unterwasserpumpe wurde damit als nicht Erfolg versprechend angesehen und verworfen.

Wie in Abb. 24 zu erkennen ist, nimmt die Produktions-Fließrate für große Zeiten mit dem Kehrwert der Wurzel aus der Produktionsdauer ab. Ein solches Zeitverhalten der Fließrate ist typisch für „formationslineares Fließen“, also für den Fall, dass die Strömung aus einer permeablen Formation (Sandsteinschicht) in einen Riss mit unendlicher hydraulischer Leitfähigkeit und erst von dort quasi reibungsfrei in die Bohrung erfolgt. Im Gegensatz dazu würde man bei einem direkten Einströmen der Flüssigkeit aus der permeablen Formation in die Bohrung eine Abnahme der Zuflussrate proportional zum Kehrwert des Logarithmus der Produktionsdauer beobachten. Dies ist ein weiterer Beleg dafür, dass im Detfurth-Sandstein tatsächlich ein Riss mit sehr hoher hydraulischer Leitfähigkeit ($> 10 \text{ Dm}$) geschaffen wurde. Interessant ist, dass sich das Zeitverhalten nach dem Anschluss des Solling-Sandsteins, der mit hoher Wahrscheinlichkeit ein sehr viel besserer Wasserleiter ist als der Detfurth-Sandstein, kaum geändert hat. Dies zeigt, dass der indirekte über den Riss erfolgende Zustrom zur Bohrung sehr viel größer ist als der direkte Zustrom von der Formation in die Bohrung, selbst wenn neben dem Riss noch eine relativ gut leitende Schicht an die Bohrung angeschlossen ist.

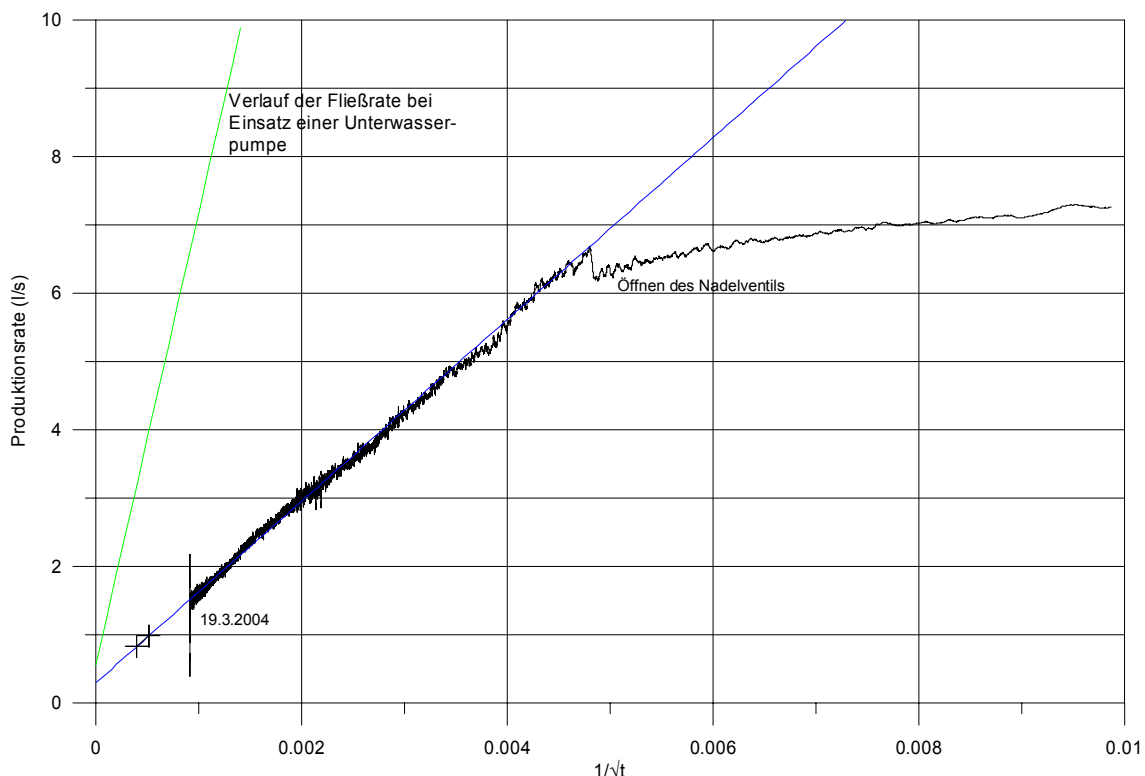


Abb. 24: Registrierung der Produktions-Fließrate während des Auslauftests 20Feb04. Die Produktionsrate ist über das Inverse aus der Wurzel der Zeit aufgetragen, d.h. die Zeiten werden von rechts nach links größer. Zudem wird die Zeitachse im Vergleich zum linearen Fall zu größeren Zeiten immer stärker gestaucht. Die „0“ entspricht in dieser Darstellung der Zeit unendlich. Es ist zu erkennen, dass die Abnahme der Produktionsraten weiter extrapolierbar ist (im linken Bereich der Darstellung).

Resümee

Aus den Beobachtungen während der Produktionstests kann geschlossen werden, dass der im Detfurth-Sandstein erzeugte Riss die Bohrung sehr wirkungsvoll an den Detfurth-Sandstein und wahrscheinlich noch an weitere Sandsteinlagen des Mittleren Buntsandsteins anschließt. Die Ergiebigkeit dieser Schichten reicht jedoch für die angestrebte Dauer-Fließrate von 7 l/s (25 m³/h) nicht aus. Für einen Anschluss an permeable Störungszonen gibt es keine Hinweise. Auch eine hydraulische Kommunikation mit dem Reinjektionshorizont konnte nicht nachgewiesen werden. Das Einbohrloch-Zweischicht Verfahren im Buntsandstein ist daher an der Lokation Horstberg nicht anwendbar. Dies schließt einen Erfolg des Konzeptes an anderen Standorten jedoch nicht aus.

2.1.11 Zyklisches Verfahren

Konzept

Der Hauptanlass zur Untersuchung dieses Konzeptes waren die hohen Rücklaufftemperaturen, die während des intermittierenden Auslauftests beobachtet wurden. Dies war insofern bemerkenswert, als nur eine Woche zuvor beim letzten Wasserfrac-Test im Detfurth-Sandstein mehr als 10.000 m³ Kaltwasser in den Riss verpresst worden waren. Die einwöchige Wartezeit zwischen dieser massiven Kaltwasserinjektion und Rückförderung hatte offensichtlich ausgereicht, den durch die Kaltwasserinjektion ausgekühlten Gebirgsbereich wieder soweit zu erwärmen, dass die Temperatur des rückgeführten Wassers bis zu 100 °C am Bohrlochkopf erreichte. Man konnte deshalb erwarten, dass bei kleinerem Injektionsvolumen die Erwärmung noch schneller erfolgen würde, so dass bereits nach kürzerer Wartezeit mit hohen Rücklaufftemperaturen gerechnet werden konnte.

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.

Tests

Zur Erprobung des Konzeptes wurden im Januar und Februar 2004 Experimente im Tages- und Wochenzyklus ausgeführt. Die Testdurchführung orientierte sich hinsichtlich der Wasservolumina und Dauer der drei Phasen Injektion (Beladung des Riss-

ses), Einschluss (Aufwärmphase) und Rücklauf (Entladung des Risses) an den praktischen Erfordernissen für den Heizbetrieb des GEOZENTRUMs. So wurden beim Tageszyklus in der ersten Nachthälfte rund 400 m³ injiziert, in der zweiten Nachthälfte eingeschlossen und während des Tages produziert. Beim Wochenzyklus wurde angenommen, dass der Wärmebedarf am Wochenende eingeschränkt ist. Das Wochenende wird deshalb für die Kaltwasserinjektion und die Aufwärmphase genutzt, während an den Wochentagen produziert wird.

Aus logistischen Gründen (fehlende Speicher- und Kühlmöglichkeiten für das geförderte Heißwasser, eingeschränkter Temperaturbereich der Hochdruckpumpen) wurde bei den Tests in der Bohrung Horstberg während aller Zyklen kaltes Frischwasser injiziert und das rücklaufende Heißwasser ungekühlt in den Kalkarenit geleitet. Dieses Vorgehen ist hinsichtlich des thermischen Systemverhaltens konservativ, da die Injektionstemperatur in der Praxis bei etwa 60 °C liegt und daher das Gebirge entsprechend weniger ausgekühlt würde als im Experiment.

Ergebnisse

Die Registrierungen des Wochen-Zyklus-Tests sind in Abbildung 25 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.

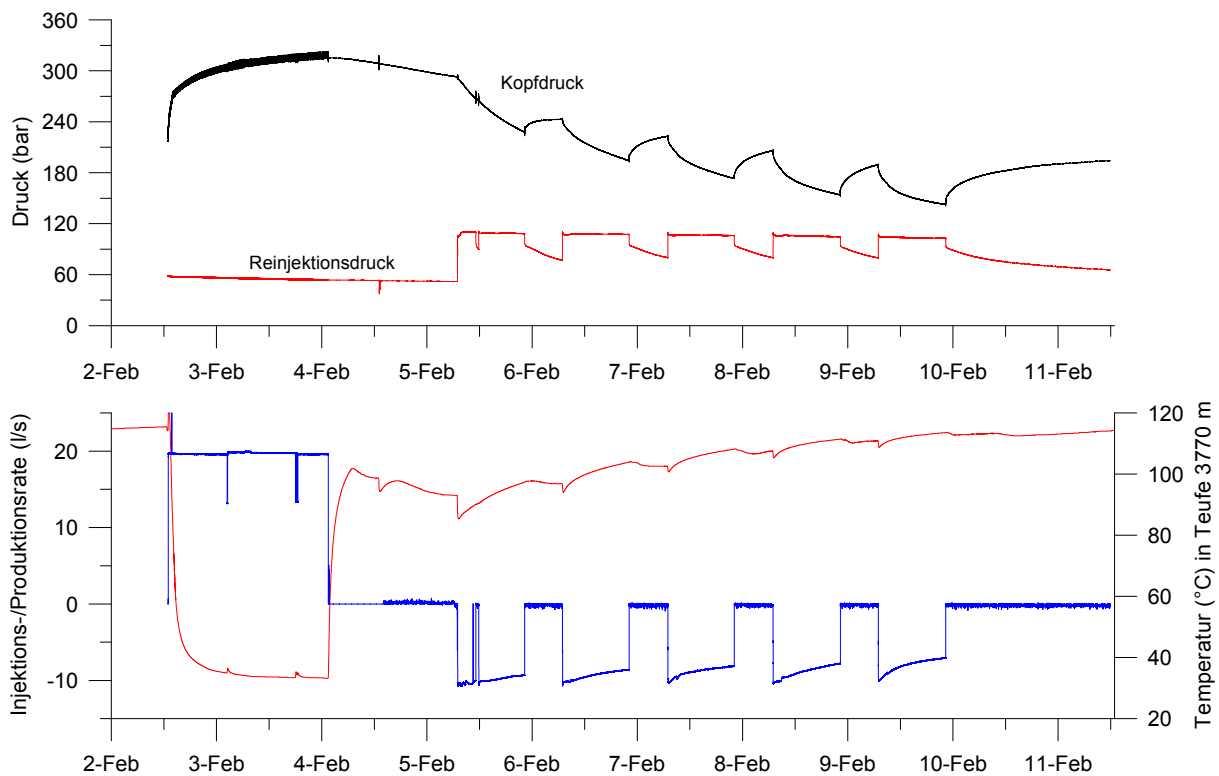


Abb. 25: Registrierungen von Druck, Durchfluss und Temperatur während des Wochenzyklus-Tests in der Bohrung Horstberg Z1. Kopfdruck: Druck im Detfurth-Sandstein, Reinjektionsdruck: Druck im Kalkarenit, Temperatur: Temperatur am Risseinlass im Detfurth-Sandstein.

Der Bohrlochkopfdruck steigt während der Injektionsphase auf ca. 320 bar an. Dieser Wert liegt um etwa 20 bar höher als der Rissöffnungsdruck im Detfurth-Sandstein. Man muss deshalb davon ausgehen, dass der Riss zumindest in Teilbereichen wieder aufgeweitet wurde und daher nicht das gesamte injizierte Volumen von der Gesteinsmatrix im Umfeld des Risses aufgenommen, sondern dass ein Teilvolumen im Riss selbst gespeichert wurde. Diese Vermutung wird durch den Druckverlauf in der Einschlussphase bestätigt. Dieser ist typisch für den Fall, dass ein hochspeicherfähiger Riss an die Bohrung angeschlossen ist. Während der ersten Rücklaufphase ist diese gute Speichereigenschaft des Risses an dem fast linearen Druckrückgang noch erkennbar. In der zweiten Rücklaufphase ist diese schon deutlich reduziert. Ab der dritten spielt die Speichereigenschaft des Risses keine Rolle mehr. Er wirkt jetzt nur noch als Wasserleiter, der das Wasser aus der Matrix zur Bohrung transportiert. Insgesamt zeigt das Druckverhalten, dass der größte Teil des injizierten Volumens in der Gesteinsmatrix im Umfeld des Risses und nur ein kleiner Teil im Riss selbst gespeichert wurden. Diese Beobachtung ist für die numerische Modellierung, die im folgenden Abschnitt beschrieben wird, von Bedeutung.

Die Temperatur des rücklaufenden Wassers wurde sowohl direkt oberhalb der Zulaufstelle als auch am Bohrlochkopf gemessen. An der Zulaufstelle stieg sie von etwa

90 °C zu Beginn der ersten Rücklaufphase auf ca. 115 °C am Ende der letzten Rücklaufphase an. Am Bohrlochkopf lagen die entsprechenden Werte um ca. 20 °C niedriger, da die Wärmeverluste in der thermisch nicht isolierten Bohrung relativ hoch waren. Bei Einsatz eines thermisch isolierten Förderstrangs ließe sich der Wärmeverlust in der Bohrung auf wenige Grad Celsius reduzieren, so dass das Wasser etwa mit der Zulaufstemperatur am Bohrlochkopf austreten würde. Des Weiteren ist zu bedenken, dass die Injektionstemperatur bei diesem Test nur 10 °C betrug, während sie in der Praxis bei etwa 60 °C liegen dürfte. Die Eintrittstemperatur in die Formation, die im Experiment nur rund 40 °C betrug (Abb. 25), wird daher in der Praxis deutlich höher liegen. Die dadurch bedingte geringere Abkühlung der Formation führt zu einer weiteren Verbesserung des thermischen System-Verhaltens.

Zur Untersuchung des Tages-Zykluskonzeptes wurden neun Zyklen ausgeführt, deren Registrierungen in Abb. 26 dargestellt sind. Der Injektionsdruck im Detfurth-Sandstein erreichte am Ende der Injektionsphasen ca. 290 bar und blieb damit knapp unter dem Rissöffnungsdruck von ca. 300 bar. Diese Beobachtung ist bemerkenswert, da sie zeigt, dass der Riss bei der Injektion nicht aufgeweitet wurde. Die hydraulische Leitfähigkeit des Risses, seine Größe und die Permeabilität des Detfurth-Sandsteins reichten offensichtlich aus, das mit einer Fließrate von jeweils 20 l/s injizierte Wasservolumen von 400 m³ ohne Aufweitung des Risses aufzunehmen. Die Produktionstemperatur am Bohrlochkopf erreichte am Ende jeder Produktionsphase Werte von über 80 °C mit einer von Zyklus zu Zyklus leicht fallenden Tendenz. An der Zulaufstelle im Detfurth-Sandstein stieg die Temperatur während der Produktionsphasen auf über 100 °C an. Obwohl die Ergebnisse des Tageszyklus-Tests in thermischer Hinsicht etwas schlechter ausfallen als die des Wochenzyklus, ist auch diese Variante für praktische Anwendungen interessant.

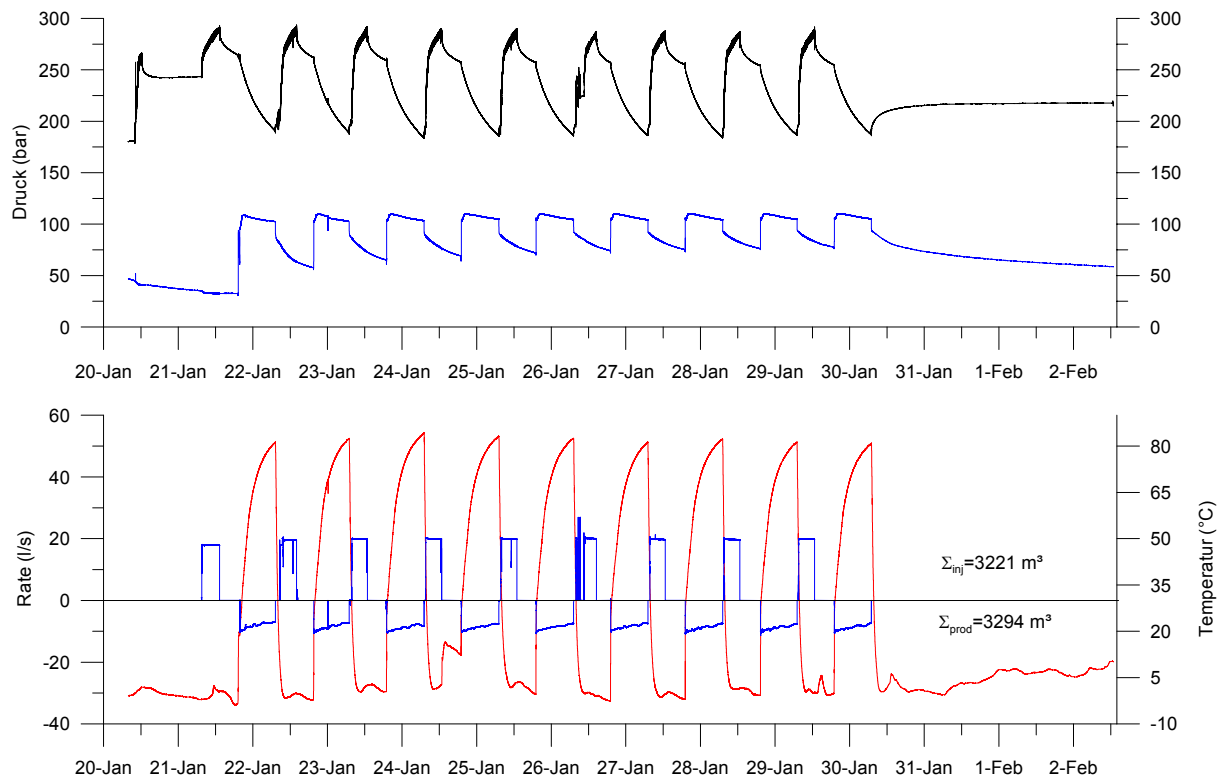


Abb. 26: Registrierungen von Druck, Durchfluss und Temperatur während des Tageszyklus-Tests. Kopfdruck: Druck im Detfurth-Sandstein, RR2: Druck im Kalkarenit, Temperatur: Temperatur am Bohrlochkopf.

Numerischen Untersuchungen

Zur Untersuchung des thermischen Langzeitverhaltens beim Zyklusbetrieb wurden numerische Untersuchungen durchgeführt. Das für die Berechnungen verwendete Modell nimmt an, dass der im Detfurth-Sandstein erzeugte Vertikalriss nur innerhalb der sechs Meter mächtigen Sandsteinschicht geöffnet ist und dort eine sehr hohe hydraulische Leitfähigkeit ($> 10 \text{ Dm}$) aufweist. 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 einem Finite Elemente-Programm berechnet. Das Modell wurde anhand der gemessenen Druck- und Temperaturdaten kalibriert. Um die Anfangsbedingungen zu ermitteln, wurde die Vorgeschichte, d.h. die wesentlichen Auswirkungen der vorherigen Tests berücksichtigt. Die Rechnungen wurden für Injektionstemperaturen von $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (wie im Experiment) und für $60 \text{ }^\circ\text{C}$ (wie bei der Nutzung) ausgeführt, wobei sowohl Wochenzyklen als auch Tageszyklen angenommen wurden.

Die dreidimensionale Modellierung erforderte einen sehr hohen Rechenaufwand, da die Rissumgebung sehr fein diskretisiert werden musste und die Zeitschritte wegen der ständig wechselnden Anfangsbedingungen von Zyklus zu Zyklus nicht vergrößert werden durften.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Modellrechnungen zeigen, dass das Systemverhalten sehr komplex ist. Während der Injektion erwärmt sich das im Riss strömende Wasser entlang des Risses und tritt daher mit unterschiedlicher Temperatur in die Gesteinsmatrix ein. Die Eindringtiefe des Wassers in die Gesteinsmatrix beträgt wegen der großen Riss-halblänge (1 km) und der relativ kleinen Flüssigkeitsvolumina nur wenige Meter. Noch geringer ist die Eindringtiefe der Kaltfront während der einzelnen Injektionsphasen. In der Einschlussphase wird die ausgekühlte Zone beidseits des Risses durch konduktive Wärmezufuhr aus der Nachbarschaft wieder aufgeheizt, wobei die Temperatur jedoch nicht mehr ihren Ausgangswert erreicht. Das aufgeheizte Wasser fließt während der Rücklaufphasen über den Riss wieder zur Bohrung zurück. Das von den äußeren Rissflügeln stammende Wasser transportiert dabei Wärme in die bohrlochnahen stärker ausgekühlten Bereiche und heizt diese während jedes Zyklus wieder auf. Die Rechnungen zeigen, dass der künstlich erzeugte Riss von großer Bedeutung ist, da durch ihn das thermisch genutzte Volumen gegenüber dem einer Bohrung ohne Riss deutlich vergrößert wird. Einen erheblichen Beitrag zum Wärmeeintrag liefern auch die die permeable Sandsteinschicht umgebenden dichten Tonsteine.

Die bei den Produktionszyklen maximal erreichten Temperaturen nehmen erwartungsgemäß von Zyklus zu Zyklus ab. Diese Abnahme erfolgt linear zum Logarithmus der Zeit, so dass sich der Temperaturverlauf bereits nach kurzer Zeit gut extrapolieren lässt. Aufgrund der Berechnungen kann eine Prognose des thermischen Verhaltens und damit der erzielbaren thermischen Leistung über eine Dauer von 25 Jahren gestellt werden (Abb. 27).

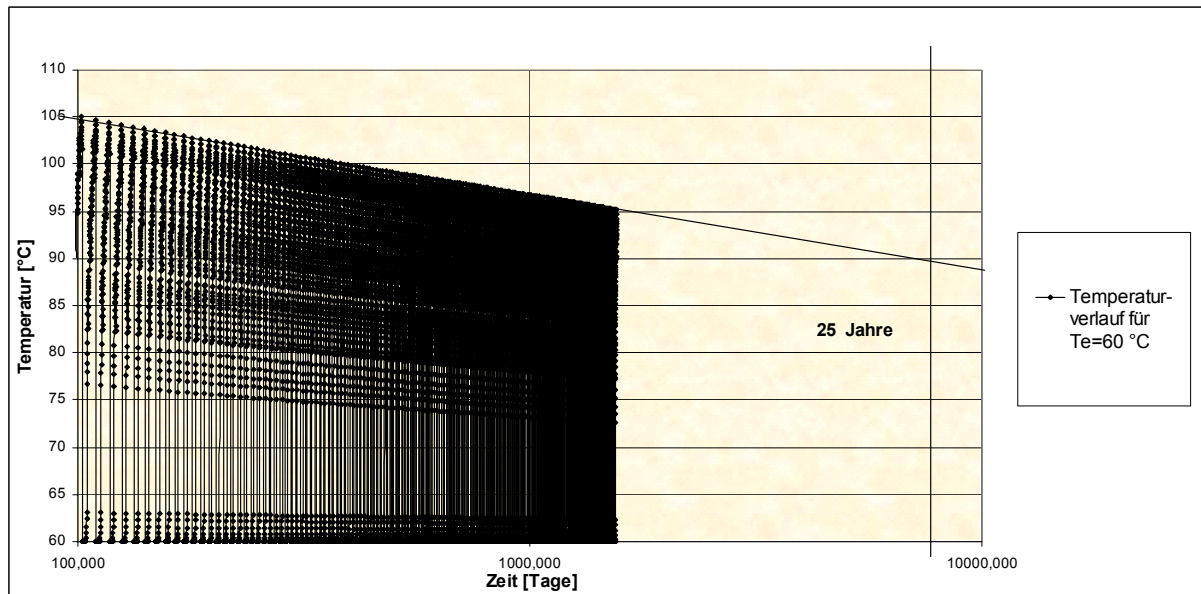


Abb. 27: Berechneter Temperaturverlauf am Risseinlauf für den Wochenzyklus-Betrieb für die ersten 4 Jahre und Extrapolation der Temperatur auf 25 Jahre (T_e : Injektionstemperatur).

Resümee

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. Optimierungsmöglichkeiten liegen in der Verwendung thermisch isolierter Förderrohre, einer jahreszeitlich angepassten Betriebsweise, in einer räumlichen Trennung von Risseinlass und -auslass und in der Erzeugung weiterer künstlicher Risse, um das thermisch nutzbare Volumen zu erhöhen.

Das Verfahren eignet sich auch und vor allem für hydraulisch dichte Gesteine. Das Einbeziehen gering permeabler Sandsteinschichten, wie in der Bohrung Horstberg, ist nicht nötig und thermisch sogar nachteilig. Das Zyklus-Konzept hat den Vorteil, dass es prinzipiell ohne Unterwasser-Motorpumpe, einem der stör anfälligsten Elemente in geothermischen Systemen auskommt. Seine Nachteile sind der diskontinuierliche Betrieb, der eine Zusatzheizung oder einen thermischen Zwischenspeicher erforderlich macht, der Bedarf für einen großen Wasserspeicher und die relativ hohen Pumpleistungen für die Reinjektion.

2.1.12 Tiefenzirkulationsverfahren

Konzept

Die Möglichkeit zur Erprobung dieses Konzeptes eröffnete sich durch die Beobachtung, dass der im Detfurth-Sandstein erzeugte Riss sich bis in den ca. 120 m höher gelegenen Solling-Sandstein ausgebreitet hatte. Ein Schema dieses Konzeptes ist in Abb. 27 dargestellt. Es sieht eine Zirkulation von Wasser zwischen diesen Sandsteinbänken über diesen Riss vor. Wasser wird im Bereich des Detfurth-Sandsteins injiziert, heizt sich bei Durchströmen des Risses auf und wird aus dem Solling-Sandstein an die Oberfläche gefördert (Abb. 28). Nach dem Wärmeentzug mittels Wärmetauscher wird es wieder in den Detfurth-Sandstein injiziert.

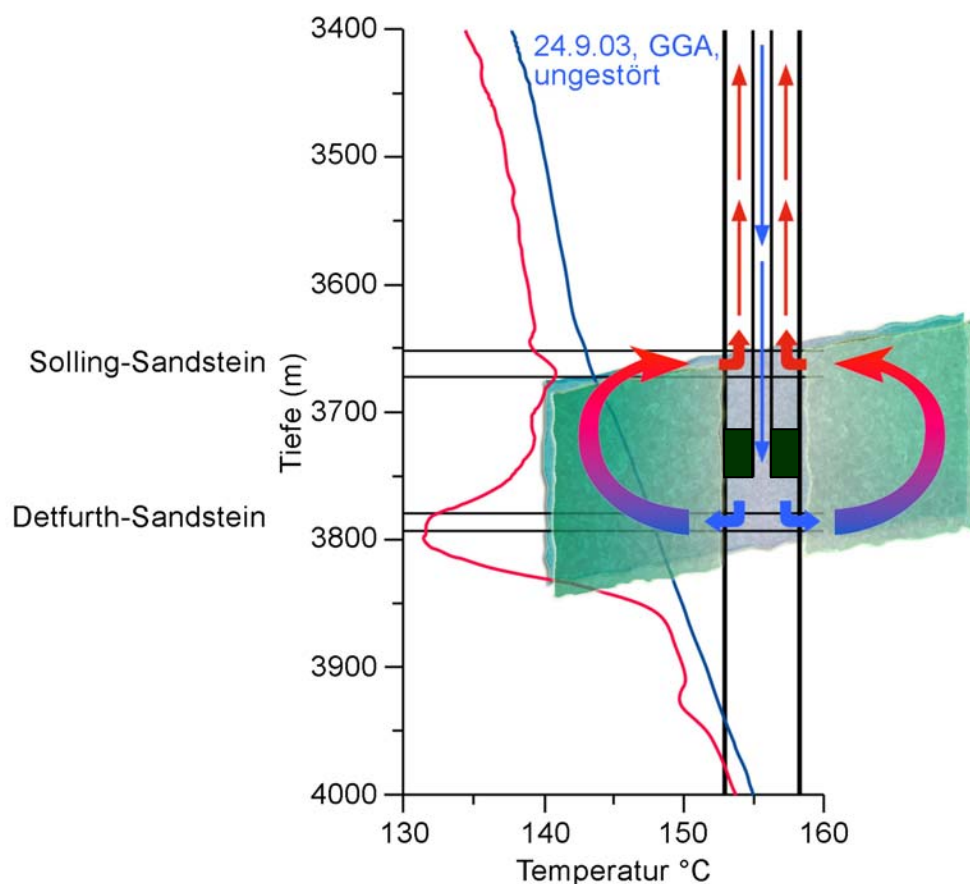


Abb. 28: Schematische Darstellung des Experimentes zur Tiefenzirkulation

Tests und experimentelle Ergebnisse

Für das Experiment musste ein Förderrohr in der Bohrung installiert und zwischen dem Solling- und dem Detfurth-Sandstein ein Packer gesetzt werden. Diese aufwändige aber technisch unproblematische Maßnahme wurde durch den hohen artesischen Druck in der Bohrung Horstberg erheblich erschwert. Der hohe artesische

Druck machte ein vorheriges „Totpumpen“ der Bohrung mittels einer feststoffhaltigen Schwerspülung erforderlich. Beim Niederbringen des Packers zeigte sich, dass sich im Bereich der Perforationsstrecken durch das Totpumpen Feststoffbrücken gebildet hatten, die mit dem Packer nicht passierbar waren. Der Packer musste daher wieder gezogen und die Feststoffbrücken in einer Meißeleinfahrt frei gebohrt werden. Erst nach dieser Maßnahme gelang es, den Packer in der projektierten Tiefe zu setzen. Im Ergebnis war die Bohrung mit einem 3½“ Steigrohr und einem Packer, der die Perforationsstrecken in Detfurth-Sandstein und Solling-Sandstein hydraulisch voneinander trennt, ausgestattet (Abb. 29).



Abb. 29: Einbau des Packers für den Tiefenzirkulations-Test

Zu Versuchsbeginn wurde über einen Zeitraum von ca. vier Tagen bei geschlossenem Auslauf Wasser in den Detfurth-Sandstein injiziert. Dabei wurde ein signifikanter Druckanstieg im Solling-Sandstein beobachtet (Abb. 30), ein Indiz dafür, dass die beiden Sandsteinhorizonte miteinander kommunizieren.

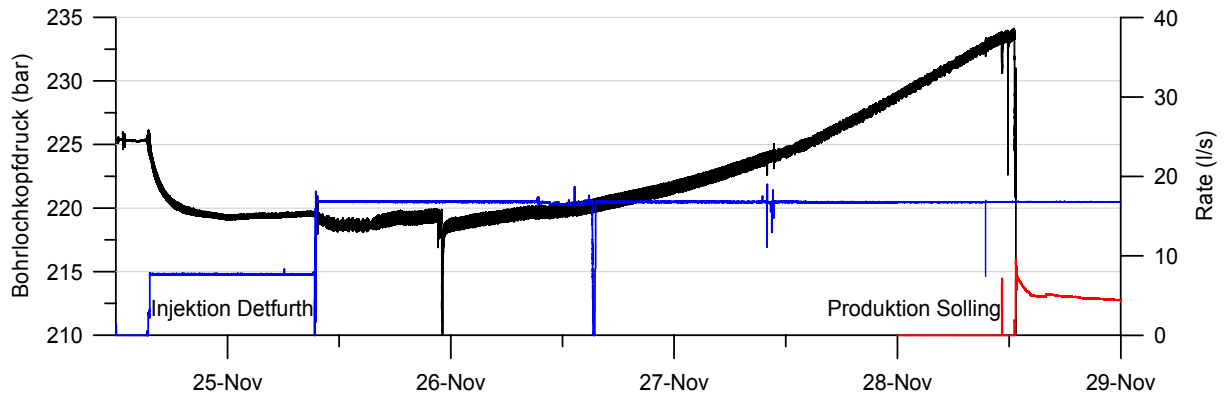


Abb. 30: Registrierungen der Injektions-Fließrate und des Bohrlochkopfdrucks im Solling-Sandstein während es Druck-Kommunikations-Tests

Während des anschließenden ersten Tiefen-Zirkulationstests wurde bei anhaltender Frischwasserinjektion aus dem Solling-Sandstein produziert, wobei die produzierte Sole wie bei früheren Tests in den Kalkarenit geleitet wurde. Nach etwa 24 Stunden stabilisierte sich die Produktions-Fließrate bei etwa 4 l/s (Abb. 31). Dieser Wert lag deutlich unter der Injektions-Fließrate von 16 l/s und war etwa nur halb so groß wie die angestrebte Produktions-Fließrate. Der Test wurde deshalb unterbrochen, um die Zuflussbedingungen im Solling-Sandstein zu verbessern.

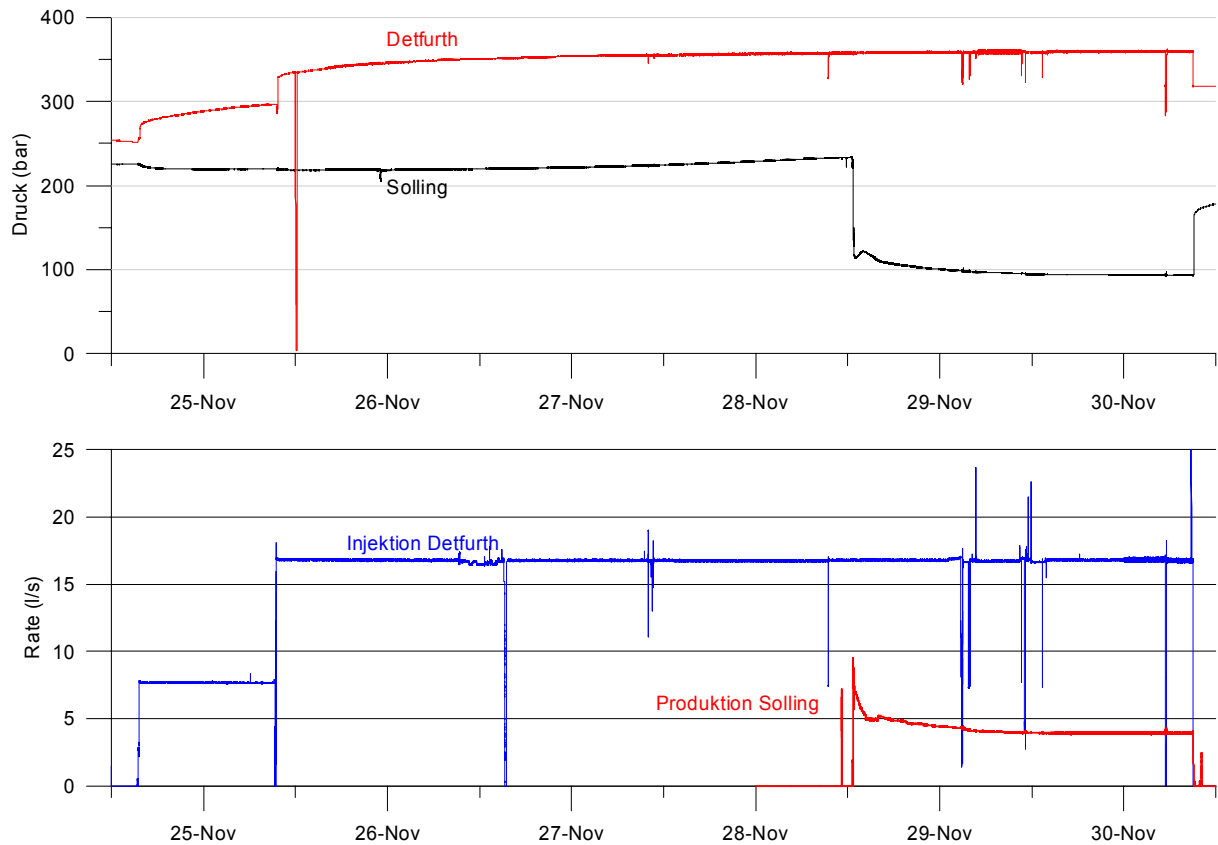


Abb. 31: Registrierungen der Fließraten und der Bohrlochkopfdrücker während des Druck-Kommunikationstests und des ersten Tiefen-Zirkulationstests (Produktion Solling)

Dazu wurde der Solling-Sandstein durch eine 24-stündige Wasser-Injektion stimuliert. Nach der Stimulation wurde eine deutlich erhöhte aber immer noch nicht ausreichende Produktionsfließrate von 5 l/s beobachtet (Abb. 32). Der Zirkulationstest konnte nicht bis zum Erreichen vollkommen stationärer Bedingungen fortgesetzt werden, da das Systemverhalten wegen des großen Speichermögens des Risses sehr träge war. Diese träge Reaktion zeigte sich auch darin, dass die Produktion nach Ausschalten der Injektionspumpen noch über mehrere Tage mit kaum verminderter Fließrate anhielt.

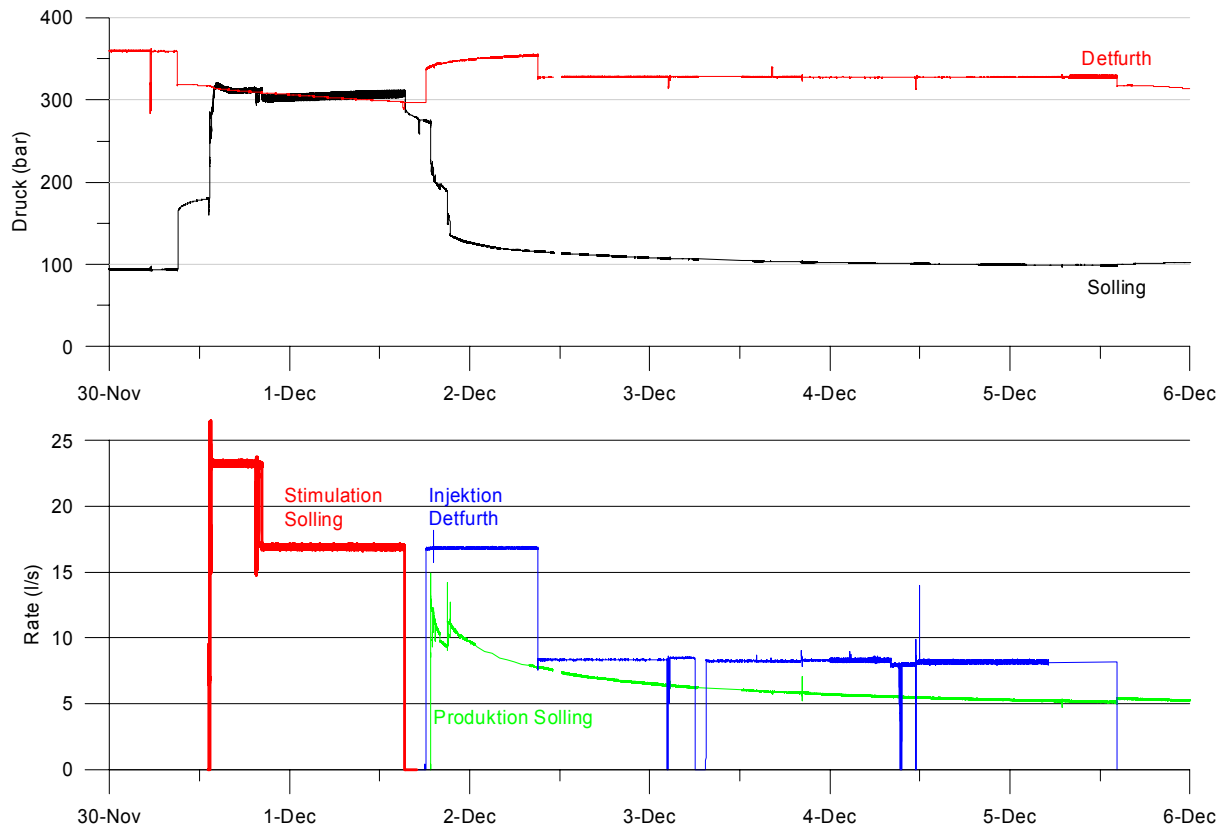


Abb. 32: Registrierungen der Fließraten und der Bohrlochkopfdrucke während des Stimulationstests und des zweiten Tiefen-Zirkulationstests (Produktion Solling)

Tracer-Untersuchungen

Zur Charakterisierung der hydraulischen Verbindung zwischen Detfurth- und Solling-Sandstein wurden im Rahmen eines Auftrages an die Arbeitsgruppe von Prof. Sauter (Universität Göttingen) während des Zirkulationstests verschiedene Markierungsstoffe („Tracer“) beigemischt (Uranin, Naphtalendisulphat, Tritium).

Der Tracerdurchbruch erfolgte nach Auslauf von ca. 500 m³ (Abb. 33). Die maximale Tracerkonzentration wurde nach 950 m³ Auslaufvolumen beobachtet. Auffällig war der langanhaltende Rückgang der Tracerkonzentration (tailing). Nach Auslauf von ca. 3600 m³ Flüssigkeit wurden für die beiden organischen Tracer Rückgewinnungswerte um 6 % bzw. 9 % erreicht. Die aus den Durchgangskurven ermittelte mittlere Verweilzeit im Zirkulationssystem lag bei etwa 130 Stunden.

Die verhältnismäßig niedrige Tracerrückgewinnung bestätigt, dass ein großes Reservoir an die Bohrung angeschlossen ist. Das vom Tracer erreichte Hohlraumvolumen lässt sich auf ca. 35.000 m³ extrapolieren, wovon ca. 700 m³ auf Klüfte bzw. den ge-

schaffenen Riss zuzuordnen sind. Ca. 95% dieses Hohlräumvolumens liegen außerhalb der unmittelbaren Fließstrecke zwischen den beiden Perforationen.

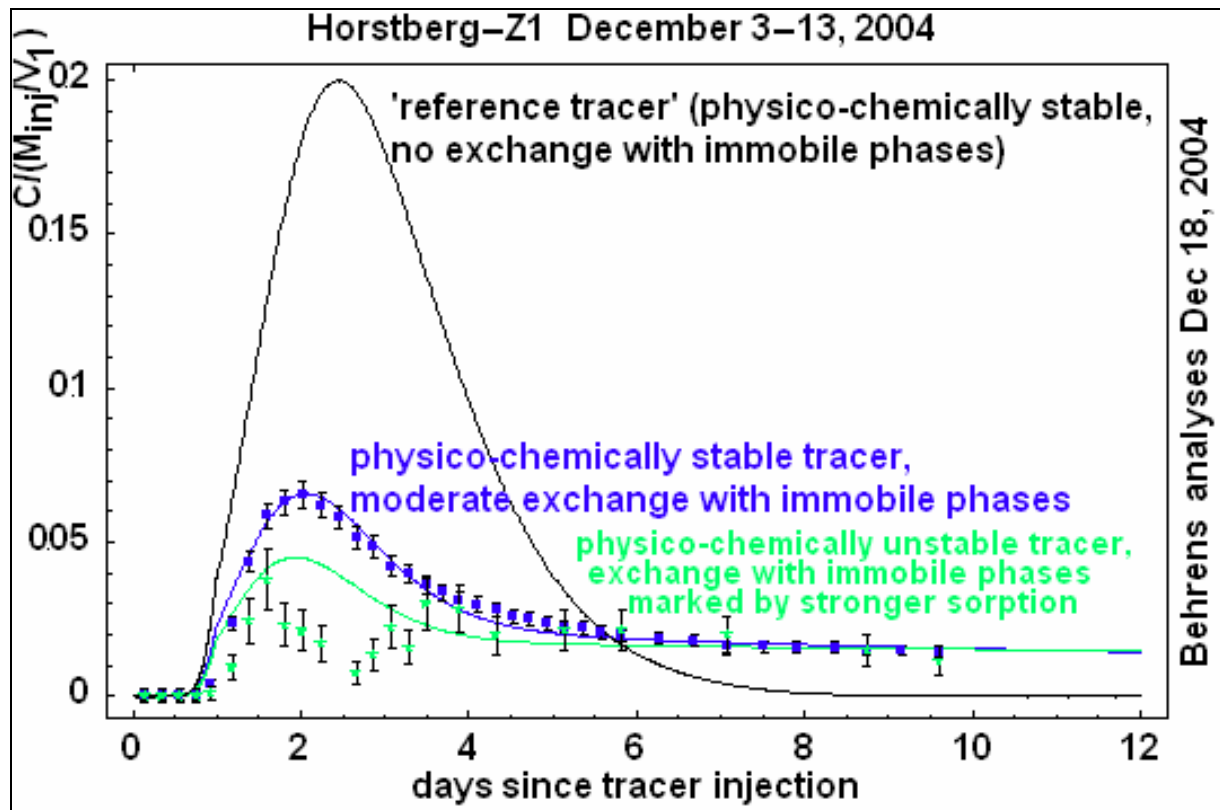


Abb. 33: Durchgangskurven der organischen Tracer (Uranin, Naphtalendisulphat).

Numerische Untersuchungen

Der geringe Abstand zwischen Injektions- und Produktionshorizont von rund 120 m wirft die Frage, ob die thermische Nutzungsdauer des Systems für eine praktische Anwendung des Tiefenzirkulations-Verfahrens ausreicht. Diese Frage ließ sich in der kurzen zur Verfügung stehenden Zeit experimentell nicht untersuchen. Zudem war wegen des Ausbaus der Bohrung mit Packer und Förderrohrtour die Messung der Zulauftemperatur im Abschnitt des Solling-Sandsteins, die für solche Untersuchungen unerlässlich ist, nicht möglich. Um dennoch das thermische Langzeitverhalten des Systems beurteilen zu können, wurden umfangreiche numerische Modellrechnungen durchgeführt.

Aufbau und numerische Diskretisierung des Wärmetauschers im Modell sind in Abb. 34 dargestellt. Wesentliches Element ist der im Detfurth-Sandstein erzeugte hydraulische Riss, der im Modell eine Halblänge zwischen 500 m und 1000 m hat. Der Riss stellt die einzige hydraulische Verbindung zwischen dem Detfurth- und dem Solling-

Sandstein dar. Er hat im Bereich der dazwischen liegenden Tonsteine eine geringe, in den beiden Sandsteinschichten dagegen eine hohe hydraulische Leitfähigkeit, wie dies für den Dethfurth-Sandstein nachgewiesen wurde. Für die instationären, dreidimensionalen Berechnungen nach dem Finite Elemente Verfahren wurde das Programm RockFlow eingesetzt.

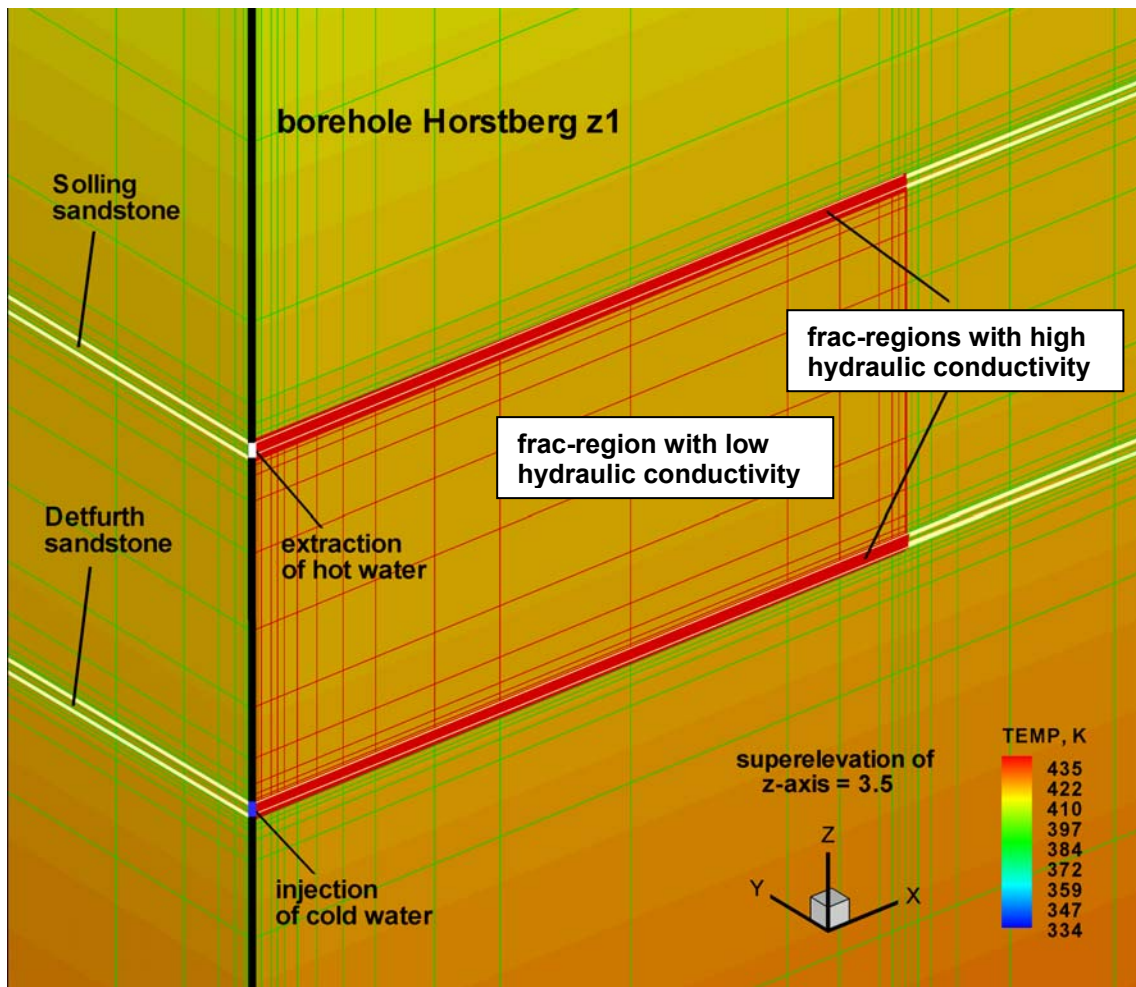


Abb. 34: Konzeptionelles Modell zur Tiefenzirkulation und zugehöriges Finite Elemente Gitter mit künstlichem Riss.

Entsprechend der wesentlich geringeren Rissöffnungsweiten im Tonstein wird diesem Teil des Risses eine um ca. 4 Größenordnungen geringere Transmissibilität zugeordnet als in den Sandstein-Horizonten. Dies hat eine annähernd gleichmäßige Durchströmung des Risses über die gesamte Risslänge zur Folge, da sich die injizierte Flüssigkeit zunächst in dem hochleitfähigen Rissstreifen des Dethfurth-Sandsteins ausbreitet, bevor sie in vertikaler Richtung auf den Solling-Sandstein zufließt.

Gesteinsmatrix und permeable Zone werden im FE-Modellkörper durch 3D-Hexaederelemente realisiert, während der künstliche Riss durch 2D-Elemente dargestellt wird. Die Modellabmessungen wurden so gewählt, dass die Modellränder das Ergebnis der Simulation nicht beeinflusst.

Die Modellrechnungen zeigen, dass sich die Kältefront zunächst entlang des hydraulisch hochleitfähigen Rissstreifens im Detfurth-Sandstein ausbreitet und dann vertikal über die schlechter leitende Riss-Region in den Tonsteinen in Richtung Solling-Sandstein fortschreitet (Abb. 35). Der künstliche Riss führt dazu, dass nicht nur die permeablen Sandsteinschichten sondern in noch größerem Maße die praktisch impermeablen Tonsteinlagen zwischen den Sandsteinschichten über eine große Fläche thermisch genutzt werden. Die durch die Sandsteinschichten eingeschossenen Tonsteinschichten liefern den größten Beitrag zum Wärmeeintrag.

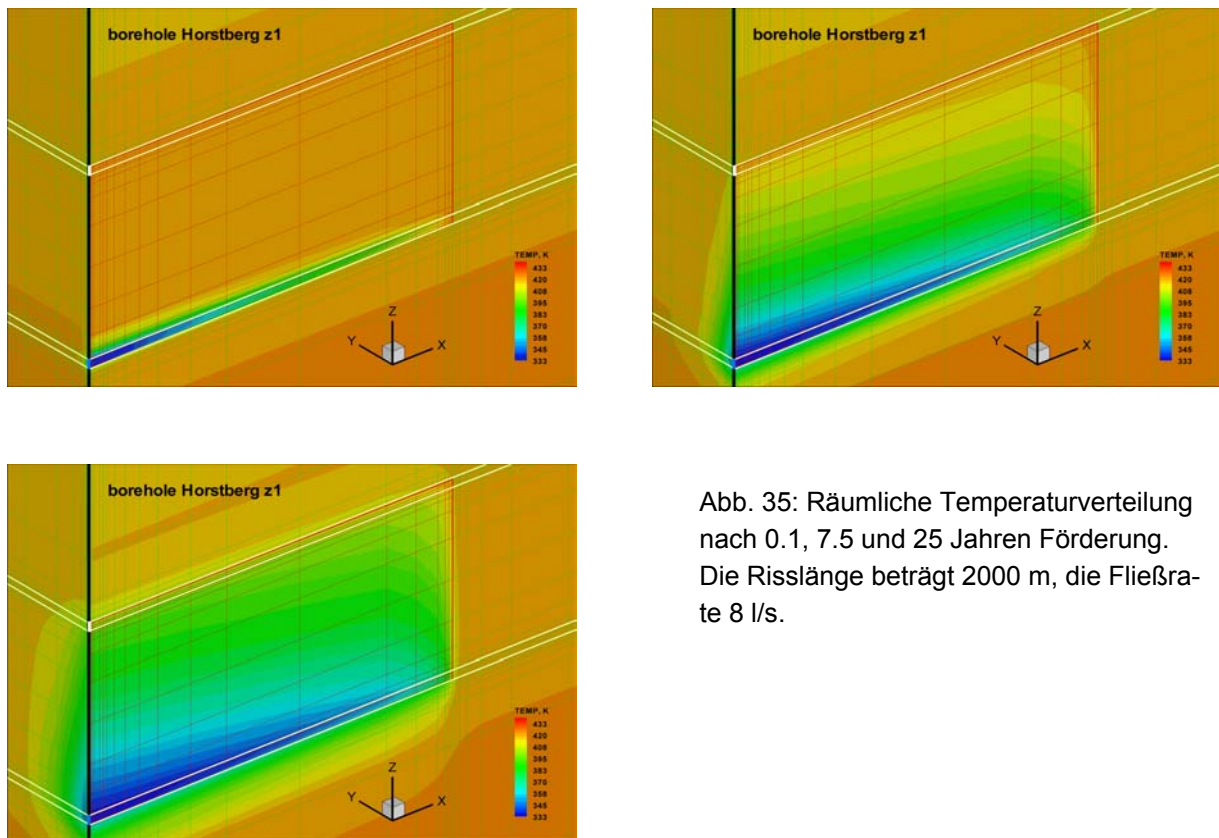


Abb. 35: Räumliche Temperaturverteilung nach 0,1, 7,5 und 25 Jahren Förderung. Die Risslänge beträgt 2000 m, die Fließrate 8 l/s.

Um den Einfluss der Fließraten auf das thermische Langzeitverhalten zu untersuchen, wurden Rechnungen für unterschiedliche Fließraten 4 l/s, 8 l/s, 12 l/s, 16 l/s und 20 l/s ausgeführt (Abb. 36). Erwartungsgemäß nimmt die Temperatur bei höheren Fließraten schneller ab als bei niedrigen Fließraten. Bei einer Fließrate von 4 l/s bleibt sie in der angestrebten Nutzungsdauer von 25 Jahren nahezu konstant und auch bei der für den Standort Hannover projektierten Fließrate von 8 l/s sinkt sie innerhalb dieses Zeitraums nur um etwa 15 °C. Ab Fließraten von mehr als 12 l/s

kommt es schon in den ersten Jahren der Produktion zu deutlichen Rückgängen in der Produktionstemperatur.

Die Modellrechnungen zeigen, dass mit dem Tiefenzirkulationsverfahren geothermische Energie über relevante Zeiträume im gewünschten Leistungsbereich entzogen werden kann. Damit stellt das Tiefenzirkulations-Verfahren eine realistische Option zur Wärmeabgewinnung aus gering-permeablen Sedimenten dar.

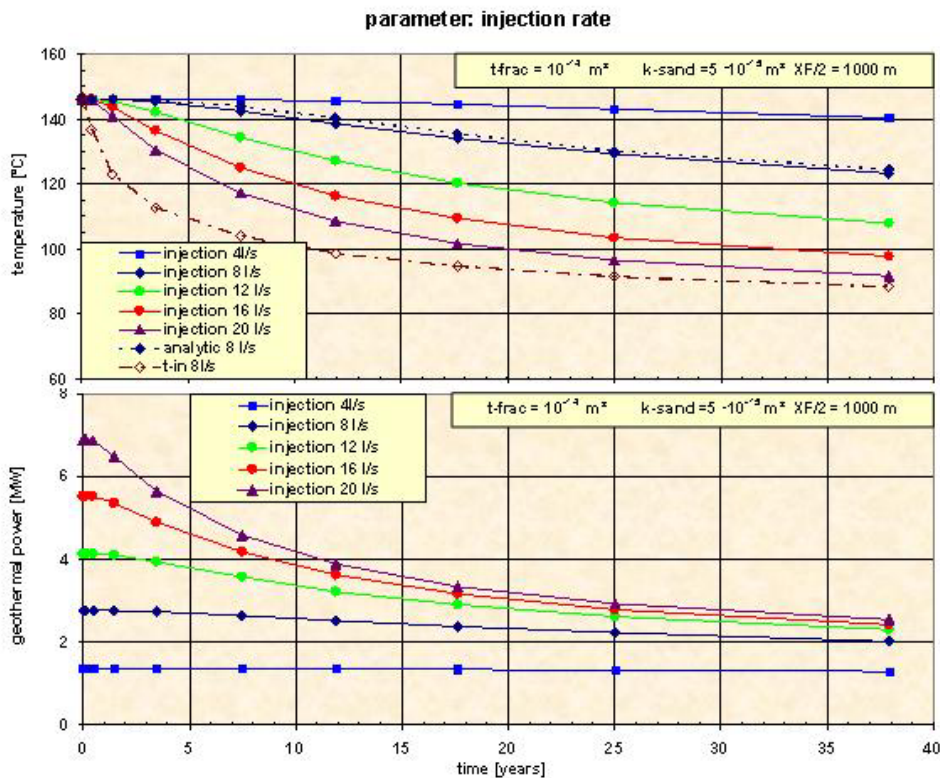


Abb. 36: Zeitliche Entwicklung von Produktionstemperatur und thermischer Leistung für unterschiedliche Fließraten.

Resümee

Obwohl bei dem Tiefen-Zirkulationsexperiment die von uns angestrebte Produktions-Fließrate von 7 l/s nicht ganz erreicht wurde, kann das Experiment insgesamt als Erfolg bewertet werden, da die Machbarkeit des Tiefen-Zirkulationskonzepts prinzipiell nachgewiesen wurde. Das Experiment lieferte zudem einen weiteren Nachweis, dass durch massive Wasserfrac-Tests auch in geschichteten Sedimentgesteinen Rissflächen mit einer großen Vertikalerstreckung erzeugt und für den Wärmeentzug genutzt werden können.

Gegenüber dem zyklischen Verfahren hat das Tiefenzirkulations-Verfahren den Vorteil, dass ein kontinuierlicher Betrieb möglich ist. Wie dieses kommt es unter bestimmten Voraussetzungen ohne Unterwassermotorpumpe aus. Nachteilig ist die

relativ hohe Pumpleistung, die jedoch unter Umständen, etwa durch Anheben des Drucks auf der Produktionsseite verringert werden kann.

2.2 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 Wärmeengewinnung aus gering-permeablen Sedimentgesteinen erprobt werden. Für zwei dieser Verfahren, das Zyklus- und das Tiefenzirkulationsverfahren, gelang der Nachweis, dass mit ihnen eine Wärmeengewinnung 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 2006, 2007, 2008 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.

2.3 Ergebnisse anderer Stellen

Die geothermische Nutzung gering permeabler Festgesteine ist auch Gegenstand des europäischen Hot-Dry-Rock-Projekts Soultz und des Geothermieprojekts Groß Schönebeck des GFZ-Potsdam. Da das GEOZENTRUM an beiden 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 beteiligt sich das GGA-Institut 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 Großschönebeck.

Auch in den Geothermieprojekten Landau 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.

Bisher sind keine Ergebnisse bekannt geworden, die die von uns vorgeschlagenen Konzepte oder erzielten Ergebnisse widerlegen und die zukünftigen Untersuchungen in der Bohrung Horstberg Z1 überflüssig machen.

2.4 Veröffentlichungen, Berichte, Vorträge

Veröffentlichungen

JUNG, R., (2001): „GeneSys“ ein Erdwärme-Demonstrationsprojekt des Geozentrums Hannover (BGR, NLfB, GGA), Geowissenschaftliche Mitteilungen GMIT Heft Nr. 3 (März 2001), S. 25-27.

TISCHNER, T.; Jung, R.; HUENGES, E. (2003). Frac-Technik in Sedimentgesteinen. Tagungsband: Start in eine neue Energiezukunft, 1. Fachkongress Geothermischer Strom, Neustadt-Glewe, 12.-13. Nov. 2003, S. 103-110.

KAUS, A., BINOT, F., WIEDERHOLD, H., Reconstruction of the kinematic evolution of the Fassberg inversion structure inferred from 3D-Seismic Data. - Ext. abstr., Terra Nostra, 7/2003, 114-116.

TISCHNER, T., SULZBACHER, H., JUNG, R., ORZOL, J., JATHO, R. & KEHRER, P., GeneSys: Hydraulische und thermische Charakterisierung des künstlich erzeugten Risses und Implikationen für dessen geothermische Nutzung. - Geothermische Energie 44: 12. Jahrgang, Heft 1/2, Jan-Okt 2004.

JUNG, R., JATHO, R., KEHRER, P. & ORZOL, J., Das Geothermieprojekt GeneSys - Ergebnisse von massiven Wasserfrac-Tests im Buntsandstein des Norddeutschen Beckens. - In: Tagungsbericht 2004 - 2 Vorträge der Frühjahrstagung des DGMK-Fachbereichs 'Aufsuchung und Gewinnung', 29./30.04.2004; Celle; 421-429; Hamburg, 2004.

ORZOL, J., JATHO, R., JUNG, R., KEHRER, P. und TISCHNER, T., The GeneSys Project – Development of concepts for the extraction of heat from tight sedimentary rocks. - Z. für Angew. Geol., 2/2004 (50. Jg.), 17-23.

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

JUNG, R., ORZOL, J., KEHRER, P. & JATHO, R., Startschuss für das Demonstrationsvorhaben GeneSys-Hannover. - Geothermische Energie - Mitteilungsblatt der Geothermischen Vereinigung/GTV, 47, Mai - Juli 2005 3/4.

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

ORZOL, J., JUNG, R., JATHO, R., KEHRER, P. & TISCHNER, T., Aktuelles vom GeneSys-Projekt. - Geothermische Energie, 45, Jan./März 2005, 12. Jahrgang, Heft 1/4.

JUNG, R., ORZOL, J., TISCHNER, T., JATHO, R. & KEHRER, P., The Geothermal Project GeneSys - Results of Massive Waterfrac-Tests in the Bunter Sandstone Formation in the Northern German Basin. - In: Proc. 30th Stanford University Workshop Geoth. Res. Eng., HORNE, R. (Ed.), 31.01.-02.02.2005; Stanford, California, USA.

ORZOL, J., JUNG, R., KEHRER, P., JATHO, R., SULZBACHER, H. & TISCHNER, T., Das GeneSys-Projekt des Geozentrums Hannover - Minderung des Fündigkeitsrisikos durch neue Erschließungskonzepte. - Tagungsband der Geothermischen Jahrestagung: Geothermie und Effizienz, ISBN: 3-932570-53-7, 16.-17.11.2005; Unterschleißheim.

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

ORZOL, J., JATHO, R., JUNG, R., KEHRER, P., Das GeneSys-Projekt: Geothermische Energie aus tiefen, dichten Sedimentgesteinen, eingereicht und akzeptiert zur Veröffentlichung bei: bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, 7-8, Seiten 6-11, 2006

Berichte

Geologische Vorerkundung zur geothermischen Nutzung triassischer Schichtenfolgen am Standort BGR/NLfB/GGA, Hannover, H.-G. Röhling, NLfB, 2000

Lithologische und petrographische Untersuchungen im höheren Unteren und Mittleren Buntsandstein der Bohrung Hämelerwald Z 1, Hannover, H.-G. Röhling, NLfB, 2001

Seismische Vorerkundung im Bereich der geplanten Bohrung GeneSys, Thomas, R., Institut für geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben, Hannover, 2001

GenSys Review 08/2001, Kehler, P., Sieber, D., Evers, F.-W., Grabenhenrich, H., Marx, J., Jung, R., Grote, R., BGR, interner Bericht, Hannover, 2001

Verfahrenstechnische Konzeptstudie zur Geothermischen Wärmeversorgung des GEOZENTRUMs Hannover, GTN, Kabus, F., & Seibr, P., 2001

Wasserfrac- und Hydraulik-Tests in der Bohrung Horstberg September - Dezember 2003, Feldbericht, ORZOL, J. und JUNG, R., Institut für geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben, Hannover, 2003

Geochemische Untersuchungen des Tiefenwassers der Bohrung Horst/Südheide, BWG (Boden, Wasser, Gesundheit GbR), Seibt, A., 2003

Hydraulik-Tests in der Bohrung Horstberg Januar- Dezember 2004, Feldbericht, ORZOL, J. und JUNG, R., Institut für geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben, Hannover, 2004

GeneSys – Ein Beobachtungsnetz für induzierte seismische Ereignisse, H. Bunes, Institut für geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben, Hannover, 2004

Mikroseismische Überwachung der massiven Stimulation in der Bohrung Horstberg, Q-Con Bericht, GEN003, Baisch et al., Q-con GmbH, 2004

Mikroseismische Überwachung der Post-Stimulationsphase an der Bohrung Horstberg, Q-Con Bericht, GEN004, Baisch et al., Q-con GmbH, 2004

Modellprognosen zum Wärmetauscher Horstberg Z1. Hydrogeothermische Modellierung des Horstberg Z1 – Untergrundwärmetauschers, SULZBACHER,H. & JUNG,R., GGA - Bericht; Hannover, 2004

Das GeneSys-Projekt: Erschließungskonzepte zur Erdwärmennutzung aus gering-permeablen Sedimentgesteinen. - GeneSys-Review 02/2005, ORZOL, J. und JUNG, R., Institut für geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben, Hannover

Tracerversuche an der Bohrung Horstberg Z1, Endbericht über Ergebnisse mit organischen Markierungsmitteln, Sauter, M., Ghergut, I, Lodemann, M. und Behrens, H., Georg-August-Universität Göttingen, 2005

Modellprognosen zum Verfahren der Tiefenzirkulation. Hydrogeothermische Modellierung des Horstberg Z1 - Untergrundwärmetauschers GGA - Bericht; SULZBACHER,H. & JUNG.R., Hannover, 2005

Vorträge

2002

JUNG, R., BINOT, F., BRAM, K., KEHRER, P., MEYER, P., REICHERT, C., RÖHLING, H.-G., SCHELLSCHMIDT, R. & THOMAS, R., GeneSys – ein Demonstrationsprojekt für die Wärmergewinnung aus geringpermeablen Sedimentgesteinen. – 7. Geothermische Fachtagg. – 20 Jahre Tiefe Geothermie in Deutschland, 06.-08.11.2002; Waren/Müritz. 2002

SCHELLSCHMIDT, R., JUNG, R., THOMAS, R. & BINOT, F., Geothermie-Projekt GeneSys des GEOZENTRUM HANNOVER: Konzept und Ergebnisse der Voruntersuchungen. - 3. Kolloquium des Arbeitskreises Geothermie der DGG, 03.-04.10.2002; Neustadt/Weinstr. 2002

THOMAS, R, Hochauflösende seismische Untersuchungen zur Erdwärmegewinnung aus tiefen, permeablen Gesteinsformationen im Stadtgebiet Hannover unter Verwendung von Profilen mit teufenabhängig optimierten Akquisitionsparametern. - DGMK-Frühjahrstag., 22.-23.04.2002; Celle

2003

ORZOL, J. JUNG, R., The GeneSys-project - Testing a single well concept for accessing heat from tight sedimentary rocks. Scientific Meeting of the Soultz Project, 29./30.4.2003, Kandel, 2003

2004

ORZOL, J., KEHRER, P., JATHO, R. & JUNG, R., GeneSys - Tiefbohrung zur Erdwärmegewinnung in Hannover. - 1. Bohrtechnisches Kolloquium, 16./17.09.2004, RWTH Aachen; Aachen. 2004

ORZOL, J., Das GeneSys-Projekt: Konzepte zur Erdwärmegewinnung aus geringpermeablen Sedimenten. - Geowissenschaftliches Kolloquium der Friedrich-Schiller-Universität Jena, 05.07.2004; Jena. 2004

ORZOL, J., Das GeneSys-Projekt: Konzepte zur Erdwärmennutzung aus Sedimenten. - Kolloquium für Angewandte Geophysik an der TU Berlin, 22.06.2004; Berlin. 2004

ORZOL, J., KEHRER, P., JATHO, R. & JUNG, R., GeneSys - Tiefbohrung zur Erdwärmegewinnung in Hannover. - 1. Bohrtechnisches Kolloquium, 16./17.09.2004, RWTH Aachen; Aachen. 2004

ORZOL, J., JATHO, R., JUNG, R. & KEHRER, P., Das GeneSys-Projekt - Erdwärmegewinnung aus gering-permeablen Sedimenten. - 64. Jahrestagg. der Dt. Geophys. Ges., 8.-12.03.2004; Berlin. 2004

ORZOL, J., JUNG, R., TISCHNER, T., KEHRER, P. & JATHO, R., The GeneSys-Project: Development of concepts for the extraction of heat from tight sedimentary rocks. - International workshop on 'New and Classical Applications of Heat Flow Studies', 04.-07.10.2004, RWTH Aachen. 2004

ORZOL, J., JUNG, R., JATHO, R., KEHRER, P. & TISCHNER, T., Das Geothermie-Projekt GeneSys: Konzepte zur Direktwärmenutzung aus gering permeablen Sedimentgesteinen. - 8. Geothermische Fachtagg. der Geothermischen Vereinigung e. V., 10.-12.11.2004; Landau in der Pfalz.

ORZOL, J., JUNG, R., TISCHNER, T., KEHRER, P. & JATHO, R., The GeneSys-Project: Development of concepts for the extraction of heat from tight sedimentary rocks. - International workshop on 'New and Classical Applications of Heat Flow Studies', 04.-07.10.2004, RWTH Aachen.

2005

JUNG, R. & ORZOL, J., Möglichkeiten der geothermischen Stromerzeugung in Deutschland. - 2. Konferenz der Elektrizitätswirtschaft Regenerative Energien - Mut zum Wandel, VDEW, 06.-07.04.2005; Stuttgart.

JUNG, R. & ORZOL, J., Das GeneSys-Projekt des Geozentrum Hannover - Erschließung geothermischer Energie aus dichten Sedimentgesteinen. - Seminar & Kolloquium, Institut für Umweltgeologie, TU-Braunschweig, 26.04.2005; Braunschweig

JUNG, R., ORZOL, J., KEHRER, P. & JATHO, R., The GeneSys-Project of the GEOZENTRUM Hannover - New methods for recovering heat from tight sedimentary rock. - Seminarreihe Advanced Topics Drilling, Production and Gas Supply des Instituts für Erdöl- und Erdgastechnik der TU-Clausthal, 19.07.2005; Clausthal-Zellerfeld.

ORZOL, J. & JUNG, R., Erschließung geothermischer Energie aus gering permeablen Tiefengestein. - Geotechnisches Seminar der TU Bergakademie Freiberg, 26.01.2005; Freiberg.

ORZOL, J., JUNG, R., KEHRER, P. & JATHO, R., The GeneSys-Project: Extraction of Heat from Tight Sediments. - Institut für Geologie, Mineralogie und Geophysik, Ruhr Universität Bochum, 22.07.2005; Bochum.

ORZOL, J., Das Geothermieprojekt GeneSys: Beispiele zum Einsatz bohrlochgeophysikalischer Methoden. - FKPE Workshop Bohrlochgeophysik und Gesteinsphysik, 20.-21.10.2005; Hamburg

WEISS, T, JUNG, R., BRENNER, S.L., ORZOL, J. & GUDMUNDSSON, A., Hydraulic Fracturing in sedimentary rocks: In-situ observations, field data and numerical simulations. - Annual Meeting European Geosciences Union, 24.-29.04.2005; Wien, Österreich.

2006

ORZOL, J. UND JUNG, R., Geothermie in Deutschland: eine Übersicht, Workshop Strukturgeologie und Geothermie im Rahmen der Tagung TSK 11, 25.3.2006, Geowissenschaftliches Zentrum der Georg-August-Universität Göttingen

ORZOL, J., RUMMEL, F. UND JUNG, R., The GeneSys- and Prometheus-Project: Concepts for the Extraction of Heat from Deep and Tight Sedimentary Rock - ENGINE Launching Conference, 12.-15.2.2006, BRGM, Orléans

TISCHNER, T., Hydraulic stimulation of EGS: A comparison of the HDR-project Soultz and the GeneSys project - ENGINE Launching Conference, 12.-15.2.2006, BRGM, Orléans

ORZOL, J. UND JUNG, R., Tiefe Geothermie in Deutschland - Öffentlicher Vortrag bei den Stadtwerken Bremen, 30.3.2006, Bremen

ORZOL, J., JUNG, R. KEHRER, P. & JATHO, R., Das Projekt GeneSys am Geozentrum Hannover - Neue Erschließungskonzepte - Öffentlicher Vortrag, Sitzung des Netzwerks für Klimaschutz der Klimaschutzregion (Metropolregion Hannover, Braunschweig, Göttingen), 16.03.2006; Hannover.

JUNG, R., ORZOL, J., SULZBACHER, H. & TISCHNER, T., The GeneSys-Project - Recovering heat from tight sedimentary rock. - EHDRA Scientific Conference, 15./16.06.2006; Soultz-sous-Forêts, Frankreich