

Hot Dry Rock Projekt Soultz: Erste Phase der Erstellung einer wissenschaftlichen Pilotanlage

Abschlussbericht

T. Tischner¹, M. Pfender¹, D. Teza²

Abschlussbericht zum Vorhaben 0327097

„Hot Dry Rock Projekt Soultz:

Erste Phase der Erstellung einer wissenschaftlichen Pilotanlage“

Gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und

Reaktorsicherheit im Zeitraum: 1.04.2001-31.03.2005.

¹Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Referat B 1.15
Stilleweg 2, 30 655 Hannover
Tel: 0511-643 2475
e-mail: T.Tischner@bgr.de
Pfender@soultz.net

² BESTEC GmbH, Landauer Str. 28, D-76870 Kandel
Tel: 07275-955440
e-mail: Teza@bestec-for-nature.com

Tgb. Nr. (BGR): B 1.15 – 10125/06

Januar 2006

Inhaltsverzeichnis

1.	Kurzdarstellung	1
1.1.	Aufgabenstellung	1
1.2.	Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens	2
1.3.	Stand von Wissenschaft und Technik zum Beginn des Vorhabens	3
1.4.	Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.5.	Zusammenarbeit mit den Projektpartnern und anderen Stellen	8
2.	Ergebnisse	12
2.1.	Abteufen der Bohrungen GPK 2, GPK 3, GPK 4	12
2.2.	Ungestörte Temperaturprofile	17
2.3.	Bohrung GPK 2	19
2.3.1	Die Bohrung GPK 2 vor der Stimulation	19
2.3.2	Hydraulische Stimulation der Bohrung GPK 2	20
2.3.3	Tests zur Bewertung der hydraulischen Stimulation	23
2.3.4	Säuerung der Bohrung GPK 2	25
2.3.5	Zusammenfassung GPK 2	28
2.4.	Bohrung GPK 3	29
2.4.1	Die Bohrung GPK 3 vor der Stimulation	29
2.4.2	Hydraulische Stimulation der Bohrung GPK 3	30
2.4.3	Säuerung der Bohrung GPK 3	33
2.4.4	Hydraulische Charakterisierung der Bohrung GPK 3	34
2.4.5	Zusammenfassung GPK 3	40
2.5.	Bohrung GPK 4	41
2.5.1	Die Bohrung GPK 4 vor der Stimulation	41
2.5.2	Hydraulische Stimulation der Bohrung GPK 4	42
2.5.3	Säuerung der Bohrung GPK 4	48
2.5.4	Hydraulische Charakterisierung der Bohrung GPK 4	52
2.5.5	Zusammenfassung GPK 4	57
2.6.	Zirkulationstest 2005	59
2.7.	Vergleich und Bewertung der Stimulationsoperationen	67
2.8.	Hydraulischer Vergleich der Bohrungen	70
2.9.	Mögliche Energieerzeugung im aktuellen Zustand	75
2.10.	Maßnahmen zur Verbesserung des Reservoirs	77
2.11.	Zusammenfassung	79
3.	Verwertbarkeit der Ergebnisse	81
4.	Ergebnisse Dritter	82
5.	Veröffentlichungen	83
	Literatur	84

1. Kurzdarstellung

1.1. Aufgabenstellung

Das BGR-Vorhaben „Hot Dry Rock Projekt Soultz: Erste Phase der Erstellung einer wissenschaftlichen Pilotanlage“ war Teil eines europäischen Forschungsvorhabens mit gleichnamigen Titel. Das Gesamtvorhaben war auf die Erstellung eines unterirdischen Wärmetauschers zur geothermischen Energiegewinnung in 5000 m Tiefe gerichtet. Das Ziel bestand darin, einen künstlichen unterirdischen Wärmetauscher zu schaffen, der die Produktion von Heißwasser mit einer Temperatur von knapp 200 °C und einer Fließrate bis zu 100 l/s zulässt. Hierzu sollte ein Tripletten-System bestehend aus einer Injektionsbohrung und 2 Produktionsbohrungen (Abb. 1.1.) installiert bzw. vervollständigt werden.

Es mussten folgende wesentliche Aufgaben gelöst und Meilensteine passiert werden:

- Auswertung der im Jahr 2000, an der ersten 5000 m Bohrung (GPK2) in Soultz, durchgeführten massiven Stimulationsoperation
- Abteufen der 2. Bohrung auf 5000 m (GPK3) als zentrale Injektionsbohrung
- Stimulation der Bohrung GPK3 und Schaffung einer hydraulischen Verbindung zur vorhergehenden Bohrung (GPK2)
- Abteufen der 3. Bohrung auf 5000 m (GPK4) als geplante Produktionsbohrung
- Stimulation der Bohrung GPK4 und Schaffung einer hydraulischen Verbindung zur Injektionsbohrung (GPK3)

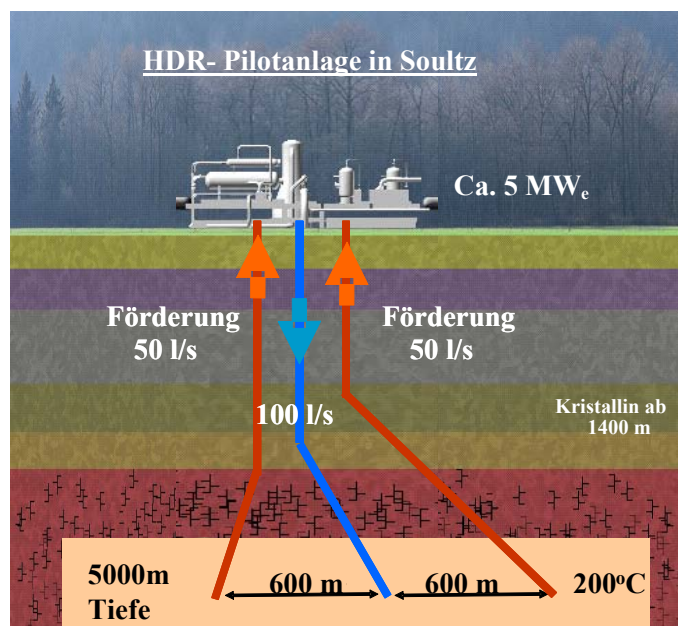


Abb. 1.1: Schema der geplanten HDR-Pilotanlage in Soultz. Die Schaffung des untertägigen Wärmetauschers war Hauptziel des Vorhabens.

Das unter Federführung der BGR laufende Forschungsvorhaben umfasste neben den eigenen Arbeiten die Aufgaben der Firma Q-con und der Stadtwerke Bad Urach (SWBU) als Unterauftragnehmer. Gegenüber dem BMU war die BGR zudem auch Auftraggeber der „Europäischen wirtschaftlichen Interessenvereinigung Wärmebergbau“ (EWIV), die wiederum als Operator in Soultz fungiert. Aus diesem Grund werden in diesem Bericht (inklusive Anlagen) nicht nur die Ergebnisse der BGR, sondern auch die wesentlichen Ergebnisse Gesamtvorhabens und damit der EWIV dargestellt.

Kurzgefasst lassen sich die Aufgaben der BGR und der Unterauftragnehmer der BGR wie folgt beschreiben:

- BGR: Planung und Auswertung aller hydraulischen Tests und Stimulationsoperationen. Betrieb eines hydraulischen Messwerterfassungssystems. Datenaquise und Datenmanagement sowie sonstige technische Unterstützung
- EWIV: Technische Durchführung und operative Leitung der Bohrarbeiten und aller weiteren Untersuchungen an den Bohrungen.
- Q-con: Mitwirkung bei der wissenschaftlichen Planung und Auswertung der hydraulischen Tests und der Stimulationsoperationen.
- SWBU: Geologische Begleitung der Bohrarbeiten; Planung und Auswertung von Bohrlochmessungen.

1.2. Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens

Das Geothermieprojekt „Soulz“ begann bereits im Jahr 1987 als deutsch-französisches Forschungsvorhaben. Aufgrund der guten Ergebnisse entwickelte sich hieraus im Jahr 1989 das europäische Forschungsvorhaben Soulz.

An dem aktuellen Vorhaben waren wissenschaftliche Einrichtungen und Firmen aus Frankreich, Deutschland und der Schweiz beteiligt. Durch Unteraufträge oder Kooperationsvereinbarungen waren zudem Wissenschaftler aus Großbritannien und Japan in das Vorhaben involviert. Durch diese breite Kooperation flossen in das Projekt Erfahrungen aus verschiedenen Vorläuferprojekten ein. Insbesondere war durch diesen Zusammenschluss gewährleistet, dass das in Europa vorhandene HDR-Know-How für das Projekt zur Verfügung stand. Durch die enge Kooperation von Partnern aus verschiedenen Ländern flossen insbesondere die Erfahrungen folgender HDR-Projekte ein:

- HDR-Projekt Falkenberg (1978-1986), in dem unter Federführung der BGR Grundlagenuntersuchungen zur hydraulischen Stimulation im Kristallingestein durchgeführt wurden.
- HDR-Projekt Los Alamos (1973-1995). In diesem Vorhaben waren zwischen 1980 und 1985 deutsche Wissenschaftler unter anderem der BGR und der Ruhr-Uni Bochum beteiligt.
- HDR-Forschungsprojekt Le Mayet de Montagne (1978 – 1984) der Universität Paris (Institute de Physique du Globe)
- HDR-Forschungsprojekt der Camborne School of Mines (Cornwall, 1977 – 1990)

Alle am Projekt beteiligten Arbeitsgruppen waren an einem dieser Vorläuferprojekte beteiligt oder verfügten über bereits langjährige Erfahrungen durch die Beteiligung am Soulz-Vorhaben. Neben den spezifischen Fachkenntnissen und umfangreichen Erfahrungen aus verschiedenen HDR-Vorhaben brachten die Kooperationspartner instrumentelle Ausstattungen mit in das Vorhaben ein (Bohrlochmessapparaturen, Laborausrüstungen für petrophysikalische und chemische Untersuchungen, etc). Aufgrund der unterschiedlichen Kompetenzen der einzelnen Partner und der bereits durch die Vorläuferprojekte existierenden Arbeitsteilung war von vornherein eine gute Kooperation aller Partner gewährleistet.

Im Verlauf des Vorhabens wurden in Deutschland 2 weitere Forschungsvorhaben zur Geothermie gestartet (Groß Schönebeck, GeneSys), in denen die Anwendung geeigneter Stimulationsmethoden von entscheidender Bedeutung ist. Die BGR ist an diesen beiden Vorhaben unmittelbar beteiligt, so dass zwischen diesen Projekten ein intensiver Erfahrungsaustausch und Wissenstransfer gegeben war.

1.3. Stand von Wissenschaft und Technik zum Beginn des Vorhabens

Der wissenschaftlich – technische Stand zu Beginn des Vorhabens war weitgehend durch die Ergebnisse, die im Soultz-Projekt selbst erzielt wurden, bestimmt. Insbesondere wurden im Zeitraum 1993 – 1997 in den damals 3600 m bzw. 3900 m tiefen Bohrungen (GPK1 und GPK2) für die weitere HDR-Entwicklung bahnbrechende Resultate gewonnen.

Im Jahr 1993 wurde zunächst die Bohrung GPK1 durch massive Wasserfrac-Operationen stimuliert. In den Jahren 1995/96 folgte dann die Stimulation der Bohrung GPK2. Durch Stimulation beider Bohrungen konnte ein hydraulisch miteinander verbundenes HDR-System mit einer Fläche von ca. 3 km² geschaffen werden, das größte HDR-System weltweit zu dieser Zeit.

In einem HDR-System wird das Wasser über diskrete Klüfte bzw. Risse transportiert. Die hydraulische Leitfähigkeit der Risse ist entscheidend für die Produktivität der Bohrungen. Um ökonomisch relevante Fließraten zu produzieren oder injizieren zu können, muss die effektive Rissleitfähigkeit im Bereich von mehr als 1 Darcymeter (Dm) liegen.

In Soultz konnten durch die Anwendung der Wasserfractechnik hoch leitfähige Risse geschaffen werden. Zum Beispiel wird abgeschätzt, dass die verbleibende Rissleitfähigkeit nach der Stimulation der GPK2 im Jahr 1996 im Bereich von etwa 5 Dm liegt (Jung, 1999; Jung & Weidler, 2000). Im Vergleich zu Fracoperationen unter Einsatz von Stützmitteln, wie sie typischerweise in der Ölindustrie eingesetzt werden, ist dies ein ungewöhnlich hoher Wert. Durch Einsatz von Stützmitteln wird eine derart hohe hydraulische Leitfähigkeit bestenfalls unter Laborbedingungen nachgewiesen. Unter Feldbedingungen verbleiben die Risse in der Regel deutlich unterhalb von 1 Darcymeter und oftmals sogar unterhalb von 0,1 Darcymeter (siehe z.B. Economides et al. 1989 oder Cikes 2000).

Diese Ergebnisse zeigen, dass die Anwendung der Wasserfractechnik in Soultz sehr erfolgreich ist und dass andererseits die konventionelle Fractechnik der Ölindustrie hier nicht zielführend ist. Rissflächen im Bereich von mehreren Quadratkilometern und mit einer hohen Rissleitfähigkeit können im Kristallin nur durch Anwendung der Wasserfractechnik erzielt werden. Die Ergebnisse, die vor Beginn dieses Vorhabens in Soultz bereits erreicht wurden, belegen eindrucksvoll, dass das bisher angewandte HDR-Konzept erfolgreich ist und auch für die nunmehr geplante Tiefe von 5000 m erfolgversprechend ist.

Im Anschluss an die Stimulation der Bohrungen im Zeitraum 1993 – 1997 wurden umfangreiche Nachfractests durchgeführt, die einen linearen Zusammenhang zwischen der Injektionsrate während der Stimulation und der erzielten Produktivität aufzeigten (Jung 1999). Dieser Zusammenhang ist von großer Bedeutung, da er die Ergebnisse von Stimulationsoperationen vorhersagbar macht. In Soultz wurde dieser Zusammenhang erstmals experimentell nachgewiesen sowohl im Reservoir in ca. 2000 m Tiefe als auch in ca. 3500 m Tiefe. Es ist davon auszugehen, dass dies eine allgemeingültige Beziehung für HDR-Reservoirs ist, die maßgeblich durch die Existenz von Scherrissen bedingt wird. Es

kann erwartet werden, dass dieser gefundene lineare Zusammenhang auch in 5000 m gültig ist.

Ein wesentlicher Meilenstein im Gesamtvorhaben wurde 1997 mit der Durchführung eines Zirkulationsexperiments passiert. Hier wurde über einen Zeitraum von ca. 4 Monaten zwischen den beiden Bohrungen in 3500 m Tiefe mit einer Fließrate von ca. 25 l/s zirkuliert (Jung et al., 1998). Aus der Bohrung GPK2 wurde durch Einsatz einer Unterwasserpumpe produziert und im geschlossenen Kreislauf in die GPK1 injiziert. Insbesondere durch den Einsatz der Unterwasserpumpe konnte ein stabiles Fließregime über die gesamte Zeitdauer aufrechterhalten werden. Aufgrund des gewählten Betriebsschemas: Aktive Förderung aus der Produktionsbohrung und Reinjektion im geschlossenen Kreis in die Injektionsbohrung konnte jeglicher Flüssigkeitsverlust im Reservoir vermieden und damit eines der Hauptprobleme bisheriger HDR-Anlagen umgangen werden.

Mit der Zirkulation von 25 l/s wurden die mit Abstand höchsten Fließraten in einem HDR-System erzielt. Die Fördertemperatur stellte sich nach längerer Zeit bei ca. 140°C mit leicht steigender Tendenz ein. Bemerkenswert war auch, dass der Injektionsdruck während der Zirkulation leicht fiel, so dass die Auskühlung des bohrlochnahen Umfelds der Injektionsbohrung hier zur Aufweitung der Risse und damit zu einer Verbesserung der Injektivität führte.

Während des Zirkulationstests wurde eine thermische Leistung von ca. 11 MW gewonnen – auch dies mit Abstand die höchste thermische Leistung aus einem HDR-Reservoir bisher.

Bemerkenswert sind zudem das große Tracerdurchbruchvolumen von ca. 6000 m³ und die relativ geringe Wiederfindungsrate von 25 % des Tracers am Ende des Experiments. Diese Angaben belegen, dass ein großer Teil des Wassers nicht direkt zwischen den Bohrungen zirkuliert, sondern über große Umwege. Natürlich vorhandene Fließwege im Untergrund müssen wesentlich zum Fluidtransport beitragen. Dies steht im Gegensatz zum ursprünglichen HDR-Konzept, in dem ausschließlich künstliche Risse angenommen werden. Für Soultz wird nicht zuletzt durch die Tracerergebnisse gezeigt, dass die Bohrungen über die künstlich geschaffenen Risse an natürlich vorhandenen Störungszonen angeschlossen sind. Das System ist peripher offen und nicht, wie im ursprünglichen Konzept angenommen, geschlossen.

In Tabelle 1.1 sind die Ergebnisse des Zirkulationstests in Soultz im Vergleich zu den weiteren HDR-Projekten aufgeführt. Hieraus wird eindrucksvoll ersichtlich, dass das Soultz-Projekt führend ist und hier die Maßstäbe für die weitere Entwicklung der HDR-Projekte gesetzt wurden.

Projekt	Tiefe (m)	Temperatur (°C)	Abstand der Bohrungen (m)	Fließrate-Produktion (l/s)	Wasser-verlust (%)	Fließwiderstand im System (MPa*s/l)	Therm. Leistung (MW)	Durchbruchvolumen (m ³)
Los Alamos	3500	232	150-300	7	< 10	2,5	5	80-100
Hijiori	2200	270	130	12	25	0,3	7	50-150
Cam-borne	2000	80	160-270	15	25	0,6	3	200-300
Soultz	3500	170	450	25	0	0,23	11	6000

Tab. 1.1: Ergebnisse der HDR-Großprojekte – Stand 1999 (Jung, 1999; Tab. 8)

Während der Stimulationsexperimente der Bohrungen in Soultz wurden die entstehenden seismischen Ereignisse konsequent aufgezeichnet und das Risswachstum und die Geometrie des Reservoirs beobachtet. Hierfür wurde und wird ein seismisches Netzwerk bestehend aus Geophonen, Hydrophonen und Beschleunigungsaufnehmern (Accelerometer) in den Beobachtungsbohrungen eingesetzt. Die Ortung der mikroseismischen Ereignisse erlaubt einen genauen Einblick in die Reservoirgeometrie und ist das entscheidende Hilfsmittel zum Verständnis der Prozesse bei der Stimulation. Die Methode der mikroseismischen Ortung der Rissausbreitung wurde durch die HDR-Projekte wesentlich entwickelt. Der Schwerpunkt der weiteren Entwicklung der mikroseismischen Ortung konzentriert sich auf die Verbesserung der Sensoren und deren Langzeitbeständigkeit unter extremen Bedingungen (hohe Drücke und hohe Temperaturen). Auch in dieser Hinsicht wurden und werden im Soultz-Projekt Maßstäbe gesetzt.

Für die Entwicklung von HDR-Projekten ist die Tiefbohrtechnik im Kristallin von entscheidender Bedeutung. Diesbezüglich hatten die HDR-Projekte Pionierarbeit geleistet, da außerhalb dieser Projekte kaum Tiefbohrungen im Kristallin abgeteuft wurden. Im Jahr 1999 wurde die Bohrung GPK2 bis auf ca. 5000 m vertieft. Hierbei wurden viele wertvolle Erfahrungen beim Abteufen der Bohrung und beim Einbau einer „gleitenden“ Verrohrung gesammelt. Die spezielle Komplettierung mit einer „gleitenden“ Verrohrung wurde hier erstmals in solch einer großen Tiefe eingesetzt.

Die für das Absetzen der Verrohrung erforderlichen Packer wurden den extremen Bedingungen in Soultz (hohe Temperaturen, hohe Salinität und Gasgehalt des Fluids) angepasst und erstmals beim Vertiefen der Bohrung GPK2 erfolgreich eingesetzt. Weiterhin wurde eine spezielle Hochtemperatur-Zementations-Strategie eingeführt, die unter den extrem hohen Temperaturen das Abdichten von Verlustzonen und das Setzen der Verrohrung problemlos ermöglichte (Baria et al., 2002).

Die Erfahrungen insbesondere beim Vertiefen der Bohrung GPK2 boten eine gute Grundlage auch für das gerichtete Abteufen von 2 weiteren Bohrungen in diesem Vorhaben.

Die erste Stimulation der Bohrung GPK2 in 5000 m Tiefe im Jahr 2000 war ein weiterer Meilenstein im Gesamtprojekt. Es wurden hierbei mehr als 31000 seismische Ereignisse registriert, mehr als bei allen Stimationsoperationen zuvor (Weidler et al., 2002). Das stimulierte Volumen war ebenfalls größer als bei den Stimulationen in den oberen Reservoirs. Die Produktivität der Bohrung GPK2 konnte hierdurch um ein Vielfaches gesteigert werden.

1.4. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben war in 11 Arbeitspakete aufgegliedert. Die Arbeitspakete 1-5 umfassten die operativen Arbeiten zur Erstellung des unterirdischen Wärmetauschers und erforderten eine zeitlich aufeinander folgende Bearbeitung. Die Arbeitspakete 6-11 hingegen umfassten die begleitenden wissenschaftlichen Arbeitspakete zur Auswertung, Interpretation und Verallgemeinerung der Ergebnisse, die von Beginn bis Ende des Projekts durchzuführen waren. Die BGR war maßgeblich an den Arbeitspaketen 1, 3 und 5 beteiligt und war federführende Institution für das Arbeitspaket 7 (Weiterentwicklung von Stimulations-technologien).

Arbeitspaket	Bezeichnung des Arbeitspakets	Koordinator	Beginn / Monat	Ende/ Monat
A	Projektkoordination	EWIV	1	36
1	Hauptstimulation der Bohrung GPK2 (bestehend)	EWIV	4	11
2	Bohrung GPK3: Abteufen einer abgelenkten Injektionsbohrung auf eine Tiefe von 5000 m	EWIV	5	19
3	Stimulation GPK3: Massive Stimulation und Testen der Injektionsbohrung	EWIV	18	22
4	Bohrung GPK4: Abteufen der 2.abgelenkten Produktionsbohrung auf eine Tiefe von 5000 m	EWIV	17	31
5	Stimulation der Bohrung GPK4 und Erprobung des hydraulischen Untergrundsystems	EWIV	30	33
6	Weiterentwicklung von Bohrtechnologien, Bohrlochkompletierungen und Bohrlochmessverfahren für HDR Anwendungen	EWIV	1	36
7	Weiterentwicklung von Stimulationstechnologien	BGR	1	36
8	Weiterentwicklung gekoppelter thermisch-/hydraulischer Modelle des Wärmetauschers im tiefen Untergrund	BRGM	1	36
9	Erstellung einer Datenbank	CYHN	1	36
10	Erfassung und Klassifizierung der Hot Dry Rock Ressourcen in Europa	BRGM	1	36
11	Ausarbeitung von Strategien zur Verbreitung der Hot Dry Rock Technologie in Europa	EWIV	1	36

Tab. 1.2: Liste der geplanten Arbeitspakete und des zeitlichen Ablauf. Der Monat 1 ist der April 2001. In blau sind die Arbeitspakete dargestellt, an denen die BGR beteiligt war. In rot ist das Arbeitspaket 7, welches von der BGR federführend bearbeitet wurde, dargestellt.

Für die Stimulation der Bohrungen GPK2 und GPK3 waren Fließraten bis 200 l/s und Injektionsvolumina bis zu 75000 m³ vorgesehen. Diese Planung basierte wesentlich auf den Ergebnissen und Erfahrungen im oberen Reservoir bei 3500 m. Die Stimulation der Bohrung GPK2 im Jahr 2000 mit einer maximalen Fließrate von 50 l/s zeigte jedoch, dass bereits durch diese vergleichsweise geringe Fließrate deutlich mehr seismische Ereignisse erzeugt wurden und auch höhere seismische Magnituden auftraten als bei der Stimulation im oberen Reservoir. Diese führte zu einer Veränderung des Arbeitsplans. Während der Sitzung der Policy Group am 6.11.01 in Bonn wurde daher beschlossen, die Arbeitspakete 1 & 3 zu verschieben und zunächst mit dem Abteufen der Bohrung GPK3 zu beginnen. Die Pakete 1 & 3 sollten anschließend nach Abteufen der Bohrung GPK3 kombiniert durchgeführt werden, wobei deutlich geringere Fließraten zur Stimulation eingesetzt werden sollten. Zusätzlich sollten für Soultz neue Stimulationskonzepte getestet werden: Säuberung der Bohrungen durch Produktionstests, moderate Säuerung zur Verbesserung des bohrlochnahen Bereiches, duale Injektion und Zirkulationsexperimente zur gezielten Stimulation der Verbindung zwischen den Bohrungen.

Ein weiteres Problem beeinflusste den Beginn der Arbeiten wesentlich. Im Anschluss an die Stimulation der Bohrung GPK2 im Sommer 2000 wurde während eines Injektionstests eine

PTF-Sonde im Bohrloch verloren. Das Kabel riss in einer Tiefe von ca. 3880 m, ca. 700 m oberhalb der Sonde. Im Jahr 2002 wurde versucht, die Sonde zu greifen und zu ziehen. Hierbei stellte sich heraus, dass in ca. 3900 m die Verrohrung partiell kollabiert war. Als Ursache hierfür wurde eine Blockade der Verrohrung im Bereich der Abdichtung der Arbeitsrohrtour am Bohrlochkopf angesehen. Die Verrohrung konnte sich offenbar im Anschluss an die Stimulation im Jahr 2000 nicht frei im Bohrlochkopf bewegen, wodurch es in genannter Tiefe partiell nach innen kollabierte. In diesem Bereich der Verrohrung riss offenbar das Kabel, so dass Sonde und Kabel nicht geborgen werden konnten. Die Situation der Bohrung GPK2 musste nun neu eingeschätzt und insbesondere die hydraulischen Eigenschaften dieser Bohrung mit der entstandenen Restriktion und der im Bohrloch verbliebenen Sonde neu bewertet werden.

Nach umfangreichen Vorarbeiten begannen im Juni 2002 die Bohrarbeiten für die Bohrung GPK3. Die besondere Herausforderung bestand hier in dem Abteufen einer gerichteten Bohrung in ein durch die seismischen Ereignisse definiertes Zielgebiet mit ca. 600 m Horizontalabstand zur GPK2 (Abb. 1.1). Die Bohrarbeiten konnten erfolgreich und weitgehend planmäßig im November 2002 abgeschlossen werden. Im ersten Halbjahr des Jahres 2003 schloss sich ein umfangreiches Testprogramm zur hydraulischen Stimulation der Bohrungen GPK2 und GPK3 an. Zudem wurden beide Bohrungen gesäuert und die Kommunikation zwischen den beiden Bohrungen getestet. Von September 2003 bis April 2004 wurde die Bohrung GPK4 als zweite Richtbohrung in ein vorab definiertes Zielgebiet bis auf ca. 5000 m abgeteuft. Zu Beginn wurden die Bohrarbeiten durch das zweifache Reißen der 20" Rohrtour beim Einbau wesentlich verzögert. Die komplette Rohrtour musste darauf hin geborgen, das Bohrloch anschließend freigeräumt und eine neue Rohrtour eingebaut werden. Erst danach konnten die Bohrarbeiten technisch weitgehend problemlos, jedoch mit deutlicher Verzögerung ausgeführt werden. Eine weitere Verzögerung entstand durch obertägige Umbauten, die in diesem Ausmaß ursprünglich nicht eingeplant waren. So wurde die Bohranlage, die mehrere Jahre in Soultz stand, demobilisiert, verbunden mit umfangreichen Rückbaumaßnahmen. Weiterhin wurde im Sommer/Herbst 2004 eine neue Managementstruktur der EWIV eingeführt, die zeitweilig zu einer Verzögerung aller operativen Abläufe führte. Bedingt durch diese Situation wurde das Projekt kostenneutral zunächst bis zum 31.12.04 verlängert.

Im September 2004 wurde die Bohrung GPK4 erstmals hydraulisch stimuliert. Obwohl die Stimulation viel versprechend verlief, musste sie nach Injektion von ca. 9000 m³ vorfristig abgebrochen werden. Eine Bohrlochsonde, die zuvor ausgefallen war, konnte nicht durch den Bohrlochkopf gezogen werden und verhakte sich in diesem. Als Ursache wurde eine Deformation der Arbeitsrohrtour knapp oberhalb der hydraulischen Abdichtung festgestellt. Das Problem konnte durch Druckentlastung und Bohrlochkopfdemontage zunächst technisch behoben werden. Allerdings war es angezeigt, den Bohrlochkopf an dieser und an den weiteren beiden Bohrungen umzurüsten, um derartige Vorfälle zukünftig zu vermeiden. Am 1.10.04 wurde in einer Policy Group Sitzung ein entsprechender Beschluss gefasst, verbunden mit einer nachfolgenden weiteren Projektverlängerung bis zum 31.03.05. Der Umbau der Bohrlochköpfe dauerte bis zum Januar 2005 an, wobei die Zeitdauer der Umbauphase weitgehend durch lange Lieferzeiten von Spezialteilen bedingt war.

Aktivität / Test	Zeitraum	Fließrate (l/s)	Volumen (m ³)
Produktion GPK2 (01JUN20)	Kurzzeitige Produktionstests zur Bestimmung chemischer Parameter und der hydraulischen Zugänglichkeit der Bohrung GPK2		
Produktion GPK2 (02APR18)			
Abteufen GPK3	Jun. 02- Nov. 02		
Injektion GPK2 (03JAN23)	23.01. – 30.01.03	15	9200
Säuerung GPK2 (03FEB12)	12.02. – 16.02.03	15/30	5800
Injektion GPK2 / Produktion aus GPK3 (03MAR11)	11.03. -15.03.03 14.03. – 20.03.03	15/30 4-5	8900 -1900
Stimulation GPK3 (03MAY27)	27.05. – 7.06.03	20-30/50/ (90)	34000
“Dual injection” - davon in GPK2	2.06. – 4.06.03	25/15	3400
Produktion aus GPK2	11.06. – 17.06.03	10/5	-4000
Produktion GPK2 (03JUN24)	24.06. – 09.07.03	20-12	-22000
Injektion GPK3 inklusive Säuerung GPK3	24.06. – 11.07.03	15-23	25000
Abteufen GPK4	Sept. 03 – April 04		
Injektion GPK3 (04AUG17)	17.08. – 23.08.04	12/18/24	2800
Produktion GPK3 (04AUG28)	28.08. – 31.08.04	10*	- 2600
Injektion GPK4 (04SEP07)	08.09. – 12.09.04	0,75	260
Stimulation GPK4 (04SEP13)	13.09. – 16.09.04	30 (45)	9300
Produktion GPK3	19.09. – 20.09.04	12*	-1000
Stimulation GPK4 (05FEB07)	07.09. – 11.09.04	30/45/25	12300
Injektion GPK4 (05FEB22)	22.02. – 25.02.05	9/17/25	4400
Säuerung GPK4 (05FEB28)	02.03. – 04.03.05	27/16/8	5500
Injektion GPK4 (05MAR13)	13.03. – 16.03.05	8/17/26	4300

Tab. 1.3: Hydraulische Tests und Bohrarbeiten im Berichtszeitraum. In Klammern angegebene Fließraten wurden nur kurzfristig Aufrecht erhalten (< 5 h). Mit * gekennzeichnete Fließraten sind mittlere Fließraten bei kontinuierlich abfallender Produktion.

Im Februar 2005 folgte dann die Fortsetzung der hydraulischen Stimulation mit Fließraten von 30 l/s bzw. 45 l/s. Anschließend wurde eine Testserie bestehend aus einem Stufeninjektionstest, einer Säuerung der Bohrung und einem abschließenden weiteren Stufeninjektionstest planmäßig durchgeführt. In nachfolgender Tabelle (Tab. 1.3) sind die Bohrarbeiten und die hydraulischen Tests im Berichtzeitraum aufgeführt.

1.5. Zusammenarbeit mit Projektpartnern und anderen Stellen

Im Gesamtvorhaben waren Projektpartner aus Frankreich, Deutschland und der Schweiz beteiligt. Fördermittel flossen zu etwa gleichen Teilen von der EU, dem BMWI/BMU (PTJ) und dem französischen Forschungsministerium (über ADEME) in das Projekt. Zudem

beteiligten sich die in der EWIV zusammengeschlossenen Firmen an der Finanzierung des Vorhabens. Technisch-wissenschaftlicher Koordinator des Gesamtvorhabens und aller operativer Arbeiten in Soultz war die „EWIV“. Die EWIV war gleichzeitig Hauptantragsteller gegenüber der EU und beauftragte die Firma BESTEC unter Leitung von Dr. J. Baumgärtner mit der Durchführung der operativen Arbeiten in Soultz. Die Firma BESTEC wurde maßgeblich mit der Zielstellung gegründet, die operativen Arbeiten in Soultz durchzuführen. In der Firma BESTEC sind Manager der Firmen ES (Electricité de Strasbourg) und der Pfalzwerke vertreten.

Übergeordnetes Aufsichtsgremium des Gesamtvorhabens war die so genannte „Policy Group“, die sich aus Vertretern der Förderinstitutionen zusammensetzt und Empfehlungen an das Projekt ausspricht. Die wissenschaftlichen Partner im Projekt waren in der EHDRA (European Hot Dry Rock Association) zusammengeschlossen, die die wissenschaftlichen Arbeiten der Partner im Projekt koordiniert.

In Abb. 1.2 sind die am Projekt beteiligten Institutionen anhand des Mittelabflusses dargestellt. Die BGR übernahm im Gesamtvorhaben eine gesonderte Position, da die Mittel des BMWI/BMU über die BGR an die EWIV geleitet wurden.

Die fachlichen Schwerpunkte der einzelnen Partner ergaben sich aus deren Tätigkeitsprofil und Kapazitäten sowie aus der zum Teil langjährig gewachsenen Arbeitsteilung, da viele Partner bereits seit Jahren im Projekt zusammen arbeiten. Eine intensive Zusammenarbeit existierte z.B. zwischen den geologisch-tektonischen Arbeitsgruppen der BRGM und SWBU.

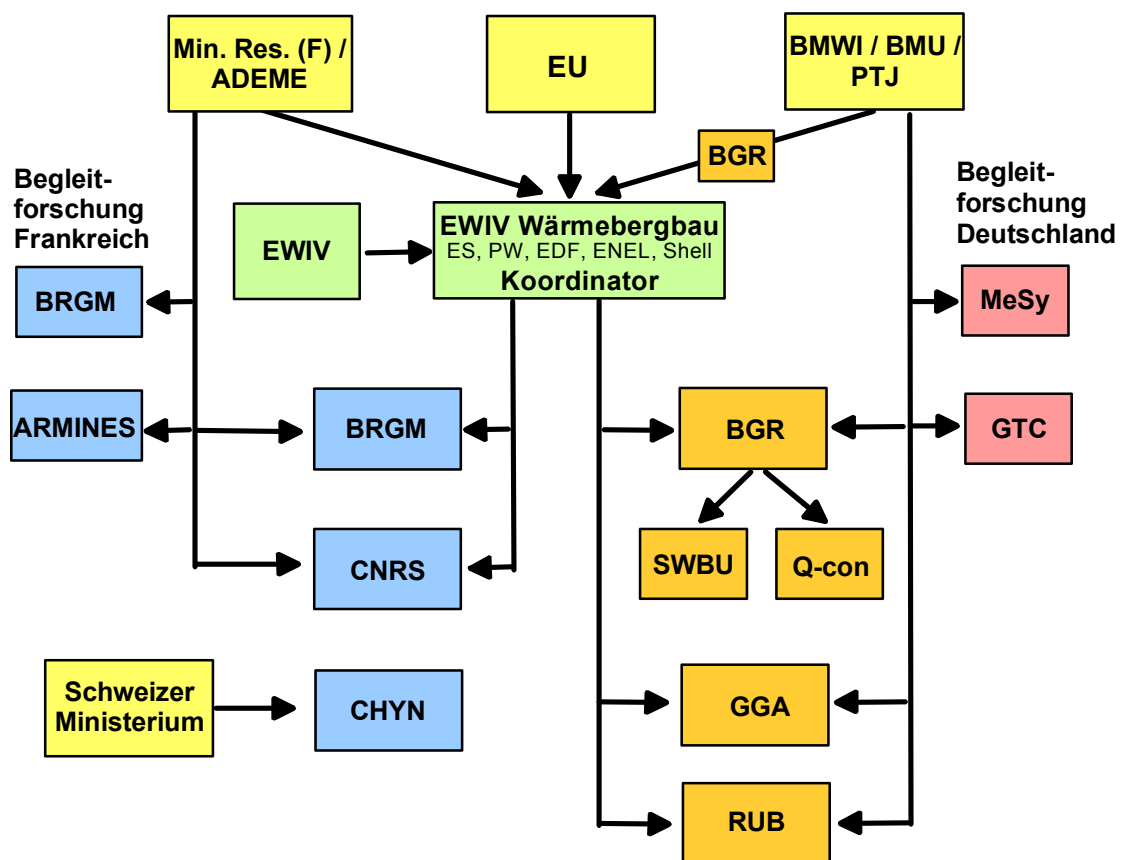


Abb. 1.2: Struktur des Projektes dargestellt anhand des Mittelabflusses. In Tabelle 4 sind die einzelnen Partner und deren Schwerpunktthemen näher aufgeführt.

Institution (Abk.)	Institution – vollständiger Name	Aufgabe
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie	Französische Förderinstitution
ARMINES	Association pour la Recherche et le Développement des Méthodes et Processus Industriels	Hydraulische und hydromechanische Reservoirmodellierung
Bestec	Best Technologies for Nature GmbH, Kandel	Operative Leitung der Arbeiten in Soultz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe	Planung und Auswertung von Stimulationsoperationen und hydraulischen Tests, Stimulationsstrategien
BRGM	Bureau des Recherches Géologiques et Minières	Geologische tektonische Interpretation; Charakterisierung HDR-Ressourcen in Europa, thermisch-hydraulische Modellrechnungen
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique.	Untersuchungen zur chemischen Gesteins-Wasser Wechselwirkung, Modellierung von thermisch-konvektiven Prozessen
CHYN	Centre d'Hydrogéologie Neuchâtel, Schweiz (hier Koordinator der Schweizer Gruppen)	Datenmanagement; Datenbanken, Reservoirmodellierung, Modellierung der Stimulation
EDF	Electricité de France	Beteiligung an der EWIV, Koordination
EHDRA	European Hot Dry Rock Association	Koordinierung der wissenschaftlichen Aktivitäten im Projekt
ENEL	Erga SpA / ENEL Group	Beteiligung an der EWIV, Koordination
ES	Electricité de Strasbourg	Beteiligung an der EWIV, Koordination
GGA	Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben	Thermische Modellierung des Reservoirs
GTC	GTC Kappelmeyer GmbH, Karlsruhe	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen von HDR-Systemen, Druckmonitoring im Fernfeld
MeSy	MeSy Geomeßsysteme GmbH, Bochum	Gesteinsphysikalische Untersuchungen, Spannungsmessungen
Policy Group	Aufsichtsgremium der Förderinstitutionen	Empfehlungen an das Projekt
PTJ	Projektträger Jülich, Forschungszentrum Jülich	Förderinstitution
Q-con	Q-con GmbH, Kandel	Interpretation hydraulischer Tests und der Stimulationen im Auftrag der BGR
RUB	Ruhr-Universität Bochum	Gesteinsphysikalische Untersuchungen, Stimulation und hydraulische Tests
Shell	Shell International Exploration and Production B.V.	Beteiligung an der EWIV, Management
SWBU	Stadtwerke Bad Urach	Geologisch-tektonische Interpretationen im Auftrag der BGR

Tab. 1.4: Auflistung der am Projekt direkt beteiligten Institutionen und deren Aufgaben.

Mit Modellrechnungen befassten sich z.B. Gruppen der ETH, ARMINES, GGA und CNRS und arbeiten diesbezüglich eng zusammen. Im Bereich der Planung, Durchführung und Auswertung von Stimulationsoptionen und hydraulischen Tests kooperierten vor allem die EWIV, BGR, RUB und MeSy. In Tabelle 1.4 sind die einzelnen Partner im Projekt mit ihren Tätigkeitsschwerpunkten aufgeführt.

Neben den im Projekt direkt beteiligten Gruppen waren weitere Institutionen vor allem aus Großbritannien und Japan im Auftrag der EWIV für den Bereich der seismischen Datenerfassung und Interpretation aktiv. Diese Gruppen besitzen langjährig Erfahrungen bei der mikroseismischen Rissortung im Rahmen der HDR-Projekte in Japan und Großbritannien und standen in regem Austausch mit anderen Arbeitsgruppen, die sich mit der hydraulischen Auswertung sowie der Reservoirmodellierung beschäftigten.

2. Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse des Projekts dargestellt. Die Schwerpunkte hierbei bilden die Stimulationsoptionen und hydraulische Tests zur Charakterisierung der Bohrungen, da die BGR vor allem mit diesen Themenschwerpunkten im Projekt vertreten war. In diese Betrachtung wird die Bohrung GPK2 mit einbezogen, auch wenn diese Bohrung bereits in der Projektphase zuvor vertieft und hydraulisch stimuliert wurde. Viele Erkenntnisse über die hydraulische Stimulation konnten aber erst durch die Untersuchungen im Berichtszeitraum gewonnen werden. Die Säuerung der Bohrung und nachfolgende hydraulische Tests an der Bohrung GPK2 waren ohnehin Bestandteil dieser Projektphase. Durch diesen Bericht soll eine Gesamtbetrachtung aller 3 Bohrungen und damit des Reservoirs in 5000 m Tiefe gegeben werden entsprechend der zentralen Aufgabenstellung für das Gesamtvorhaben: Die Erstellung des unterirdischen Wärmetauschers in 5000 m Tiefe.

In den Anlagen werden Detailinformationen über die Bohrarbeiten, neue Technologieentwicklungen im Zusammenhang mit den Bohrarbeiten sowie über die Ergebnisse der Unterauftragnehmer (SWBU und Q-con) gegeben. Insgesamt werden damit die wesentlichen Aspekte des Gesamtvorhabens in die Berichterstattung einbezogen und der besonderen Stellung der BGR als eigenständiger Projektbearbeiter und gleichzeitig als Vertreter der „EWIV“ gegenüber den deutschen Förderinstitutionen Rechnung getragen. Dem Bericht sind folgende Anlagen beigefügt:

- Management report (EWIV)
- Drilling report GPK3 (EWIV)
- Drilling report GPK4 (EWIV)
- Cost report GPK3 (EWIV)
- Cost report GPK4 (EWIV)
- Novel technologies applied to HDR/HFR drilling (EWIV)
- Development of High temperature tools: Logging tools – seismic sondes (EWIV)
- Abschlussbericht Q-con (Q-con)
- Geologische Charakterisierung der Bohrung GPK4 (SWBU, BESTEC)

2.1. Abteufen der Bohrungen GPK 2, GPK3 und GPK4

Zur Erstellung und Exploration des unterirdischen Wärmetauschers wurden in Soultz drei Tiefbohrungen bis in über 5000 m erfolgreich abgeteuft (GPK2, GPK3 und GPK4). Hinsichtlich der Tiefe, der Temperatur und der Gesteinseigenschaften wurde hier unter Extrembedingungen gebohrt. Aufgrund der besonderen und zum Teil extremen Bedingungen mussten neue Konzepte und Technologien eingesetzt werden. Trotzdem konnten die Bohrarbeiten im wesentlichen innerhalb des vorgegebenen Zeit – und Kostenrahmens niedergebracht werden. Das Abteufen der 3 Bohrungen muss als besonderer Erfolg des Projekts herausgestellt werden. Hiermit konnte die Grundlage für die Erschließung des Reservoirs in 5000 m Tiefe gelegt werden.

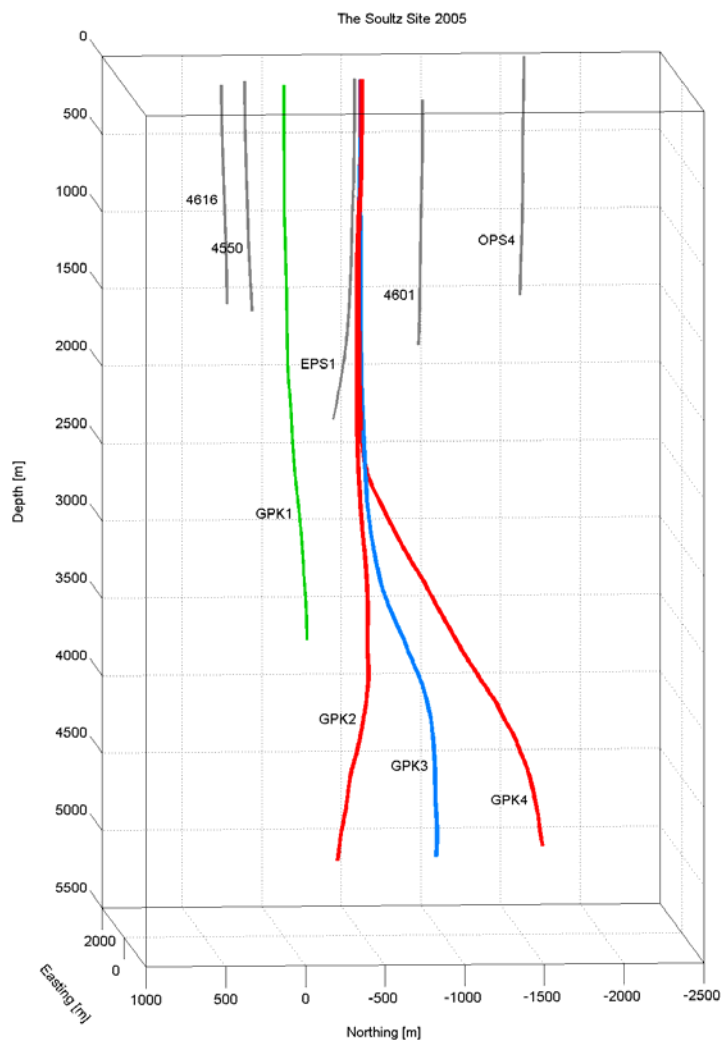


Abb. 2.1.1: 3D-Ansicht: Trajektorien der Injektionsbohrung GP3, der Produktionsbohrungen GP2 und GP4, sowie aller seismischen Observationsbohrungen.

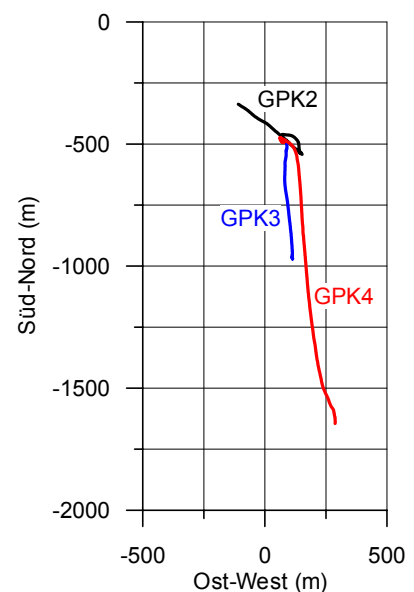


Abb. 2.1.2: Aufsicht auf die Bohrlochtrajektorien der Bohrungen GP2, GP3 und GP4.

Nachfolgend wird näher auf den Ablauf und die Besonderheiten der Bohrarbeiten in Soultz eingegangen. Weitere Details können den beigefügten Drilling Reports entnommen werden.

Die Bohrungen liegen an der Oberfläche nur 6 m auseinander und wurden durch Richtbohren untertage auf 600 m auseinander gezogen (Abbildung 2.1.1 und 2.1.2).

Die in 5000 m Tiefe zu erwartende Temperatur von etwa 200 °C und der Granit, bekannt durch die ersten Forschungsbohrungen in Soultz als sehr hartes und abrasives Gestein, stellten besondere technische Herausforderungen bei der Abteufung (Auswahl des Meißelwerkzeuges), dem Richtbohren (Einsetzen von Untertagemotoren), der Komplettierung und der Zementierung des Rohrstranges dar.

Eine Besonderheit der Bohrungen in Soultz ist der freie unzementierte Rohrstrang, der thermische Ausdehnung (Produktion) und Schrumpfen (Injektion) erlaubt. Das Konzept entstand als Konsequenz der schlechten Erfahrungen, die in der Industrie mit Komplettierungen von geothermischen Bohrungen gemacht wurden, und aus der Notwendigkeit heraus, eine Bohrung sowohl zur Injektion (Stimulation) als auch für die

spätere Produktion verwenden zu können. Dieses Komplettierungskonzept wurde zum ersten Mal an der GPK1 (2000 m) erprobt und anschließend auch auf die 5000 m tiefen Bohrungen GPK2, GPK3 und GPK4 übertragen (Abbildung 2.1.3). Die Zementation erfolgte grundsätzlich nur am Fuss der Verrohrung. Hierfür wurde ein spezieller HMR - Zement, (High Magnetic Resistance) eingesetzt, einem Hochofenzement kombiniert mit Flugasche, der speziell für die Bedingungen in Soultz entwickelt wurde. Gegenüber Standardzementtypen zeichnet sich der HMR Zement durch seine gute Stabilität gegenüber Salzwässern sowie Säure bei vergleichbaren Druckfestigkeiten aus.

Die Tiefbohrarbeiten an allen drei Bohrungen wurden unter der Leitung von Experten aus den USA (SII, Gandy Inc.) durchgeführt, die umfassende Erfahrungen im Bohren von Granit aus dem HDR Projekt in Cornwall und aus Schweden mitbrachten. Die Bohranlage, eine MASS6000, und das Bohrpersonal wurden von dem Projektpartner ENEL aus Italien gestellt.

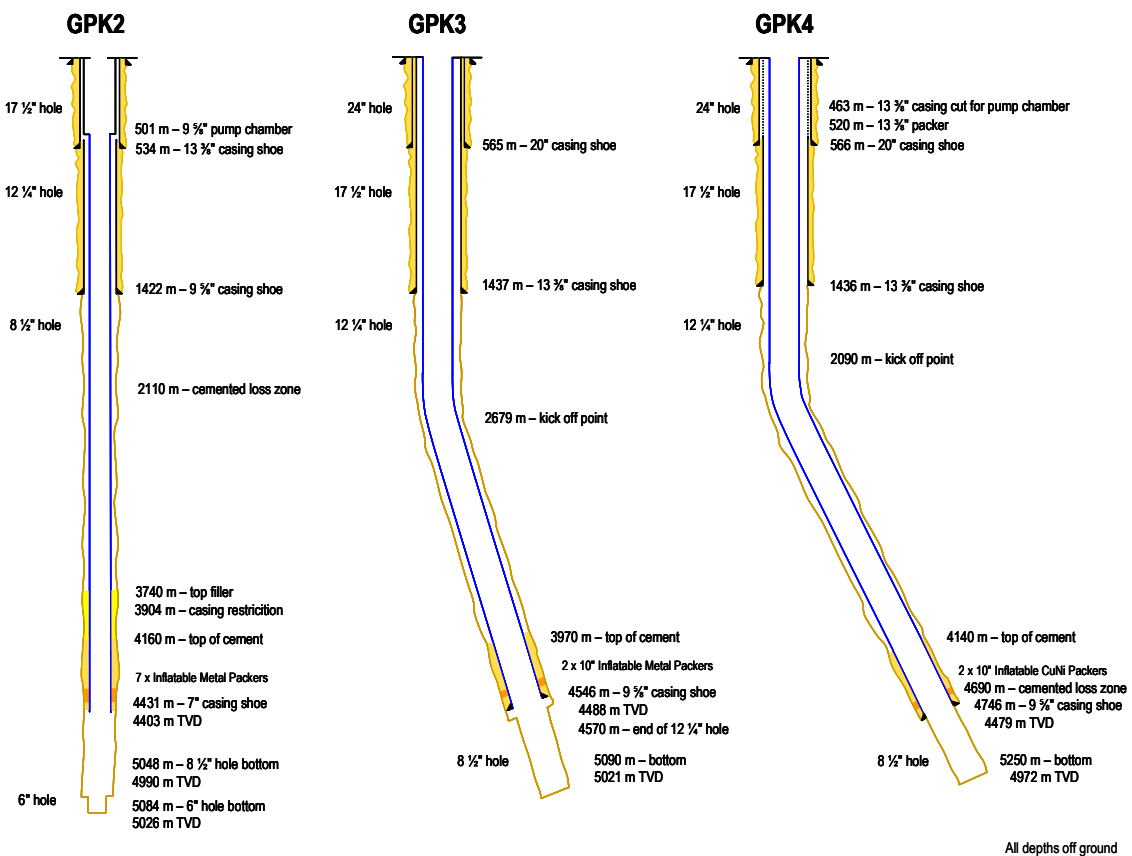


Abb. 2.1.3: Komplettierung der GPK2, GPK3 und GPK4.

GPK2

Die Bohrung GPK2 wurde 1995 als Forschungsbohrung bis in eine Tiefe von 3597 m abgeteuft und diente im oberen Reservoir als Produktionsbohrung. 1999 wurde sie erfolgreich als Pilotbohrung nahezu vertikal bis auf eine Tiefe von 5084 m vertieft.

Die GPK2 wurde mit einem gemischten Rohrstrang komplettiert, bis zu einer Tiefe von etwa 501 m mit 9 5/8" und bis 4431 m mit 7" Rohren. Das 7" Rohr wird am Schuh von 7 Metallpackern gestützt, und ist bis zu einer Tiefe von ~4160 m zementiert. Der offene Bohrlochbereich hat einen Durchmesser von 8 1/2".

Im Juli 2000 wurde die Bohrung erfolgreich hydraulisch stimuliert. Während des anschließenden Injektionstests wurden etwa 700 m Kabel zusammen mit einer Druck- und Temperatur Sonde im Bohrloch zurückgelassen.

Die Pilotbohrung GPK2 sollte zu Beginn dieser 1. Phase den ersten Baustein des 5 km tiefen Wärmeaustauschsystems darstellen, um später wieder als Produktionsbohrung genutzt zu werden. Anfang 2002 wurde aus diesem Grund versucht, den 'Fisch' aus der Bohrung zu entfernen. Es stellte sich heraus, dass das unzementierte 7" Rohr in 3904 m Tiefe aufgrund einer Blockade des Rohres innerhalb der Bohrlochkopfdichtung teilweise kollabiert war. Mit Hilfe eines kurzen Injektionstest im Juni 2002, der andeutete, dass die Bohrung weiterhin zugänglich und ausreichend hydraulische Qualität besaß, wurde entschieden, weitere Verbesserungsversuche erst einmal abzuberechnen.

GPK3

Die Bohrung GPK3 ist die zweite Bohrung, die in Soultz bis auf eine Tiefe von 5 km abgeteuft wurde.

Geplant war es, mit dieser Bohrung eine Zone in 5 km Tiefe zu erreichen, die durch gezielte Stimulationsmaßnahmen mit der Bohrung GPK2 und dem bereits erzeugten Wärmetauscher verbunden werden kann.

Mikroseismische Daten der Stimulation in 2000 und Spannungsdaten wurden analysiert und ein Zielbereich für die GPK3 festgelegt, der im Bohrlochtieferen 600 m von der GPK2 entfernt und innerhalb des bereits stimulierten Bereichs liegt. Die GPK3 war somit die erste gerichtete Bohrung in Soultz und soll als zukünftige Injektionsbohrung dienen.

Die Bohrarbeiten an der GPK3 begannen am 25. Juni 2002. Der 24" Abschnitt wurde bis 565 m Tiefe mit 20" Rohren ausgekleidet und bis zur Oberfläche zementiert. Anschließend wurde in 17 1/2" nahezu vertikal gebohrt, wobei der Granit in einer Tiefe von 1408 m angetroffen wurde. Die 13 3/8" Rohrtour wurde bis zu einer Tiefe von 1439 m gesetzt und zementiert.

Bis zu einer Tiefe von 2679 m wurde mit einem 12 1/4" Bohrlochmeißel gebohrt. Anschließend begannen die Richtbohrarbeiten mit Hilfe eines 8 1/2" Motors und einem MWD (Measurement While Drilling) bis zu einer Tiefe von 3171 m, um die Bohrung in Richtung Ziel auszulenken und die Position der Bohrung kontinuierlich einmessen zu können. Zu diesem Zeitpunkt waren bereits eine Inklination der Bohrung von 19° und ein Azimuth von 177° erreicht, so dass der Motor wieder abgelegt werden konnte. Der in 8 1/2" erbohrte Bereich wurde daraufhin auf einen Durchmesser von 12 1/4" vergrößert.

Das Bohren durch den oberen Wärmetauscher zwischen 3200 und 3600 m, der 1997 fertig gestellt wurde, erwies sich aufgrund des sehr geringen Bohrlochwandkontakts und Spülungsverlusten im stimulierten Granit als äußerst schwierig. Obwohl versucht wurde, die Auslenkung durch eine steife Bohrgerätenordnung konstant zu halten, stieg die Inklination in diesem Bereich auf 25° an. Um das Ziel trotzdem noch erreichen zu können, musste diese Auslenkung mit Pendelanordnungen langsam reduziert werden. Durch einzelne Kompassmessungen wurde der Bohrlochverlauf mehrmals kontrolliert, in einer Tiefe von 4571 m wurde schließlich ein Winkel von 3.5° bei fast 521 m Abstand zur GPK2 erreicht.

Der offene Bohrlochbereich wurde in 8 1/2" nahezu vertikal erbohrt. Bis zu einer Tiefe von 4838 m wurden zunehmend Wasserverluste beobachtet, die auf permeable Risse hinwiesen. In einer Tiefe von 5084 m produzierte das Bohrloch plötzlich etwa 2500 l/min, was wiederum

vermuten ließ, dass sich auch im Bohrlochtiefsten durchlässige Strukturen befinden. Zu diesem Zeitpunkt standen fast 3650 m des Bohrlochs im Granit unverrohrt.

Vor Einbau des 9 5/8" Rohrstrangs, wurde das Bohrloch bis auf 4580 m aufgesandet, um die notwendige Zementierung der Rohre im 12 1/4" Loch durchführen zu können. Die 9 5/8" Verrohrung wurde bis zu einer Tiefe von 4546 m erfolgreich eingebaut, blieb allerdings etwa 24 m vor dem Übergang zu 8 1/2" stecken. Nachdem ohne Erfolg mit 324 t an dem Rohrstrang gezogen wurde, musste entschieden werden, die Rohre an dieser Stelle zu verankern und zu zementieren. Die Zementierung verlief trotz dieser Komplikationen erfolgreich. Die Zementoberkante wurde bei 4015 m bestimmt und die zwei Metallpacker zur Verankerung des Rohres wurden bei einem Druck von 21.5 MPa gesetzt.

Nachdem der Sand aus dem Bohrloch ausgewaschen wurde, wurde die GPK3 bis auf eine Endteufe von 5091 m vertieft, um einen besseren Zugang zu der tiefen permeablen Zone zu ermöglichen.

Die Bohrarbeiten an der GPK3 wurden am 13. November 2002 nach 142 Tagen, etwa 16 Tage vor der ursprünglichen Planung, erfolgreich beendet. Die Auswertung des Bohrlochverlaufs zeigte, dass die GPK3 in der Zielzone gelandet ist. Die offenen Bohrlochbereiche der GPK2 und GPK3 liegen im Mittel 600 m voneinander entfernt.

GPK4

Die Bohrung GPK4 ist die zweite Produktionsbohrung des unterirdischen Wärmetauschersystems.

Anhand der mikroseismischer Aktivität, die während der Stimulationen der GPK2 und GPK3 beobachtet wurde, und den Informationen über das vorherrschende Spannungsfeld in Soultz wurden auch hier Bohrlochverlauf und Ziel für die Bohrung definiert. Das Ziel sollte in Richtung Süden liegen, so dass ein ausreichender Abstand von 600 m zur Injektionsbohrung GPK3 eingehalten werden konnte. Die GPK4 stellte mit einer notwendigen Auslage von über 1200 m bei einer Bohrlochlänge von fast 5300 m den technisch anspruchvollsten Meilenstein in dieser ersten Phase da.

Die Bohrarbeiten an der GPK4 begannen am 29. August 2003 in 24", an der Oberfläche 6 m entfernt vom Bohrlochkopf der GPK3.

Nach der Installation der 20" Rohre bis auf eine Tiefe von 576 m und deren erfolgreichen Zementierung wurde das Bohren in 17 1/2" bis 1446 m, etwa 40 m tief im Granit, fortgeführt. Anschließend wurde die 13 3/8" Verrohrung installiert. Bei dem Verrohrungsaufbau wurde die Option offen gehalten, bei Bedarf einer größeren Förderpumpe, eine entsprechende Pumpenkammer installieren zu können. Aus diesem Grund wurde die 13 3/8" Verrohrung vom Rohrschuh bis zu einer Tiefe von 486 m zementiert, so dass vor Einbau der 9 5/8" Rohrtour die 13 3/8" Rohre in einer Tiefe von 473 m abgeschnitten und der obere Bereich entfernt werden konnte.

Das Bohren in 12 1/4" wurde fortgesetzt bis zu einer Tiefe von etwa 2000 m. In dieser Tiefe sollte die Bohrung in Richtung Ziel ausgelenkt werden. Das Einmessen des Bohrlochverlaufs zeigte, dass aus der aktuellen Position heraus bei Einhalten des ursprünglich geplanten Bohrlochverlaufs das Risiko bestand, mit der GPK3 zu kollidieren. Der Bohrlochverlauf musste aktualisiert werden und die Bohrung in sicherem Abstand mittels eines Motors um die GPK3 herumgeführt werden. In 2125 m Tiefe konnte die Bohrung dann in Richtung des Ziels nach Süden N172° ausgelenkt werden. Die Auslenkung von maximal 34° wurde daraufhin durch reines Rotationsbohren gehalten, wobei durch MWD Messungen der

Bohrlochverlauf kontinuierlich überprüft werden konnte. Die Operationen wurden ab einer Tiefe von 3300 m extrem durch die regelmäßigen Ausfälle dieses Messgerätes dominiert. Es wurde vermutet, dass diese Ausfälle durch erhöhte Temperaturen und extremen Bohrstrangvibrationen im Granit verursacht wurden. Nach mehrmaligen jedoch erfolglosen Versuchen wurde beschlossen, eigenständig mit der Winde des Projektes Kompass-Messungen zu fahren. In Tiefen zwischen 4697 und 4716 m wurden Spülungsverluste von 10 – 15 m³/h und sehr hohe Bohrfortschrittsraten beobachtet. Diese Zone liegt innerhalb der mikroseismischen Wolke, die bei den Stimulationen der GPK2 und GPK3 aufgezeichnet wurde.

Bis zu einer Tiefe von 4910 m konnte die Neigung der Bohrung in 8 ½" auf 14.3° reduziert werden, allerdings wurde gleichzeitig eine starke Rotation in Richtung Osten beobachtet (142.6°). Um die Bohrung trotzdem in die Zielzone abzuteufen, musste zur Korrektur des Verlaufs ein 8 ½" Motor eingesetzt werden. Obwohl es sich als sehr schwierig erwies, den Motor zu rotieren, konnte die Bohrung zurück auf den richtigen Kurs gebracht werden. Zunehmende Bohrlochwandausbrüche, Rückfall von Bohrlochklein und Festsitzen erschwerten die Arbeiten in der Tiefe. Es wurde entschieden den 9 5/8" Rohrstrang früher einzubauen als geplant. Zuvor wurde die Verlustzone in 4700 m Tiefe zementiert, um Zementverluste bei der Zementierung der Rohre zu vermeiden. Die Verrohrung wurde erfolgreich bis in eine Tiefe von 4746 m eingebaut, mit zwei CuNi Packern verankert und anschließend mit HMR Zement bis 4140 m zementiert.

Nach dem Einbau und der Zementation der Rohre wurden die Bohrarbeiten in 8 ½" fortgeführt. Zwischen 5060 und 5105 m wurden immer wieder Druckverluste aufgrund von Auswaschungen und Rissen im Bohrgestänge beobachtet. Das Bohrgestänge konnte immer wieder rechtzeitig ausgebaut werden. Am 11. April 2004 erreichte die Bohrung GPK4 eine Länge von 5250 m und eine vertikale Teufe von 4972 m. Zu diesem Zeitpunkt wurde entschieden, dass die Fortsetzung der Bohrarbeiten, dominiert von hohem Drehmoment, dem damit bedingten Material- und Rohrverschleiß sowie fortdauernden spannungsbedingten Bohrlochwandausbrüchen, zu riskant war, und die Arbeiten wurden eingestellt. Die bohrtechnischen Grenzen für den Granit in Soultz schienen erreicht zu sein. Der Großteil des offenen Bohrlochbereichs landete trotz aller Schwierigkeiten innerhalb des geplanten Zielvolumens in 1150 m horizontaler Entfernung vom Bohrlochkopf.

2.2. Ungestörte Temperaturprofile

Die nach Fertigstellung der Bohrungen im Ruhezustand gemessenen Temperaturprofile in GPK2, 3 und 4 sind in Abb. 2.2.1 dargestellt. Sie wurden jeweils zwei bis vier Monate nach Bohrende aufgenommen.

Die Messungen zeigen übereinstimmend einen hohen Temperaturgradienten von ~ 0.1 K/m in der Tiefe von 0-1000 m, gefolgt von einer Zone mit nur geringer Temperaturzunahme bis ca. 3500 m. Das Abflachen des Temperaturgradienten ist auf die Existenz großräumiger Konvektionszellen zurück zu führen. Bis zum Bohrlochtiefsten entspricht der Gradient dann dem ‚normalen‘ geothermischen Gradienten von 0.03 K/m. In 5000 m Teufe wird in allen drei Bohrlöchern die Zieltemperatur von 200 °C erreicht.

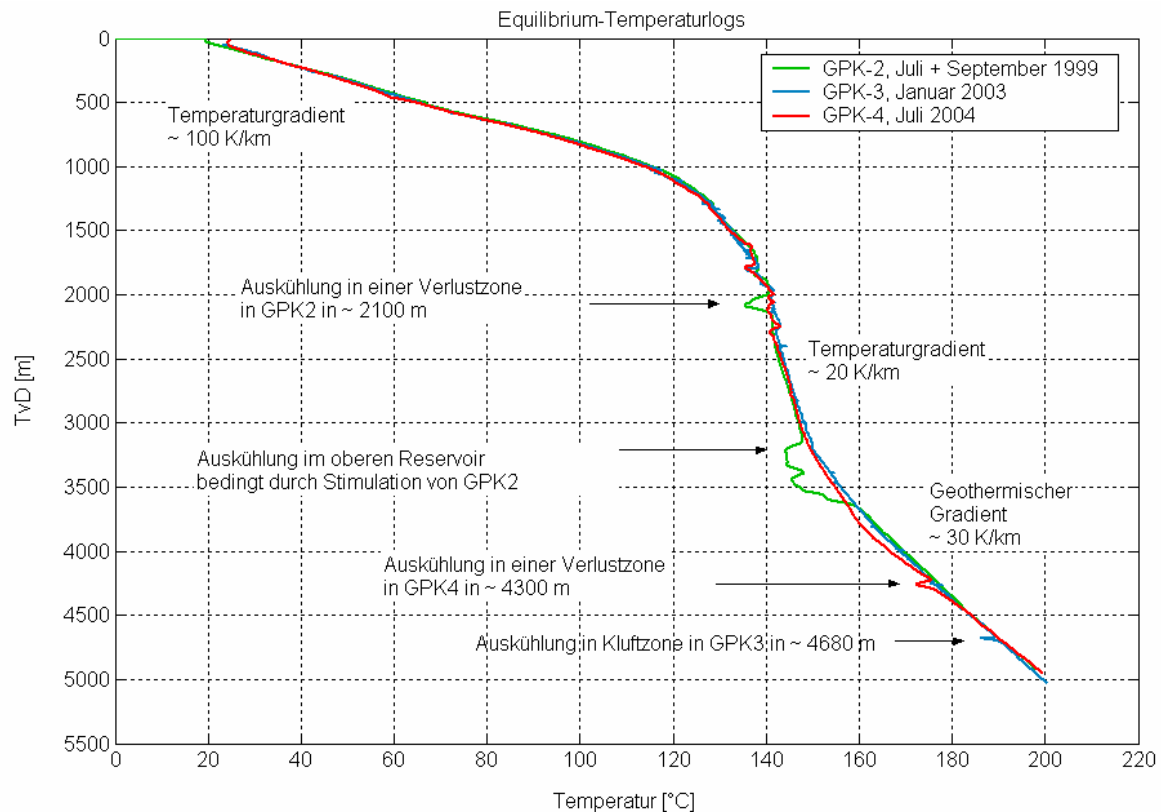


Abb. 2.2.1: Ungestörte Temperaturprofile in den Bohrungen GPK2,3 und 4 in Abhängigkeit von der Tiefe (TVD).

Alle drei Temperaturmessungen weisen Auskühlungen durch Injektion von kaltem Wasser auf. In GPK2 wurde bei ~ 2100 m während des Abteufens (1994-1995) eine Verlustzone angetroffen, die durch die Zirkulation des Bohrfluids abgekühlt wurde. Dieser Bereich wurde zementiert, ist aber noch sichtbar kälter als die Umgebung. Weiterhin ist in GPK2 von 3200-3600 m (TVD) die Lage des oberen Reservoirs zu erkennen, in dem von 1995 – 1997 Stimulationsexperimente und die Zirkulation mit GPK1 vorgenommen wurden. Das Temperaturprofil von GPK3 wurde vor deren Stimulation aufgenommen und weist in ~ 4680 m eine Auskühlung in Übereinstimmung mit der Lage einer Kluffzone auf. Während des Abteufens von GPK4 wurden Spülungsverluste ab einer Tiefe von 4298 m festgestellt, die bei 4458 m maximal waren. Diese Stelle wurde vor Einbringen der Verrohrung zementiert. Die erwähnten Auskühlungszonen der GPK3 und GPK4 zeigen eine ähnliche Charakteristik. Da dominante Auskühlungszonen zudem recht selten auftreten, ist zu vermuten, dass beide Auskühlungszonen dieselbe Struktur repräsentieren. Dies würde auf eine hydraulische Verbindung zwischen beiden Bohrungen über diese Struktur schließen lassen.

2.3. Die Bohrung GPK2

2.3.1 Die Bohrung GPK 2 vor der Stimulation

Die Bohrung GPK2 wurde zwischen Februar 1999 und Mai 1999 bis auf eine Endteufe von 5024 m (TVD)¹ vertieft. Zur hydraulischen Charakterisierung der Bohrung vor den Stimationsoperationen wurden zwei Slug Tests (2.08.99 – 5.08.99; Testname: 99AUG02), ein Produktionstest (26.10.99 – 1.12.99; 99OCT25) und ein Injektionstest (23.02.00 – 1.03.00; 00FEB25) durchgeführt (Baria et al., 2002, S. 33-42). Der Produktionstest war vorrangig auf die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung des Formationswassers gerichtet, lieferte jedoch auch wichtige Zusatzinformationen über die hydraulischen Eigenschaften der Bohrung vor der Stimulation.

In Abb. 2.3.1 ist der Injektionstest 00FEB25 dargestellt. Es wurde mit relativ geringen Fließraten zwischen 0.25 und 0.5 l/s über jeweils einige Stunden injiziert. Es stellten sich relativ schnell quasi-stationäre Verhältnisse ein, die eine Abschätzung der Injektivität der Bohrung erlaubten. So entnimmt man zum Beispiel für die 4. Injektionsphase (0.4 l/s) eine quasi-stationäre Druckdifferenz von ca. 20 bar (2 MPa), woraus eine Injektivität von ca. 0.02 l/(s*bar) folgt. Aus den beiden Slug Tests wird in guter Übereinstimmung hiermit eine Injektivität von 0.01 – 0.03 l/(s*bar) abgeschätzt (Baria et al., 2002, S. 34). Denselben Bereich für die Injektivität liefert die hydraulische Interpretation des Produktionstests 99OCT25.

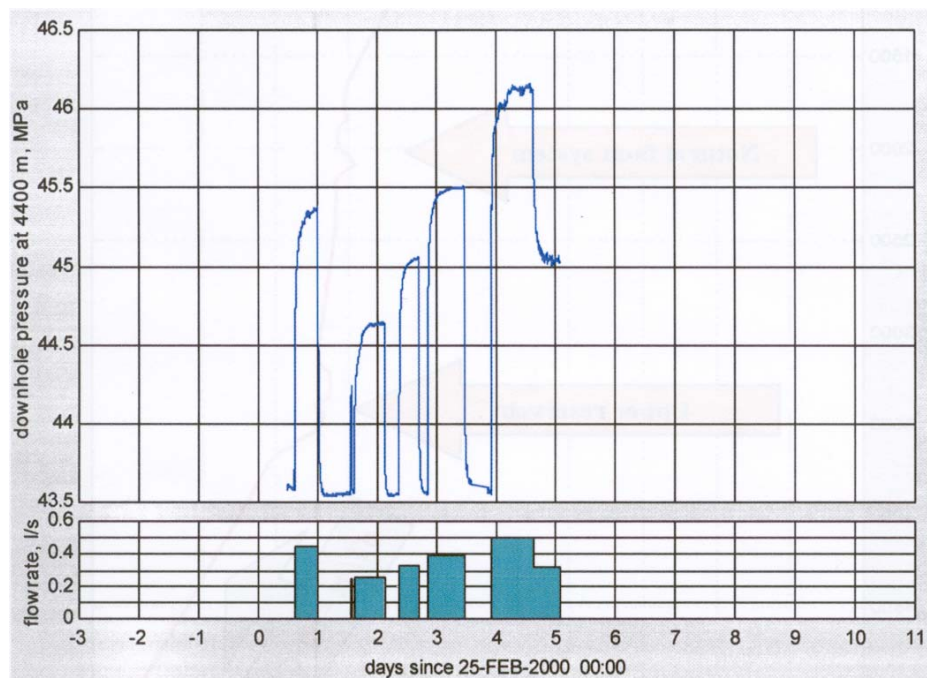


Abb. 2.3.1: Übersicht über den Injektionstest 00FEB25 (Februar 2000) vor der Stimulation der GPK2 (aus Baria et al., 2002, S. 39)..

¹ TVD: True vertical depth (wahre vertikale Tiefe). Die gemessene Tiefe (MD: Measured depth) des Bohrlochs hingegen beträgt 5084 m, so dass zwischen Messtiefe und wahrer vertikaler Tiefe eine Differenz von ca. 60 m im offenen Bohrlochabschnitt besteht.

Nimmt man ein einfaches radiales Reservoirmodell an, so korrespondiert diese Injektivität mit einer Transmissibilität von $(0.03 - 0.05) \cdot Dm^2$. Für einen kompakten und intakten Granit wäre diese Transmissibilität bereits zu hoch. Die abgeschätzte Injektivität bzw. Transmissibilität nach Abteufen der Bohrung deutet somit auf die Existenz von diskreten Zuflusszonen im offenen Bohrlochbereich vor der Stimulation hin.

Vor und nach dem Injektionstest 00FEB25 wurden Temperaturlogs im offenen Bohrlochbereich aufgenommen (nicht dargestellt). Der Vergleich zwischen beiden Logs deutet auf eine Abflusszone direkt unterhalb des Rohrschuhs hin (Baria et al., 2002). Weitere Abflusszonen können hieraus nicht eindeutig abgeleitet werden, da die „Temperaturstörung“, verursacht durch das relativ kleine Injektionsvolumen, sehr gering war.

Leider konnten vor der Stimulation quasi keine Logging-Operationen mit abbildenden Verfahren im offenen Bohrlochbereich durchgeführt werden, so dass die direkte Beobachtung von geklüfteten Abschnitten nicht möglich war. Ein UBI-Log (Ultrasonic Borehole Imager) wurde aufgrund von technischen Problemen und aufgrund einer Bohrlocherweiterung in ca. 3900 m nicht tiefer gefahren. Ein ARI-Log (Azimuthal Resistivity Imager) wurde bis ca. 4500 m, d.h. bis in oberen Bereich des späteren offenen Bohrlochbereichs gefahren, ist aber in seiner Aussagekraft nicht mit einem UBI-Log vergleichbar. Aufgrund von Restriktionen im offenen Bohrloch konnten auch ein Kaliber-Log und ein Gamma-Log nur bis 4625 m bzw. 4500 m gefahren werden (Baria et al., 2002, S. 25-30). Für den unteren Bereich des offenen Bohrlochs standen somit vor der Stimulation mit Ausnahme der Temperaturlogs keine weiteren Logginginformationen zur Verfügung.

Indirekte Aussagen über die Klüftung des Reservoirs konnten aus der Cutting-Analyse gewonnen werden. Klüftzonen wurden hieraus bei 4580, 4600 und 4775 m abgeleitet (Baria et al., 2002, S. 26-27). Signifikante Spülungsverluste während des Bohrprozesses wurden jedoch nicht beobachtet.

Um die Bohrung ausreichend produktiv zu gestalten, war eine Steigerung der Injektivität/Produktivität³ auf ca. $1 \text{ l/(s} \cdot \text{bar)}$, d.h. um etwa das 50-fache, durch Stimulation notwendig.

2.3.2 Hydraulische Stimulation der Bohrung GPK 2

Im Zeitraum 30.06.00 – 6.07.00 wurde die massive hydraulische Stimulation der Bohrung GPK2 durchgeführt. Es wurden insgesamt 23400 m^3 Wasser mit den Fließraten 31 l/s , 41 l/s und 51 l/s injiziert. Im Unterschied zu den Stimationsoperationen im oberen Reservoir wurde hier gleich zu Beginn der Stimulation eine sehr hohe Fließrate eingesetzt. Weiterhin wurden am Anfang der Stimulation ca. 800 m^3 salzgesättigtes Wasser mit einer Dichte von 1.2 kg/l injiziert. Die besondere Strategie (hohe Fließrate, Salzzugabe) hatte folgende Gründe:

- Durch die hohe Fließrate zu Beginn der Stimulation sollte der Injektionsdruck in kurzer Zeit in der gesamten offenen Bohrlochstrecke den kritischen Wert für die

² Die Transmissibilität T wird durch folgende Beziehung abgeschätzt: $T = PI \cdot \mu$ (PI : Injektivität; $\mu = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$: Viskosität). Diese Beziehung ergibt sich als Näherung für lange Zeiten aus der logarithmischen Abhängigkeit zwischen Druck und Zeit für ein radiales Fließsystem (siehe z.B. Streltsova, 1988, S. 76).

³ Injektivität und Produktivität werden als gleich angenommen, da in Sultz bisher experimentell keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Größen aufgrund von Produktions- und Injektionstests gefunden wurden.

Erzeugung neuer Risse überschreiten, so dass nicht nur eine bereits vorab unmittelbar unterhalb des Rohrschuhs befindliche Abflusszone aktiviert wird, sondern auch weitere Zonen deutlich tiefer.

- Die Zugabe von salzgesättigtem Wasser zu Beginn der Stimulation diente ebenso dem Zweck, möglichst tiefliegende Strukturen zu aktivieren, bzw. hier neue Risse zu erzeugen. Durch die Dichte von 1.2 kg/l werden im Bohrloch nahezu Bedingungen erreicht, wo über die gesamte offenen Bohrlochstrecke die Initiierung von Rissen möglich ist, da der „Fracgradient“ in Soultz nicht wesentlich höher ist als 0.12 bar/m.

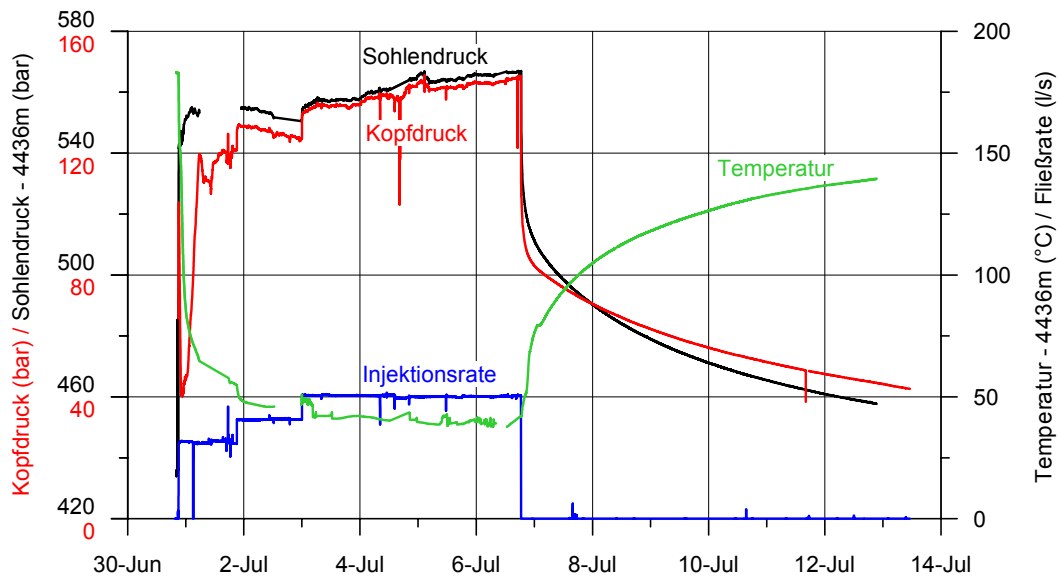


Abb. 2.3.2: Übersicht über die hydraulische Stimulation der Bohrung GPK2 im Sommer 2000. Die angegebene Tiefe von 4436 m (MD) entspricht 4416 m (TVD).

In Abb. 2.3.2 ist der Verlauf der Stimulation dargestellt. Nach anfänglichem starkem Druckanstieg stellt sich ein Differenzdruck von ca. 150 bar ein. In der Hauptstimulationsphase (51 l/s) wird ein flacher, aber allmählicher Druckanstieg beobachtet. Dieser kontinuierliche Anstieg deutet darauf hin, dass kein Anschluss an eine Konstantdruckgrenze bzw. hoch („unendliche“) leitfähige Struktur gefunden wurde.

In der Einschussphase unmittelbar nach dem shut-in fällt der Kopfdruck steiler als der Sohlendruck. Hierdurch wird ein signifikanter hydraulischer Widerstand in der Bohrung angezeigt. Allerdings sind bei dem Bohrlochausbau (7“ – Liner über ca. 4000m) Druckverluste von ca. 10 bar bei 50 l/s innerhalb der Rohrtour zu erwarten.

Der Differenzdruck während der Stimulation lag etwa genauso so hoch wie bei den Stimulationsexperimenten im oberen Reservoir. Aufgrund der größeren Tiefe wurde hier jedoch mit einem deutlich höheren Druck für die Stimulation gerechnet. Dies weist darauf hin, dass die Gebirgsspannung gegen die die Risse geöffnet wurden, in 5000m offensichtlich nicht wesentlich höher ist als in 3500 m, dem oberen Reservoir. Das mit der Bohrung GPK2 erstmals erschlossene Reservoir in 5000 m befindet sich näher an einem kritischen Spannungszustand als das Reservoir in 3500 m.

Hiermit korrespondiert die bei der Stimulation beobachtete hohe Seismizität. Es wurden mehr als 31511 Ereignisse registriert und 13986 Ereignisse lokalisiert, deutlich mehr als bei den Stimulationen im oberen Reservoir (Abb. 2.3.3).

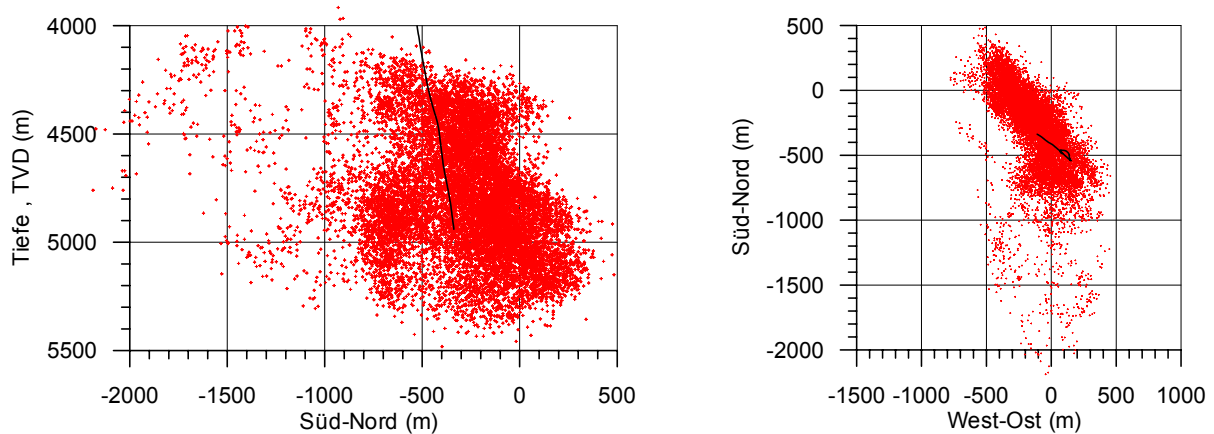


Abb. 2.3.3: Lokalisierte seismische Ereignisse während der hydraulischen Stimulation der GPK2 in 2 Projektionsebenen. Eingezeichnet ist die Trajektorie der Bohrung GPK2 (schwarz). Die Koordinaten sind bezogen auf den Bohrlochkopf der GPK1.

Die Ereignisse sind vorrangig in Nordwest/Südost – Richtung orientiert und folgen damit der Richtung des Oberrheingrabens. 92 % der seismischen Ereignisse sind in einem Raumgebiet lokalisiert, dass durch einen Quader mit den Abmessungen 1000m x 1000m x 500m, der Streichrichtung N155° und dem Einfallswinkel 80° nach Südwest beschrieben werden kann (Weidler et al., 2002; siehe auch beiliegenden Abschlussbericht von Q-con). Die Ebene der höchsten Aktivität liegt genau im Zentrum dieses Quaders und schneidet die Bohrung bei ca. 4700 m (TVD) bzw. 4760 m (MD). Diese Zone korreliert sehr gut mit einer Kluffzone, die durch Cuttinganalyse beim Bohrprozess identifiziert wurde.

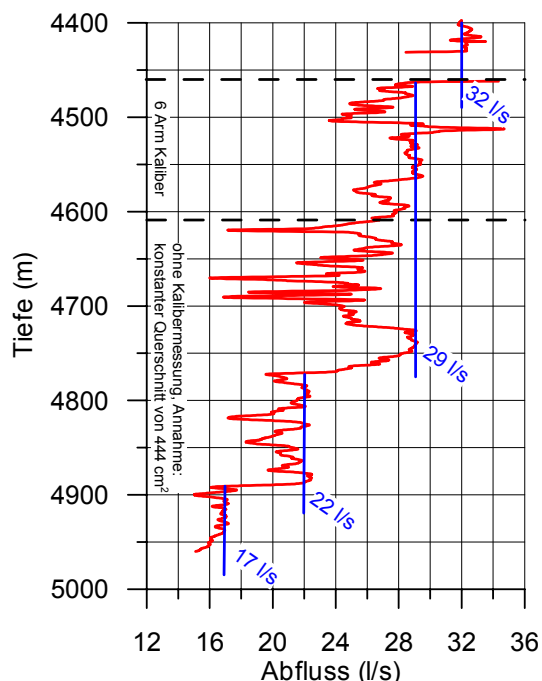


Abb. 2.3.4: Flowmeterlog während der 1. Phase der hydraulischen Stimulation (Injektion mit 32 l/s). Interpretation von A.Gerard (siehe auch Baria et al., 2002, S. 52)

Ein weiterer Beleg für die Stimulation dieser Kluffzone folgt aus dem Flowmeterlog. Am Beginn der Stimulation (32 l/s) wurde ein Flowmeterlog gefahren, das einzige Flowlog während bzw. nach der Stimulation der Bohrung GPK2 (Abb. 2.3.4) Leider konnte dieses Flowmeterlog nicht hinsichtlich des Kalibers der Bohrung korrigiert werden, da unterhalb von ca. 4610 m (MD) kein Kaliberlog zur Verfügung steht. Dennoch lassen sich hieraus die wesentlichen Abflusszonen bestimmen, unmittelbar unterhalb des Rohrschuhs (4460 m), bei ca. 4750 m, bei 4880 m und unterhalb von 4950 m.

Die im Flowmeterlog nachgewiesene Abflusszone bei 4750 m (MD) ist die Zone, die mit der Kluffzone korreliert werden kann und die offensichtlich vorrangig stimuliert wurde.

2.3.3 Tests zur Bewertung der hydraulischen Stimulation

7 Tage nach Beendigung der Stimulation der Bohrung GPK2 wurde ein Stufeninjektionstest mit 2 vorangehenden Pulstests durchgeführt (Test: 00JUL13, nicht dargestellt). Der Stufeninjektionstest konnte jedoch nicht im geplanten Umfang durchgeführt werden. Während des Tests fiel die downhole-Drucksonde mehrfach aus und während des anschließenden Shut in riss das Kabel und die Sonde verblieb im Bohrloch mit ca. 700 m Kabel.

Im Jahr 2003, nach Abteufen der Bohrung GPK3, wurde ein Injektionstest (03JAN23) an der Bohrung GPK2 durchgeführt (Abb. 2.3.5). Dieser Test charakterisiert die Bohrung im Zustand nach der Stimulation und vor der Säuerung. Es wurden 15 l/s über einen Zeitraum von ca. 5.5 Tagen injiziert. Leider konnte der Sohlendruck nur in einer Tiefe von 3500 m (TVD) gemessen werden, da das Bohrloch aufgrund der im Jahr 2000 havarierten Sonde nicht mehr wesentlich weiter befahrbar war. Für die genaue hydraulische Analyse ist jedoch die Kenntnis des Drucks in Reservoirtiefe notwendig.

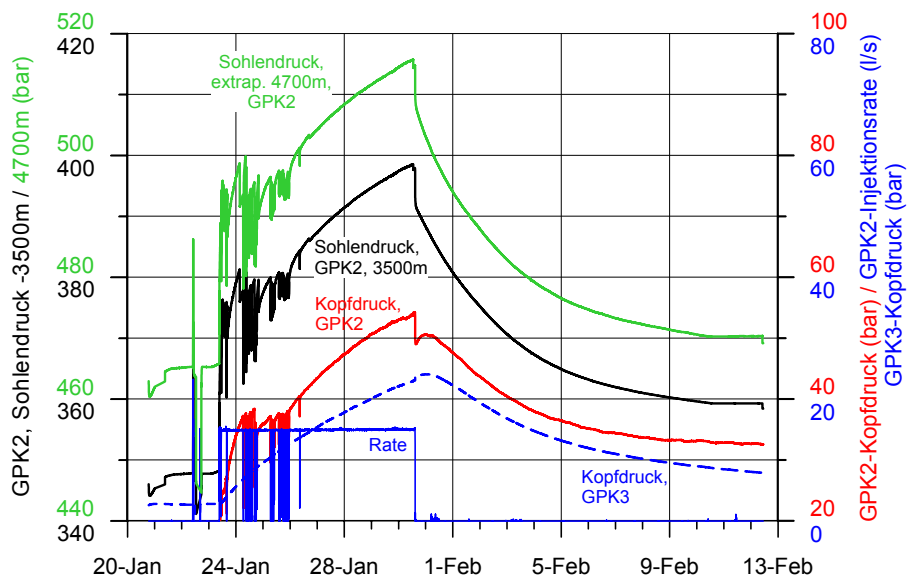


Abb. 2.3.5: Übersicht über den Injektionstest 03Jan23 an der Bohrung GPK2. Grün ist der extrapolierte Sohlendruck in 4700 m dargestellt, der durch lineare Extrapolation aus dem Bohrlochkopfdruck und gemessenem Druck in 3500 m abgeleitet wurde. (Tiefenangaben in TVD).

Im Abschlussbericht von Q-con (Weidler&Baisch, 2004) wird der Reservoirdruck in 5000 m für die Einschussphase auf Basis des in 3500 m gemessenen Drucks ermittelt und mit einem komplexen Reservoirmodell angepaßt. Das Modell beschreibt einen unendlich leitfähigen, vertikalen Riss in einer Matrix mit einer Transmissibilität von ca. 0.8 Dm. Außerhalb von ca. 600 m schließt sich radial eine Zone mit einer um den Faktor 4 reduzierten Transmissibilität an. Der Bohrlochspeicher wird mit 0.02 – 4 m³/bar angegeben. Auch wenn die Bestimmung der Parameter sehr unsicher ist, so weist der grundsätzliche Druckverlauf auf ein formationslineares Fließregime hin: Die Änderung des Drucks und der 1. Ableitung erfolgt proportional mit der Wurzel der Zeit (Abb. 2.3.6). Insbesondere die Aussage, dass ein sehr gut (unendlich leitfähiger) Riss an die Bohrung angeschlossen ist, ist damit gut begründet.

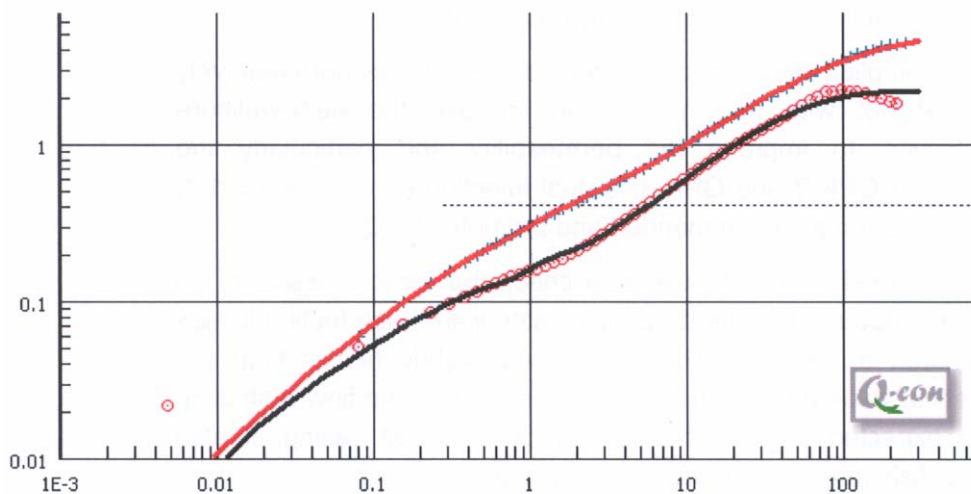


Abb. 2.3.6: Anpassung des Druckverlaufs für die Einschussphase des Tests 03JAN20. Doppeltlogarithmische Darstellung der Druckdifferenz (bar) und der Ableitung des Drucks als Funktion der Zeit (h) (aus Weidler & Baisch, 2004). Durchgezogen sind die Fitkurven für den Druck (rot) und die Ableitung des Drucks (schwarz) dargestellt. Die Kreise bzw. Kreuze repräsentieren die Messwerte.

Der Druck steigt während des gesamten Tests kontinuierlich an und es werden keine stationären Bedingungen erreicht. Es sind folglich keine äußeren Begrenzungen des Reservoirs und insbesondere auch keine Konstantdruckgrenzen festzustellen.

Die Produktivität der Bohrung ist daher zeitabhängig. Aus dem in Abb. 2.3.5 dargestellten, extrapolierten Sohlendruck (in 4700 m) entnimmt man aus der Einschussperiode eine Produktivität nach 2 Tagen von ca. $0.5 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{bar})$ bzw. nach 5 Tagen von ca. $0.4 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{bar})$. Die so abgeschätzte Produktivität auf der Basis des Sohlendrucks kennzeichnet das Reservoir im Umfeld der GPK2⁴.

Die Produktivität der Bohrung wurde folglich durch die hydraulische Stimulation um ca. das 20 fache gesteigert [von ca. $0.02 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{bar})$ auf $0.4 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{bar})$].

Es ist lohnenswert, den Beginn der Einschussperiode dieses Tests näher zu betrachten. Unmittelbar nach Beendigung der Injektion fällt der Druck schlagartig um ca. 3 bar am Bohrlochkopf (Abb. 2.3.7). Ein identischer Druckabfall wird in 3500 m Tiefe beobachtet (nicht dargestellt). Dies zeigt, dass sich unterhalb der Sonde ein hydraulischer Widerstand befindet. Unter Berücksichtigung der Vorgeschichte liegt es nahe, diesen hydraulischen Widerstand mit der Verengung des Bohrlochs bei ca. 3900 m bzw. der abgerissenen Sonde/Kabel zu erklären. Da der Druck nahezu schlagartig abfällt, befindet sich oberhalb der Restriktion nur ein marginaler Bohrlochspeicher. Unterhalb des hydraulischen Widerstandes schließt sich hingegen ein System mit einem großen Speicherkoeffizienten an. Der sehr flache Druckabfall, überlagert von ausgeprägten Oszillationen, deutet darauf hin. Aus dem Druckabfall kann ein Speicherkoeffizient von ca. $2 \text{ m}^3/\text{bar}$ abgeleitet werden. Dieser große Speicherkoeffizient kann vermutlich nur mit einem großen, gut leitfähigen und sehr nachgiebigen Riss erklärt werden.

⁴ Eine Abschätzung der Produktivität für diesen Test auf der Basis des Kopfdrucks würde zu einer signifikant höheren Produktivität führen. Die Produktivität des Reservoirs ist aus dem Bohrlochkopfdruck nicht unmittelbar bestimmbar, da der Bohrlochkopfdruck durch die Dichte der Wassersäule im Bohrloch stark beeinflusst wird. Die mittlere Dichte der Wassersäule im Bohrloch ändert sich jedoch signifikant zwischen Injektion und Einschussphase.

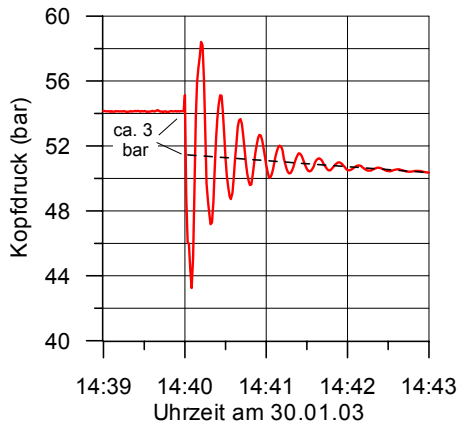


Abb. 2.3.7: Kopfdruck am Beginn der Einschussphase des Tests 03JAN20. Aus dem Abfall der eingezeichneten, gestrichelten Gerade (1.2 bar/180 s) entnimmt man einen Bohrlochspeicher von 2 m³/bar.

2.3.4 Säuerung der Bohrung GPK2

Mit der Bohrung GPK2 wurde die erste Tiefbohrung in Soultz gesäuert. Den Anlass hierfür boten die Kernuntersuchungen an dem Bohrkern, der hier aus dem Bohrloch tiefstem gewonnen wurde. In diesem Kern wurde eine Vielzahl Kalzit-gefüllter Klüfte gefunden.

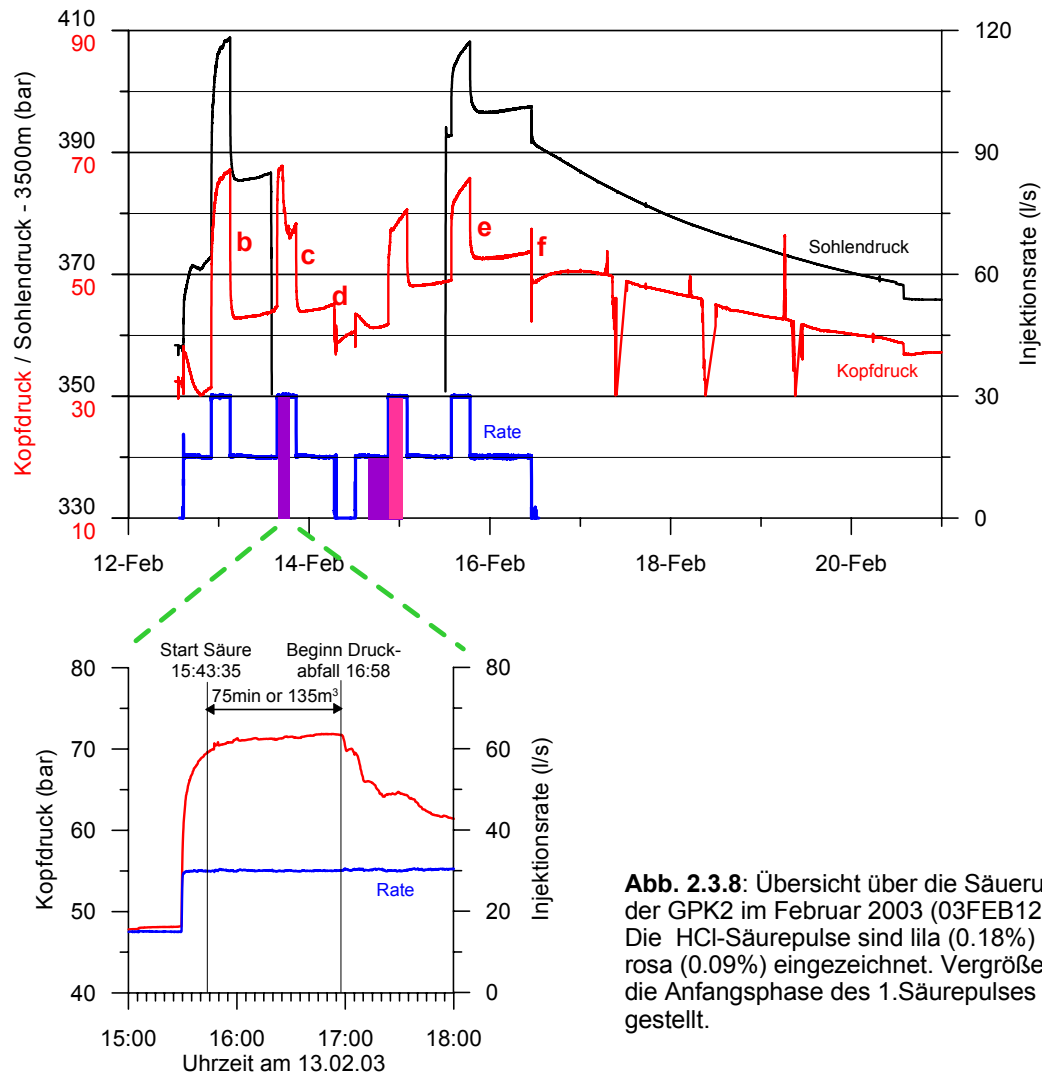


Abb. 2.3.8: Übersicht über die Säuerung der GPK2 im Februar 2003 (03FEB12). Die HCl-Säurepulse sind lila (0.18%) bzw. rosa (0.09%) eingezeichnet. Vergrößert ist die Anfangsphase des 1. Säurepulses dargestellt.

Die Bohrung der GPK2 wurde im Februar 2003 gesäuert (Test 03FEB12). Es wurden ca. 5800 m³ Wasser injiziert mit Fließraten von 15 und 30 l/s (Abb. 2.3.8). In 2 Pulsen wurde Salzsäure in einer Konzentration von ca. 0.2 % bzw. 0.1 % zugegeben. Insgesamt wurden ca. 1.4 t Salzsäure verpresst.

Auffallend ist der drastische Druckabfall unmittelbar nach Beginn des 1. Säurepulses. Der Druck fällt hierbei innerhalb kurzer Zeit um ca. 11 bar ab. Dieser Druckabfall setzt bereits nach Injektion von 135 m³ Säure ein. Das Bohrlochvolumen bis zur vermutlichen Hauptabflusszone in ca. 4700 m beträgt ca. 110 m³. Es wurden demnach lediglich ca. 20-30 m³ Säure in die Formation verpresst bis zu diesem Ereignis. Im Anschluss hieran steigt der Druck wieder allmählich an. Während des 2. Säurepulses ist keinerlei Druckabfall mehr zu beobachten. Im Gegenteil: Hier ist der charakteristische Druckverlauf „quasi“ identisch zum nachgeschalteten reinen Frischwasserpuls mit gleicher Rate. Bereits aus der qualitativen Betrachtung kann gefolgert werden, dass vermutlich nur der erste der beiden Säurepulse zu einer Erhöhung der Injektivität der Bohrung geführt hat. Dies wird noch deutlicher, wenn man die Druckänderungen vor der Säuerung, nach dem 1. Säurepuls und nach dem 2. Säurepuls gegenüber der Fließrate aufträgt (Abb. 2.3.9). In dieser Abbildung wurden jeweils die Druckänderungen bei Reduktion der Fließrate von 15 auf 0 l/s bzw. von 30 auf 15 l/s ausgewertet. Es besteht grundsätzlich eine nichtlineare Abhängigkeit des Drucks von der Fließrate. Dies weist auf Turbulenz hin. Die Druckänderungen vor der Säuerung und nach den beiden Säurestufen sind bei kleinen Fließraten (< 15 l/s) näherungsweise gleich. Offensichtlich hat sich für diese Fließraten die Säuerung kaum ausgewirkt. Erst für höhere Fließraten wird die Injektivitätserhöhung durch Säuerung deutlich. Weiterhin bestätigt die Abbildung, dass durch die 2. Säurestufe kaum eine weitere Verbesserung erzielt wurde.

Entsprechend der Abb. 2.3.9 ist die Bohrung GPK2 auch nach der Säurebehandlung durch ein dominant turbulentes Fließregime geprägt. Bei einer Fließrate von 15 l/s treten bohrlochnah bereits Druckverluste von 5 bar auf, während bei der doppelten Fließrate (30 l/s) die Druckverluste etwa das Vierfache (bis zu 20 bar) betragen. Extrapoliert man diese Angaben auf 50 l/s, so würde man dann mehr als 50 bar Druckverluste im unmittelbaren Umfeld der Bohrung erwarten. Allein aufgrund dieser Druckverluste ist es fragwürdig, ob Fließraten von deutlich mehr als 30 l/s hier mit akzeptablem Energieaufwand produziert werden können.

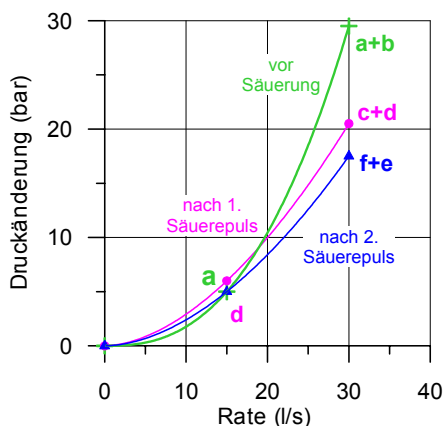


Abb. 2.3.9: Auftragung der Druckänderung (Kopfdruck) in Abhängigkeit von der Fließrate. Es werden jeweils die Druckänderungen nach Reduktion der Fließrate bzw. unmittelbar nach Shut in während des Injektions/Säuretests (03FEB12) ausgewertet. Die Punkte b bis f sind aus Abb. 2.3.7 zu entnehmen. Der Punkt a wurde aus der Einschlussperiode des Injektionstests zuvor entnommen.

Die obige Diskussion legt nahe, den positiven Effekt der Säuerung mit der Auflösung eines hydraulischen Widerstands in der Bohrung selbst zu erklären. In der Bohrung befinden sich 700 m Kabel, die abgerissene Sonde und vermutlich auch Gesteinsbrocken, die als Fließwiderstände Anlass geben können. Zudem liegt eine Verengung des Bohrlochs bei ca. 3900 m vor. Die Hauptargumente für diese These sind:

- Es wird nur ein singuläres Ereignis beobachtet, in dem der Druck rapide abfällt.
- Dieses Ereignis tritt sehr früh ein, d.h. wenn die Säure gerade die Formation erreicht hat.

Mit hoher Wahrscheinlichkeit kann man ausschließen, dass die Injektivitätsverbesserung bei hohen Fließraten durch die sukzessive Auflösung von Calcit auf den Rissoberflächen verursacht wird. Bei sukzessiver Auflösung von Calcit und der damit verbundenen Verbesserung der hydraulischen Leitfähigkeit der Risse würde man einen allmählichen Abfall des Drucks über einen längeren Zeitraum erwarten.

In der Abbildung 2.3.10 ist der Druckverlauf am Beginn der abschließenden Einschussperiode des Säuerungstests (03FEB12) analog zum Injektionstest 03JAN23 vor der Säuerung (Abb. 2.3.7) dargestellt. Da in beiden Fällen mit der gleichen Fließrate injiziert wurde (15 l/s), sind die beiden Einschussperioden miteinander vergleichbar. Der nahezu instantane Druckabfall beträgt ebenfalls ca. 3.0 bar, wie zuvor.⁵ Die Druckschwankungen sind hinsichtlich Dämpfung und Periode nicht unterscheidbar zum vorhergehenden Injektionstest und der mittlere Druckverlauf weist den gleichen Abfall (1.2 bar / 150 s) auf. Aus der letzteren Angabe wiederum folgt ein Bohrlochspeicher von ca. 2 m³/bar, identisch zur Situation vor der Säuerung.

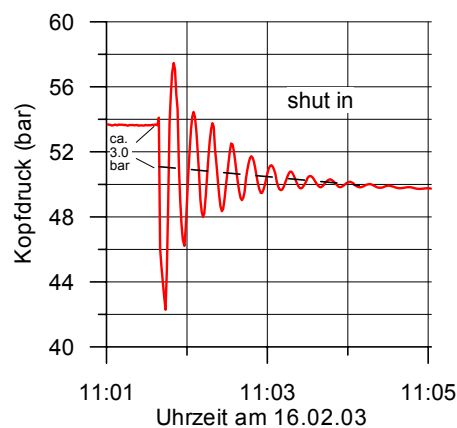


Abb. 2.3.10: Kopfdruck am Beginn der Einschussphase des Tests 03FEB12. Aus dem Anstieg der eingezeichneten Gerade (1.2 bar/150 s) folgt ein Bohrlochspeicher von ca. 2 m³/bar. Die Zeitdauer in der die Amplitude der Oszillationen auf die Hälfte fällt beträgt ca. 20 s.

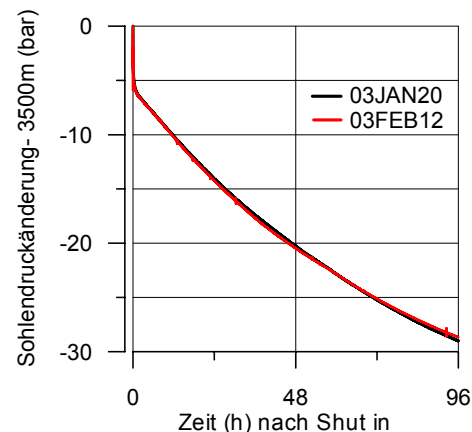


Abb. 2.3.11: Vergleich der Einschussphasen des Injektionstests vor der Säuerung (03JAN20) und der Einschussphase nach der Säuerung (03FEB12). Zuvor wurde jeweils über längere Zeit mit 15 l/s injiziert. Im Test 03JAN20 wurden 9365 m³ in 7 d verpresst und im Test 03FEB12 wurden 5820 m³ in 4 d injiziert.

⁵ Der nahezu instantane Druckabfall ist nicht identisch mit den in den Abbildungen 2.3.8 und 2.3.9 ausgewerteten Druckänderungen. In Abb. 2.3.8 und 2.3.9 werden längere Zeiträume nach der Reduktion der jeweiligen Fließraten betrachtet. Hier sind dann nicht nur ein rein hydraulischer Widerstand wirksam, sondern auch der Einfluß eines „nachgeschalteten“ Bohrlochspeichers und partiell der Formation.

In Abb. 2.3.11 sind die Einschussperioden (Sohlendruck, 3500 m) beider Tests normiert aufgetragen. Zwischen beiden Kurven sind keinerlei Unterschiede erkennbar. Dies zeigt eindeutig, dass zumindest bis zu einer Fließrate von 15 l/s, die jeweils zuvor injiziert wurde, die Säuerung quasi keinen Effekt hatte.

Die durch die Säuerung bewirkte Injektivitätssteigerung ist vermutlich auf eine Reduktion der Turbulenz zurückzuführen, die erst bei größeren Fließraten zum Tragen kommt.

2.3.5 Zusammenfassung GPK2

- Die initiale Produktivität der Bohrung GPK2 nach Vertiefen kann mit etwa 0.02 l/(s*bar) abgeschätzt werden (für kurze Zeiträume < 1 d).
- Bei der hydraulischen Stimulation der Bohrung GPK2 im Jahr 2000 wird bei Fließraten von bis zu 50 l/s ein Differenzdruck von ca. 150 bar nicht überschritten.
- Während der hydraulischen Stimulation wurden 31511 seismische Ereignisse registriert und hiervon 13986 lokalisiert. Es wurden hier somit deutlich mehr seismische Ereignisse registriert als jemals zuvor bei hydraulischen Stimulationen im oberen Reservoir.
- Die starke Seismizität als auch der relativ geringe Druck während der Stimulation deuten auf einen nahezu kritischen Gebirgsspannungszustand im tiefen Untergrund hin.
- Die Produktivität der Bohrung wurde durch die hydraulische Stimulation um das 25 fache auf ca. 0.5 l/(s*bar) gesteigert (Bestimmung der Produktivität für eine Zeitdauer von ca. 2 d).
- Eine anschließende Säuerung der Bohrung führt zu einer Reduktion des turbulenten hydraulischen Widerstands. Aufgrund der Turbulenz wird diese Reduktion erst bei hohen Fließraten (> 15 l/s) erkennbar. Die hydraulischen Tests mit einer Fließrate von 15 l/s vor und nach der Säuerung zeigen keinerlei Unterschiede im hydraulischen Verhalten. Vermutlich wird durch die Säuerung ein Fließwiderstand in der Bohrung selbst reduziert. Die Säuerung hat somit zu einer Produktivitätssteigerung der Bohrung insbesondere für relevante, hohe Fließraten geführt. Die Auflösung von Kalzit auf Rissoberflächen als Ursache ist sehr unwahrscheinlich.
- Auch nach der Säuerung ist die Bohrung weiterhin durch ein turbulentes Fließregime gekennzeichnet. Bei einer Fließrate von 30 l/s treten bereits ca. 20 bar Druckverluste im unmittelbaren Umfeld der Bohrung auf. Es ist allein aufgrund dieser Situation fragwürdig, ob Fließraten von mehr als ca. 30 l/s aus dieser Bohrung produziert werden können. Für die genauere Beurteilung der bohrlochnahen Widerstände wäre es wünschenswert, einen Lifttest in mehreren Stufen durchzuführen, um Fließraten bis zu 50 l/s zu produzieren.
- Die Bohrung ist nach der Säuerung durch einen turbulenten Skin, einen großen Bohrlochspeicher (2 m³/bar) und vermutlich durch einen sehr gut leitfähigen Riss gekennzeichnet (formationslineares Fließregime ?!).
- In allen Injektionstests wird niemals ein konstanter Druck erreicht. Es werden demnach keine äußeren Begrenzungen des Reservoirs sichtbar (weder Konstantdruckgrenze noch hydraulisch abdichtende Strukturen).

2.4. Die Bohrung GPK3

2.4.1 Die Bohrung GPK 3 vor der Stimulation

Die Bohrung GPK3 wurde zwischen Juni 2002 und November 2002 bis auf eine Endteufe von 5031 m (TVD)⁶ abgeteuft. Während des Abteufens der Bohrung wurden in der späteren unverrohrten Bohrlochstrecke insbesondere bei ca. 4760 m (MD) massive Spülungsverluste beobachtet. Die Zone der Spülungsverluste korrespondiert mit einer massiven Kluftzone, die im UBI-Log nachgewiesen werden konnte (Abb. 2.4.1).

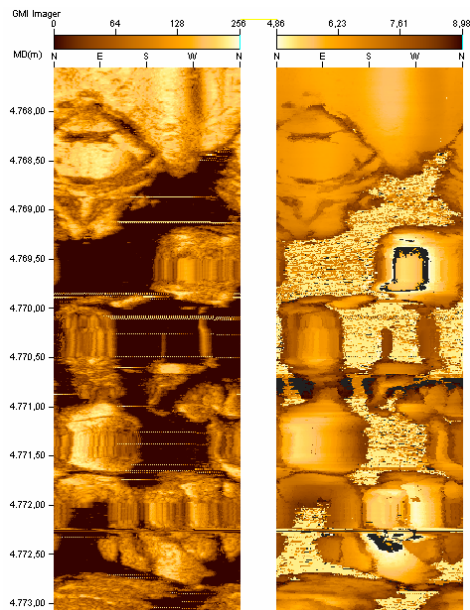


Abb. 2.4.1: Aufnahme einer Kluftzone, der Hauptabflusszone, im UBI – Log (Ultrasonic Borehole Imager) zwischen 4768 und 4773 m (MD) bzw. 4700-4705 m (TVD) .

Vor den Stimulationsoperationen wurde leider kein Test speziell zur hydraulischen Charakterisierung der Bohrung durchgeführt. Einige Informationen lassen sich jedoch aus einem Injektionstests in die GPK2 und anschließender Produktion aus der GPK3 ableiten (Abb. 2.4.2).

In diesem Test wurde am Ende der Injektion in die GPK2 mit der Produktion aus der GPK3 begonnen. Die beiden Einschlussphasen, beginnend am 19.März bzw. am 20.März, liefern die einzigen Hinweise zur Abschätzung der Produktivität der Bohrung vor der Stimulation. Nach Beendigung der Produktion mit einer Fließrate von jeweils ca. 4 l/s steigt der Druck um 12 bzw. 14 bar an. Hieraus ermittelt man eine (scheinbare) Produktivität der Bohrung von ca. 0.3 l/(s*bar), wenn man davon ausgeht, dass der beobachtete Druckanstieg um 12/14 bar rein hydraulisch bedingt ist und noch nicht durch die Abkühlung der Bohrung nach Beendigung der Produktion beeinflusst ist. Tatsächlich ist aber der beobachtete Druckverlauf in der Einschlussphase eine Überlagerung des Druckanstiegs im Reservoir und der Änderung des hydrostatischen Drucks in der Bohrung. Letzterer wirkt einem Druckanstieg am Bohrlochkopf in der Einschlussphase entgegen und führt so zu einer oberen Abschätzung der Produktivität.

Nachfolgende Überlegung soll eine bessere Abschätzung der Produktivität liefern: Während der Produktion mit 4 l/s am 20.03.03 wurde ein Temperaturlog gefahren, welches eine mittlere Temperatur im Bohrloch von 155°C anzeigt (Hettkamp et al., 2003). Im Ruhezustand

⁶ Die Differenz zwischen MD und TVD beträgt 68 m in der offenen Bohrlochstrecke der GPK3.

hingegen weist die Bohrung eine mittlere Temperatur von 130°C auf (siehe Temperaturlogs in Kap 2.2). Es ist plausibel anzunehmen, dass sich die Bohrung innerhalb von 3 Tagen der Einschussphase um ca. 20°C, von 155 auf 135°C, abkühlt. Damit wird angenommen, dass sich die Temperaturstörung in der Bohrung innerhalb von 3 Tagen um ca. 80 % wieder abbaut. (Die Produktionsphase dauerte insgesamt 6.5 Tage mit einer Unterbrechung von ca. 1 Tag). Hieraus ermittelt man eine Änderung der Dichte um 1.9 % bei einem mittleren Druck in der Wassersäule von 230 bar (IAPWS, 1995). Hieraus folgt, bezogen auf einen mittleren Reservoirdruck von 460 bar, eine absolute Druckänderung der hydrostatischen Säule im Bohrloch von 9 bar. Der beobachtete Druckabfall nach Durchschreiten des Maximums beträgt jedoch nur ca. 4 bar für die Einschussphase beginnend ab 20.03.03. Hieraus folgt, dass der relevante Reservoirdruck in der Einschussphase über die beobachteten 14 bar hinaus, um weitere 5 bar (9-4) gestiegen sein muss. Somit beträgt die gesamte Druckänderung in Reservoirtiefe ca. 20 bar innerhalb von 3 Tagen nach Shut in. Die Produktivität der Bohrung GPK3 liegt damit im Bereich von ca. 0.2 l/(s*bar), (20 bar/4 l/s) für eine Zeitdauer von ca. 3 Tagen.

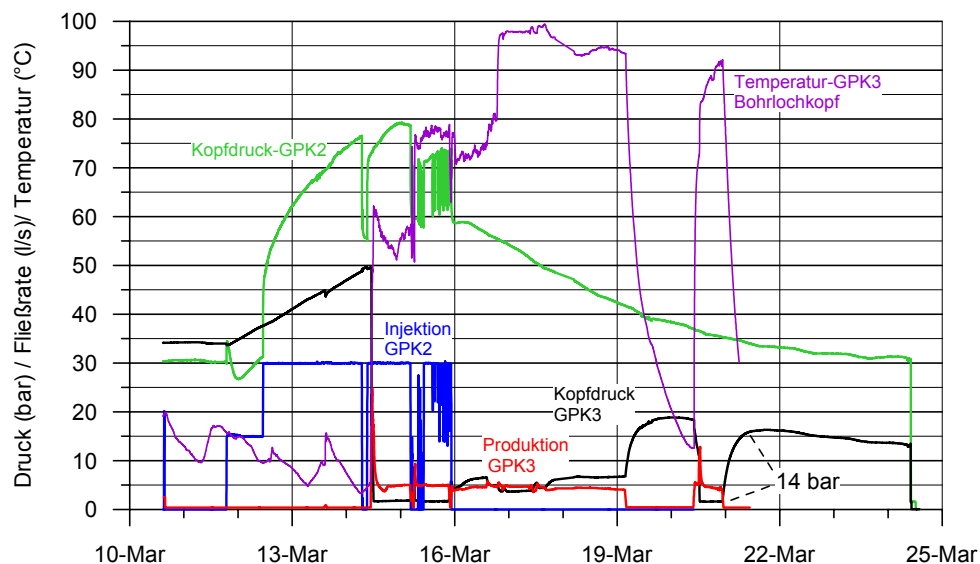


Abb. 2.4.2: Übersicht über den Test 03JAN10 im März 2003 (Injektion in GPK2 und anschließende Produktion aus GPK3).

Im Unterschied zur Bohrung GPK2 weist die Bohrung GPK3 initial bereits eine beachtliche Produktivität auf, um etwa den Faktor 10 höher als GPK2 vor der Stimulation.

Ein Zufluss während der Produktion am 20.03.03 wurde durch eine Flowmeterbefahrung nahezu ausschließlich aus der oben dargestellten Zone bei ca. 4760 m (MD) nachgewiesen (siehe auch nächsten Abschnitt).

2.4.2 Hydraulische Stimulation der Bohrung GPK 3

Die Bohrung GPK3 wurde im Mai/Juni 2003 hydraulisch stimuliert. Es wurden hier insgesamt 34000 m³ Wasser injiziert mit einer maximalen Fließrate von 90 l/s (Abb. 2.4.3). Aus technischen Gründen konnten jedoch nur „Pulse“ mit einer Fließrate von knapp 90 l/s realisiert werden, maximal für eine Dauer von knapp 3 h. Zum Beginn der Stimulation wurde NaCl gesättigte Lauge injiziert, um möglichst tiefe Bereiche des Reservoirs zu stimulieren.

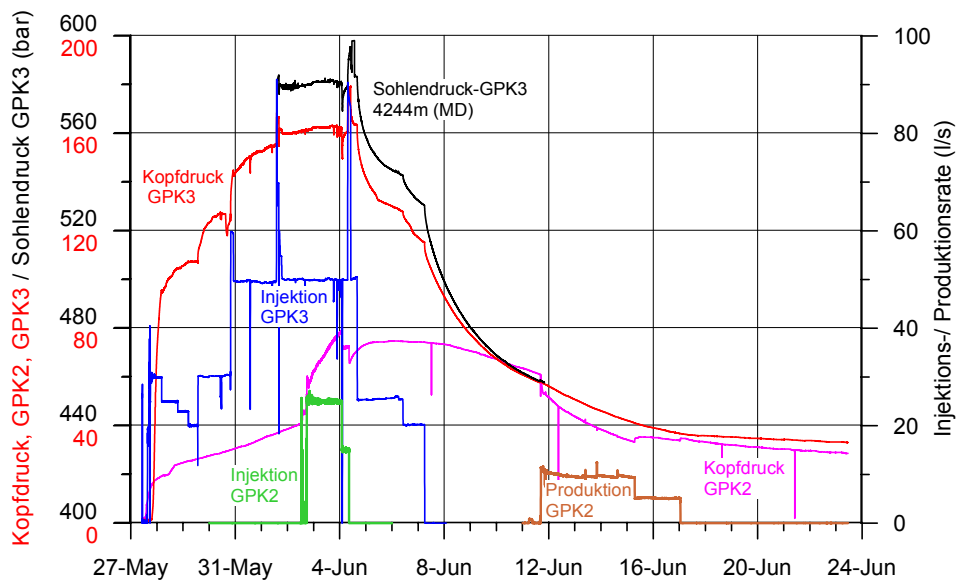


Abb. 2.4.3: Übersicht über die hydraulische Stimulation der Bohrung GPK3 im Mai/Juni 2003 (Test 03MAY27). Der Sohlendruck wurde am Beginn des Tests in einer anderen Messteufe (4540 m-MD) gemessen, hier jedoch aus Gründen der Übersicht nicht eingezeichnet.

Während der Stimulation wurde eine Phase von 1.5 Tagen zwischengeschaltet, in der zusätzlich in die Bohrung GPK2 injiziert wurde. Die duale Injektion diente insbesondere der Verbesserung der hydraulischen Verbindung zwischen beiden Bohrungen.

Der Druck steigt während der Stimulation deutlich langsamer an als bei der Stimulation der Bohrung GPK2 im Jahr 2000. Dies deutet hier auf eine große Speicherkapazität der Bohrung bereits im Ausgangszustand hin und muss im Zusammenhang mit der Abflusszone bei ca. 4760 m (MD) gesehen werden. Der Druck steigt während der Stimulation quasi kontinuierlich an. Die einzelnen Injektionsstufen setzen sich hinsichtlich des Druckniveaus deutlich voneinander ab als Hinweis auf signifikante Reibungsdruckverluste. Es wird niemals ein Abfall des Drucks während einer Stimulationsphase beobachtet wie teilweise bei der Stimulation der GPK2 im Jahr 2000 (Abb. 2.3.2). Der Kopfdruck steigt am Ende bis auf ca. 160 bar an und ist damit etwas höher als bei der Stimulation der Bohrung GPK2.

Es wurden im Verlauf der Stimulation mehrere Flowmeterlogs gefahren (Abb. 2.4.4). Es zeigt sich, dass der überwiegende Volumenanteil (70-80 %) bei ca. 4760 m (MD) in die Formation eindringt. Bei hohen Fließraten (30 l/s bzw. 50 l/s) sind 2 zusätzliche Abflusszonen bei 4950 m und bei ca. 5000 m (MD) erkennbar, die zu ca. 5 % (4950 m) bzw. bis zu 15 % (5000 m) zum Gesamtabfluss beitragen. Interessant ist hier, dass der Beitrag dieser Zone im Verlauf der Stimulation zunimmt. Demnach werden unterhalb der dominanten Abflusszone 2 weitere Bereiche aktiviert. Jedoch können die Abflusszonen auch druckabhängig reagieren, so dass diese dann nur bei hohen Fließraten (hoher Druck) aktiv wären.

Der Abfall der Fließrate unmittelbar unterhalb der Verrohrung ist vermutlich auf die Vergrößerung des Bohrlochs in diesem Bereich und nicht auf einen Zufluss zurückzuführen.

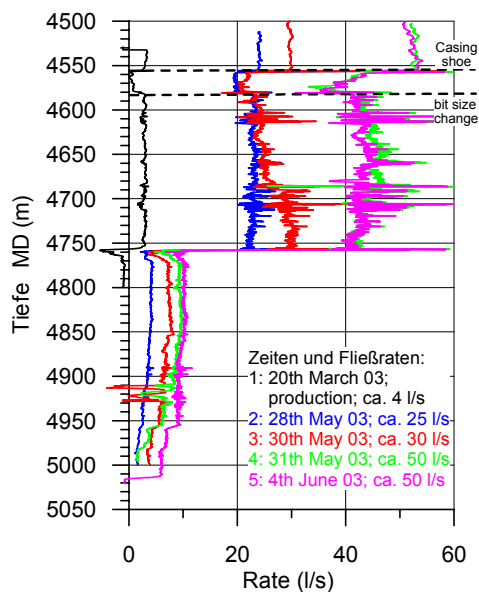


Abb. 2.4.4: Flowmeterlogs in der Bohrung GPK3 während der Produktion am 20.03.03 und der hydraulischen Stimulation im Mai/Juni 2003.

Während der Stimulation wurden mehr als 90000 seismische Ereignisse registriert. Hiervon konnten ca. 8500 Ereignisse lokalisiert werden. Die höchste seismische Aktivität mit bis zu 550 Ereignissen pro Stunde wurde während der kurzzeitigen Stimulationsphasen mit 90 l/s beobachtet.

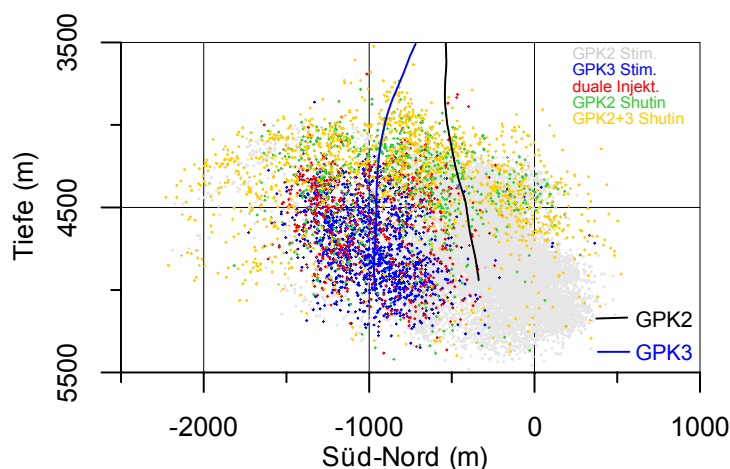


Abb. 2.4.5: Seismische Ereignisse während der Stimulation der GPK3. Grau: GPK2 im Jahr 2000; Blau: Stimulation bis zur dualen Injektion; Rot: duale Injektion; Grün: nachfolgende Einschussphase der GPK2; Gelb: Nachfolgende Einschussphase beider Bohrungen.

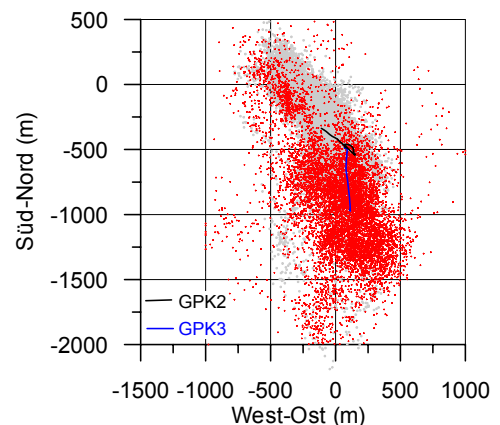


Abb. 2.4.6: Alle seismischen Ereignisse während der Stimulation der GPK3 in Aufsicht (rot) im Vergleich zur Stimulation der GPK2 im Jahr 2000 (grau).

Aus der Abbildung 2.4.5 sind deutlich die verschiedenen Phasen der Stimulation erkennbar. Zunächst konzentrieren sich die Ereignisse im Umfeld der Bohrung GPK3 (blaue Punkte). Es wird offensichtlich das nähere Umfeld der Bohrung stimuliert. Auch während der nachfolgenden dualen Stimulation sind die Ereignisse wesentlich auf das Umfeld der Bohrung GPK3 konzentriert (rote Punkte). Eine verstärkte Konzentration der Ereignisse zwischen den Bohrungen als Anzeichen einer Stimulation des Bereichs zwischen den Bohrungen ist nicht eindeutig erkennbar. Nach Beendigung der dualen Stimulation und

Fortsetzung der Injektion in die Bohrung GPK3 treten die seismischen Ereignisse vermehrt im größeren Umfeld der GPK3 auf und streuen stärker. Tendenziell ist jetzt eine Aufwärtsbewegung der Ereignisse zu beobachten. Die deutliche Überlappung der seismischen Ereignisse der Bohrungen GPK2 und GPK3 weist darauf hin, dass die hydraulische Verbindung beider Bohrung durch die Stimulation der GPK3 verbessert wurde. Insbesondere in der Einschlussphase wurden mehrere starke seismische Ereignisse beobachtet. Das stärkste seismische Ereignis hatte eine Magnitude von $M=2.9$ und bot den Hauptanlass für die schnellere Druckentlastung des System durch Produktion aus der Bohrung GPK2 im Zeitraum 11.06.03 – 17.06.03.

2.4.3 Säuerung der Bohrung GPK 3

Die Bohrung GPK3 wurde im Rahmen des Zirkulationstests zwischen GPK2 und GPK3 im Juni/Juli 2003 gesäuert.

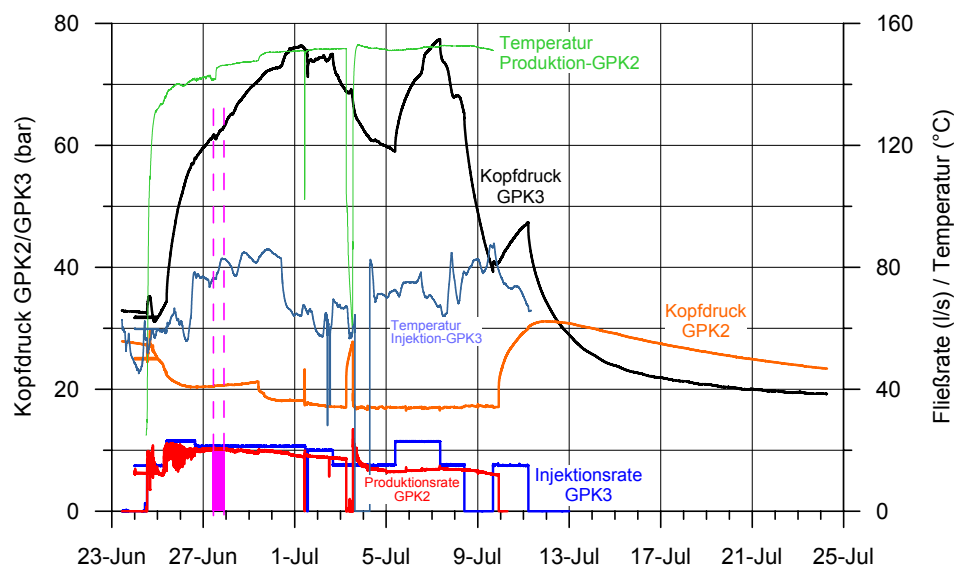


Abb. 2.4.7: Übersicht über den Zirkulationstest im Juni/Juli 2003 (03JUN23): Injektion in GPK3 und Produktion aus GPK2. In lila ist der Zeitraum der Säuerung (27.06.: 10:50 bis 23:00 Uhr) mit einer HCl-Konzentration von ca. 0.45 % eingezeichnet. Die Dichte des produzierten Fluids betrug ca. 1.035 g/cm^3 (25°C) und die des injizierten Wassers 1.02 ± 0.01 bei der aufgezeichneten Temperatur (Zeitraum 24.06. und 8.07.03).

Über einen Zeitraum von ca. 12 h wurde Salzsäure mit einer Konzentration von 0.45 % während der Injektion mit 20 l/s zugegeben. Die Konzentration der Säure war damit um ca. den Faktor 2 größer als bei der Säurebehandlung der GPK2. Insgesamt wurden ca. 3 t HCl in die Bohrung verpresst. In Abb. 2.4.7 ist der Zeitbereich markiert, in dem die Säure zugesetzt wurde. Der Kopfdruck ändert sich während der Säureinjektion nicht signifikant. Der Anstieg des Drucks vor und nach der Säureinjektion ist nicht unterscheidbar. Die kleine Druckabsenkung (um ca. 1 bar) zum Beginn der Säureinjektion ist vermutlich auf die Erhöhung der Dichte infolge der HCl-Zugabe zurück zu führen. Aus dem Druckverlauf ergeben sich somit keine eindeutigen Hinweise auf einen positiven Effekt der Säuerung. Leider wurde zwischen der hydraulischen Stimulation und der Säuerung der GPK3 kein hydraulischer Test zur Bestimmung der Produktivität durchgeführt. Es ist somit nicht möglich,

eine Trennung der Wirkung beider Operationen vorzunehmen. Weiterhin ist bedauerlich, dass die Säuerung in einer Phase sich ohnehin stark ändernden Kopfdrucks durchgeführt wurde. Bei einem stabilen Bohrlochkopfdruck wäre eher eine unmittelbare Aussage über die Wirkung der Säure möglich gewesen.

Der Zirkulationstest zwischen den Bohrungen GPK2 und GPK3 nach beider Stimulation bestätigt eine hydraulische Kommunikation zwischen den Bohrungen. Aus GPK2 konnte längere Zeit mit einer Fließrate von ca. 15 l/s allein durch Ausnutzung des natürlichen Auftriebs produziert werden. Nach zwischenzeitlichem Stopp der Injektion (8.07. – 9.07.03) wird ein deutlicher Abfall der Produktionsfließrate beobachtet. Dies zeigt, dass die Produktion der GPK2 und die hier beobachtete Produktivität wesentlich durch die Injektion der GPK3 beeinflusst werden. Die Kommunikation der beiden Bohrungen ist aber nicht ausreichend für die Zirkulation von Fließraten von bis zu 50 l/s, wie insbesondere aus dem hohen Kopfdruck der Bohrung GPK3 entnommen werden kann.

Aus dem Druckanstieg der GPK2 nach Beendigung der Produktion am 9.07.05 liest man eine scheinbare Produktivität der Bohrung GPK2 von ca. 1 l/(s*bar) ab (ca. 15 bar Druckanstieg nach einer Produktion von ca. 15 l/s). Diese Angabe steht im Widerspruch zur vorab getroffenen Abschätzung (Kap. 2.3.3) der Injektivität von ca. 0.5 l/(s*bar). Dieser Widerspruch löst sich jedoch auf, wenn man bedenkt, dass im hier diskutierten Test nur der Bohrlochkopfdruck ausgewertet wird. Die Temperaturabnahme im Bohrloch nach Beendigung der Produktion führt jedoch zu einer Zunahme des hydrostatischen Drucks im Bohrloch, wodurch der Bohrlochkopfdruck tendenziell sinkt. Die Produktivität basierend auf der Auswertung des Bohrlochkopfdrucks überschätzt hier um einen Faktor 2 die tatsächliche Produktivität, die mit downhole-Messungen bestimmt wurde.

Diese Betrachtung verdeutlicht den Einfluss der Temperaturänderung im Bohrloch auf die Auswertung des Bohrlochkopfdrucks und stützt zusätzlich die in Kap. 2.4.1 gemachte Korrektur der initialen Produktivität der Bohrung GPK3 von ca. 0.3 l/(s*bar) auf ca. 0.2 l/(s*bar).

2.4.4 Hydraulische Charakterisierung der Bohrung GPK3

Nach der hydraulischen Stimulation und der Säuerung der Bohrung wurde im August 2004 ein Stufeninjektionstest mit Fließraten von 12, 18 und 24 l/s durchgeführt (Abb. 2.4.8). Dieser Test charakterisiert die Bohrung im aktuellen Zustand und wird hier zur detaillierten hydraulischen Interpretation genutzt.

Zur Abschätzung der Permeabilität im Umfeld der Bohrung kann zunächst die Druckantwort an der Bohrung GPK2 herangezogen werden. Hierbei wird angenommen, dass die Bohrungen GPK2 und GPK3 wesentlich durch die Störungszone, die beide Bohrungen bei ca. 4760 m (MD) schneidet, hydraulisch verbunden sind und dass diese Störungszone das hydraulische Verhalten beider Bohrungen dominiert.

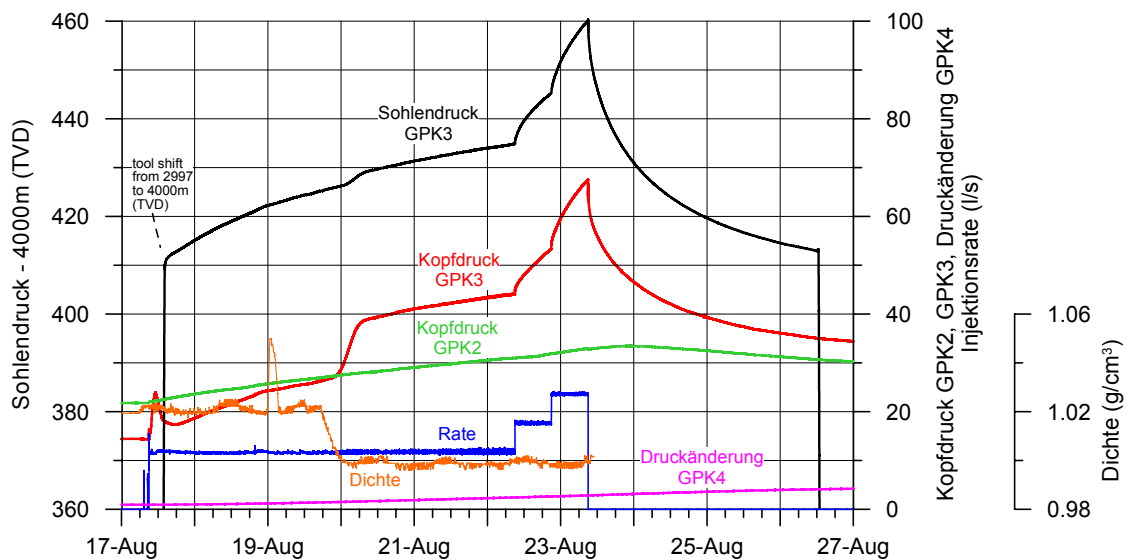


Abb. 2.4.8: Übersicht über den Injektionstest 04AUG17 an der Bohrung GPK3. In der Bohrung GPK4 wurde die Wasserspiegeländerung gegenüber einer Referenztiefe von ca. 60 m unter Gelände gemessen und hier als Druckänderung aufgetragen. Die Bohrung GPK2 hingegen war aktiviert und es konnte der Bohrlochkopfdruck gemessen werden. Die Dichte wurde im 300 m³-Vorratstank unmittelbar vor der Injektion kontinuierlich erfasst.

Aus Abb. 2.4.8 entnimmt man, dass das Druckmaximum die Bohrung GPK2 ca. 15 h nach Durchschreiten des Druckmaximums (Ende der Injektion) an der Injektionsbohrung erreicht. Bei bekanntem Speicherkoeffizienten der Störungszone kann hieraus näherungsweise die Permeabilität zwischen den Bohrungen abgeschätzt werden (siehe z.B. Streltsova, 1988, S. 80):

$$r \approx 2 \cdot \sqrt{D \cdot t} = 2 \cdot \sqrt{\frac{k}{S \cdot \mu} \cdot t}$$

mit: $S = n \cdot c_t$

hier: r: Abstand der Bohrungen (600 m)
t: Zeitdauer bis zur Druckantwort an GPK2 (15 h)
S: Speicherkoeffizient ($3 \cdot 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$)
n: Porosität (0.03)
 c_t : totale Kompressibilität ($1 \cdot 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$)
 μ : Viskosität ($2 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$)

Durch Umstellen dieser Beziehung nach k erhält man eine Abschätzung der Permeabilität von ca. $k \approx 10^{-14} \text{ m}^2$ (0.01 D). In dieser Abschätzung wird die Formation zwischen den Bohrungen als homogenes Medium angenommen. Tatsächlich befindet sich im Umfeld beider Bohrungen (GPK2 und GPK3) aber ein stimulierter Bereich mit einer höheren Permeabilität. Dieser Wert $k \approx 10^{-14} \text{ m}^2$ (0.01 D) kann daher tendenziell als obere Abschätzung für die Permeabilität außerhalb der stimulierten Bereiche zwischen den Bohrungen GPK2 und GPK3 angesetzt werden. Der angegebene Speicherkoeffizient ist ein typischer Wert für Granit und die Viskosität wird für salinares Wasser bei ca. 200°C eingesetzt.

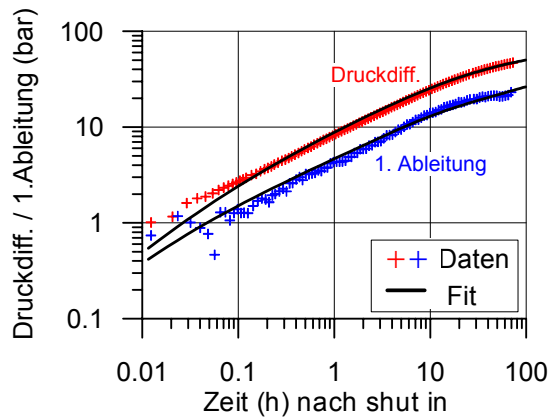


Abb. 2.4.9: Doppeltlogarithmische Darstellung von Sohlendruck (Druckdifferenz bzgl. des Einschlussdruck) und 1. Ableitung des Drucks für die Einschussphase nach der Injektion.

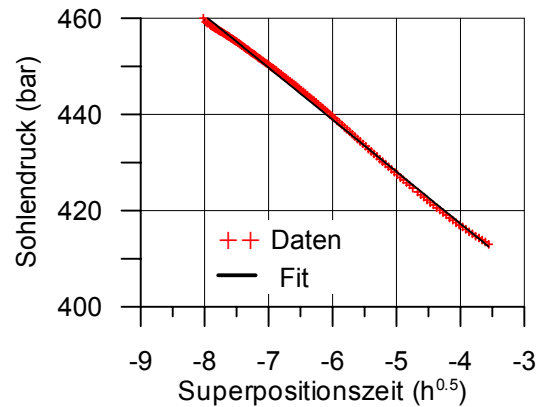


Abb. 2.4.10: Darstellung des Sohlendrucks gegenüber der Superpositionszeit, gebildet aus Wurzel aus der Zeit. Der Anstieg der Kurve beträgt $10.6 \text{ bar} \cdot h^{-0.5}$ ($1.8 \cdot 10^{+4} \text{ Pa} \cdot s^{-0.5}$).

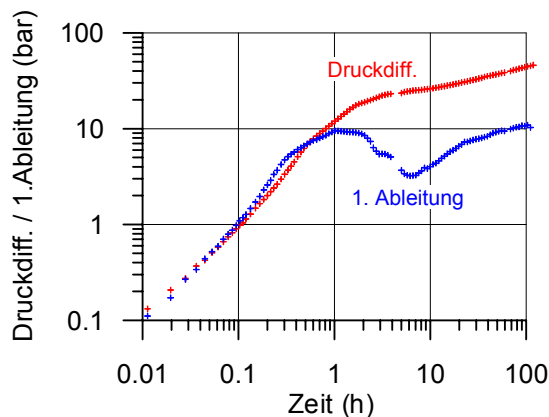


Abb. 2.4.11: Doppeltlogarithmische Darstellung von Sohlendruck (Druckdifferenz) und 1. Ableitung des Drucks für die 1. Injektionsphase (12 l/s).

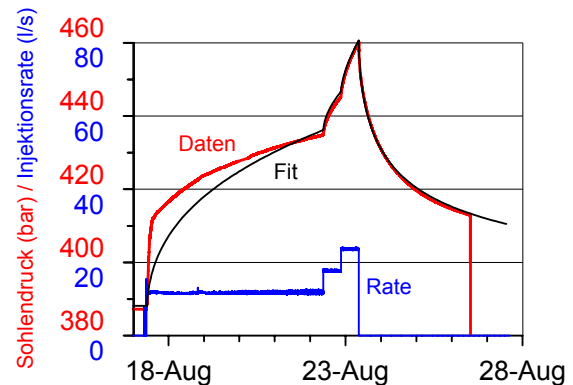


Abb. 2.4.12: Druckverlauf und Fitkurve, abgeleitet aus der Anpassung des Druckverlaufs für die Einschussphase aus der doppeltlogarithmischen Darstellung (siehe Abb. 2.4.9).

Zur hydraulischen Interpretation wird vorrangig die Einschussphase betrachtet. Sowohl in der doppeltlogarithmischen Darstellung als auch in der Darstellung gegenüber der Superpositionszeit, gebildet aus der 2. Wurzel der Zeit, zeigt sich hier eine Proportionalität des Drucks zur Wurzel der Zeit. Dies ist ein klarer Hinweis auf ein lineares Fließregime. Die Bohrung wird wahrscheinlich von einem hochleitfähigen Riss gekreuzt. In diesem Riss treten keine Druckverluste auf und senkrecht zum Riss wird das Wasser in die Formation gespeist. Die charakteristische Abhängigkeit von der Wurzel der Zeit wird durch ein formationslineares Fließregime aus dem Riss in die Formation verursacht.

Die Anpassung für die Einschussperiode liefert auch eine gute Übereinstimmung für die 2. und 3. Injektionsphase (Abb. 2.4.12). Hingegen ist eine deutliche Abweichung für die erste Injektionsphase erkennbar. Die erste Injektionsphase ist zum einen durch einen linearen Druckanstieg, der auf einen großen Bohrlochspeicher hindeutet, charakterisiert. Weiterhin wirkt ein Skin, d.h. ein bohrlochnaher hydraulischer Widerstand, erkennbar an dem Peak in der 1. Ableitung (Abb. 2.4.11). Das hydraulische Verhalten kann hier analog zur Einschussperiode mit einem formationslinearen Fließregime erklärt werden, dem ein Skin überlagert ist. Dieser Skin wird jedoch offensichtlich im Verlauf der Injektion abgebaut,

wodurch eine zunehmend bessere Übereinstimmung zwischen der Fitkurve und den Messwerten (Abb. 2.4.12) entsteht. Die Ursache für den Skin und dessen Verschwinden ist nicht klar. Es kann nur vermutet werden, dass kleine Partikel in den Klüften zu einer partiellen Blockade geführt haben, die durch die Injektion beseitigt wurde. Es wird daher angenommen, dass die hydraulischen Eigenschaften der Bohrung GPK3 durch die Einschlusskurve repräsentiert werden. Aus der ersten Injektionsphase kann jedoch zusätzlich der Bohrlochspeicher bestimmt werden. (In der Einschlussphase ist der Bohrlochspeicher nicht eindeutig bestimmbar, da hier aufgrund der unmittelbar, d.h. ohne Skin, an die Bohrung angeschlossenen Formation sofort das formationslineare Fließregime dominiert). Ein Bohrlochspeicher kann im Verlauf des Tests, d.h. mit Zunahme des Drucks, nur größer werden kann. Daher ist die Annahme berechtigt, zumindest den in der 1. Injektionsphase beobachteten Bohrlochspeicher auch in der Einschlussphase anzusetzen. Für die hydraulische Interpretation wird folgendes konzeptionelles Modell zugrunde gelegt. Die Bohrung schneidet eine Störungszone bei ca. 4760 m (MD). Innerhalb dieser Störungszone existiert ein hochdurchlässiger Riss, der z.B. durch Scherung an den Begrenzungen der Störungszone offen gehalten wird. Der Riss selbst kann ein Zugriss sein, der sich entlang einer Schwächezone entwickelt hat (Abb. 2.4.13). Die Mächtigkeit der Störungszone wird hier mit 50 m angenommen.

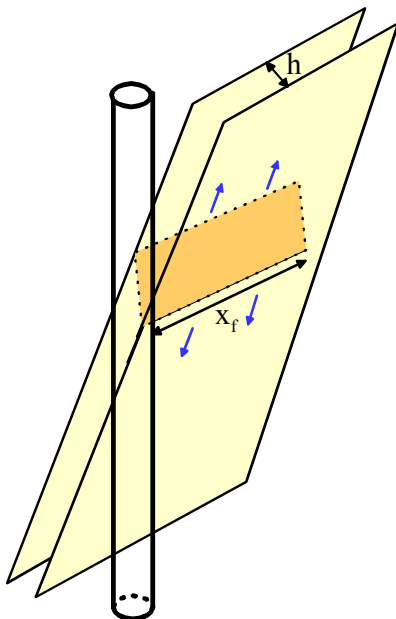


Abb. 2.4.13: Konzeptionelle Vorstellung zur Störungszone und Rissgeometrie an der Bohrung GPK3. Der Riss breitet sich innerhalb der Störungszone aus (h : Mächtigkeit der Störungszone – entspricht gleichzeitig der effektiven Risshöhe; x_f : Risslänge).

Auf der Basis dieser konzeptionellen Vorstellung werden durch Anpassung der Einschlussphase (Abb. 2.4.9) folgende Parameter erhalten:

Bohrlochspeicher:	$C = 2.1 \text{ m/bar}$
Transmissibilität (Störungszone):	$T = 4.7 \cdot 10^{-14} \text{ m}^3$
Permeabilität	$k = 0.9 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
Risslänge:	$x_f = 510 \text{ m}$
Rissleitfähigkeit:	infinite
Reservoirdruck (4000 m, TVD):	388 bar

Folgende konstante Eingangsparameter werden angenommen:

Bohrlochradius:	$r = 0.11 \text{ m}$
Mächtigkeit der Störungszone:	$h = 50 \text{ m}$
Porosität:	$n = 0.05$
Totale Kompressibilität:	$c_t = 1 \cdot 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$
Viskosität:	$\mu = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

Mit diesen Fitparametern kann eine nahezu perfekte Anpassung des Druckverlaufs für die Einschussphase erzielt werden. Die hieraus ermittelte Permeabilität der Störungszone von ca. 1 mD ist um eine Größenordnung geringer als die Abschätzung aus der Interferenz zur Bohrung GPK2 ergibt.

Bei der Interpretation muss beachtet werden, dass insbesondere für die Bestimmung der Transmissibilität (und damit der Permeabilität) das geringfügige Abflachen der Druckkurve und der 1.Ableitung für große Zeiten in Abb. 2.4.9 ausgewertet wird. Die Bestimmung der Transmissibilität ist somit sehr unsicher. Allerdings kann jedoch aus dem Niveau der 1. Ableitung des Drucks zumindest ein Maximalwert für die Transmissibilität abgeleitet werden (Abb. 2.4.9). Man entnimmt hieraus $T_{\max} < 2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^3$.

Aus dieser Sicht ist es sinnvoll, die weniger sensitive Darstellung gegenüber der Superpositionszeit zu betrachten (Abb. 2.4.10). Der hier beobachtete Anstieg wird sich kaum von dem in Formationstiefe anzutreffenden unterscheiden. Unter Annahme von formationslinearem Fließen kann aus dem Anstieg der Geraden die Permeabilität der Störungszone oder Rissfläche bestimmt werden, sofern einer dieser beiden Parameter als bekannt angenommen wird. Für den Anstieg m gilt (Gringarten et al., 1974):

$$m = \frac{q}{A} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{S \cdot k \cdot \pi}} = 1.8 \cdot 10^{+4} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-0.5}$$

mit q : Injektionsrate (hier 24 l/s)
 A : Rissfläche
 S : Speicherkoeffizient ($5 \cdot 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$)
 μ : Viskosität ($2 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$)

Behält man eine konstante Mächtigkeit ($h=50 \text{ m}$) bei, so kann man bei realistischer Variation der Permeabilität (k) der Störungszone die effektive Rissfläche (A) abschätzen:

$$k = 10^{-15} \text{ m}^2 (T = 5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^3) \rightarrow A = 47000 \text{ m}^2 (x_f = 470 \text{ m})$$

$$k = 4 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2 (T_{\max} = 2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^3) \rightarrow A = 24000 \text{ m}^2 (x_f = 240 \text{ m})$$

Auf der Basis dieses konzeptionellen Modells variiert die Rissfläche, über die das Fluid in die Störungszone eindringt, demnach zwischen ca. 50000 und 25000 m^2 . Die Anpassung der Druckkurve entsprechend Abb. 2.4.9 liefert tendenziell einen unteren Grenzwert für die Transmissibilität und einen oberen für die effektive Rissfläche.

Eine weitergehende Betrachtung und Eingrenzung dieser Parameter insbesondere unter Einbeziehung einer detaillierten Analyse der Interferenzttests steht noch aus.

Unabhängig von der genauen Parameteranalyse kann aber die Produktivität der Bohrung aufgrund dieses Tests gut bestimmt werden. Nach einer Zeitdauer von 2 d beträgt die Produktivität 0.35 l/(s*bar).

Auch für diesen Test ist es lohnenswert, den unmittelbaren Beginn der Einschussperiode näher zu betrachten (Abb. 2.4.14). Hier treten ausgeprägte Oszillationen auf, mit einer deutlich geringeren Dämpfung als an der Bohrung GPK2. Die Amplitude der Oszillationen

klingt in etwa 45-60 s auf die Hälfte ab. Offensichtlich handelt es sich bei der Bohrung GPK3 um ein System mit einer sehr geringen Steifigkeit. Dies korrespondiert mit einem sehr großen Bohrlochspeicherkoeffizienten von etwa $5 \text{ m}^3/\text{bar}$, abgeleitet aus dem mittleren Druckabfall in den ersten Minuten nach Shut in. Die Abschätzung des Bohrlochspeichers aus Abb. 2.4.14 deutet sogar auf einen noch größeren Bohrlochspeicher hin als er aus der hydraulischen Analyse der ersten Injektionsphase gewonnen wird (Abb. 2.4.11).

Der große Bohrlochspeicher und die ausgeprägten Druckoszillationen stimmen qualitativ mit der Vorstellung überein, dass ein Riss mit großer Fläche und sehr guter hydraulischer Leitfähigkeit die Bohrung schneidet. Unter diesen Bedingungen wird der große Bohrlochspeicher durch die Änderung der Rissweite bei Druckänderung bestimmt und die Steifigkeit des Risses ist aufgrund der großen Rissfläche sehr gering. Möglicherweise ist die Normalspannung, die auf die Rissfläche wirkt, sehr gering, da die Spannungen innerhalb der Störungszone weitgehend abgebaut sein können. Dies würde den großen Bohrlochspeicher auch deutlich unterhalb des kritischen Drucks für die Rissausbreitung erklären.

Im Anschluss an den Injektionstest wurde ein Produktionstest durchgeführt, um die Bohrung von in der Bohrung verbliebenem Bohrklein zu „säubern“. Der Druckanstieg in der folgenden Einschlussphase täuscht auch hier eine Produktivität von etwas über $1 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{bar})$ vor. Entsprechend der Argumentation am Ende des vorhergehenden Abschnitts (2.4.3) ist die so abgeschätzte Produktivität maßgeblich durch den Temperatureffekt im Bohrloch bestimmt und unrealistisch hoch.

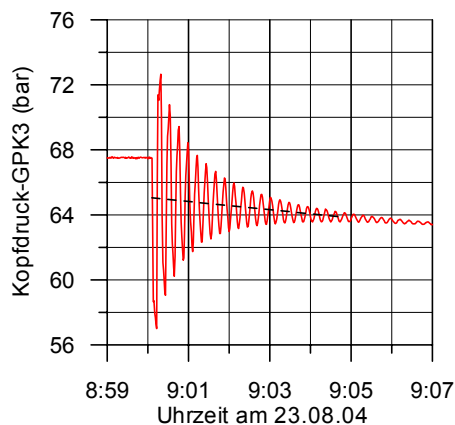


Abb. 2.4.14: Kopfdruck der Bohrung GPK3 am Beginn der Einschlussperiode (04AUG17). Aus der eingezeichneten Geraden entnimmt man einen mittleren Druckabfall von $1 \text{ bar}/210 \text{ s}$. Die Zeitdauer in der die Amplitude der Oszillationen auf die Hälfte abklingt beträgt ca. 45-60 s.

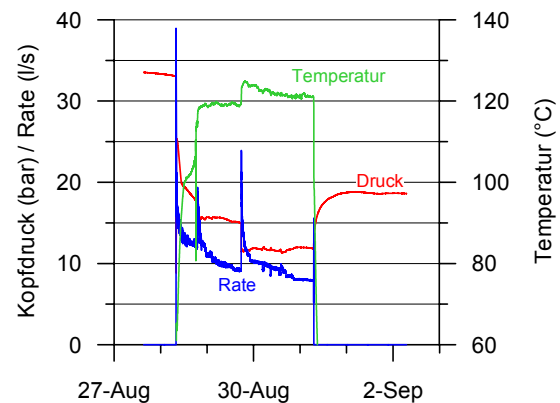


Abb. 2.4.15: Produktionstest der Bohrung GPK3 (04SEP02).

2.4.5 Zusammenfassung GPK3

- Die Bohrung GPK3 wies nach dem Abteufen bereits eine erhebliche Produktivität von ca. $0.2 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{bar})$ bezogen auf einen Zeitraum von ca. 2 d auf.
- Bei der hydraulischen Stimulation wurden insgesamt 34000 m^3 Wasser verpresst mit einer mittleren Fließrate von 50 l/s. Hinsichtlich des injizierten Volumens war dies die größte Stimulationsoperation im Soultz-Projekt.
- Während der hydraulischen Stimulation wurden mehr als 90000 seismische Ereignisse registriert, wovon ca. 8500 lokalisiert werden konnten. In der anschließenden Einschlussphase wurden die stärksten seismischen Ereignisse beobachtet, bis zu einer Magnitude von $M = 2.9$. Die starken seismischen Ereignisse zwangen zu einer vorzeitigen Druckentlastung in der Einschlussphase durch Öffnen der Bohrung GPK2.
- Während eines nachfolgenden Zirkulationstests zwischen den Bohrungen GPK2 und GPK3 wurde die Bohrung GPK3 gesäuert. Insgesamt wurden ca. 3 t Salzsäure mit einer durchschnittlichen Konzentration von 0.45 % verpresst. Damit wurde eine mehr als doppelt so hohe HCl-Konzentration und mehr als die doppelte Menge wie an der Bohrung GPK2 verpresst. Dennoch sind keine Anzeichen im Druckverlauf zu finden, die auf einen signifikanten Effekt der Säurebehandlung schließen lassen. Es ist unwahrscheinlich, dass die Säurebehandlung zu einer Steigerung der Produktivität geführt hat. Leider wurde kein hydraulischer Test nach der hydraulischen Stimulation und vor der Säuerung durchgeführt, um die Effekte der hydraulischen Stimulation und der Säuerung eindeutig zu trennen.
- Nach den Stimulationsoperationen (hydraulisch und Säuerung) weist die Bohrung eine Produktivität von ca. $0.35 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{bar})$ nach einem Zeitraum von 2 d auf. Es ist sehr wahrscheinlich, dass die erzielte Produktivitätserhöhung (70 % Anstieg) vorrangig auf die hydraulische Stimulation zurück zu führen ist.
- Das hydraulische Verhalten der Bohrung wird durch ein formationslineares Fließregime dominiert. Dies weist auf einen sehr gut („unendlich“) leitfähigen Riss hin, über den die Bohrung an die Formation angeschlossen ist. Die effektive Rissfläche wird mit $25000\text{-}50000 \text{ m}^2$ und die Transmissibilität der Formation mit $0.05\text{-}0.2 \text{ Dm}$ abgeschätzt. Die Bohrung ist durch einen sehr großen Bohrlochspeicher gekennzeichnet ($1\text{-}5 \text{ m}^3/\text{bar}$). Dieser hohe Bohrlochspeicher korrespondiert mit der Annahme eines großen, unendlich leitfähigen Risses im Umfeld der Bohrung.
- Analog zur Bohrung GPK2 zeigen die hydraulischen Tests keine äußeren Begrenzungen des Systems (weder Konstantdruckgrenze noch hydraulisch abdichtende Strukturen). Es tritt keine signifikante Turbulenz auf.

2.5. Die Bohrung GPK4

2.5.1 Die Bohrung GPK 4 vor der Stimulation

Die Injektivität der Bohrung GPK4 vor der Stimulation wurde im September 2004 mit einem Injektionstest untersucht (Abb. 2.5.1). Es wurde mit einer Fließrate von ca. 075 l/s über ca. 4 Tage injiziert. Bereits diese geringe Injektionsrate genügte um einen Druckanstieg von 437 auf 488 bar (Sohlendruck) innerhalb von einem Tag zu bewirken. Hieraus ermittelt man eine Produktivität der Bohrung von lediglich ca. 0.01 l/(s*bar) im Ausgangszustand. Leider konnte der Sohlendruck aufgrund eines technischen Problems nur für die Anfangsphase des Tests aufgezeichnet werden. Der Kopfdruck ist nicht auswertbar, da hier Salzwasser in die Bohrung verpresst wurde und die Dichteänderungen im Bohrloch den Reservoirdruckanstieg maskieren.

Hinsichtlich der initialen Produktivität ist die Bohrung GPK4 mit der Bohrung GPK2 vergleichbar.

Aus dem Sohlendruck vor Beginn des Tests kann näherungsweise der ungestörte Druck von 435 bar in 4437 m (TVD) abgeleitet werden. In der mittleren Reservoirtiefe von 4700 m (TVD) folgt hieraus ein Ruhedruck von 463 bar.

Während des Tests konnte aufgrund der geringen Fließrate kein Flowmeterlog gefahren werden und es wurde auch kein Temperaturprofil im Anschluss an diesen Test gemessen. Somit konnten keine Abflusszone(n) bestimmt werden. Aus dem UBI-Log (akust. TelevIEWer) sind Zonen mit deutlich erhöhter Dichte der Störungen bekannt bei MD: 4950-5050 m bzw. bei MD: 5070-5120 m (Homeier&Baumgärtner, 2004). Eine Aussage über die hydraulische Durchlässigkeit dieser Strukturen aus dem UBI-Log ist aber nicht möglich.

Beim Abteufen der Bohrung wurden teilweise massive Spülungsverluste ab ca. 4550 m (MD) bis kurz oberhalb des späteren Casing shoe 4756 m (MD) beobachtet. Diese Zone wurde zementiert und verrohrt (Drilling report GPK4, EEIG, 2004).

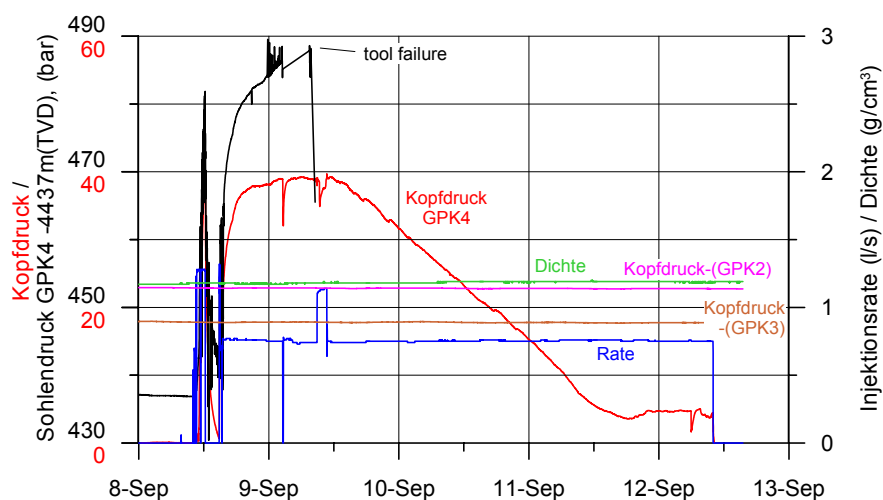


Abb. 2.5.1: Übersicht über den Injektionstest an der GPK4 im September 2004 (04SEP07). Der Sohlendruck wurde in 4700 m (MD) – entsprechend 4437 m (TVD)⁷ – aufgezeichnet. Es wurde nahezu salzgesättigtes Wasser mit einer Dichte von 1.18 g/cm³ injiziert.

⁷ Am Casing shoe (TVD: 4489m bzw. MD: 4756m) besteht ein Teufenversatz zwischen TVD und MD von 267 m und im Bohrlochtiefstem von 278 m (TVD: 4982m bzw. MD: 5260 m)

2.5.2 Hydraulische Stimulation der Bohrung GPK 4

Stimulation September 2004

Die Bohrung GPK4 wurde im unmittelbaren Anschluss an den oben beschriebenen Injektionstest hydraulisch stimuliert (04SEP13). Nach Injektion von ca. 9300 m³ Wasser musste die Stimulation noch vor der geplanten Erhöhung der Fließrate auf 45 l/s vorfristig beendet werden. Die Ursache hierfür war der Ausfall der downhole-Sonde und das anschließend festgestellte Kollabieren der Arbeitsrohrtour im Riser.

Während der Stimulation wurde ein Kopfdruck von 160-170 bar erreicht. Bei vergleichbaren Raten ist der Stimulationsdruck hier deutlich größer als bei der Stimulation der Bohrungen GPK2 und GPK3. Auffällig ist zusätzlich, dass ein Maximum des Drucks am Beginn der Stimulation durchschritten wird. Dies kann ein Hinweis auf die Schaffung neuer Risse und die Überwindung der bohrlochnahen Spannungskonzentration sein.

Die Bohrungen GPK2 und GPK3 reagieren minimal mit einer Druckerhöhung von ca. 3 bar innerhalb des Beobachtungszeitraums. Damit kann im Verlauf der Stimulation zumindest eine schwache Reaktion der anderen Bohrungen nachgewiesen werden, im Unterschied zum vorhergehenden Injektionstest.

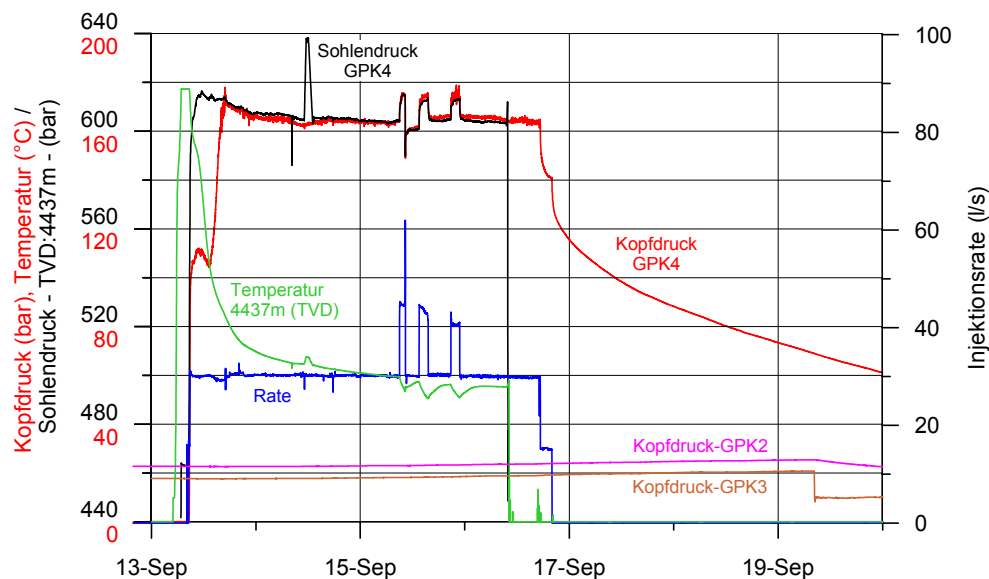


Abb. 2.5.2: Übersicht über den ersten Teil der hydraulischen Stimulation der Bohrung GPK4 im September 2004 (Test: 04SEP13). Der Sohlendruck wurde in 4700 m (MD) bzw. 4437 m (TVD) aufgezeichnet.

Am zweiten Tag der Stimulation wurde ein Flowmeterlog in den oberen 300 m des offenen Bohrlochabschnitts gefahren (Abb. 2.5.3). Das Bohrloch war mit dieser Sonde nur bis zu einer Tiefe von 5050 m (MD) befahrbar. Das Log zeigt eine tendenziell kontinuierliche Zunahme des Zufluss über die gesamte Messstrecke. Abweichungen des linearen Trends sind gut mit Kaliberänderungen erklärbar, die nicht vollständig korrigiert werden können. Es gibt hier offensichtlich keine einzelnen dominanten Kluffstrukturen wie an den Bohrungen GPK2 und GPK3. Nahe liegend ist hingegen die Existenz eines langen Axialrisses anzunehmen, da anders eine kontinuierliche Zunahme des Zufluss in einem dichten Gestein nicht interpretiert werden kann. Dies korrespondiert mit dem oben beschriebenen Druckverlauf, der auf die Schaffung eines künstlichen Risses (vertikaler Zugriss) schließen lässt.

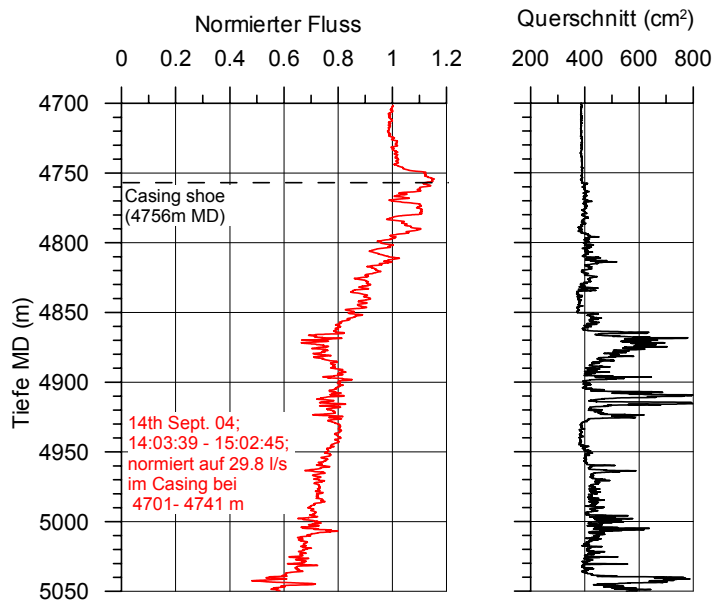


Abb. 2.5.3: Flowmeterlog am Beginn der Stimulation der GPK4 (14.09.04) und Querschnittsfläche der Bohrung, bestimmt aus dem Kaliberlog. Das dargestellte Flowmeterlog ist korrigiert bzgl. der Querschnittsfläche der Bohrung.

In der gemessenen Bohrlochstrecke werden nur etwa 40 % des Gesamtzufluss nachgewiesen. 60 % des Zufluß stammen aus einer Tiefe von mehr als 5050 m (MD). Es ist demnach wahrscheinlich, dass sich der vermutete Axialriss bis in größere Tiefen fortsetzt.

Stimulation Februar 2005

Nach aufwendigen Arbeiten an den Bohrlochköpfen wurde die hydraulische Stimulation im Februar 2005 fortgesetzt (Abb. 2.5.4). Am Beginn und zum Ende dieser zweiten Stimulation wurde jeweils mit 30 l/s injiziert. Über ca. 2 Tage wurde mit einer Rate von 45 l/s injiziert. Hierbei wurde ein Maximaldruck von über 180 bar erreicht, deutlich höher als bei den Stimulationen an den Bohrungen GPK2 und GPK3. Bei der zweiten Stimulation wurden 12300 m³ Wasser verpresst, etwa 30 % mehr als bei der ersten Stimulation im September 2004. Leider konnte während der zweiten Stimulation mit Ausnahme der Anfangsstunden kein Sohlendruck gemessen werden, da die Drucksonde ausfiel. Der Druckverlauf hat nun eine völlig andere Charakteristik als bei der ersten Stimulation. Er steigt kontinuierlich während der ersten beiden Phasen an (30 l/s und 45 l/s). Zudem ist der Wechsel auf die höhere Fließrate mit einem starken Druckanstieg verbunden. Diese Charakteristik ist untypisch für eine effiziente Stimulation und deutet eher auf das Auffüllen bzw. Aufweiten einer bereits vorab geschaffenen Struktur (Riss) ohne signifikante Stimulationswirkung hin. Die Bohrung GPK2 reagiert mit einer Druckerhöhung von ca. 4 bar. Das Druckmaximum an den beiden Beobachtungsbohrungen wird ca. 4 Tage nach Durchschreiten des Maximums an der Injektionsbohrung erreicht. Die Druckamplitude an der Bohrung GPK3 kann hier nicht ausgewertet werden, da vermutlich die Bohrung GPK3 erst kurz zuvor aktiviert wurde und der Kopfdruck hier noch infolge der Erwärmung der Wassersäule ansteigt (vgl. auch Abb. 2.5.9). Dieser und insbesondere die späteren Injektionstests geben keine Hinweise auf eine signifikante Verbesserung der hydraulischen Kommunikation zu den anderen beiden Tiefbohrungen infolge der Stimulation.

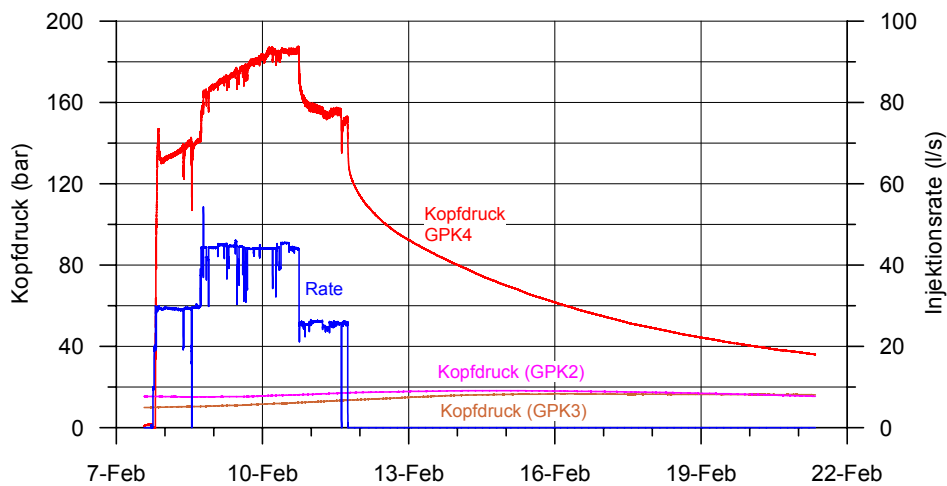


Abb. 2.5.4: Übersicht über den zweiten Teil der hydraulischen Stimulation der Bohrung GPK4 im Februar 2004 (Test: 05FEB07).

„Loch“ in der Verrohrung

Am Beginn der Stimulation vom Februar 2005 treten plötzliche Druckabfälle auf. In Abb. 2.5.5 sind die ersten 3 dieser Ereignisse aufgezeigt. Ein weiteres, ähnliches Ereignis korreliert näherungsweise mit dem Eintreffen der Kaltwasserfront in der Formation und ist bereits aus Abb. 2.5.2 ersichtlich (markanter Druckabfall nach Durchschreiten des Druckmaximums kurz nach Beginn der Injektion). Nimmt man einen Bohrlochspeicher in der Größenordnung von ca. $0.1 \text{ m}^3/\text{bar}$ (siehe unten) an, so müssen bei diesen plötzlichen Druckabfällen ca. 1 m^3 Volumen in wenigen Sekunden aus der Bohrung fließen, da der Druckabfall 10 bar und teilweise mehr beträgt.

Am Ende der Testserie vom Februar/März 2005 wurde ein Loch in der Verrohrung der Bohrung GPK4 diagnostiziert (siehe nächstes Kapitel). Es liegt nahe, die hier beobachteten Druckänderungen mit der Entstehung des Lochs in der Verrohrung in Verbindung zu bringen. Während dieser Druckabfälle werden keine seismischen Ereignisse registriert. Nimmt man an, dass die Druckänderungen das Aufreißen eines Loches markieren, dann muss quasi gleichzeitig jeweils der „plötzliche“ Abfluss von 1 m^3 Volumen innerhalb weniger Sekunden erfolgt sein. Dies würde bedeuten, dass das Loch unmittelbar den Zugang zu einem größeren Speicher bzw. einer Kluft mit einer großen Nachgiebigkeit ermöglicht hat. Kaum erklärbar ist dann, warum diese Ereignisse mehrfach auftreten. Dies wäre nur erklärbar, wenn jeder Druckabfall die Schaffung eines neuen Loches markiert und die jeweils geschaffenen Verbindungen zum Gebirge hydraulisch getrennt wären. Dies muss aber als extrem unwahrscheinlich eingeschätzt werden.

Es kann jedoch auch keine andere plausible Erklärung für die plötzlichen Änderungen im Druck gegeben werden.

Bleibt man bei der These, dass hier ein Loch in der Verrohrung entstanden ist, so kann aber nahezu ausgeschlossen werden, dass gleichzeitig ein Riss in das Gebirge hinein erzeugt wurde: Es wurden keine seismischen Ereignisse in der Anfangsphase dieser Stimulation registriert und das relativ geringe Druckniveau widerspricht ebenfalls der Erzeugung oder Öffnung von Rissen im Gebirge. Auch im weiteren Verlauf der hydraulischen Stimulation wird keine Konzentration von seismischen Ereignissen um das später detektierte Loch in der Verrohrung beobachtet.

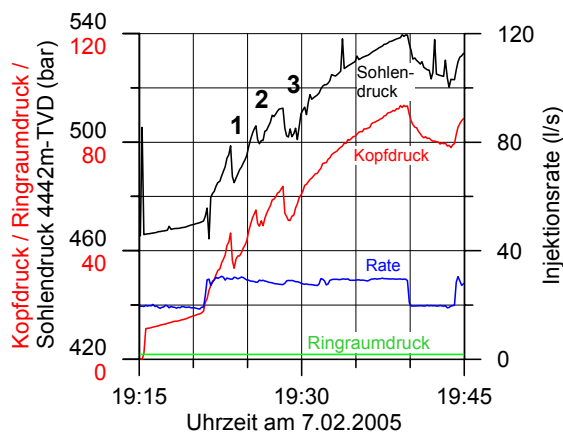


Abb. 2.5.5: Anfangsphase der Stimulation der GPK4 im Februar 2005 (Test: 05FEB07).

Vergleich der beiden Stimulationen

Es ist instruktiv, die beiden Einschussphasen im Anschluss an die Stimulationen im September 2004 und Februar 2005 (Abb. 2.5.2. und 2.5.4) zu vergleichen. Während der zweiten Stimulation wurden ca. 35 % mehr Wasser verpresst als bei der ersten (12300 m^3 bzw. 9140 m^3). Hingegen ist die letzte Fließrate, mit der nahezu stationäre Verhältnisse erreicht wurden, während der zweiten Stimulation geringer als während der ersten (25.6 l/s bzw. 29.6 l/s).

Der Druckabfall nach der ersten Stimulation erfolgt schneller (Abb. 2.5.6). Diese Tendenz bleibt auch erhalten, wenn man die Druckänderung auf die letzte Fließrate normiert (Abb. 2.5.6 rechts). Der schwächere Druckabfall nach der zweiten Stimulation scheint hier durch die insgesamt längere Stimulationsdauer und das größere Volumen bedingt zu sein. Andererseits wäre nach der zweiten Stimulation ein schnellerer Druckabfall zu erwarten gewesen, wenn durch die zweite Stimulation die Produktivität der Bohrung angestiegen wäre.

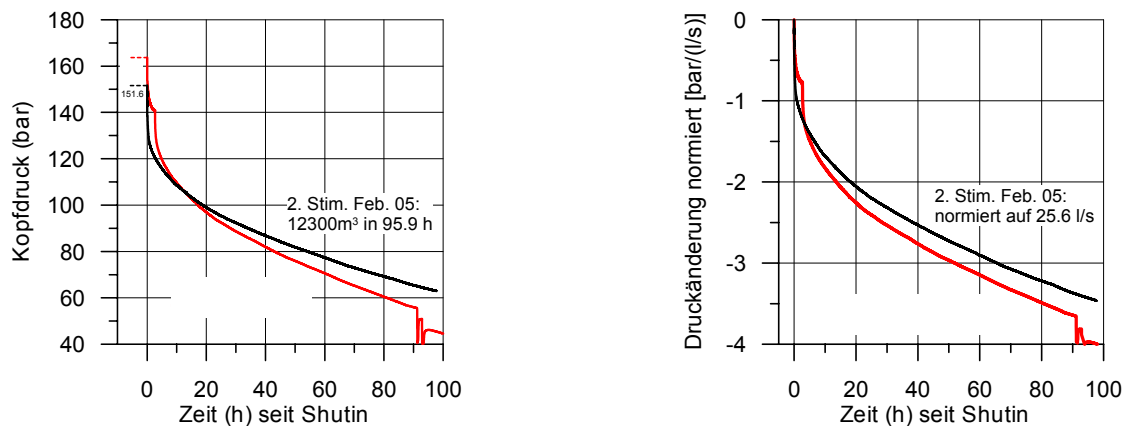


Abb. 2.5.6: Vergleich der Einschusskurven im Anschluss an die hydraulischen Stimulationen der GPK4 im September 2004 und Februar 2005. Links ist der Druckverlauf in den Einschussphasen aufgetragen und rechts die Druckänderung normiert auf die letzte Fließrate (in der quasi stationäre Verhältnisse erzielt worden). Der Einschussdruck beträgt 163.7 bar (1.Stimulation) bzw. 151.5 bar (2.Stimulation)

(An dieser qualitativen Betrachtung ändert sich qualitativ nichts wenn man die letzte Injektionsphase der zweiten Stimulation von ca. 3 h Dauer am 12. Februar nicht berücksichtigt und den Einschlussdruck um ca. 4 bar höher ansetzt. Hier wurde nach einem ca. 1 stündigen Pumpenstopp wieder mit ca. 25 l/s injiziert, der Ausgangsdruck von ca. 155 bar aber nicht wieder erreicht).

Der Druckverlauf in der Einschlussphase, wie auch während der Injektionsphase deuten darauf hin, dass die zweite Stimulation zu keiner signifikanten Erhöhung der Produktivität der Bohrung GPK4 geführt hat.

Es bestätigt sich hier offenbar, dass in relativ dichten Formationen das Volumen jeder weiteren Stimulation erheblich größer sein muss als der vorangegangenen, um eine weitere signifikante Steigerung der Produktivität zu erzielen (sogenannter Kaiser-Effekt).

Seismik

Während der Stimulation im September 2004 wurden ca. 16700 seismische Ereignisse registriert, wovon ca. 5800 lokalisiert werden konnten. Der Schwerpunkt der Ereignisse befindet sich erfreulicherweise im unteren Abschnitt der offenen Bohrlochstrecke bzw. darunter. In der zweiten Stimulation (Februar 2005) wurden ca. 8500 Ereignisse registriert und ca. 3000 davon lokalisiert. Obwohl somit in der zweiten Stimulation über längere Zeit mit einer größeren Fließrate stimuliert wurde (45 l/s) und auch mehr Volumen verpresst wurde, konnten nur etwa halb soviel Ereignisse registriert werden.

Weiterhin ist aus der Abbildung 2.5.7 ersichtlich, dass die Ereignisse während der zweiten Stimulation vorwiegend in der Peripherie der Zone, die bereits im September 2004 stimuliert wurde, auftreten.

Durch die deutlich geringere Intensität und durch die räumliche Streuung an der Peripherie wird tendenziell die These gestützt, dass die zweite Stimulation keine signifikante Steigerung der Produktivität bewirkt hat.

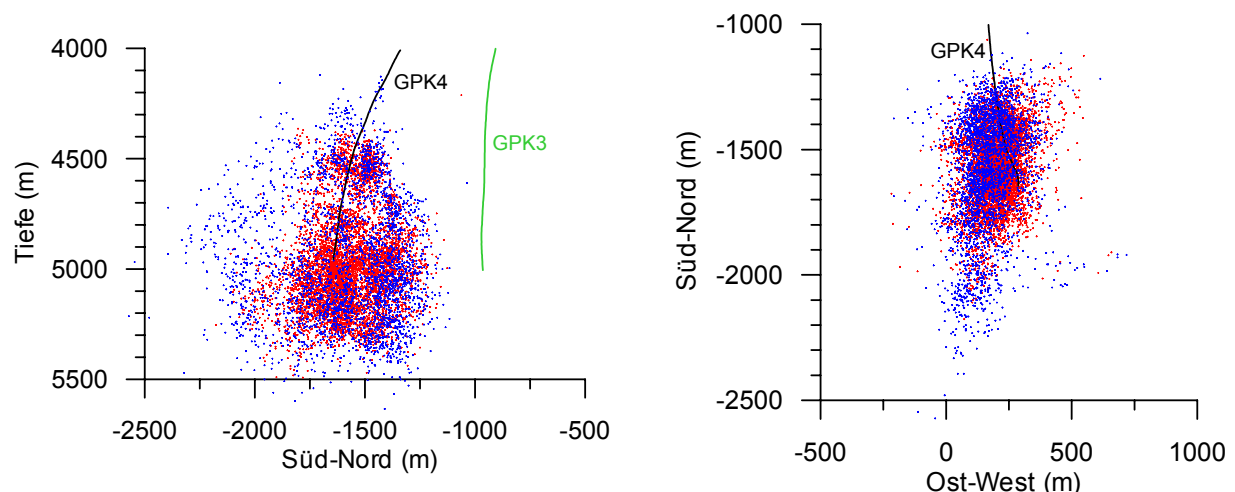


Abb. 2.5.7: Darstellung der seismischen Ereignisse während der Stimulation der GPK4 im September 2004 (rot) und Februar 2005 (blau). Die Ereignisse der zweiten Stimulation sind im Vordergrund dargestellt.

In Abb. 2.5.8 sind die Dichteverteilungen der seismischen Ereignisse während der hydraulischen Stimulationen der GPK3 (2003) und GPK4 (2004/2005) dargestellt. Es ist hieraus erkennbar, dass an der GPK4 ein deutlich kleineres Volumen stimuliert wurde. Die relative kurze Zeitdauer der Stimulation an der GPK4 bzw. das vergleichsweise geringe Stimulationsvolumen findet seine Entsprechung in der kleineren räumlichen Ausdehnung der seismischen Ereignisse. Aus der Abb. 2.5.8 kann eine gewisse räumliche Trennung der Ereignisse zwischen der GPK3 und GPK4 abgeleitet werden. Es gelang mit der Stimulation der GPK4 offensichtlich nicht, die stimulierten Bereiche der GPK3 und GPK4 zur Überlappung zu bringen. Dies korreliert mit der schwachen hydraulischen Kommunikation zwischen beiden Bohrungen.

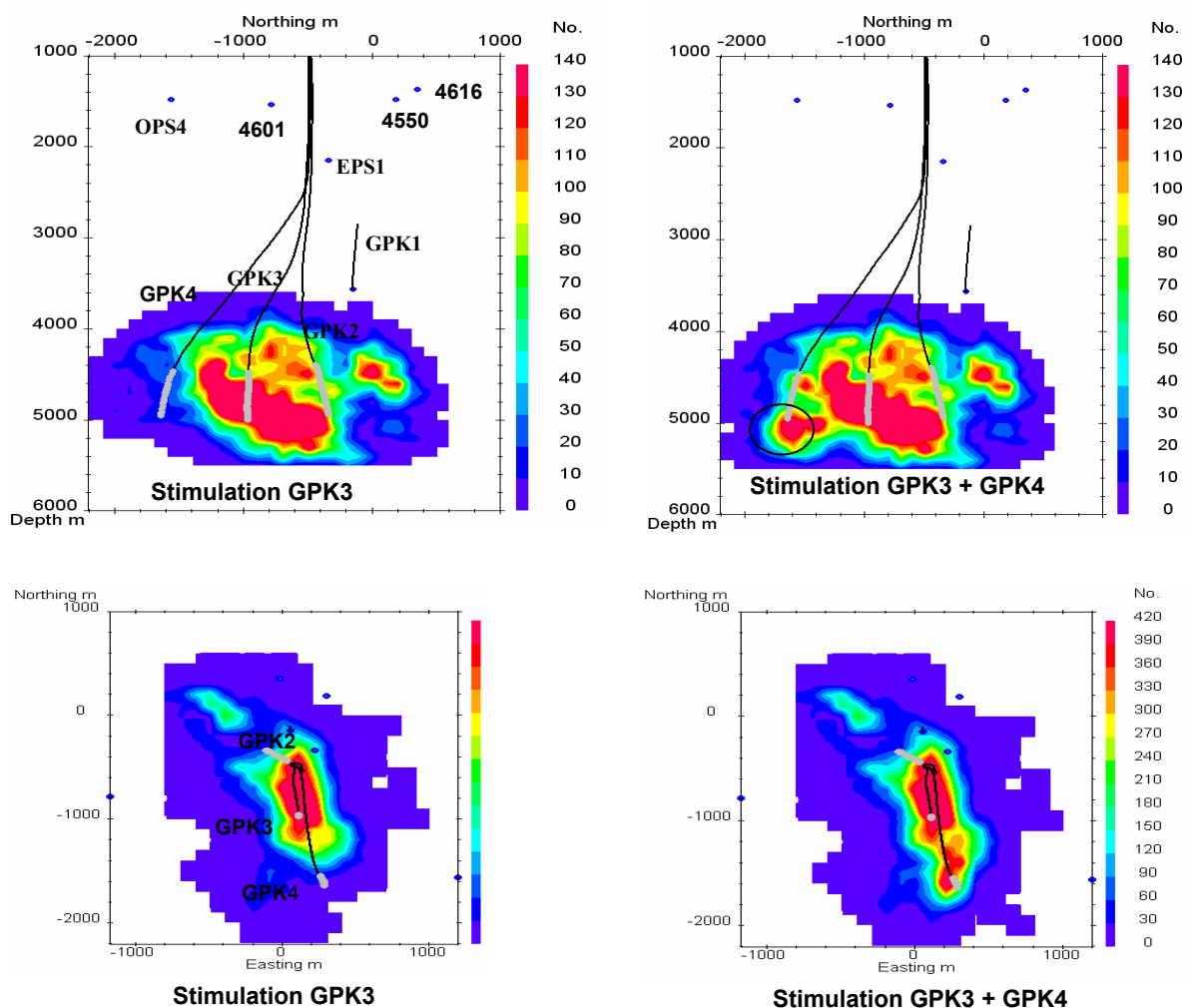


Abb.2.5.8: Seismische Ereignisse während der hydraulischen Stimulation der GPK3 und GPK4 im Querschnitt und in Aufsicht. Als farbige Kontur ist die Dichte der Ereignisse in Quadern mit 50 m Kantenlänge dargestellt (Dyer, 2005).

Produktivität nach beiden hydraulischen Stimulationen

Im Anschluss an die hydraulische Stimulation wurde im Februar 2005 ein hydraulischer Test zu Charakterisierung der Bohrung durchgeführt (siehe Abschnitt 2.5.3 und 2.5.4). Hieraus konnte eine Produktivität von 0.3 l/(s*bar) abgeleitet werden (nach 2 Tagen- siehe Abbildung 2.5.9). Durch die hydraulische Stimulation wurde somit die Produktivität der Bohrung von 0.01 l/(s*bar) auf ca. 0.3 l/(s*bar), das heißt etwa um das 30 fache gesteigert.

2.5.3 Säuerung der Bohrung GPK 4

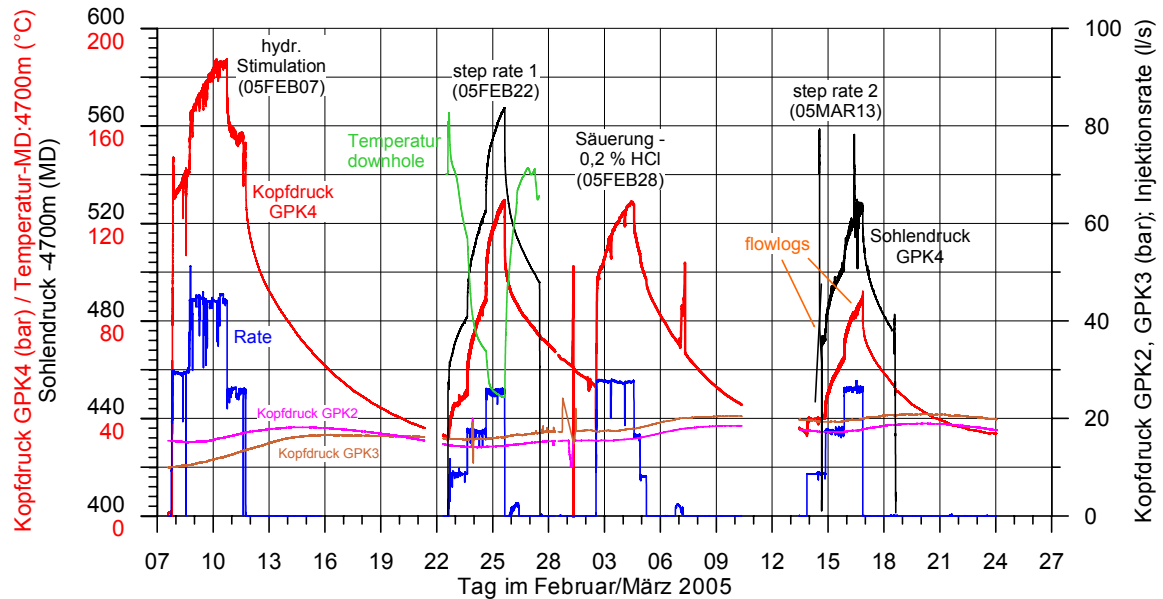
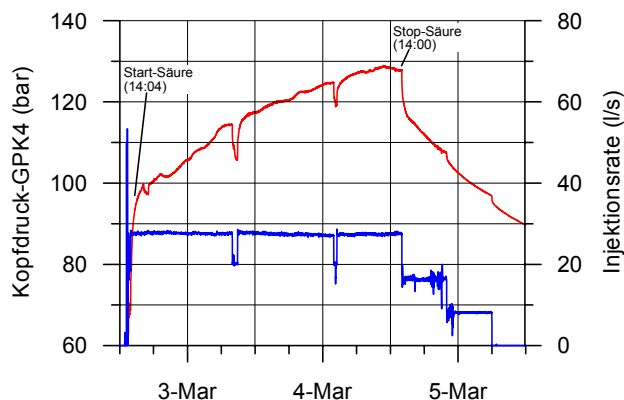


Abb. 2.5.9: Übersicht über den Testablauf im Februar/März 2005. Der Kopfdruck der Interferenzbohrungen ist hier auf die rechte (höher auflösende) y-Achse bezogen. Auf die Darstellung der Sohlentemperatur für den letzten Test wurde aus Gründen der Übersicht verzichtet.

Die Bohrung GPK4 wurde im März 2005 durch Zugabe von Salzsäure gesäuert (Abb. 2.5.9). Insgesamt wurden hierbei ca. 11 t HCl mit einer Konzentration von 0.2 % injiziert. Während der Säuerung wurde mit einer mittleren Rate von 27.2 l/s injiziert, d.h. ca. 4700 m³ Fluid wurden innerhalb von 2 Tagen verpresst. Um den Effekt der Säuerung direkt beurteilen zu können, wurde jeweils vor und nach der Säuerung ein Injektionstest mit identischen Fließraten und Volumen durchgeführt. Es wurde mit den Raten von 9, 18 und 26 l/s injiziert.

Produktivitätssteigerung durch die Säuerung

In Abb. 2.5.10 ist der Druckverlauf während der Säurezugabe noch einmal vergrößert dargestellt. Im Gegensatz zu den Injektionstests vor und nach der Säuerung ist hier der Druckverlauf deutlich unruhiger. Zu mehreren Zeitpunkten steigt der Druck nicht weiter an oder fällt sogar, obwohl die Fließrate konstant bleibt. Dies ist insbesondere kurz nach Beginn der Säureinjektion und zum Ende der Injektion gut zu sehen.



2.5.10: Druckverlauf während der Säuerung der Bohrung GPK4 im März 2005.

Das Druckniveau, welches am Ende der Säuerung erreicht wird (128 bar), unterscheidet sich jedoch nur minimal von dem Maximaldruck des Injektionstests (130 bar) zuvor. Der Druckverlauf weist lediglich auf eine geringfügige Verbesserung der Produktivität infolge der Säuerung hin. Eine signifikante Produktivitätssteigerung unmittelbar während der Säureinjektion würde sich durch ein Abflachen des Druckverlaufs und besonders durch ein geringeres Druckniveau auszeichnen. Daher ist während der Säureinjektion kaum eine unmittelbare Verbesserung festzustellen.

Dagegen überrascht der Druckverlauf des nachfolgenden Injektionstests, der bei gleicher Injektionsrate von 26 l/s um bis zu 40 bar niedrigerer Kopfdruck (maximal 92 bar) als der Test vor der Säuerung aufweist. Durch die Säuerung wurde also eine signifikante Produktivitätssteigerung erzielt, die allerdings erst im nachfolgenden Injektionstest deutlich wird.

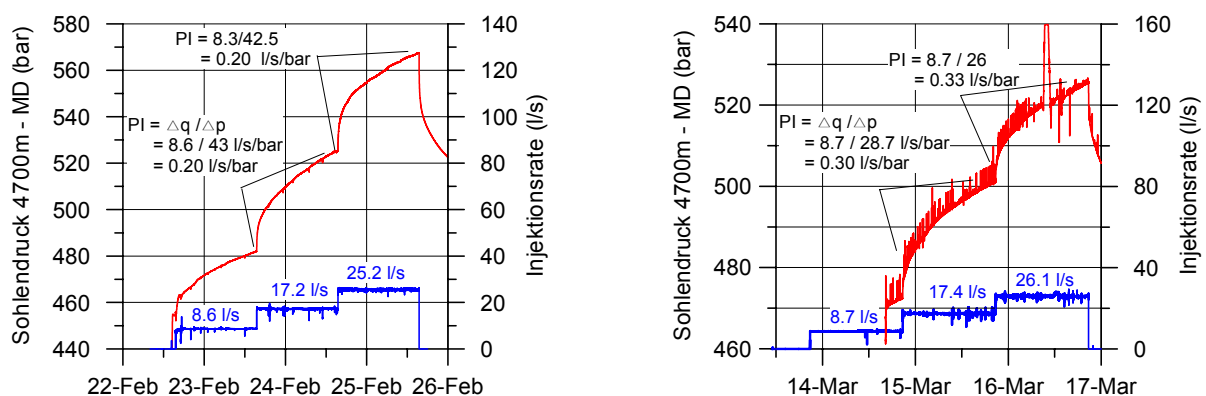


Abb. 2.5.11: Sohlendruckverlauf für die Injektionstests vor und nach der Säuerung. Eingezeichnet ist die (scheinbare) Produktivität (PI) für die zweite und dritte Injektionsstufe, die sich aus der Änderung der Fließrate und der zugehörigen Druckänderung ergibt.

Die Produktivitätssteigerung kann aus dem Vergleich des Sohlendrucks der Tests vor und nach der Säuerung entnommen werden (Abb. 2.5.11). Die jeweils erste Injektionsphase ist aufgrund technischer Probleme des downhole-Sensors gestört. Die zweiten und dritten Injektionsphasen können aber direkt miteinander verglichen werden. Aus diesem Vergleich entnimmt man einen Anstieg von 0.20 l/(s*bar) auf 0.30 bzw. 0.33 (l/(s*bar))⁸. Folglich wurde durch die Säuerung ein Anstieg der Produktivität um 50 % erzielt.

Interpretation der Säuerung

Die Wirkung der Säure setzt vermutlich mit zeitlicher Verzögerung ein, so dass die Produktivitätssteigerung weitgehend auf den allmählichen Druckabfall zum Ende der Säuerung (vgl. Abb. 2.5.10), auf die nachfolgende Phase mit geringerer Injektionsrate (17 l/s) bzw. sogar die Einschlussphase zurückzuführen ist. Wahrscheinlich wird zum Ende der Säureinjektion bzw. kurz danach der Durchbruch zu einer Abflusszone geschaffen. Dies korrespondiert mit den mikroseismischen Beobachtungen. Die mikroseismische Aktivität ist während der Säuerung deutlich höher als bei dem Injektionstest davor (Abb. 2.5.12). Insbesondere ist etwa ab der Mitte der Säureinjektion eine verstärkte seismische Aktivität mit Maximum sogar in der Einschlussphase nach der Säureinjektion zu verzeichnen. Dieser

⁸ Die hier abgeleiteten Produktivitäten sind beeinflusst durch die vorhergehende Injektionsphase 1 und unterschätzen die reale Produktivität nach einem Tag etwas. Zur Bestimmung der relativen Änderung der Produktivität können diese Angaben aber unmittelbar verwendet werden, da die Testhistorie in beiden Fällen nahezu identisch ist.

Unterschied in der seismischen Aktivität ist ein weiterer Hinweis auf die Öffnung eines zusätzlichen Fließweges durch die Säuerung. Wären durch die Säuerung ausschließlich dieselben Fließwege wie bei der hydraulischen Stimulation und des Injektionstests zuvor angesprochen worden, wäre kein Grund für eine erhöhte seismische Aktivität gegeben. Das etwa 20 % größere Injektionsvolumen während der Säuerung im Vergleich zum Injektionstest zuvor (5500 m³ statt 4400 m³) bei gleicher maximaler Fließrate kann die deutlich höhere seismische Aktivität nicht erklären.

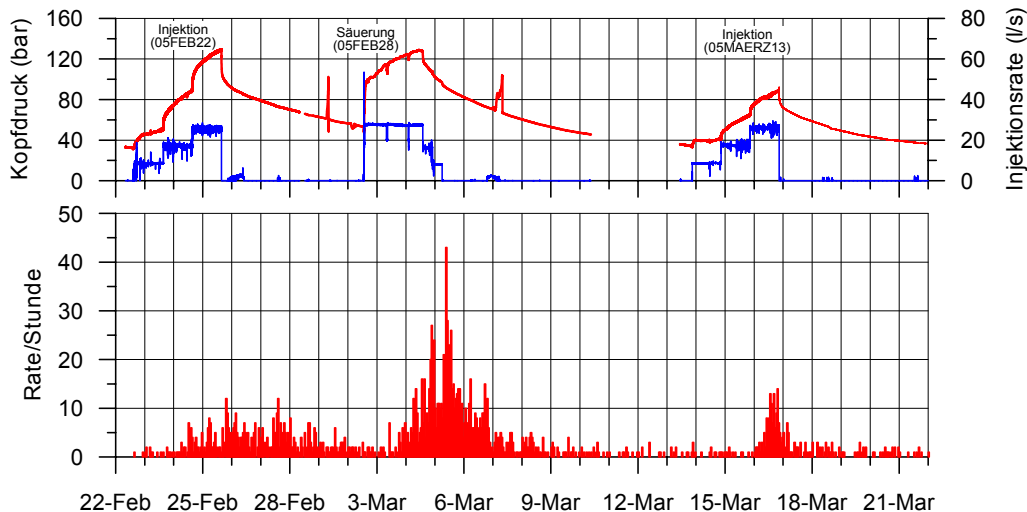


Abb. 2.5.12: Registrierte seismische Ereignisse und Druckverlauf während der Testserie im Februar/März 2005 (nach der hydraulischen Stimulation der GPK4 im Februar 2005).

Die erhöhte seismische Aktivität während der Säuerung weist hier zudem darauf hin, dass die Kombination von Säureinjektion und hohem Druck zum Anschluss zusätzlicher Fließwege geführt hat. Eine Säureinjektion allein gibt keinen Anlass für seismische Aktivität. Die Betrachtung der lokalen Verteilung der seismischen Ereignisse während der Testserie im Februar-März 2005 gibt weiteren Aufschluss über die Ursache der Produktivitätssteigerung infolge der Säuerung (Abb. 2.5.13). Während des Injektionstests vor der Säuerung werden seismische Ereignisse vor allem an der Peripherie der bereits vorab stimulierten Zone beobachtet. Während der Säuerung hingegen tritt zusätzlich eine Häufung der Ereignisse oberhalb des Casing shoe in einer Tiefe von ca. 4300 – 4400 m (TVD) auf⁹. Diese Ereignisse sind zudem in der Nähe der Verrohrung lokalisiert. Im nachfolgenden Injektionstest wird eine ausgeprägte Konzentration der Ereignisse noch weiter oberhalb bei ca. 4000 -4200 m festgestellt. Weiterhin wurde während der Säuerung und des nachfolgenden Injektionstests eine Gruppe von Ereignissen weit entfernt, nördlich der GPK2 beobachtet. Dies muss als Hinweis auf die Schaffung einer hydraulischen Verbindung zu einer großflächigen permeablen Struktur interpretiert werden. Andernfalls könnte diese Gruppe nicht als isolierte Gruppe in dieser großen Entfernung in Erscheinung treten.

⁹ Im Zeitraum 2.03.-5.03.05 konnten keine seismischen Ereignisse lokalisiert werden, da nicht genügend Sensoren einsatzfähig waren. Somit konnten während der gesamten Säureinjektion keine Ereignisse lokalisiert werden. Erst in der nachfolgenden Einschussphase war die Lokalisierung wieder möglich (ab 5:03:05; ca. 15:00 Uhr). Die lokalisierten Ereignisse „während der Säuerung“ beziehen sich daher ausschließlich auf die nachfolgende Einschussperiode.

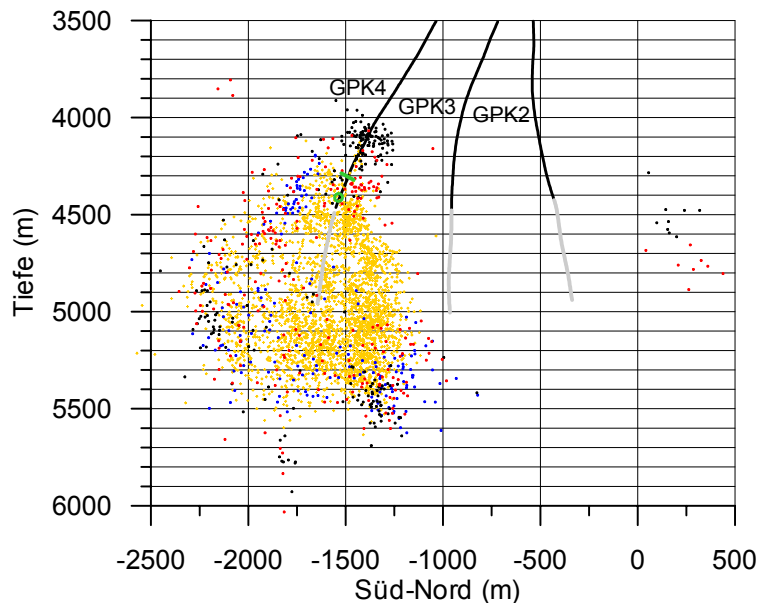


Abb. 2.5.13: Seismische Ereignisse während der Testserie im Februar-März 2005. **Gelb:** Hydraulische Stimulation (05FEB07); **Blau:** Injektionstest vor der Säuerung (05FEB22); **Rot:** Säuerung (05FEB28); **Schwarz:** Injektionstest nach der Säuerung (05MAR13). Als grüner Kreis ist die Zone markiert, in der später das Loch in der Verrohrung gefunden wurde (4425 m) und als grüner Strich die Verlustzone beim Abteufen der Bohrung mit nachhaltiger Auskühlung (ca. 4300 m – siehe Abb. 2.2.1). Alle Tiefenangaben und Koordinaten sind auf den Bohrlochkopf der GPK1 bezogen.

Im Verlauf der Säuerung ändert sich das räumliche Verteilungsmuster der seismischen Ereignisse signifikant. Dies ist ein weiteres Indiz dafür, dass durch die Säuerung zusätzliche Fließwege an die Bohrung angeschlossen wurden. Aufgrund der Lokalisierung dieser Ereignisse oberhalb des Casing shoes ist anzunehmen, dass eine Verbindung zu einer Abflussszone oberhalb des Casing shoes geschaffen wurde.

Während des Injektionstests nach der Säuerung wurden 3 Flowmeterlogs gefahren (Abb. 2.5.14). Diese 3 Logs zeigen deutlich an, dass nunmehr ca. 50 m oberhalb des Casing shoes eine Leckage existiert. Bezogen auf den Fluss unmittelbar oberhalb des Casing shoes wird ein Volumenstrom von 30-50 % durch das Loch in die Formation injiziert. Es ist auffällig, dass der zusätzliche Volumenstrom durch das Loch in der Verrohrung nahezu genau der Produktivitätssteigerung (50 %) durch die Säuerung entspricht.

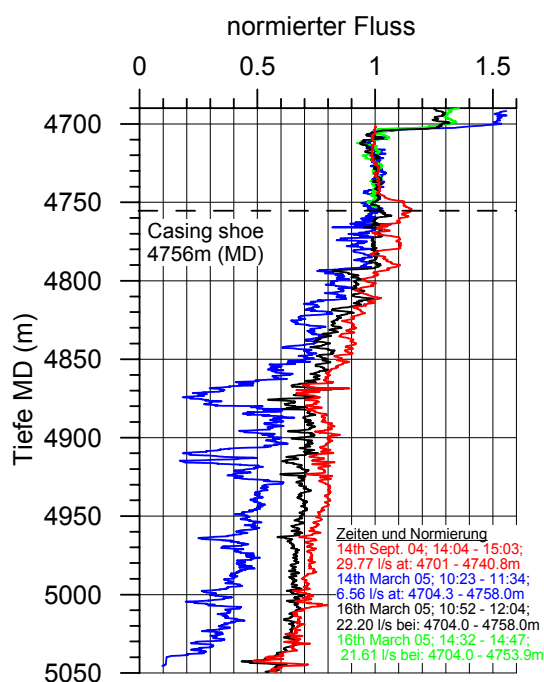


Abb. 2.5.14: Flowmeterlogs während des Injektionstests nach der Säuerung (blau, schwarz, grün) im Vergleich zum Flowmeterlog während der Stimulation im September 2004 (rot) – siehe auch Abb. 2.5.3. Die Logs sind hier normiert bezüglich der Fließrate in der Verrohrung kurz oberhalb des Casing shoe dargestellt.

Säuerung und „Loch“ in der Verrohrung

Das Loch in der Verrohrung muss zwischen der 1. hydraulischen Stimulation im September 2004 (Flowlog am 14.09.2004) und dem Beginn des Injektionstests nach der Säuerung entstanden sein. Es ist zunächst plausibel anzunehmen, dass das Loch zum Beginn der 2. hydraulischen Stimulation im Februar 2005 entstanden ist (siehe Abb. 2.5.5 und die dortige Diskussion). Allerdings kann dieses Loch während der 2. Stimulation kaum hydraulisch wirksam gewesen sein. Andernfalls wäre eine signifikante Steigerung der Produktivität der Bohrung durch die 2. Stimulation zu erwarten gewesen. Diese Steigerung der Produktivität wurde jedoch nicht beobachtet. In der Konsequenz muss man annehmen, dass das Loch in der Verrohrung durch die Säuerung aktiviert wurde und über dieses Loch der Anschluss an eine permeable Struktur in der Formation gefunden wurde. Der signifikante Unterschied in der räumlichen Verteilung der seismischen Ereignisse vor der Säuerung und danach ist ein zusätzliches starkes Indiz hierfür. Weiterhin ist die gute Korrelation zwischen der Produktivitätssteigerung durch die Säuerung und dem zusätzlichen Beitrag des „Lochs“ zum Gesamtabfluss ein Argument für diese These.

Wahrscheinlich wurden durch die Säureinjektion Fließwege im bohrlochnahen Bereich geschaffen und an eine Abflusszone in der Formation angeschlossen. Aufgrund der räumlichen Nähe der seismischen Ereignisse zu der Verlustzone (Abb. 2.2.1), die während des Abteufens der Bohrung angetroffen wurde, ist anzunehmen, dass durch die Säuerung eine Verbindung „nach oben“ zu dieser Verlustzone geschaffen wurde. Diese These impliziert die mögliche Bildung von Kanälen im Zementmantel um die Bohrung herum. Für alle weiteren Operationen an der Bohrung GPK4 ist auch aufgrund dieser Implikation erhöhte Vorsicht notwendig.

Als entscheidende Konsequenz aus dieser Erklärung folgt, dass die Säureinjektion im Reservoir selbst, das heißt unterhalb des Casing shoes, keine signifikante Wirkung hatte. Der beabsichtigte Effekt - die Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit von bereits existierenden Rissen durch die Auflösung von Kalzit - konnte somit nicht nachgewiesen werden.

2.5.4 Hydraulische Charakterisierung der Bohrung GPK 4

Zur hydraulischen Charakterisierung der Bohrung können die Injektionstests vor und nach der Säuerung analysiert werden.

Injektionstest vor der Säuerung (05FEB22)

Zur Analyse des Injektionstests vor der Säuerung eignet sich insbesondere die 2. Injektionsstufe mit einer mittleren Rate von 17 l/s. In der 1. Injektionsphase (8 l/s) ist der Druck zum Beginn gestört und in der 3. Injektionsphase ist der Druck bereits relativ hoch (mehr als 130 bar Druckerhöhung gegenüber dem Ruhedruck), so dass hier mechanische Effekte (Aufweitung der Risse) nicht ausgeschlossen werden können. Die Darstellung des Druckverlaufs in der Injektionsphase liefert klare Anzeichen für eine Rissströmung (Abb. 2.5.16). Der Druck steigt in der doppeltlogarithmischen Darstellung linear über die gesamte Injektionsphase an. Es wird keine Stabilisierung der Ableitung, wie für ein radiales Fließregime typisch, registriert. Weiterhin sind auch keine äußeren Begrenzungen des Systems sichtbar.

Noch klarer wird die hydraulische Charakteristik aus der semilogarithmischen Darstellung in Abb. 2.5.17. Hier wird eine Proportionalität zur 4. Wurzel aus der Zeit erkennbar. Es dominiert ein bilineares Fließregime. Bilineares Fließen ist charakteristisch für einen vertikalen Riss mit einer begrenzten hydraulischen Leitfähigkeit. Es setzt sich zusammen aus 2 instationären, linearen Strömungsanteilen: linearer inkompressibler Fluss im Riss und linearer kompressibler Fluß senkrecht zur Rissfläche, d.h. vom Riss in die Matrix.

Der Druckverlauf für bilineares Fließen kann analytisch wie folgt beschrieben werden (Cinco-Ley & Samaniego, 1981):

$$\Delta p = 0,3901 \cdot \frac{q \cdot \mu}{h \cdot \sqrt[2]{T_f} \cdot \sqrt[4]{k \cdot n \cdot \mu \cdot c_t}} \cdot \sqrt[4]{t} = m \cdot \sqrt[4]{t}$$

mit: q: Fließrate
 μ : Viskosität
h: Risshöhe
k: Permeabilität d. Formation
n: Porosität d. Formation (hier:
 c_t : totale Kompressibilität d. Formation
 $T_f = k_f \cdot w$ (Rissleitfähigkeit = Risspermeabilität * Rissweite)
t: Zeit

Hieraus wird insbesondere ersichtlich, dass bei konstantem Anstieg m die hydraulische Leitfähigkeit des Risses nicht unabhängig von der Permeabilität (Transmissibilität) der Formation bestimmt werden kann. Es kann jedoch ein Maximalwert für die Transmissibilität aus dem am Ende der Analyseperiode erreichten Niveau der 1. Ableitung abgeschätzt werden. Man entnimmt hieraus: $T < 0.1 \text{ Dm}$.

Für die in Abb. 2.5.16 gezeigte Anpassung wird ein langer vertikaler Riss mit einer Risshöhe von 200 m angenommen, in Übereinstimmung mit dem tendenziell linearen Verlauf der Flowlogs (Abb. 2.5.14). Allerdings wird als Risshöhe nur etwa die halbe offene Bohrlochstrecke angenommen, da auch bei einem deutlich länger ausgedehnten vertikalen Riss nicht von einer homogenen vertikalen Verteilung der Strömung im Riss ausgegangen werden kann. Folgende Parameter liegen der Anpassung in Abb. 2.5.15/2.5.16 zugrunde:

Bohrlochspeicher:	$C = 0.2 \text{ m}^3/\text{bar}$
Transmissibilität:	$T = 1.0 \cdot 10^{-13} \text{ m}^3$
Permeabilität	$k = 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$
Rissleitfähigkeit:	$T_f = 2.5 \cdot 10^{-13} \text{ m}^3$
Risshalblänge:	$x_f = 78 \text{ m}$
Reservoirdruck (4437 m, TVD):	$p_i = 433 \text{ bar}$

Folgende konstante Eingangsparameter werden angenommen:

Bohrlochradius:	$r = 0.11 \text{ m}$
Mächtigkeit der Formation/Risshöhe:	$h = 200 \text{ m}$
Porosität:	$n = 0.05$
Totale Kompressibilität:	$c_t = 1 \cdot 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$
Viskosität:	$\mu = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

Der angegebene Fit basiert somit bereits auf dem oben abgeschätzten Maximalwert für die Transmissibilität der Formation (0.1 Dm). Die Rissleitfähigkeit liegt in derselben Größenordnung. Auf der Basis der zugrunde liegenden Modellvorstellung wirken hier sowohl die Rissleitfähigkeit als auch die Transmissibilität der Formation limitierend für die Produktivität der Bohrung. Der angegebene Bohrlochspeicher ist tendenziell als obere Abschätzung anzusehen. Es ist kein ausgeprägter linearer Druckanstieg am Beginn der Injektionsphase zu beobachten und gute Anpassungen sind auch mit deutlich kleinerem Bohrlochspeicher möglich.

Wie bei den anderen beiden Bohrungen sind keine Begrenzungen des Reservoirs (Konstantdruckgrenze oder dichtende Strukturen) erkennbar. Weiterhin tritt keine signifikante Turbulenz auf, zumindest im Fließratenbereich bis 26 l/s.

Mit der angegebenen Parameterkombination kann der Druckverlauf für alle 3 Injektionsphasen sehr gut beschrieben werden. Allerdings besteht eine deutliche Diskrepanz in der abschließenden Einschlussphase. Während für alle 3 Injektionsphasen in der semilogarithmischen Darstellung ein linearer Verlauf zu beobachten ist (Abb. 2.5.17), ist in der Einschlussphase keine Abhängigkeit von der 4. Wurzel der Zeit erkennbar. Dieses grundsätzlich verschiedene Verhalten deutet tendenziell auf ein Problem der Sonde hin. Möglicherweise ist die Sonde zu träge um bei der schnellen Temperaturänderung insbesondere in der Einschlussphase den Druck richtig wieder zu geben. Hier ist noch eine detaillierte Betrachtung notwendig.

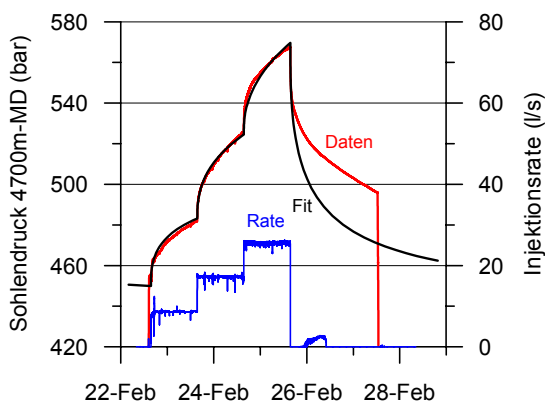


Abb. 2.5.15: Injektionstest vor der Säuerung der GPK4: Vergleich von Messwerten und Anpassung.

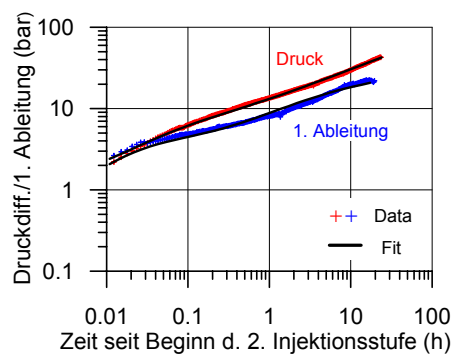


Abb. 2.5.16: Druckdifferenz und 1. Ableitung des Drucks in doppeltlogarithmischer Darstellung für die 2. Injektionsphase des Tests 05FEB22- siehe nebenstehende Abbildung.

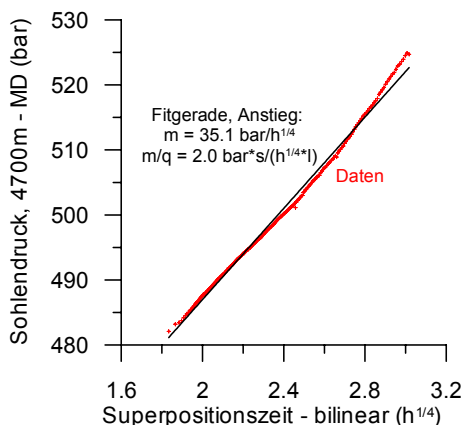


Abb. 2.5.17: Darstellung des Sohlendrucks für die 2. Injektionsphase (Test 05FEB22) in Abhängigkeit von der Superpositionszeit für bilineares Fließen. Injektionsrate: 17.2 l/s.

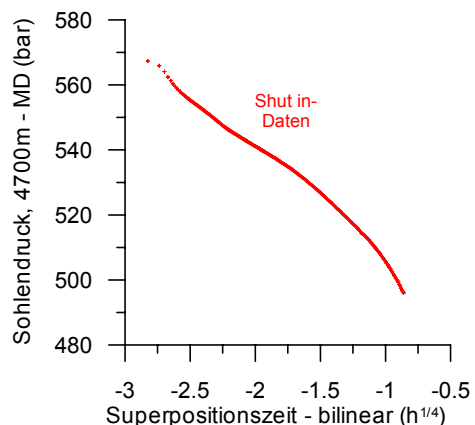


Abb. 2.5.18: Darstellung des Sohlendrucks für die Einschlussphase (Test 05FEB22) in Abhängigkeit von der Superpositionszeit für bilineares Fließen.

Injektionstest nach der Säuerung (05MAR13)

Für die Interpretation des Tests nach der Säuerung wird ebenfalls die 2. Injektionsphase betrachtet. Generell ist die Druckaufzeichnung hier von schlechterer Qualität – es treten viele Aussetzer auf. Die erste und die dritte Injektionsphase können daher kaum analysiert werden, zumal hier während der Injektion zusätzlich Flowlogs gefahren wurden.

Für diesen Test muss das Loch in der Verrohrung mit berücksichtigt werden, da hierdurch ca. 35 % des Gesamtvolumenstroms abfließen. Bei der Interpretation wird daher zunächst angenommen, dass nur ca. 65 % des Gesamtvolumenstroms in die Formation unterhalb der Verrohrung eindringen und nur dieser Anteil für das hydraulische Verhalten maßgeblich ist. Unter dieser Annahme kann der Druckverlauf mit nahezu identischen Parametern wie der Test vor der Säuerung beschrieben werden. Nachfolgende Tabelle (2.5.1) gibt eine Übersicht über die Parameter der Anpassungen beider Tests:

Parameter	Vor Säuerung (05FEB22)	Nach Säuerung (05MAR13)
Bohrlochspeicher	< 0.2	< 0.2
Transmissibilität	$1.0 \cdot 10^{-13} \text{ m}^3$	$1.0 \cdot 10^{-13} \text{ m}^3$
Permeabilität	$5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	$5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$
Rissleitfähigkeit	2.5^{-13} m^3	3.1^{-13} m^3
Risshalblänge	78 m	74
Reservoirdruck (4437 m, TVD)	433 bar	433

Tab. 2.5.1: Hydraulische Parameter für die Anpassung der Injektionstests vor und nach der Säuerung.

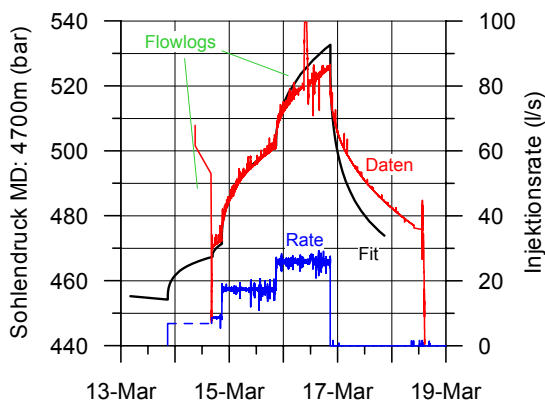


Abb. 2.5.19: Injektionstest vor der Säuerung der GPK4: Vergleich von Messwerten und Anpassung.

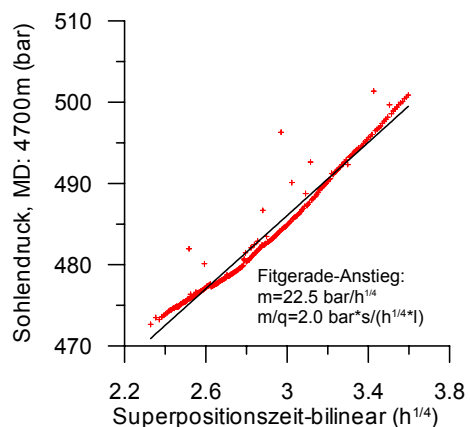


Abb. 2.5.20: Darstellung des Sohlendrucks für die 2. Injektionsphase (Test 05Mar13) in Abhängigkeit von der Superpositionszeit für bilineares Fließen. Angenommene Injektionsrate: 11.3 l/s. (65% der Gesamtfießrate von 17.4 l/s)

Der Bohrlochspeicher ist sehr gering und verdeutlicht die Unsicherheit der Bestimmung dieses Parameters. Wie bereits oben formuliert, sind $0.2 \text{ m}^3/\text{bar}$ als obere Abschätzung anzusehen. Der Anstieg der Kurve in semilogarithmischer Darstellung ist identisch wie zuvor (Abb. 2.5.20). Grundsätzlich ergibt sich auch eine ähnliche Diskrepanz zwischen der recht guten Anpassung in den Injektionsphasen und einer signifikanten Differenz in der Einschussphase (Abb. 2.5.19).

Aus dieser Anpassung kann gefolgert werden, dass das Loch in der Verrohrung die hydraulische Charakteristik der Bohrung kaum beeinflusst. Es ist wahrscheinlich, dass die hydraulische Charakteristik der zusätzlichen Abflusszone durch die Verrohrung ebenfalls durch eine Rissströmung gekennzeichnet ist. Vermutlich ist dann die Druckanpassung nicht sensitiv genug, um durch die zusätzliche Abflusszone eine signifikante Änderung des Gesamtverhaltens der Bohrung zu erwarten. Das Verhalten der Bohrung nach der Säuerung erscheint näherungsweise so, als sei der hydraulische Widerstand der Bohrung zu jedem Zeitpunkt um ca. 35 % reduziert oder die Produktivität linear zu jedem Zeitpunkt um 50 % angestiegen (Abb. 2.5.21).

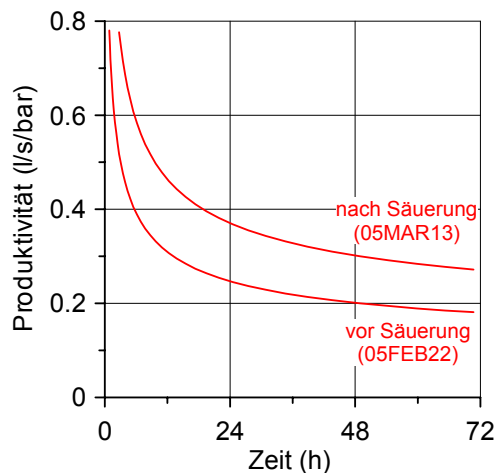


Abb. 2.5.21: Darstellung der zeitabhängigen Produktivität (Injektivität) vor der Säuerung der GPK4 und nach der Säuerung auf der Basis der in Tabelle 2.5.1 angegebenen Parameter.

Anfangsphasen der Einschussperioden

Auch hier ist es lohnenswert, die ersten Minuten der Einschussphasen der Injektionstests vor und nach der Säuerung mit hoher zeitlicher Auflösung darzustellen. Es treten in beiden Fällen nur wenig ausgeprägte Oszillationen auf. Der tendenzielle Druckabfall am Beginn der Einschussperiode ist deutlich steiler als bei vergleichbaren Injektionstests der beiden anderen Bohrungen (siehe z.B. Abb. 2.4.14). Diese Charakteristik weist auf einen signifikant kleineren Bohrlochspeicher der Bohrung GPK4 hin. Zudem sind die relativ schwachen Oszillationen ein zusätzlicher Hinweis auf Druckverluste im bohrlochnahen Umfeld, wie sie bei einem Riss mit endlicher Leitfähigkeit zu erwarten sind.

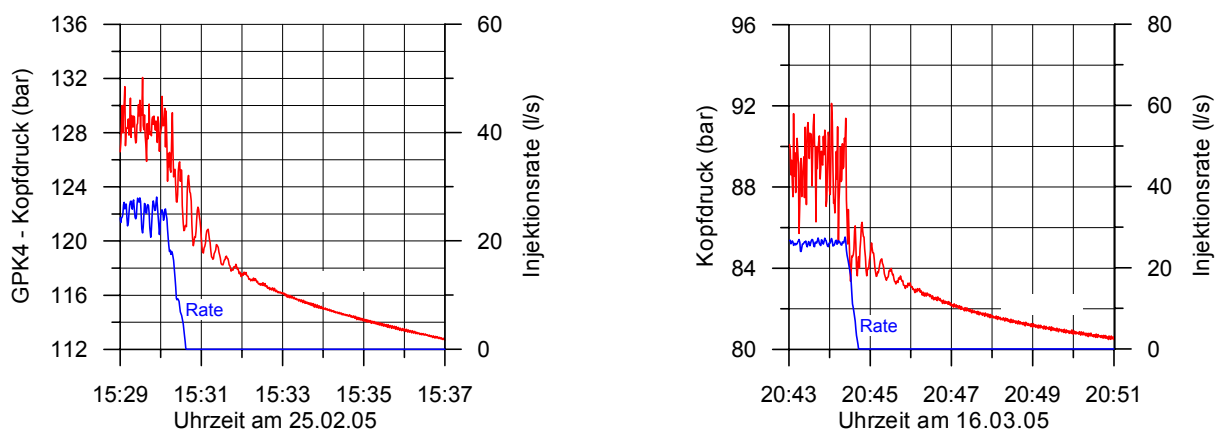


Abb. 2.5.22: Beginn der Einschussphase für die Tests vor der Säuerung (Test 05FEB22; links) und nach der Säuerung (Test 05MAR13, rechts).

Der qualitative Verlauf beider Druckkurven in Abb. 2.5.22 stützt somit die hydraulische Auswertung, die ein bilineares Fließregime und einen kleinen Bohrlochspeicher anzeigt. Der Bohrlochspeicher kann aus dem Druckabfall unmittelbar nach Shut in mit $< 0.2 \text{ m}^3/\text{bar}$ abgeschätzt werden. Eine genauere quantitative Abschätzung des Bohrlochspeichers aus der Abb. 2.5.22 ist nicht möglich, da kein linearer Druckabfall über auswertbar lange Zeiträume beobachtet wird.

2.5.5 Zusammenfassung GPK4

- Die Bohrung GPK4 wies nach dem Abteufen eine Produktivität von ca. $0.01 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{bar})$ auf.
- Die Bohrung wurde zweimal hydraulisch stimuliert: Zunächst mit einer Fließrate von 30 l/s über 3.5 Tage und einem Injektionsvolumen von 9300 m^3 im September 2004, und ca. 4 Monate später im Februar 2005 mit einer maximalen Fließrate von 45 l/s über insgesamt 4 Tage und einem Injektionsvolumen von 12300 m^3
- Während der ersten hydraulischen Stimulation wurden 16700 seismische Ereignisse und während der zweiten 8500 seismische Ereignisse registriert. Es traten keine kritischen Magnituden auf, die zu einer Beeinträchtigung der Bevölkerung geführt hätten.
- Durch die hydraulische Stimulation wurde die Produktivität der Bohrung auf ca. $0.2 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{bar})$ und damit etwa um das 20 fache gesteigert. Mit hoher Wahrscheinlichkeit wurde die Steigerung der Produktivität weitgehend durch die 1.hydraulische Stimulation erreicht. Die zweite Stimulation war vermutlich aufgrund des im Vergleich zur ersten Stimulation nur unwesentlich größeren Volumens relativ wirkungslos.
- Im Anschluss an die hydraulische Stimulation wurde die Bohrung mit Salzsäure behandelt. Es wurden insgesamt 11 t HCl mit einer Konzentration von 0.2% und einer Fließrate von 30 l/s injiziert. Während der Säuerung wurde ein signifikanter Anstieg der seismischen Aktivität im Vergleich zu einem ähnlichen Injektionstest zuvor beobachtet. Weiterhin wird eine signifikante Aufwärtsbewegung der seismischen Ereignisse infolge der Säuerung registriert.
- Ein Injektionstest zeigt, dass die Produktivität um ca. 50% auf $0.3 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{bar})$ – nach 48 h - durch die Säuerung angestiegen ist. Allerdings wurde durch ein Flowmeterlog im Anschluss an die Säuerung ein Loch in der Verrohrung festgestellt. Der zusätzliche Abfluss durch dieses Loch entspricht näherungsweise dem Produktivitätsanstieg infolge der Säuerung. Diese Tatsache, die hohe seismische Aktivität und die Aufwärtsbewegung der seismischen Ereignisse führen zu der Schlussfolgerung, dass durch die Säuerung ein zusätzlicher Fließweg durch das Loch in der Verrohrung aktiviert wurde und Zugang zu einer Abflusszone oberhalb geschaffen wurde. Umgekehrt bedeutet dies, dass die Säuerung in der Formation unterhalb der Verrohrung keinen signifikanten Effekt hatte. Das initiale Aufreißen des Lochs in der Verrohrung wird vermutlich bereits vorher, während der hydraulischen Stimulation im Februar 2005, geschehen sein, ohne hier jedoch einen signifikanten Zugang zur Formation geschaffen zu haben.

- Die Flowmeterbefahrungen zeigen an der GPK4 einen näherungsweise konstanten Zufluss über die gesamte gemessene offene Bohrlochstrecke (4760 – 5050 m – MD) an. Mehr als 30 % des Gesamtabfluss erfolgen unterhalb von 5050 m (MD). Das Abflussprofil zeigt vermutlich die Existenz eines langen vertikalen Risses (axialer Zugriss) an.
- Das hydraulische Verhalten der Bohrung wird durch ein bilineares Fließregime dominiert. Dies weist auf einen großflächigen vertikalen Riss mit einer begrenzten hydraulischen Leitfähigkeit hin. Eine gute hydraulische Anpassung wird mit einer Rissleitfähigkeit von $2\text{-}3 \cdot 10^{-13} \text{ m}^3$ und einer Transmissibilität der Formation von $1 \cdot 10^{-13} \text{ m}^3$ erzielt. Der Bohrlochspeicher ist gering und kann mit $< 0.2 \text{ m}^3/\text{bar}$ abgeschätzt werden.
- Analog wie bei den anderen beiden Bohrungen zeigen die hydraulischen Tests keine äußeren Begrenzungen des Systems an (weder Konstantdruckgrenze noch hydraulisch abdichtende Strukturen). Es tritt keine signifikante Turbulenz auf.

2.6 Zirkulationstest 2005

Zur Charakterisierung des in 5 km Tiefe erschlossenen Reservoirs wurde am 11. Juli 2005 erstmalig ein Zirkulationstest zwischen allen 3 Bohrungen (GPK2, GPK3 und GPK4) gestartet. Zunächst wurde ab dem 6. Juli in die GPK3 injiziert und aus GPK2 und 3 frei produziert. Der Kreislauf wurde am 11. Juli geschlossen, das aus GPK2 und GPK4 produzierte Wasser durch einen Wärmetauscher abgekühlt und in GPK3 reinjiziert (Abb. 2.6.1). Die Produktion erfolgte allein durch den thermischen Auftrieb, es wurden keine Förderpumpen eingesetzt.

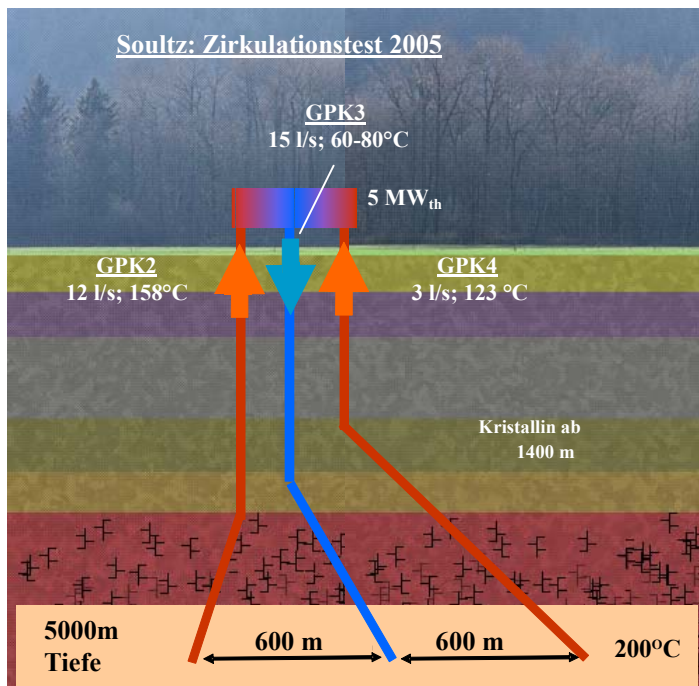


Abb. 2.6.1: Schematische Darstellung der geschlossenen Zirkulation von Juli bis Dezember 2005. Das von GPK2 und GPK4 geförderte Wasser wurde mittels eines Wärmetauschers abgekühlt und in GPK3 verpresst. Von Juli bis September war die injizierte Fließrate 15 l/s, wobei 12 l/s von GPK2 und 3 l/s von GPK4 stammten. Ab Oktober wurden verschiedene Tests mit veränderten Bohrlochkopfdrücken und Fließraten vorgenommen, um das Verhalten des Reservoirs zu untersuchen.

Im wesentlichen wurde von Juli bis Oktober 15 l/s stabil zirkuliert. Es konnten bereits nach wenigen Tagen nahezu konstante hydraulische Verhältnisse erzielt werden. Allerdings war die Produktion sehr unsymmetrisch. Aus der Bohrung GPK4 wurde nur eine Fließrate von ca. 3 l/s erzielt, während die GPK2 mit 11-12 l/s produzierte. Der Bohrlochkopfdruck wurde an den Produktionsbohrungen mit ca. 8 bar stabil gehalten, um Ausfällungen im obertägigen System zu vermeiden. Allein die Betrachtung der Produktionsfließraten verdeutlicht, dass die hydraulische Verbindung zwischen der GPK2 und GPK3 deutlich besser ist als im anderen Arm (GPK3-GPK4). Die Produktion aus der GPK4 weist zudem einen schwachen aber kontinuierlichen Abwärtstrend auf und produziert scheinbar unbeeinflusst von der Injektion in die GPK3.

Im Zeitraum Juli bis Oktober 2005 wurde ein relativ konstanter Druck von 40 bar für die Injektion benötigt. Über den gesamten Zeitraum der Zirkulation ist keine Verbesserung der Injektivität der Bohrung GPK3 zu beobachten, aber auch keine Erhöhung der Fließwiderstände im Reservoir.

Die Dichte (bei 20°C) des produzierten Fluids steigt im Zeitraum 06.07.05 – 19.10.05 wie folgt an: 1.054 → 1.058 (GPK2); 1.040 → 1.054 (GPK4). Die geringere Dichte des Fluids der Bohrung GPK4 ist durch die erst relativ kurz zuvor durchgeführte Stimulation mit Frischwasser bedingt.

Exemplarisch sind die ersten zwei Monate dieses Experiments in Abb. 2.6.2 dargestellt und wesentliche Parameter in Tab. 2.6.1 zusammengefasst.

Bohrung	Temperatur [°c]	Kopfdruck [bar]	Flieβrate [l/s]	Dichte (20°C) [g/cm ³]
GPK2	157	7.5	11.8	1.055
GPK3	60	40	14.5	1.054
GPK4	117	7.5	3.2	1.053

Tab. 2.6.1: Kenndaten der Zirkulation am 08. September 2005.

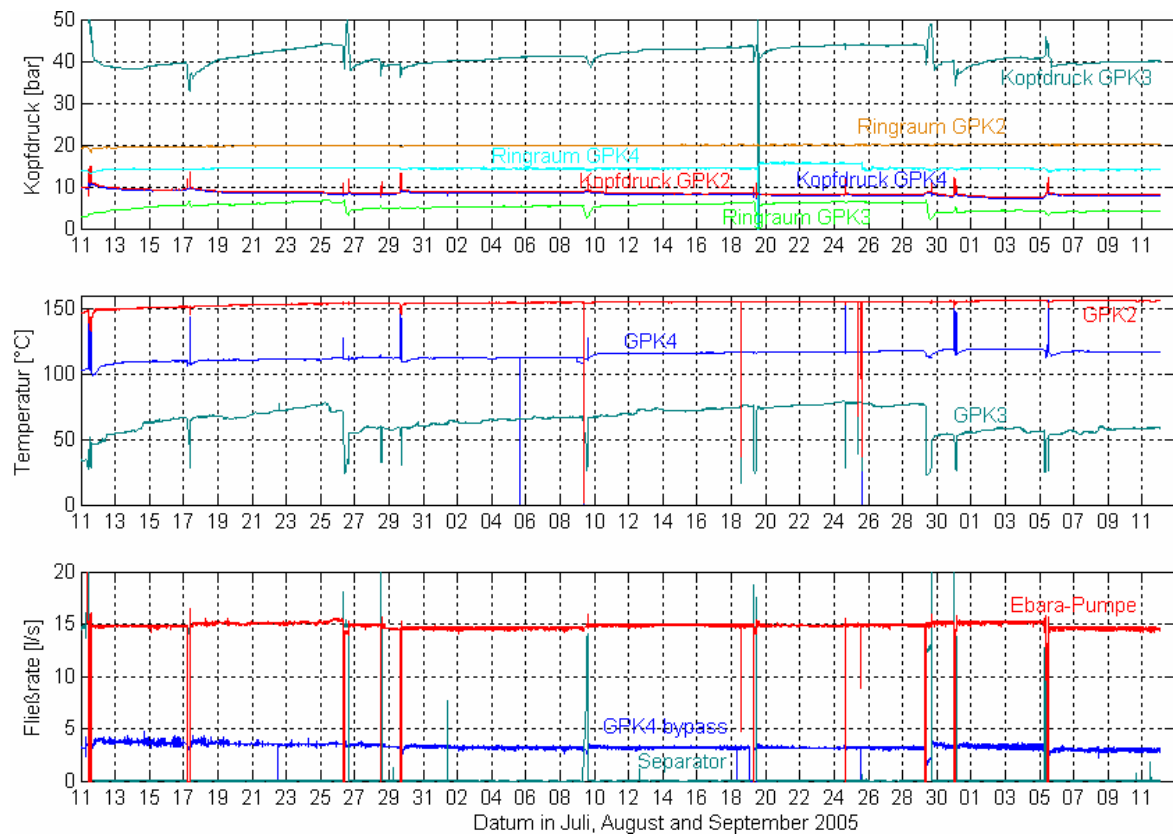


Abb. 2.6.2: Übersicht über die ersten zwei Monate des Zirkulationsexperimentes 2005. Vom BGR-Datenerfassungssystem werden Kopf- und Ringraumdrücke der Bohrungen GPK2, 3 und 4, die Temperaturen des zirkulierenden Wassers sowie die Flieβraten aufgezeichnet. Die mit ‚Ebara-Pumpe‘ benannte Flieβrate ist die Injektionsflieβrate.

Im Oktober und November wurde mit veränderten Kopfdrücken und Flieβraten gearbeitet und das System um zwei Hilfspumpen erweitert. Am 23. Dezember endete dieser Test mit einem stufenweisen ‚Shut-in‘ der Produktionsbohrungen GPK2 und 4 (Abb. 2.6.3).

Direkte Abschätzungen der Produktivitäten von GPK2 und 4 sowie der Injektivität von GPK3 wurden am Ende des Tests vorgenommen.

Aus dem Einschluss der GPK4 am 09.12. und dem daraus resultierenden Anstieg des Bohrlochkopfdruckes ergibt sich die Produktivität mit 0.4 l/s/bar, wobei dieses eine obere Grenze ist, die Temperatureffekte in der sich abkühlenden Wassersäule beinhaltet und zeitabhängig ist.

Für die Produktivität von GPK2 ergibt sich eine Abschätzung von ca. 0.5 l/s/bar, bestimmt aus der Änderung der Produktionsrate am 13.12. Die Flieβrate wurde hier von ca. 10 l/s auf

ca. 12 l/s erhöht, begleitet durch eine Reduktion des Kopfdrucks. Die Temperatur am Bohrlochkopf erhöht sich hierbei um ca. 5 C von 158.5 auf 163.5°C.

Die Injektivität der Bohrung GPK3 wurde mit 0.6 l/s/bar ebenfalls nach oben abgeschätzt, wobei hier der Zeitraum nach Abschalten der Injektionspumpe (Ebara-Pumpe) am 19.12. betrachtet wurde. Die Abschätzung der Injektivität der GPK3 aus diesem Test ist noch unsicherer als die der anderen beiden Bohrungen, da an der GPK3 die stärkste Temperaturänderung in der Wassersäule durch die Injektion von kaltem Wasser verursacht wird.

Bedeutsamer als die Produktivitätsangaben zu den einzelnen Bohrungen sind jedoch die Druckverluste im Reservoir bzw. die Impedanz des Reservoirs zwischen den Bohrungen. Hierauf wird weiter unten eingegangen.

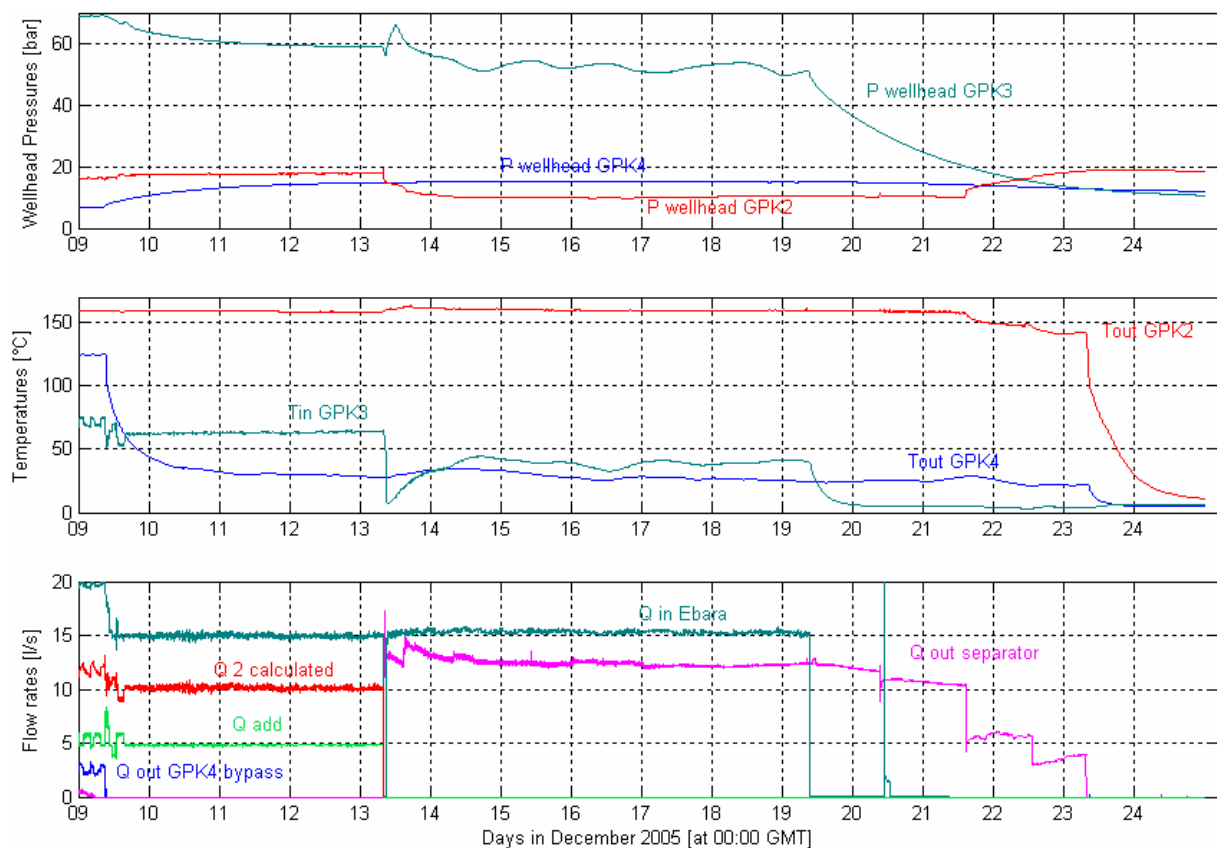


Abb. 2.6.3: Ende des Zirkulationstests im Dezember 2005. Es sind von unten nach oben Fließraten, Temperaturen und Bohrlochkopfdrücke dargestellt, wobei jeweils dunkelgrün für GPK3, rot für GPK2 (magenta im Falle der Produktion über den Separator) und blau für GPK4 stehen.

Tracer

Als Tracer wurden am 19. Juli 150 kg Fluoreszin über 24 Stunden der Injektion in GPK3 hinzugefügt. Nach vier Tagen wurde er in GPK2 detektiert und erreichte nach ca. 14 Tagen sein Maximum. In GPK4 konnte der Tracer nach ca. 1 Monat nachgewiesen werden, das Maximum scheint bislang (14.12.2005) allerdings noch nicht erreicht (Abb. 2.6.4).

Die Auswertungen werden durch die kontinuierliche – und nicht pulsartige – Zugabe des Tracers sowie der Reinjektion des geförderten Wassers kompliziert. Erste Ergebnisse zeigen, dass nach 70 Tagen Zirkulation 19 % des injizierten Tracers aus GPK2 wieder gefördert wurden. Das Durchbruchvolumen beträgt hier ungefähr 11500 m³ (12 Tage Verweilzeit bei ca. 11 l/s Produktion der GPK2).

Dieses relativ geringe Durchbruchvolumen zwischen GPK3 und GPK2 deutet auf eine relativ schmale Störungszone (wenige Meter Mächtigkeit) bzw. sogar auf eine Rissfläche hin, über die beide Bohrungen dominant miteinander hydraulisch kommunizieren. Im gewissen Widerspruch zur Annahme einer dominanten Struktur zwischen GPK3 und GPK2 steht jedoch die geringe Wiederfindungsrate des Tracers. Es ist noch eine weitergehende Prüfung der Tracerdaten notwendig, um hier zu verlässlicheren Aussagen zu kommen.

Im November 2005 enthielt das von der GPK4 geförderte Wasser 78 % und das der GPK2 85 % des ursprünglichen Thermalwassers („Brine“). Dies zeigen chemische Analysen, die von BRGM durchgeführt wurden.

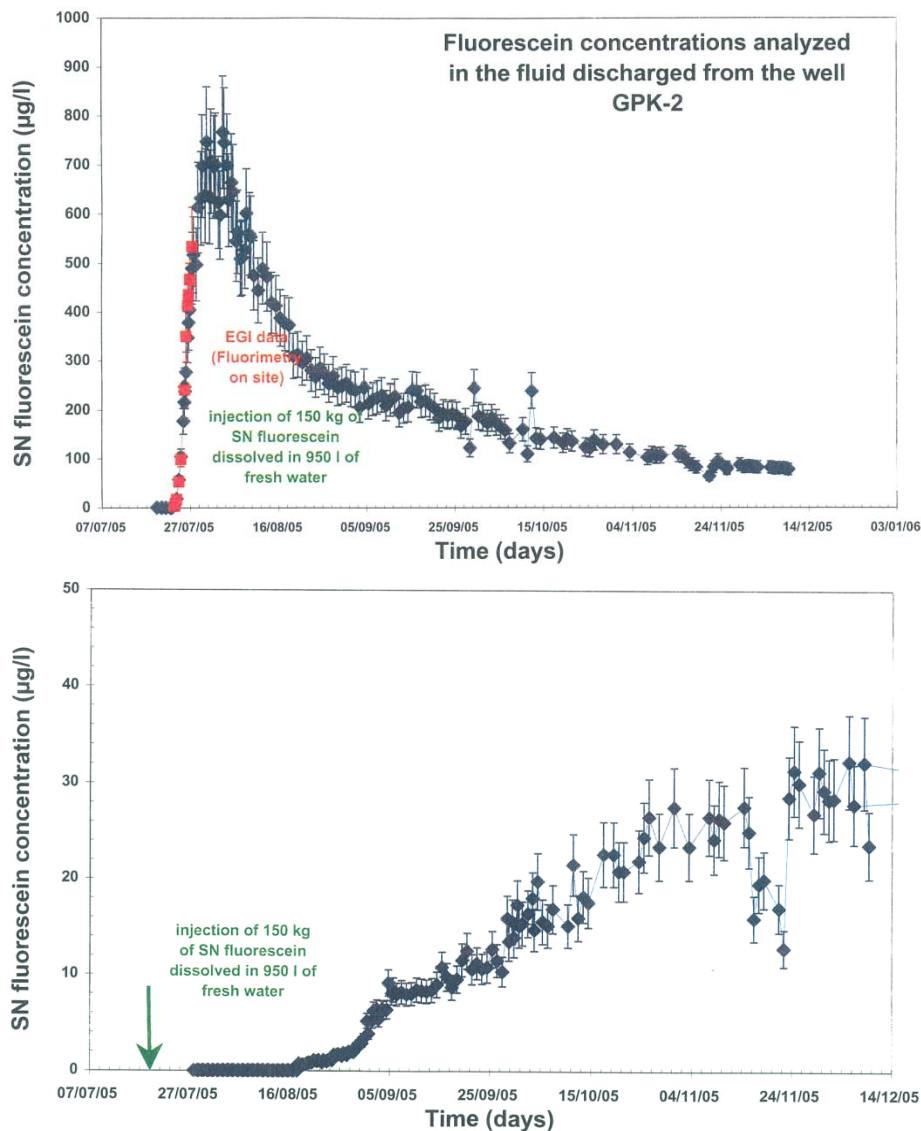


Abb. 2.6.4: An GPK2 (oben) und GPK4 (unten) zurückgewonnene Tracer. (Quelle: Bernard Sanjuan, BGRM).

Seismik

Während des gesamten Zirkulationstests wurde an der Oberfläche und mit dem untertägigen Netzwerk die mikroseismische Aktivität beobachtet. Für die Lokalisierung der seismischen Ereignisse wurde das permanent installierte Oberflächennetzwerk verwendet, welches aus 9

Stationen besteht. Die Daten der in den Bohrlöchern abgehängten Geophone und Beschleunigungsmesser werden zu einem späteren Zeitpunkt bearbeitet.

Insgesamt war die seismische Aktivität mit durchschnittlich 3 Ereignissen pro Tag gering. Bis November wurden 435 Lokalisierungen berechnet. Die Magnituden lagen größtenteils bei -0.5 bis 1.4. Allerdings nahm die seismische Aktivität bei Erhöhung der Fließrate deutlich zu. Maximale Magnituden von bis zu 2.2 wurden während Phasen mit einer Injektionsfließrate von 22 l/s erreicht. Die Ereignisse traten unter GPK2 und GPK3 gehäuft auf und erschienen weniger unter GPK4.

Der Anstieg der Magnitude bis zu 2.2 zeigt, dass die Zirkulation mit einer Rate von mehr als 20 l/s allein aus diesem Grund als kritisch eingeschätzt werden muss.

Die Abbildung 2.6.5 gibt eine Übersicht über die Verteilung der seismischen Ereignisse, die von Juli bis November aufgezeichnet und lokalisiert wurden. Dabei sind Magnituden > 1.4 skaliert dargestellt, Magnituden < 1.4 sind unskaliert. Hier wird die Häufung der Ereignisse unter GPK2 und GPK3 deutlich.

In Abb. 2.6.6 sind Magnituden > 1.4 skaliert dargestellt. Die größten Ereignisse wurden bei einer erhöhten Injektionsfließrate aufgezeichnet.

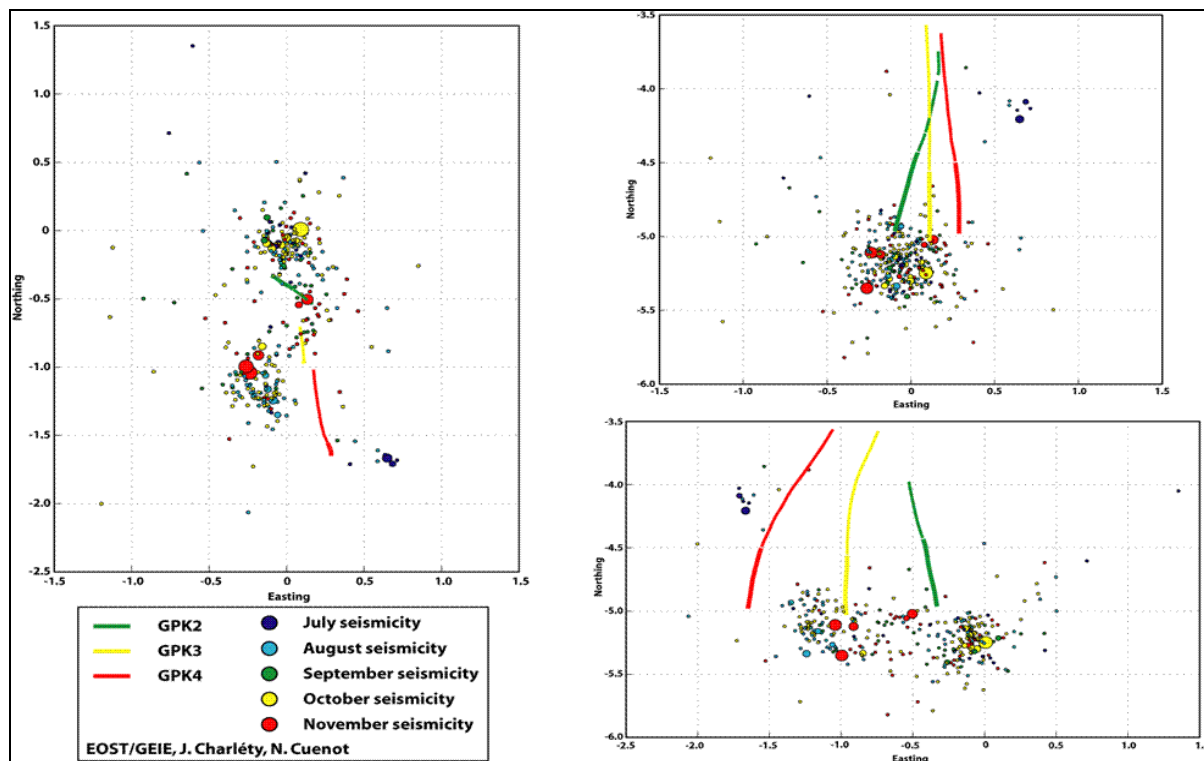


Abb. 2.6.5: Lokalisierte seismische Ereignisse von Juli bis November 2005 (basierend auf dem seismischen Oberflächennetzwerk).

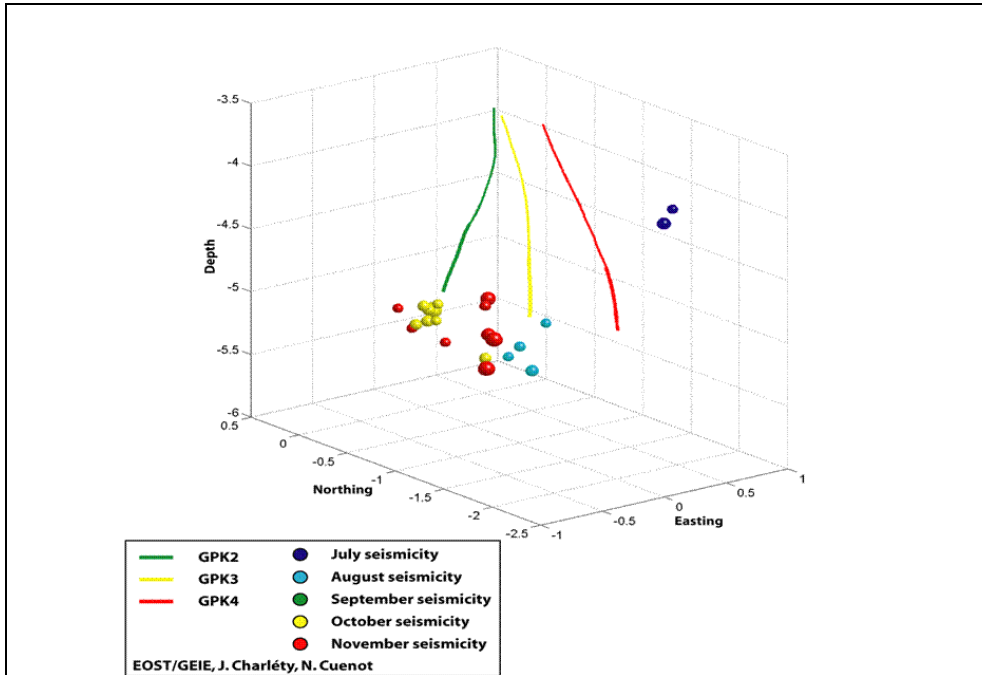


Abb. 2.6.6: Lokalisierte seismische Ereignisse von Juli bis November mit einer Magnitude > 1.4.

Temperatur- und Drucklogs

Zur näheren Charakterisierung der hydraulischen Verhältnisse in den Bohrungen wurden am 8. und 9. September Temperatur – und Drucklogs in den Bohrungen GPK3 und GPK4 unter stabilen hydraulischen Verhältnissen gemessen. Leider konnten in der Bohrung GPK2 keine vergleichbaren Bohrlochmessungen durchgeführt werden, da hier die Temperatur am Bohrlochkopf zu hoch für diese technischen Operationen war. Die Abb. 2.6.7 zeigt den Druckverlauf in der GPK3 und GPK4 während der Injektion von 14.5 l/s beziehungsweise der Produktion von 3.4 l/s. Die Drücke in 4600 m (TVD) betragen 509.5 bar (GPK3) und 449.5 bar (GPK4).

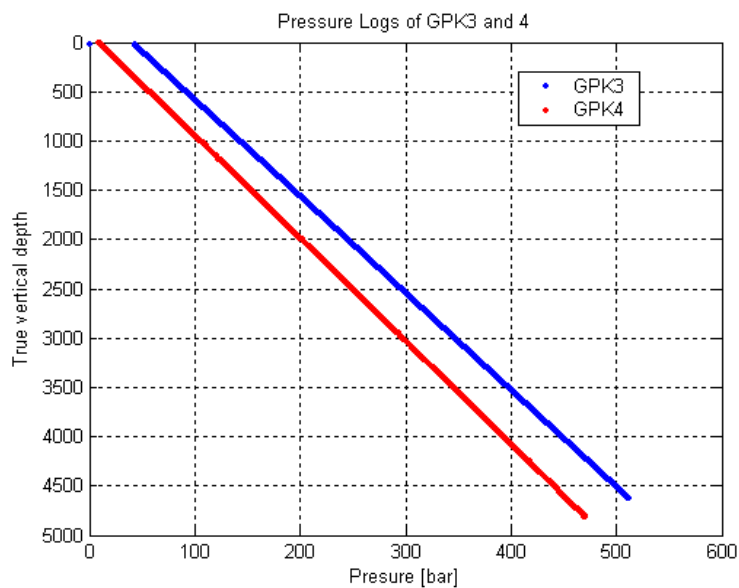


Abb. 2.6.7: Druckmessungen während der Injektion mit 14.5 l/s in die GPK3 und der Produktion von 3.4 l/s aus der GPK4 am 8. bzw. 9. September 05.

Für weitere Betrachtungen von besonderem Interesse ist hier der Druck in 4700 m (TVD) der Bohrung GPK3. Durch Extrapolation aus Abb. 2.6.7 entnimmt man hierfür ca. 519 bar. Die Druckdifferenz zwischen ungestörtem Ruhedruck (460 bar) und dem Injektionsdruck in Formationstiefe bei Injektion von 14.5 l/s beträgt somit 59 bar.

Abbildung 2.6.8 zeigt die Temperaturmessung an GPK4 während der Produktion im Vergleich zu den Gleichgewichts-Temperaturen. Es wird deutlich, dass durch die Stimulation der Jahre 2004 und 2005 verursachte Auskühlung im unteren Teil der Bohrung auch nach 2 Monaten der Produktion noch deutlich sichtbar ist. Der untere Teil ist gegenüber dem Ruhezustand 10°C kälter: ab ca. 4000 m ist dann die Erwärmung durch die Produktion erkennbar. In den oberen 1000 m ist der Temperaturverlust am stärksten, da hier der Temperaturgradient der ungestörten Gebirgstemperatur am größten.

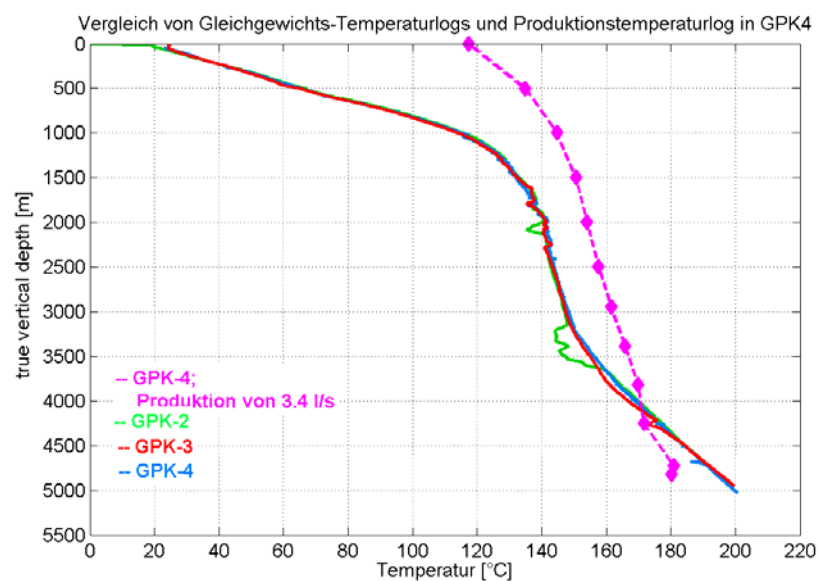


Abb. 2.6.8: Vergleich der Temperaturen im Ruhezustand mit den im September 2005 während der Produktion in GPK4 gemessenen Werten. Die magentafarbenen Rauten markieren die Lokationen, an denen die Messsonde 30 min am Platz gehalten wurde, die Linie ist linear zwischen je zwei Messpunkten interpoliert.

Wegen der großen Zeitkonstante der verwendeten Messsonde ist es schwierig, Details auszuwerten. Verlässliche Messwerte sind nur in Abständen von 500 m gegeben, wo die Sonde für je 30 min am Platz gehalten wurde.

In GPK3 waren zeitlich höher auflösende Temperaturmessungen möglich. Allerdings ist die Temperaturmessung insbesondere im Bereich von ca. 2000 m sehr unzuverlässig, da hier ein unplausibler Temperaturanstieg um ca. 20°C innerhalb von etwa 200 m gemessen wird. (Abb. 2.6.9, links). Das Temperaturprofil im unteren Teil deutet auf 2 weitere zwei weitere Abflusszonen hin, die oberhalb der bekannten Störung bei 4750 m liegen.

Leider wurde hier die Messung nicht bis in größere Tiefen durchgeführt, so dass der Vergleich mit der Auskühlung in der tiefer gelegenen Hauptabflusszone nicht möglich ist. Aufgrund der relativ geringen Temperaturerhöhung in den zusätzlich gefundenen Abflusszonen ist deren Beitrag zum Gesamtabfluss vermutlich gering.

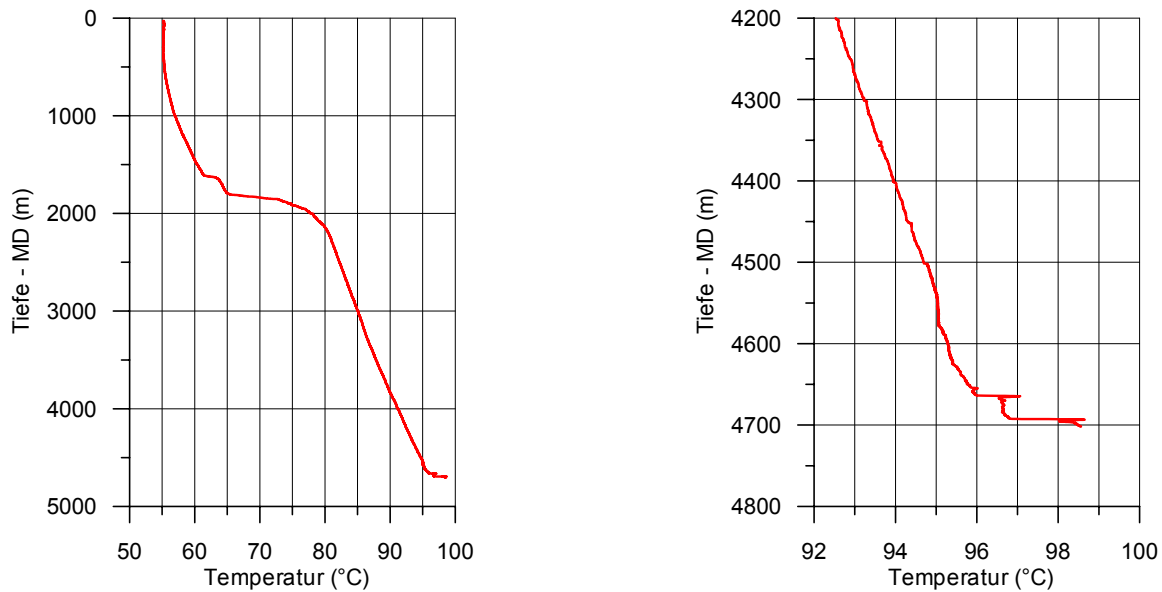


Abb. 2.6.9: Temperaturlog in der GPK3 während der Zirkulation am 8./9.09.05. Rechts ist der Ausschnitt unterhalb von 4200 m vergrößert dargestellt.

Hydraulische Impedanz GPK2-GPK3

Der Zirkulationstest bestätigt, dass die Bohrung GPK4 hydraulisch nur sehr schlecht mit der Injektionsbohrung verbunden ist. Für die Energiegewinnung im aktuellen Zustand ist daher vor allem die Zirkulation im Arm GPK3 - GPK2 entscheidend. Als Basis zur Bestimmung des Energieaufwands für die Zirkulation zwischen diesen beiden Bohrungen sind die Druckverluste bzw. die hydraulische Impedanz in diesem Arm wichtig. Aus den Daten während der Zirkulation lassen sich die Druckverluste im Reservoir zwischen GPK2 und GPK3 abschätzen (Tab. 2.6.2).

Bohrung	Fließrate (l/s)	Kopfdruck (bar)	Mittl. Dichte (g/cm ³)	Sohlendruck 4700m (bar)	Ruhedruck 4700m (bar)	Druckdifferenz (bar)
GPK2	11.8	7.5	0.965 (175°C)	453 (berechnet)	460	- 7
GPK3	- 14.5	40	1.040	519 (gemessen)	460	59

Tab. 2.6.2: Bestimmung der Druckänderung an den Bohrungen GPK2 und GPK3 während der Zirkulation auf der Basis der Daten vom 8.09.05. Die mittlere Dichte der Wassersäule in der GPK2 wurde für einen Druck von 220 bar und einer Temperatur von 175°C aus Hilbert (1979) für eine Salinität von 8% NaCl entnommen.

Hieraus wird deutlich ersichtlich, dass die Hauptdruckverluste im Umfeld der GPK3 auftreten. Nimmt man eine geschlossene Zirkulation zwischen GPK2 und GPK3 mit 12 l/s an, so reduziert sich die Druckdifferenz an der GPK3 von 59 bar auf 49 bar. Gleichzeitig sinkt hierdurch bedingt der Druck an der GPK2 um ca. 2 bar. Folglich beträgt dann die Druckdifferenz 9 bar an der GPK2.

Zwischen der GPK2 und GPK3 entstehen demnach Druckverluste von ca. 58 bar bei der Zirkulation von 12 l/s. Hieraus folgt eine hydraulischer Widerstand (Impedanz) zwischen GPK3 und GPK2 von 5 bar/(l/s).

Energiebilanz

Während des Zirkulationstests wurde Wasser mit einer mittleren Fließrate von ca. 14.5 l/s zirkuliert. Die mittlere Produktionstemperatur betrug 150°C (geschätzte Mischungstemperatur der Bohrungen GPK2 und GPK4) und die nutzbare Temperaturdifferenz betrug ca. 90°C (150 – 60°C). Hieraus folgt eine umgesetzte thermische Leistung von ca. 5.5 MW, die für eine Bruttostromproduktion von ca. 660 kW_{el} genügen würde bei einem angenommenen Wirkungsgrad von 12 %. Abziehen hiervon ist der Energieeinsatz für die Injektionspumpe. Dieser lag bei ca. 90 kW_{el}, könnte allerdings durch Einsatz einer auf die vorliegende Zirkulationsrate besser angepassten Pumpe bis auf ca. 50 kW_{el} reduziert werden. Somit verbliebe eine Nettostromproduktion von maximal 600 kW_{el}.

2.7 Vergleich und Bewertung der Stimulationsoperationen

An allen 3 Bohrungen (GPK2, GPK3, GPK4) wurden hydraulische Stimulationen und Säurebehandlungen durchgeführt. Es ist sinnvoll sowohl die hydraulischen Stimulationen als auch die Säuerungen untereinander zu vergleichen.

Hydraulische Stimulationen

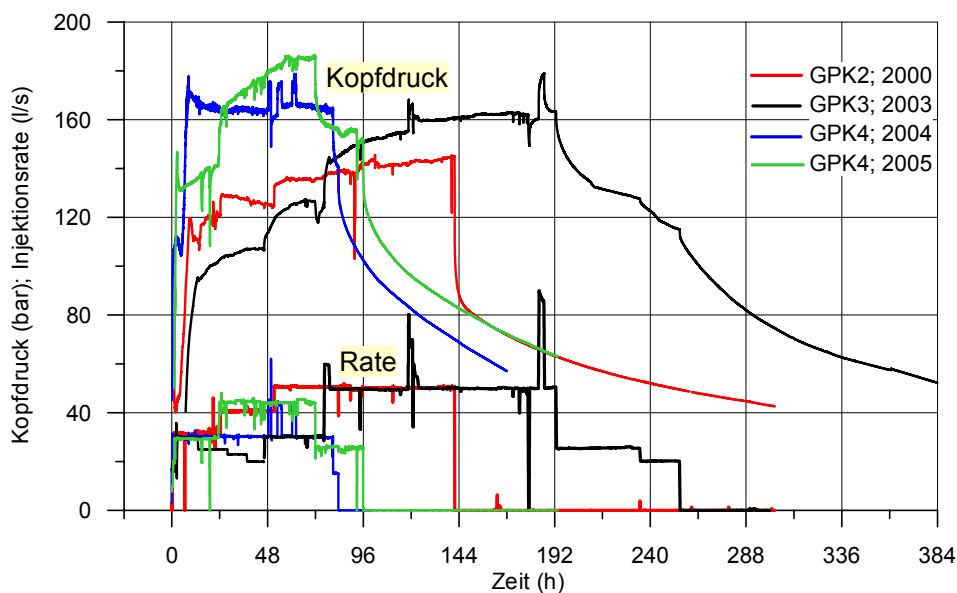


Abb. 2.7.1: Darstellung von Kopfdruck und Injektionsrate für die hydraulischen Stimulationen der Bohrungen GPK2, GPK3 und GPK4 im direkten Vergleich.

In Abb. 2.7.1 sind der Druckverlauf und die Fließrate für die hydraulischen Stimulationen der Bohrungen GPK2 bis GPK4 im direkten Vergleich dargestellt. Aus der Darstellung können folgende Aussagen bzw. Hypothesen abgeleitet werden:

- Der Druckanstieg am Beginn der Stimulation verläuft für die GPK3 am flachsten und für die Bohrung GPK4 am steilsten. Dies korrespondiert mit der These, dass an der GPK3 von Beginn an eine hochdurchlässige Struktur (Störung) mit hoher Speicherefähigkeit angeschlossen war. Der steile Druckanstieg an der GPK4 ist

vermutlich durch die sehr geringe Produktivität der Bohrung im Ausgangszustand bedingt.

- Das geringste Druckniveau während der Stimulation wird mit ca. 140 bar an der GPK2 beobachtet. Dabei müssen hier noch ca. 10 bar Reibungsdruckverluste in der Rohrtour abgezogen werden, um den Druck mit den anderen beiden Bohrungen vergleichen zu können. An der GPK3 stellt sich bei gleicher Fließrate (50 l/s) ein Druck von ca. 160 bar ein. Der höchste Kopfdruck wird an der GPK4 mit ca. 180 bar bei sogar geringerer Rate (45 l/s) registriert. Das erreichte Druckniveau während der Stimulation wird wesentlich durch Reibung in dem angeschlossenen Riss kontrolliert, wenn man plausibel unterstellt, dass der kritische Druck für die Rissausbreitung an allen 3 Bohrungen näherungsweise konstant ist. Das erreichte Druckniveau während der Stimulation korrespondiert mit den hydraulischen Interpretationen: Der Riss mit der geringsten hydraulischen Leitfähigkeit wird an der GPK4 beobachtet, während an die GPK2 und GPK3 besser leitfähige bzw. unendlich leitfähige Riss angeschlossen sind.
- Phasen effizienter Stimulation sind tendenziell durch einen flachen bzw. abfallenden Druck bei konstanter Fließrate gekennzeichnet, da dann der Druck durch bruchmechanische Vorgänge „gekappt“ wird. Demnach sind die Stimulation der GPK2 und die erste Stimulation der GPK4 als effiziente Stimationsoperationen einzuschätzen. Die Stimulation der GPK3 ist vermutlich weitgehend durch das Auffüllen und Aufweiten einer großen permeablen Struktur charakterisiert. Erst in den letzten 3 Tagen wird näherungsweise eine Stabilisierung des Drucks erreicht. Die zweite Stimulation der GPK4 im Jahr 2005 kann als nahezu wirkungslos eingeschätzt werden. Hier impliziert der Druckverlauf, dass lediglich eine bereits vorhandene Struktur wieder aufgefüllt und aufgeweitet wird (vergleiche auch die Diskussion in Abschnitt 2.5.2).
- Phasen mit abfallendem Druck während der Stimulation weisen auf Zugrisse in Kombination mit einem vertikalen Risswachstum hin. Solche Phasen findet man bei der ersten Stimulation der GPK4 (2004) und bei der Stimulation der GPK2. Möglicherweise ist sogar die komplette erste Stimulation der GPK4 durch Zugrissausbreitung dominiert. Der Druckverlauf stimmt qualitativ mit dieser Vorstellung überein.
Die Druckkurven während der Stimulationen deuten somit darauf hin, dass nicht nur Scherriss- sondern auch Zugrissausbreitung bzw. eine Kombination von beidem stattfindet. Es kann davon ausgegangen werden, dass durch Scherung Risse mit höherer hydraulischer Leitfähigkeit geschaffen werden als durch Zugrisse. Die beobachteten schlechteren hydraulischen Eigenschaften des an die Bohrung GPK4 angeschlossenen Risses (bilineares Fließen) korrelieren mit der These der Zugrissausbreitung.
- Der Druck nach Beendigung der Stimulation fällt an der GPK3 nur sehr langsam ab. Auch hier zeigt sich der große angeschlossene Bohrlochspeicher. Überraschend ist hingegen der starke Druckabfall an der GPK2. Für die GPK2 muss berücksichtigt werden, dass allein infolge des Bohrlochausbaus ca. 10 bar Reibungsdruckverluste in der Rohrtour bei einer Fließrate von 50 l/s auftreten. Zudem ist hier die Änderung der Fließrate deutlich stärker (von 50 l/s auf 0 l/s).

Es ist instruktiv, die während der Stimulation gemessene Produktivität mit derjenigen in Injektionstests danach zu vergleichen. Die Produktivität wird jeweils zum Ende der Stimulation, bei annähernd konstantem Druck ausgewertet und der Referenz-Ruhedruck (Kopfdruck) für die Stimulation wird mit Null angenommen. Tabelle 2.7.1 zeigt den Vergleich.

	GPK2	GPK3	GPK4
Produktivität (l/(s*bar)- Stimulation	0.4 (50/130)	0.3 (50/160)	0.2 (30/160)
Produktivität (l/(s*bar) - danach (s.a. Tab. 2.6.1)	0.5 (bei 15 l/s)	0.35	0.2

Tab. 2.7.1: Vergleich der Produktivität am Ende der hydraulischen Stimulation und in Injektionstests danach.

Bei allen 3 Bohrungen besteht eine recht gute Übereinstimmung zwischen der Produktivität während der Stimulation und der in Injektionstests unter „normalen“ Bedingungen (unterhalb des Fracdrucks) registrierten Produktivität. Dies bedeutet, dass die während der Stimulation erzielte Produktivität auch nach der hydraulischen Stimulation erhalten bleibt. Folglich wurde mit den hydraulischen Stimulationen, im Rahmen der Testauslegung, ein sehr guter Erfolg erzielt. Höhere Produktivitäten waren unter den gegebenen Bedingungen und insbesondere mit den jeweils eingesetzten Fließraten nicht zu erwarten. Durch Anwendung von höheren Fließraten hätte man sehr wahrscheinlich auch höhere Produktivitäten erzielt.

Säuerung

Die 3 Bohrungen wurden im Anschluss an die hydraulische Stimulation mit folgenden Mengen, Konzentrationen und Dauer an Salzsäure (HCl) behandelt:

- GPK2: 1.4 t, 0.1 - 0.2 %, 12 h (15 - 30 l/s)
- GPK3: 3 t, 0.45 %, 12 h (20 l/s)
- GPK4: 11 t, 0.2 %, 48 h (30 l/s)

Im Vergleich zu Säurebehandlungen in der Ölindustrie sind die eingesetzten Mengen als normal (GPK4) einzuschätzen. Die Konzentration war sehr gering, wohingegen die Zeitdauer der Säurebehandlung lang war.

An der GPK2 konnte durch die Säurebehandlung schlagartig ein hydraulischer Widerstand im Bohrloch bzw. im unmittelbaren Bohrlochumfeld reduziert werden. Es wurde hiermit die Turbulenz verringert. Bei einer Fließrate von 30 l/s reduzierte sich der Kopfdruck um ca. 10 bar (von 70 auf 60 bar), während bei einer Fließrate unterhalb von 15 l/s kein signifikanter Effekt der Säuerung nachweisbar war. Es ist nahe liegend, dass die Säuerung hier den hydraulischen Durchgang im Bohrloch selbst verbessert hat (Es befinden sich eine Sonde, 700 m Kabel und vermutlich Gesteinsbrocken im Bohrloch)

An der GPK3 konnte kein signifikanter Effekt der Säuerung nachgewiesen werden. Hingegen wurde die Produktivität der GPK4 durch die Säuerung um 50 % gesteigert (von 0.2 auf 0.3 l/s/bar). Es ist sehr wahrscheinlich, dass durch die Säuerung eine hydraulische Verbindung durch das „Loch“ in der Verrohrung zu einer oberhalb gelegenen Abflusszone geschaffen wurde. Insofern hat die Säuerung hier zu einer Verbesserung der Fließwege im bohrlochnahen Umfeld beigetragen. Es ist hierbei aber nicht auszuschließen, dass der Zementmantel im unmittelbaren Umfeld der Bohrung durch die Säuerung angegriffen wurde. Im Zielbereich, der offenen Bohrlochstrecke der GPK4, konnte kein signifikanter Effekt der Säuerung nachgewiesen werden.

An allen 3 Bohrungen konnte bisher kein eindeutiger Nachweis erbracht werden, dass durch die Säuerung die hydraulische Leitfähigkeit der Risse im Umfeld der Bohrungen verbessert wird. An den Bohrungen GPK2 und GPK3 besteht vermutlich auch gar kein Potenzial zur Verbesserung der Risseigenschaften, da hier ohnehin schon unendlich leitfähige Risse an die Bohrungen angeschlossen sind. Die beobachteten positiven Effekte der Säurezugabe in der GPK2 und GPK4 sind eher auf Nebeneffekte – siehe oben - zurück zu führen.

Säurebehandlungen sind eine Stimulationsmethode, um das bohrlochnahe Umfeld hydraulisch zu verbessern und können hydraulische Stimulationen aufgrund ihrer deutlich geringeren Reichweite nicht ersetzen. Die beiden Hauptprobleme des Reservoirs in Soultz, die ungenügende hydraulische Kommunikation zwischen GPK3 und GPK4 sowie die ungenügende Produktivität der GPK3, können durch Säuerung nicht behoben werden. Einzig in der GPK4 besteht ein Potential zur Verbesserung der hydraulischen Leitfähigkeit des angeschlossenen Risses. Denkbar wäre hier eine nochmalige Säuerung mit deutlich höherer Konzentration und noch größerer Menge als bisher. Die Säure sollte dann jedoch unbedingt über ein coil tubing direkt in die Formation gepumpt werden, um Korrosion an der Rohrtour zu vermeiden.

In Anbetracht der oben erwähnten Hauptprobleme sollten aber hydraulische Stimulationen Vorrang gegenüber einer weiteren Säuerung haben.

2.8 Hydraulischer Vergleich der Bohrungen

In der Tab. 2.8.1 sind die wesentlichen hydraulischen Eigenschaften der Bohrungen nach den Stimulationsoperationen zusammengefasst.

	GPK2	GPK3	GPK4
Dominantes Fließregime	Formationslinear	Formationslinear	Bilinear
Bohrlochspeicher-Größenordnung (m ³ /bar)	1	1	< 0.2
Transmissibilität – Größenordnung (Dm)	0.1		
Reservoirbegrenzung	keine	keine	keine
Signifikante Turbulenz	ja	nein	nein
Reservoirdruck (bar) in 4700m, TVD	460		
Produktivität (48 h) [l/(s*bar)]	0.5 (bei 15 l/s)	0.35	0.3 (0.2)

Tab. 2.8.1: Hydraulische Eigenschaften der Bohrungen GPK2, GPK3 und GPK4 nach hydraulischer Stimulation und Säuerung. Die Produktivitätsangabe für die GPK4 in Klammern bezieht sich auf die Produktivität nach der hydraulischen Stimulation und vor der Säuerung.

Nachfolgend werden die Parameter und Charakteristika näher erläutert.

Hydraulische Charakteristik und Bohrlochspeicher

An allen 3 Bohrungen wird durch die hydraulische Interpretation eine dominante Rissströmung aufgezeigt. Die Druckänderung ist proportional zur 2.Wurzel bzw. zur 4.

Wurzel aus der Zeit. Insbesondere wird nirgends ein radiales Fließregime beobachtet. Die Bohrungen schneiden offensichtlich großflächige Risse, die hydraulisch mit der Formation verbunden sind. Die Bohrungen GPK2 und GPK3 sind durch unendlich leitfähige Risse gekennzeichnet; hier überwiegt folglich ein lineares Fließregime (formationslinear). An der Bohrung GPK4 treten signifikante Druckverluste im Riss auf; hier wird ein bilineares Fließregime beobachtet. Die Angaben zum Bohrlochspeicher korrespondieren mit den beobachteten Fließregimes. An den Bohrungen GPK2 und GPK3 werden ungewöhnlich große Bohrlochspeicherkoeffizienten gefunden, da die großflächigen und nachgiebigen Risse als Bohrlochspeicher wirksam sind. An der Bohrung GPK4 kann der Riss aufgrund der darin auftretenden Druckverluste nur partiell oder gar nicht als Bohrlochspeicher wirksam sein. Diese unterschiedliche Charakteristik der Bohrungen GPK2 und GPK3 einerseits sowie GPK4 andererseits wird durch weitere Beobachtungen gestützt. So werden nur an den Bohrungen GPK2 und GPK3 ausgeprägte Druckoszillationen nach Injektionstests aufgezeichnet als zusätzlicher Hinweis auf großflächige Risse und geringe bohrlochnahe Druckverluste. Weiterhin zeigen die Flowmeterbefahrungen an der GPK4 einen quasi kontinuierlichen Abfluss über das gesamte offene Bohrloch. An den Bohrungen GPK2 und GPK3 dominieren dagegen diskrete Zuflussstellen. Dies stützt die Vermutung, dass an der Bohrung GPK4 ein langer Axialriss und damit ein Zugriss existiert, wohingegen an den anderen beiden Bohrungen Scherrisse vorliegen, die aufgrund der Spannungssituation nicht vertikal orientiert sind. Scherrisse haben aufgrund der Versetzung der Rissflächen gegeneinander tendenziell eine größere hydraulische Leitfähigkeit als Zugrisse.

Die ähnlichen hydraulischen Eigenschaften der Bohrungen GPK 2 und GPK3, die Ergebnisse des Zirkulationstests sowie die seismischen Beobachtungen stützen die These, dass die Bohrungen GPK2 und GPK3 über eine dominante Störungszone miteinander hydraulisch verbunden sind. Diese Störungszone wurde insbesondere in den UBI-Logs an beiden Bohrungen nachgewiesen. Die Bohrung GPK4 hingegen ist hydraulisch kaum mit den anderen beiden Bohrungen verbunden.

Transmissibilität

Die Transmissibilität der Formation kann relativ sicher bestimmt werden, wenn sich der Druck linear mit dem Logarithmus der Zeit ändert und somit ein radiales Fließregime dominiert. An den 3 Bohrungen wird jedoch kein radiales Fließregime beobachtet und die Bestimmung der Transmissibilität der Formation ist recht unsicher. Es wird hier die Größenordnung der Transmissibilität mit 0.1 Dm aus dem extrapolierten Verlauf der 1. Ableitung des Drucks abgeleitet.

Rissfläche und Rissleitfähigkeit

Für formationslineares Fließen kann aus dem transienten Druckverlauf bei bekannter Permeabilität der Formation die effektive Rissfläche bestimmt werden, über die der Abfluss in die Formation erfolgt. Für die Bohrung GPK3 wird die effektive Rissfläche des unendlich leitfähigen Risses mit 25000 – 50000 m² abgeschätzt bei einer Transmissibilität der Formation zwischen 0.2 Dm und 0.05 Dm und konstanter Risshöhe von 50 m.

An der Bohrung GPK4 überwiegt bilineares Fließen und die Rissdimensionen sind hier nur schwer zugänglich. Bei einer angenommenen Transmissibilität der Formation von 0.1 Dm kann die Rissleitfähigkeit mit ca. 0.3 Dm bestimmt werden (angenommene Risshöhe: 200 m).

Für die Bohrung GPK2 wird die hydraulische Interpretation maßgeblich dadurch erschwert, dass Druckmessungen maximal in einer Tiefe von 3500 m (MD) und damit mehr als 1000 m oberhalb der Abflusszone durchgeführt wurden. Aufgrund der großen Unsicherheit soll hier auf eine Abschätzung der effektiven Rissfläche verzichtet werden.

Reservoirbegrenzung

An allen 3 Bohrungen wird niemals eine Stabilisierung des Drucks oder eine zunehmende Druckänderung für große Zeiten beobachtet. Die Druckkurven weisen in allen Fällen auf „unendlich“ ausgedehnte Reservoirs hin. Folglich sind alle Bohrungen an permeable Strukturen im weiteren Umfeld der Bohrungen angeschlossen. Es sind keine Konstantdruckgrenzen oder hydraulisch abdichtende Strukturen wirksam.

Turbulenz

An den Bohrungen GPK3 und GPK4 ist bis zu einer Injektionsrate von ca. 25 l/s kein Einfluss von Turbulenz spürbar. Der Druck steigt proportional zur Fließrate an. Hydraulische Tests mit höheren Raten wurden hier nicht durchgeführt. Hingegen findet man an der Bohrung GPK2 deutliche Hinweise auf Turbulenz auch nach der Säuerung. Bei einer Fließrate von 30 l/s treten bohrlochnah Druckverluste von ca. 20 bar auf während bei der halben Fließrate von 15 l/s lediglich ca. 5 bar beobachtet werden. Es wäre wünschenswert, die Bohrung GPK2 mit mehr als 2 Injektionsstufen zu testen, um insbesondere die Druckverluste bei hohen Fließraten (bis zu 50 l/s) besser prognostizieren zu können.

Aufgrund der Turbulenz nimmt die Produktivität der Bohrung GPK2 mit steigender Fließrate ab.

Ungestörter Reservoirdruck

Zur Bestimmung des Reservoirdrucks wurden Messungen des Sohlendrucks unter relativ ungestörten Bedingungen vor Beginn von Injektionstests ausgewertet. Im Einzelnen handelte es sich dabei um folgende Tests:

- GPK2 - Injektion (00FEB25); p_0 [4374 m] = 436 bar: p_0 [4700 m] = 467 bar¹
- GPK2 – Injektion (03JAN23); p_0 [3495 m] = 348 bar: p_0 [4700 m] = 456 bar²
- GPK3 - Stimulation (03MAY27); p_0 [4472 m] = 438 bar: p_0 [4700 m] = 459 bar¹
- GPK4 - Injektion (04SEP07); p_0 [4437 m] = 435 bar: p_0 [4700 m] = 460 bar¹
- GPK4 - Stimulation (05FEB07); p_0 [4442 m] = 435 bar: p_0 [4700 m] = 459 bar¹

Die Tiefenangaben beziehen sich jeweils auf True vertical depth (TVD). Ausgehend von relativ stabilen Druckwerten in den Beobachtungstiefen wurde der Druck auf die mittlere Abflusstiefe von 4700 m (TVD) extrapoliert. Als Dichte der Wassersäule zwischen Meßteufe und Reservoirteufe bei Gebirgstemperatur wurden 0.96 g/cm³ (bei Formationswasser - ¹) bzw. 0.91 g/cm³ (bei Frischwasser- ²) angenommen. An den Bohrungen GPK3 und GPK4 erhält man übereinstimmend einen ungestörten Reservoirdruck von 460 bar. An der Bohrung GPK2 differieren die beiden Druckangaben erheblich. Der Mittelwert dieser beiden Angaben liegt aber nur geringfügig höher als 460 bar, so dass auch hier unter Einbeziehung von systematischen Messfehlern ein ungestörter Ruhedruck von 460 bar in 4700 m angenommen wird.

Der einheitliche ungestörte Reservoirdruck für alle 3 Bohrungen weist darauf hin, dass die Bohrungen dem gleichen Reservoir zuzuordnen sind und durch keine über geologische Zeiträume wirksamen hydraulischen Barrieren getrennt sind.

Hydraulische Kommunikation der Bohrungen

Die Bohrungen GPK2 und GPK3 beeinflussen sich hydraulisch spürbar. Bei dem hier maßgeblich ausgewerteten Injektionstest an der Bohrung GPK3 (04AUG17) wurde bei einer mittleren Injektionsrate von ca. 15 l/s ein Druckanstieg von ca. 10 bar an der Bohrung GPK2 beobachtet. Das Druckmaximum wurde an der GPK2 mit einer Verzögerung von 15 h gegenüber der Injektionsbohrung GPK3 erreicht.

Die Stimulations- und Injektionstests an der Bohrung GPK4 im Februar/März 2005 führten hingegen nur zu einer geringen Druckantwort von maximal 4 bar an den beiden Beobachtungsbohrungen GPK2 und GPK3, obwohl bis zu 45 l/s über 2 Tage injiziert wurden. Die Druckantwort an den beiden Beobachtungsbohrungen wurde näherungsweise synchron mit einer Verzögerung von ca. 4 Tagen registriert.

Die Beobachtungen zur hydraulischen Kommunikation der Bohrungen stützen die These, dass GPK2 und GPK3 über dieselbe Struktur (Störungszone) hydraulisch miteinander verbunden sind. Aus der Dichteverteilung der seismischen Ereignisse zwischen GPK2 und GPK3 kann auf eine Störung mit 80° Einfall nach Südwest geschlossen werden, die beide Bohrungen GPK2 und GPK3 maßgeblich miteinander verbindet (Weidler & Baisch, 2004). Aus der Verbindungslinie beider Bohrungen in 4700 m Tiefe (TVD) ergibt sich eine Streichrichtung von 165° für diese Störung (blaue Linie in Abb. 2.8.1). Die Streichrichtung dieser Störung stimmt nahezu mit der Streichrichtung der Trajektorie von GPK4 überein. Diese Störungszone würde dann die Bohrung GPK4 in einer Tiefe von ca. 4800 m schneiden. Hierfür gibt es jedoch keine Hinweise. Weiterhin kann die bereits mehrfach erwähnte massive Verlustzone der GPK4 in ca. 4300m Tiefe nicht mit dieser Störungszone erklärt werden. Bei Annahme einer Streichrichtung von 155° und 80° Einfall nach Südwest, wie von Weidler & Baisch, 2004 vorgeschlagen, würde die Störungszone die GPK4 nirgendwo in relevanter Tiefe schneiden (braune gestrichelte Linie in Abb. 2.8.1).

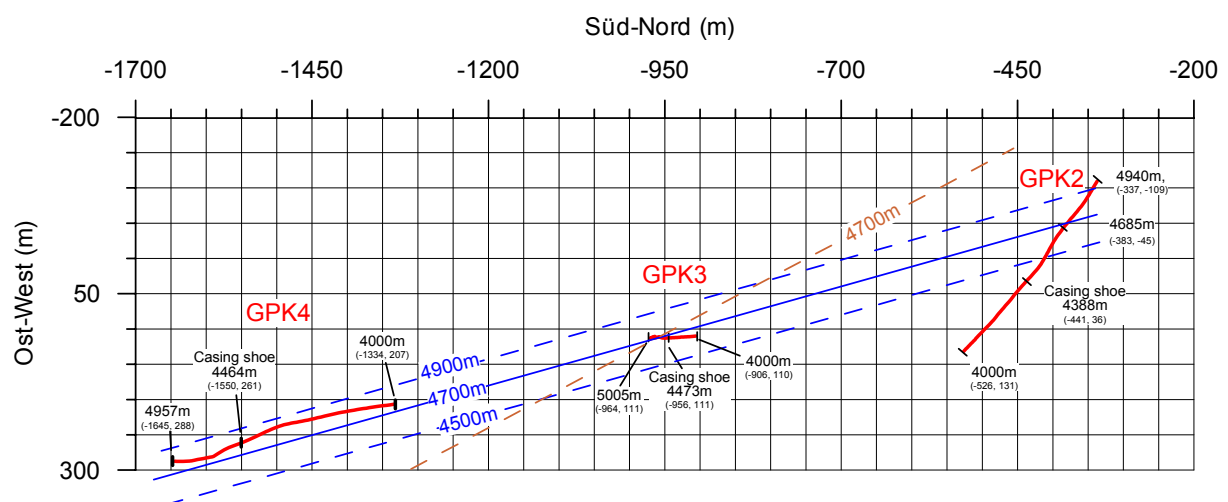


Abb. 2.8.1: Bohrlochtrajektorien zwischen 4000m und Endteufe in der horizontalen Projektion. Die durchgezogene blaue Linie repräsentiert den Verlauf einer angenommenen Störung, die in 4700 m die Bohrungen GPK2 und GPK3 schneidet (Streichrichtung: 165°) und die mit 80° nach Südwest einfällt. Die Projektion dieser Störung ist zusätzlich in 4900m und 4500m dargestellt (blau gestrichelt). Außerdem ist eine Störung mit der Streichrichtung 155° und 80° Einfall nach Südwest dargestellt (braun gestrichelt). Alle Koordinaten beziehen sich auf den Bohrerkopf der GPK1. Die Tiefenangaben sind dadurch ca. 15 m geringer als bei Bezug auf die Bohrplattform der Bohrungen GPK2 bis GPK 4.

Entsprechend dieser Betrachtung ist es schwierig, die massive Verlustzone bei ca. 4300 m (TVD) der GPK4 mit einer Störungszone zu interpretieren, die gleichzeitig die Bohrungen GPK2 und GPK3 in 4700 m schneidet. Die Situation ändert sich natürlich grundsätzlich, wenn nicht nur eine dominante Störung angenommen wird, sondern mindestens eine weitere, die die erstere im flachen Winkel schneidet.

Produktivität

In Abb. 2.8.2 ist die zeitliche Entwicklung der Produktivität der Bohrungen dargestellt. Die Kurven für die Bohrungen GPK3 und GPK4 wurden durch Vorwärtsrechnungen mit Parameterkombinationen, abgeleitet aus den oben dargestellten hydraulischen Tests, erhalten. Für die Bohrung GPK2 wurde die Produktivität nach 48 h unmittelbar aus dem Injektionstest 03JAN23 entnommen. Bei den hier dargestellten Produktivitäten/Injektivitäten handelt es sich um Angaben, die für Einzelbohrungstests und aus Sohlendruckmessungen bestimmt wurden. Es wurde in eine Bohrung injiziert während die jeweils anderen beiden Bohrungen geschlossen waren. Somit charakterisieren diese Produktivitäten das Reservoir im Umfeld der jeweiligen Bohrungen unbeeinflusst von anderen Bohrungen. Für alle Bohrungen liegen die Produktivitäten unterhalb von 1 l/(s*bar) [GPK2 und GPK4] bzw. 2 l/(s*bar) [GPK3] und sind damit geringer als gewünscht.

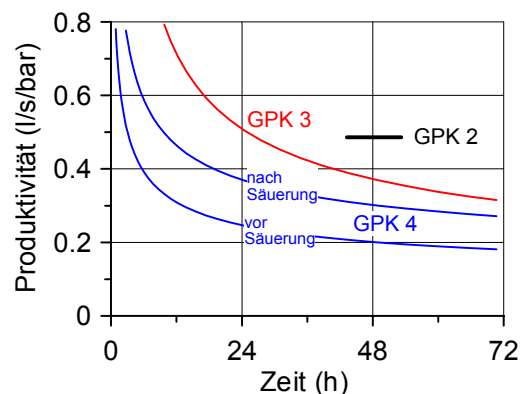


Abb. 2.8.2: Zeitliche Entwicklung der Produktivität der Bohrungen GPK3 und GPK4. Als schwarzer Strich ist die Produktivität der Bohrung GPK2 nach 48 h eingezeichnet.

Für die Bewertung eines HDR-Systems können diese Produktivitäten jedoch nur als Orientierung dienen, da letztlich die Druckverluste bzw. die Impedanz zwischen den Bohrungen bei einer Zirkulation, das heißt bei unmittelbarer gegenseitiger Beeinflussung der Bohrungen, entscheidend sind. Basierend auf den oben angegebenen Produktivitäten kann als relevante Zielmarke für die Impedanz in jedem Teilarm ca. 2 bar/(l/s) angegeben werden. Aus dem Zirkulationstest 2005 erhält man für die Zirkulation mit 12 l/s eine Impedanz von ca. 5 bar/(l/s) , basierend auf dem Sohlendruck. Jedoch ist die am Bohrlochkopf beobachtete Impedanz von ca. 3 bar/(l/s) deutlich geringer. Für die Energiebilanz ist die letztere Angabe entscheidend und verdeutlicht, dass sich der Arm GPK2-GPK3 durchaus in der Nähe einer ökonomisch relevanten Energienutzung befindet.

Der zweite Teilarm (GPK3-GPK4) kann momentan nicht genutzt werden, da die schlechte Kommunikation zwischen beiden Bohrungen keine stabile Zirkulation ermöglicht.

Die recht optimistische Einschätzung der GPK2 bzw. des Arms GPK2-GPK3 wird dadurch relativiert, dass an der GPK 2 vermutlich turbulente Verhältnisse vorherrschen und bei höheren Fließraten die Produktivität abnimmt.

2.9 Mögliche Energieerzeugung im aktuellen Zustand

Der Zirkulationstest (2005) zeigt, dass die Produktionsrate der GPK4 während der Zirkulation deutlich geringer ist als die der GPK2 und dass die Rate kontinuierlich abnimmt (siehe Kap. 2.6). Die Bohrung GPK4 kann deshalb nicht zur Energiegewinnung beitragen. Im aktuellen Zustand ist eine stabile Zirkulation nur in der Dublette GPK2 - GPK3 möglich.

Abb. 2.9.1 zeigt die hydraulischen und thermischen Verhältnisse an diesen beiden Bohrungen bei Zirkulation von 12 l/s bzw. 30 l/s. Die Parameter für die Zirkulation mit 12 l/s wurden aus dem Zirkulationstest 2005 abgeleitet. Die Parameter für die Zirkulation mit 30 l/s wurden dann durch proportional zur Fließrate ansteigende Druckverluste im Reservoir und unter Einbeziehung von Temperatur/Dichteänderungen in den Bohrungen bestimmt. Die Salinität des Fluids wurde mit 8.0 % (Gewichtsprozent) entsprechend den Ergebnissen des Zirkulationstests angenommen¹⁰.

Die Druckverluste sind überwiegend im Umfeld der GPK3 lokalisiert. Bei 30 l/s wird hier ein Überdruck von ca. 120 bar an der Bohrlochsohle erreicht. Dieser Druck ist lediglich um 30-50 bar geringer als während der Stimulation mit 50 l/s. Der beobachtete Anstieg der seismischen Ereignisse bei einer Fließrate von mehr als 20 l/s während des Zirkulationstests 2005 ist somit nicht überraschend.

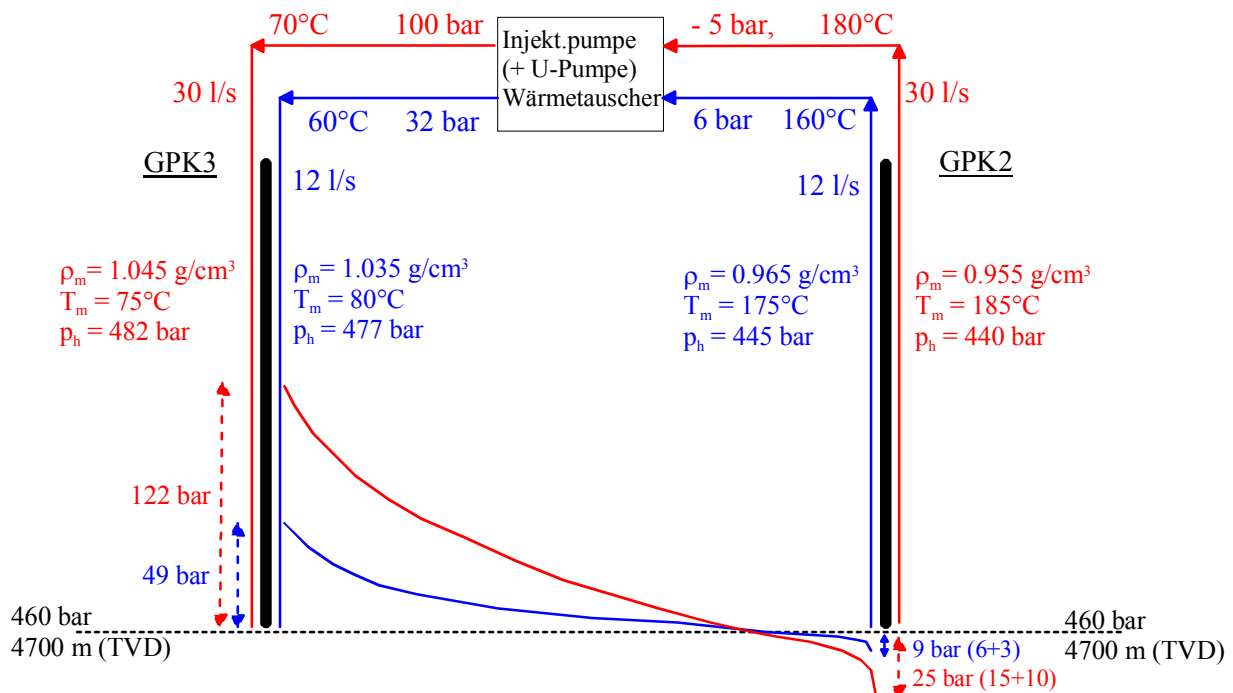


Abb. 2.9.1: Schematischer Druckverlauf im Reservoir während der Zirkulation mit 12 bzw. 30 l/s. Angegeben sind die relevanten hydraulischen und thermischen Parameter in den Bohrungen und am Bohrlochkopf. Die Druckabsenkung an der GPK2 ist aufgeteilt in die Druckänderung im Reservoir (1. Term) und bohrlochnahe, turbulente Druckverluste (2. Term). ρ_m : Mittlere Dichte in der Bohrung bei der mittleren Temperatur T_m und dem mittleren Druck der Wassersäule. p_h : Gesamter hydrostatischer Druck der Wassersäule.

¹⁰ Die Dichte einer 8% - NaCl-Lösung beträgt 1.056 g/cm³ unter Normalbedingungen und stimmt mit der gemessenen, relativ stabilisierten Dichte in GPK2 und GPK3 während der Zirkulation 2005 überein.

In einem längerfristigen Betrieb muss der Überdruck im Umfeld der GPK 3 sicherlich geringer als 120 bar (bei 30 l/s) gehalten werden. Nimmt man etwas willkürlich eine maximal tolerierbare Druckerhöhung von 100 bar in 4700 m (TVD) an, so folgt hieraus eine maximale Zirkulationsrate von ca. 25 l/s.

An der GPK2 treten bohrlochnah turbulente Druckverluste auf, die allein von der Fließrate in der GPK2 abhängig sind. Diese wurden hier konservativ mit 3 bar (12 l/s) bzw. 10 bar (30 l/s) abgeschätzt. Es sind bis zu einem Faktor 2 größere turbulente Druckverluste möglich, wie die Ausführungen in Abschnitt 2.3.4 zeigen, so dass insbesondere für hohe Fließraten eine beträchtliche Unsicherheit bezüglich der GPK2 besteht.

In der nachfolgenden Tabelle (2.9.1) wird die Energiebilanz für die Zirkulation mit 12 l/s und 30 l/s aufgestellt. Die Angaben basieren hierbei auf den Parametern in Abb. 2.9.1 bzw. aus den Ergebnissen des Zirkulationstests 2005 (Kap. 2.6). Aus der Tabelle folgt für eine Fließrate von 30 l/s die elektrische Bruttoleistung von ca. 1.6 MW. Dies entspricht ungefähr der Zielmarke für die erste Etappe auf dem Weg zur geothermischen Stromproduktion in Soultz. In diesem Fall müssen aber für den Einsatz von Unterwasserpumpe und Injektionspumpe nahezu 30 % der elektrischen Bruttoleistung eingesetzt werden, so dass eine Nettoleistung von etwas oberhalb von 1 MW_{el} verbleibt. Dies ist ökonomisch sicherlich kaum zu rechtfertigen.

Parameter	q = 12 l/s ¹¹	q = 30 l/s
Nutzbare Temperaturdifferenz ΔT , Produktion-Injektion (K)	100	110
Dichte (ρ) am Bohrlochkopf GPK2 bei Produktions- temperatur (g/cm ³)	0.960	0.950
Thermische Bruttoleistung N_{th} (MW); $N_{th} = q \cdot \rho \cdot c_w \cdot \Delta T$, mit $c_w = 4.2$ kJ/(kg·K)	4.8	13.2
Elektrische Bruttoleistung N_{el} (MW); $N_{el} = 0.12 \cdot N_{th}$	0.58	1.58
Druckverluste Δp_{res} im Reservoir (bar)	58	147
Druckdifferenz der hydrostatischen Säulen Δp_h (bar); $\Delta p_h = p_h$ (GPK2) - p_h (GPK3)	- 32	- 42
Druckerhöhung zur Reinjektion Δp_{inj} (bar); $\Delta p_{inj} = \Delta p_{res} + \Delta p_h$	26	105
Elektrische Pumpleistung N_{Pel} (MW); $N_{Pel} = 1.1 \cdot \Delta p_{inj} \cdot q / \eta_P$ ¹² , mit Wirkungsgrad $\eta_P = 0.8$ ¹³	0.04	0.43
Elektrische Nettoleistung (MW), $N_{el} - N_{Pel}$	0.54	1.15

Tab. 2.9.1: Übersicht über die Parameter für 2 Szenarien zur geothermischen Stromerzeugung durch Zirkulation zwischen GPK2 und GPK3

¹¹ Die in dieser Spalte gemachten Angaben beruhen unmittelbar auf den Beobachtungen während des Zirkulationstests 2005: Modifizierend wird hier jedoch angenommen, dass nur 12 l/s in die GPK3 injiziert werden (anstatt ca. 15 l/s) und eine geschlossene Zirkulation zwischen GPK2 und GPK3 besteht.

¹² Der Vorfaktor 1.1 resultiert aus der notwendigen Leistung für die Komprimierung der Flüssigkeit bzw. Erhöhung der Dichte durch die Pumpe (hier aufgerundet ca. 10 %).

¹³ Hier ist ein mittlerer Wirkungsgrad von Unterwasserpumpe und Injektionspumpe gemeint. Da der Hauptanteil der hydraulischen Leistung auf die Injektionspumpe (Elektrische Kolbenpumpe) entfällt, kann ein relativ hoher Wirkungsgrad angesetzt werden.

Gegen eine stabile Zirkulation mit 30 l/s sprechen zudem der hohe Überdruck an der GPK3 und die damit zu erwartenden seismischen Ereignisse während der Zirkulation (siehe oben). Als maximale Obergrenze für die Zirkulation im aktuellen Zustand der Bohrungen werden daher etwa 25 l/s angesehen. Die elektrische Bruttoleistung würde dann ca. 1.3 MW_{el} und die elektrische Nettoleistung etwa 1.0 MW_{el} betragen.

Diese Angaben verdeutlichen, dass das Reservoir noch wesentlich verbessert werden muss, um die angestrebten 5-6 MW_{el} elektrische Leistung gewinnen zu können.

2.10 Maßnahmen zur Verbesserung des Reservoirs

Die obigen Ausführungen zeigen, dass im aktuellen Zustand des Reservoirs eine Nettostromproduktion von maximal 1.0 MW_{el} möglich ist. Eine deutliche Steigerung der Produktivität des Reservoirs ist daher notwendig. Der Arm GPK3-GPK4 kann momentan für die Energiegewinnung faktisch nicht genutzt werden. Weiterhin zeigt die Abb. 2.9.1, dass im Umfeld der zentralen Injektionsbohrung (GPK3) die hydraulischen Verluste zu hoch sind. Weitere Maßnahmen zur Verbesserung des Reservoirs sollten sich daher auf die hydraulische Verbindung der Bohrungen GPK3 und GPK4 sowie auf die Steigerung der Produktivität (Injektivität) der GPK3 konzentrieren.

Wie bereits erwähnt, konnte mit den bisher durchgeführten Säurebehandlungen kein Nachweis erbracht werden, dass der gewünschte Effekt, die nachhaltige Verbesserung des Reservoirs geliefert werden. Die beobachtete Steigerung der Produktivität der GPK2 und GPK4 infolge der Säuerung ist vermutlich eher auf sekundäre Effekte zurück zu führen (Reduzierung von Fließwiderständen im Bohrloch der GPK2, bzw. Schaffung eines Fließweges durch ein Loch in der Verrohrung der GPK4).

Für die Verbesserung der hydraulischen Verbindung von GPK3 und GPK4 oder die Produktivitätssteigerung der GPK3 sind Säuerungen nicht zielführend. Daher werden keine weiteren Säurebehandlungen empfohlen.

In Anbetracht des seismischen Risikos von massiven hydraulischen Stimulationen kann die gezielte hydraulische Stimulation von einzelnen Intervallen einen Ausweg darstellen. Sofern jeweils nur kurze Intervalle geöffnet und mit relativ geringem Volumina/Fließraten stimuliert werden, reduziert sich das seismische Risiko. Durch die Summation der Beiträge von mehreren Abflusszonen kann schließlich eine deutliche Steigerung der Produktivität der Bohrungen GPK3 / GPK4 und eine Verbesserung der hydraulischen Kommunikation zwischen beiden Bohrungen erreicht werden. In diesem Sinne werden folgende Maßnahmen vorgeschlagen.

- Im Bericht wurde bereits mehrfach erwähnt, dass während des Abteufens der GPK4 eine massive Verlustzone (bei ca. 4300 m – TVD) vorgefunden wurde, die zementiert und verrohrt wurde. In Anbetracht des Spannungsfeldes zwischen unerwünschten starken seismischen Ereignissen und massiven hydraulischen Stimulationen, könnte die nachträgliche Öffnung dieser Verlustzone einen guten Kompromiss darstellen. Es ist nahezu sicher, dass diese Verlustzone hydraulischen Anschluss an eine größere permeable Struktur hat. Möglicherweise handelt es sich hierbei um dieselbe Struktur über die GPK2 und GPK3 hydraulisch miteinander verbunden sind. Die Öffnung dieser Verlustzone sollte über eine Perforation geschehen. Vermutlich ist anschließend eine moderate hydraulische Stimulation notwendig, die fokussiert auf diesen Bereich erfolgen sollte. Es muss geprüft werden, ob der Einsatz eines Packers/bridge plug hierfür

notwendig ist, um die Perforationsstrecke von dem offenen Bohrlochabschnitt hydraulisch zu isolieren. Der Zufluss aus 4300 m (TVD), d.h. von ca. 700 m oberhalb der Bohrlochsohle, wird eine maximale Temperatur von etwa 180 C aufweisen. Gegenüber der Sohlentemperatur von ca. 200°C tritt demnach ein Verlust von 20 K auf und die maximale Fördertemperatur am Bohrlochkopf wird 170°C nicht überschreiten, sofern diese zusätzliche Zuflusszone dominiert. Somit wäre dann die Fördertemperatur etwa 10°C geringer als angestrebt. In Anbetracht der schwierigen Situation, in Soultz weitere massive Stimulationen durchzuführen, sollte dieser Kompromiss eingegangen werden.

- Unabhängig von der oben vorgeschlagenen Öffnung einer zusätzlichen Zuflusszone in der GPK4 sind weitere Stimulationsmassnahmen in der GPK3 notwendig. Die GPK3 wird dominiert durch eine Abflusszone in ca. 4700 m (TVD). Diese Zone wurde bereits mit 50 l/s stimuliert. Da eine durchaus erfolgversprechende hydraulische Stimulation mit deutlich höherer Rate aufgrund des seismischen Risikos vermutlich nicht durchführbar ist, sollte die Schaffung weiterer Abflusszonen avisiert werden. Vorgeschlagen wird daher, einen 7"-Tubing in die offene Bohrlochstrecke bis deutlich unterhalb dieser Abflusszone einzubauen und vom Fuss bis unterhalb der bisherigen Abflusszone zu zementieren. Hierdurch eröffnet sich die Möglichkeit, gezielt im Bohrlochtiefstem zu stimulieren und hier eine weitere Abflusszone zu schaffen. Grundsätzlich besteht dann auch die Möglichkeit in mehreren Etappen kurze Intervalle zu stimulieren, indem jeweils ein Abschnitt geöffnet (perforiert) und stimuliert wird und nach unten eine temporäre Abdichtung durch einen bridge-plug erfolgt. Die Stimulationen können hinsichtlich Volumen und Fließrate stark begrenzt werden, da jedes einzelne Intervall nur einen Anteil zur Gesamtproduktivität beiträgt. Am Ende würde hier die Wiederöffnung des Zugangs zu der Abflusszone in ca. 4700 m Tiefe stehen.
- Sofern in die GPK3 zusätzlich ein Liner eingebaut wird, eröffnet sich die Möglichkeit zu einer effizienten, gleichzeitigen Stimulation beider Bohrungen (GPK3 und GPK4). Es sollte in dieser Konfiguration in beide Bohrungen gleichzeitig injiziert werden. Hierbei sollte in der GPK3 ein möglichst tiefliegender Abschnitt geöffnet werden, um die Wahrscheinlichkeit, beide Bohrungen im Bohrlochtiefstem zu verbinden, zu erhöhen.

2.11 Zusammenfassung

Die wesentlichen Ergebnisse des Projekts: „HDR-Soultz: Erste Phase der Erstellung einer wissenschaftlichen Pilotanlage“ lassen sich wie folgt zusammenfassen.

- Im Berichtszeitraum wurden die beiden Bohrungen GPK3 und GPK4 bis auf 5000 m erfolgreich abgeteuft. Die Bohrungen konnten innerhalb des vorgegebenen Kostenrahmes und weitgehend innerhalb des gesetzten Zeitrahmens erstellt werden. Die vorgesehenen Zielgebiete für die Bohrungen wurden erreicht. Somit steht nun ein Triplettsystem, wie geplant, bestehend aus den Bohrungen GPK2 (Produktion), GPK3 (Injektion) und GPK4 (Produktion) zur Erschließung des Reservoirs in 5000 m zur Verfügung.
Das planmäßige Abteufen von 3 Tiefbohrungen im Kristallin bis 5000 m Tiefe muss als außerordentlicher Erfolg des Projekts herausgestellt werden.
- Die Bohrungen GPK3 und GPK4 wurden im Berichtszeitraum hydraulisch stimuliert. Es wurden massive Wasserfracs mit einer Fließrate von maximal 50 l/s und einem Wasservolumen bis zu 30000 m³ (GPK3) durchgeführt.
- Bei den hydraulischen Stimulationsoperationen wurde eine hohe seismische Aktivität registriert, deutlich höher als im oberen Reservoir bei vergleichbaren Raten. Insbesondere die massive hydraulische Stimulation der GPK3 führte zu vielen Ereignissen mit einer Magnitude größer als 2. Die stärksten Ereignisse traten jeweils in der Einschussperiode auf. Die hohe seismische Aktivität zwang zu einer Reduzierung der Fließraten für alle Stimulationsoperationen im Berichtszeitraum.
- Durch die hydraulischen Stimulationen konnte eine deutliche Steigerung der Produktivität der Bohrungen erzielt werden. Die Produktivität der Bohrungen nach den hydraulischen Stimulationen liegt im Bereich von 0.2 – 0.5 l/(s*bar).
- Bei allen 3 Bohrungen besteht eine gute Übereinstimmung zwischen der Produktivität während der Stimulation und der registrierten Produktivität in Injektionstests unter „normalen“ Bedingungen (unterhalb des Fracdrucks). Dies bedeutet, dass die während der Stimulation erzielte Produktivität auch nach der hydraulischen Stimulation erhalten bleibt. Folglich wurde mit den hydraulischen Stimulationen, im Rahmen der Testauslegung, ein sehr guter Erfolg erzielt.
- Alle 3 Bohrungen wurden durch Zugabe von Salzsäure gesäuert. Die Konzentration der Salzsäure war hierbei gering (0.1 % - 0.4 %), wohingegen über eine beträchtliche Zeitdauer (bis zu 2 Tage) injiziert wurde. Durch die Säuerung wurde eine signifikante Steigerung der Produktivität der GPK2 und der GPK4 erreicht. Insbesondere konnte die Produktivität der GPK4 von 0.2 auf 0.3 l/(s*bar) infolge der Säuerung erhöht werden. Vermutlich ist die Steigerung der Produktivität jedoch auf Nebeneffekte zurück zu führen (Beseitigung eines Fließwiderstandes in der Bohrung bzw. Aktivierung eines Fließweges durch ein Loch in der Verrohrung). Der eindeutige Nachweis, dass durch die Säureinjektion die hydraulische Leitfähigkeit von Klüften im Reservoir gesteigert werden kann, steht weiterhin aus.
- Die hydraulischen Tests nach den Stimulationsoperationen geben den Nachweis einer dominanten Rissströmung an allen 3 Bohrungen. Folglich sind große Rissflächen an die Bohrungen angeschlossen über die der Zustrom in die Formation erfolgt. An den Bohrungen GPK 2 und GPK 3 wird ein formationslineares

Fließregime beobachtet als Hinweis auf einen Riss mit unendlich hoher Leitfähigkeit. An der GPK 4 dominiert ein bilineares Fließregime. Die hydraulische Rissleitfähigkeit ist begrenzt und es treten signifikante Druckverluste im Riss auf.

- Die hydraulischen Tests geben keine Hinweise auf natürliche Strukturen mit sehr hoher hydraulischer Leitfähigkeit im Umfeld der Bohrungen, die als Konstantdruckgrenzen wirksam sind. In allen hydraulischen Tests wird eine kontinuierliche Änderung des Drucks auch über lange Zeiträume (1-2 Wochen) beobachtet.
- Der im Jahr 2005 durchgeführte Zirkulationstest zeigt, dass eine gute hydraulische Verbindung zwischen den Bohrungen GPK2 und GPK3 besteht. Vermutlich sind beide Bohrungen über eine Störungszone miteinander hydraulisch verbunden. Zwischen GPK2 und GPK3 konnte über mehrere Monate eine stabile Zirkulation mit ca. 12 l/s aufrecht erhalten werden. Hingegen besteht „quasi“ keine hydraulische Verbindung zu der 2. Produktionsbohrung (GPK4). Für die geothermische Energiegewinnung steht momentan nur die Dublette GPK3-GPK2 zur Verfügung.
- Momentan kann eine Fließrate von vermutlich maximal 25 l/s zwischen den Bohrungen GPK2 und GPK3 zirkuliert werden. Hieraus folgt eine elektrische Bruttoleistung von ca. 1.3 MW_{el} bzw. eine Nettoleistung von ca. 1.0 MW_{el}. Als Haupthindernis für eine größere Zirkulationsrate erweist sich der große Druckanstieg im Umfeld der GPK3, begleitet von seismischen Ereignissen.
- Weitere Stimulationsmassnahmen sind notwendig, um insbesondere die Bohrung GPK4 mit der zentralen Injektionsbohrung GPK3 hydraulisch zu verbinden. Hierfür gibt es gute Chancen durch Öffnung einer bereits nachgewiesenen Verlustzone an der GPK4 bzw. durch hydraulische Stimulation von selektiven Intervallen in der GPK3.

3. Verwertbarkeit der Ergebnisse

Durch das erfolgreiche Abteufen von 3 Bohrungen bis auf 5000 m wurde ein wichtiger Meilenstein im Gesamtvorhaben passiert und die Grundlage für die Nutzung des Reservoirs in 5000 m gelegt.

Mit den Bohrarbeiten wurden in vielen Punkten die Grenzen des derzeit technisch Machbaren erreicht. Dies betraf zum Beispiel die große Ablenkung der Bohrung GPK4 und die Beherrschung von massiven Spülungsverlusten in großen Tiefen. Konzepte und Erfahrungen aus den vorhergehenden Soultz-Projekten wurden hier konsequent umgesetzt bzw. weiter entwickelt (frei bewegliche Rohrtour, Einsatz von Metallpackern zur Zementation, Einsatz eines speziellen HMR-Zements). Das erfolgreiche Abteufen von 3 Geothermiebohrungen im Kristallin bis 5000 m Tiefe kann als Meilenstein der HDR-Technik angesehen werden. Die hier gemachten Erfahrungen beim Abteufen von Tiefbohrungen sind für weitere Geothermieprojekte von großer Bedeutung. So ist das Bohrkonzept für die tiefen Geothermiebohrungen des Projekts „Landau“ unmittelbar durch die Erfahrungen aus Soultz beeinflusst. Dass es in Landau gelungen ist, eine sehr produktive Bohrung – vermutlich die aktuell produktivste Geothermiebohrung in Deutschland – abzuteufen, ist wesentlich auch auf die Erkenntnisse aus Soultz zurück zu führen.

Die hydraulische Stimulation der Bohrungen in Soultz verlief erfolgreich. Die Produktivität der Bohrungen konnte erheblich gesteigert werden. Es wurden großflächige Risse mit einer sehr guten hydraulischen Leitfähigkeit erzeugt. Die hydraulische Leitfähigkeit der Risse ist erheblich höher, als es bei Anwendung der Proppant-Frac-Technologie möglich gewesen wäre. Das Soultz-Vorhaben demonstriert damit, dass das Konzept der Wasserfracs bis in große Tiefen im Granit überaus erfolgreich ist. Durch dieses Vorhaben konnte bestätigt werden, dass es auch in einer Tiefe von 5000 m im Granit möglich ist, künstliche Risse zu erzeugen und hierüber die Bohrungen hydraulisch zu verbinden. Für weitere HDR-Projekte bilden die Erfahrungen, die bei der hydraulischen Stimulation in Soultz gewonnen wurden, eine wesentliche Grundlage für deren Umsetzung.

Von großer Bedeutung ist aber auch die Erkenntnis, dass die seismische Aktivität in 5000 m erheblich höher ist als im oberen Reservoir (3500 m). Die Beobachtungen in Soultz haben die Diskussion über induzierte seismische Ereignisse während der hydraulischen Stimulation in der internationalen Fachwelt wesentlich beeinflusst und verstärkt. In das Blickfeld rücken nunmehr Konzepte, wie man trotz massiver hydraulischer Stimulation starke seismische Ereignisse vermeiden kann.

In Soultz selbst wird in der nächsten Projektphase die Realisierung der geothermischen Stromproduktion im Vordergrund stehen. Die Erzeugung einer elektrischen Leistung von 1.5 – 5 MW_{el} wird angestrebt. Durch die direkte Beteiligung von Energieversorgungsunternehmen im Projekt ist die Verwertung der gewonnenen Erkenntnisse für die geothermische Stromproduktion unmittelbar garantiert.

Die TAB-Studie (TAB, 2003) hat für Deutschland ein enormes geothermisches Potential in Kristallingebieten ausgewiesen. Für die Nutzung dieses Potentials bietet aus heutiger Sicht das HDR-Konzept die einzige Möglichkeit. Die Grundlagen hierfür wurden und werden massgeblich in Soultz gelegt. Es gibt weltweit kein Projekt mit ähnlicher Bedeutung für die künstliche Erschließung dichter Gesteinsformationen.

Ein abschließender Erfolg im Soultz-Projekt wird eine Signalwirkung auf weitere Investoren haben und zur großflächigen Nutzung der Geothermie nicht nur in Deutschland beitragen.

4. Ergebnisse Dritter

Im Projekt sind Partner aus mehreren europäischen Ländern vertreten. Darüber hinaus gibt es enge Kontakte zu Geothermieprojekten in den USA, Australien und Japan. Durch die vielfältige internationale Verflechtung stehen die Erkenntnisse und Erfahrungen aus den anderen Ländern und Projekten auch für Soultz zur Verfügung. Allerdings ist es tendenziell eher so, dass die anderen Projekte aus den Erfahrungen in Soultz profitieren. Das HDR-Projekt Soultz ist weltweit nach wie vor Vorreiter hinsichtlich der Entwicklung der HDR-Technik.

Aktuell werden in Deutschland an einer Vielzahl von Standorten Geothermieprojekte entwickelt. Die Wasserfractechnik wurde im Berichtszeitraum an mehreren Standorten und insbesondere an den Bohrungen Horstberg (Projekt GeneSys) und Gross Schönebeck eingesetzt. Die BGR war an den beiden letzt genannten Projekten unmittelbar beteiligt. Die hier durchgeführten massiven hydraulischen Stimulationen sind maßgeblich auf die Erfahrungen aus Soultz zurückzuführen. Die erzielten Ergebnisse belegen, dass mit dieser Stimulationstechnik auch in Sedimentgesteinen großflächige und hydraulisch gut leitfähige Risse erzeugt werden können sowie eine nachhaltige Steigerung der Produktivität möglich ist.

Während des Förderzeitraumes sind keine Ergebnisse von anderen Stellen bekannt geworden, die die in Soultz durchgeführten Untersuchungen wesentlich beeinflussen oder überflüssig hätten machen können.

5. Veröffentlichungen

(Über das Vorhaben im Zeitraum 2001-2005 mit Beteiligung der deutschen Projektpartner)

2002

- Baria, R., Baumgärtner, J., Gerard, A., Weidler, J., Hopkirk, R. (2002). European Hot-Dry-Rock Geothermal Research Programme Soultz-sous-forêts, Stimulierte geothermische Systeme – Hot-Dry-Rock-Project Soultz-sous-forêts, Schlussbericht zum BMWi-Forschungsvorhaben 0327218, 116 S.
- Grecksch, G., Jung, R., Weidler, R. (2002). Erfolgreiche Anwendung der Wasserfrac-Technik im HDR-Projekt Soultz – ein konzeptionelles Modell, Tagungsband der 7. Geothermischen Fachtagung, Waren, S. 139-144.
- Hettkamp, T., Teza, D., Baumgärtner, J., Baria, R., Gerard, A. (2002). Stand des europäischen Hot-Dry-Rock-Forschungsprojekts Soultz-sous-Forêts. Tagungsband 7. Geothermische Fachtagung, Waren 6.-8. November 2002, S. 48-55.
- Weidler, R., Oates, S., Dyer, B., Baumgärtner, J., Gerard, A. (2002). Integrated Microseismic and Hydraulic Monitoring of HDR Reservoir Stimulation, Soultz 2000, 64th Annual EAGE Conference, Florence, EAGE Abstract Books, ISBN 90-73781-20-5.
- Weidler, R., Gerard, A., Baria, R., Baumgärtner, J., Jung, R. (2002). Hydraulic and Micro-Seismic Results of a Massive Stimulation Test at 5 km Depth at the European Hot-Dry-Rock Test Site Soultz, France, Proceedings of the 27th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, California.
- Weidler, R., Baumgärtner, J., Jung, R., Tenzer, H., Teza, D. (2002). Der 5 km tiefe Erdwärmetauscher des Europäischen Hot-Dry-Rock Forschungsprojekts in Soultz-sous-Forêts – Hydraulische Stimulation und wissenschaftliche Ergebnisse. Tagungsband 7. Geothermische Fachtagung, Waren 6.-8. November 2002, S. 176-180.

2003

- Grecksch, G., Jung, R., Tischner, T., Weidler, R. (2003): Hydraulic fracturing of the European HDR/HFR test site Soultz-sous-Forêts – a conceptual model. Proceedings: European Geothermal Conference, Szeged, Hungary, 25-30. May 2003, paper O-1-04.
- Weidler, R., Baisch, S., Baumgärtner J., Gerard, A., Michelet, S., Teza, D. (2003). Frac-Technik im Kristallin, Tagungsband: 1. Fachkongress Geothermischer Strom, Neustadt-Glewe, S. 96-102.

2004

- Baisch, S., Weidler, R., Voeroes, R., Tenzer, H., Teza, D. (2004). Improving Hydraulic Stimulation Efficiency by Means of Real-Time-Monitoring, Proceedings of the 29th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, California, 26-28 January 2004.
- Baria, R., Michelet, S., Baumgärtner, J., Dyer, B., Gerard, A., Nicolls, J., Hettkamp, T., Teza, D., Soma, N., Asanuma, H., Garnish, J., Megel, T. (2004). Microseismic monitoring of the world's largest potential HDR reservoir. Proceedings, 29th workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, California, 26-28 January 2004.
- Baumgärtner, J., Jung, R., Hettkamp, T., Teza, D. (2004). The status of the Hot Dry Rock scientific power plant at Soultz-sous-Forêts. Z. Angew. Geol. 2/04, S. 12-16.

- Baumgärtner, J., Hettkamp, T., Teza, D., Baria, R., Michelet, S. (2004). Building of a Hot Dry Rock power plant at Soultz-sous-Forêts. Last borehole in Soultz successfully completed. Tagungsband 8. Geothermische Fachtagung, Landau 10.-12. November 2004, S. 69 - 76.
- Baumgärtner, J., Hettkamp, T., Teza, D., Baria, R., Michelet, S. (2004). Building of a Hot Dry Rock scientific power plant at Soultz-sous-Forêts. Geothermal Resources Council, Annual meeting, Indian wells, California-USA, Sept. 2004.
- Hettkamp, T., Baumgärtner, J., Baria, R., Gerard, A., Gandy, T., Michelet, S., Teza, D. (2004). Electricity production from hot rocks. Proceedings, 29th workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, California, 26-28 January 2004.
- Michelet, S., Baria, R., Baumgärtner, J., Gerard, A., Oates, S., Hettkamp, T., Teza, D. (2004). Seismic source parameter evaluation and its importance in the development of an HDR/EGS System. Proceedings, 29th workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, California, 26-28 January 2004.

2005

- Baria, R., Michelet, S., Baumgärtner, J., Dyer, B., Nicholls, J., Hettkamp, T., Teza, D., Soma N., Asanuma, H., Garnish, J., Mégel T. (2005). Creation and Mapping of 5000 m deep HDR/HFR Reservoir to Produce Electricity, Proceedings of the World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 24.-29. April 2005.
- Baumgärtner, J., Teza, D., Hettkamp, T., Homeier, G., Baria, R., Michelet S. (2005). Electricity Production from Hot Rocks, Proceedings of the World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 24.-29. April 2005.
- Baumgärtner, J., Hettkamp, T., Teza, D., Baria, R., Michelet S. (2004). Building of a Hot Dry Rock Scientific Power Plant at Soultz-sous-Forêts, Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 28, Geothermal Resources Council 2004 Annual Meeting, Indian Wells, California.

Literatur

- Baria, R., Baumgärtner, J., Gerard, A., Weidler, J., Hopkirk, R. (2002). European Hot-Dry-Rock Geothermal Research Programme Soultz-sous-forêts, Stimulierte geothermische Systeme – Hot-Dry-Rock-Project Soultz-sous-forêts, Schlussbericht zum BMWi-Forschungsvorhaben 0327218, 116 S.
- Cikes, M. (2000). Long-term hydraulic-fracture conductivities under extreme conditions. SPE Prod. & Facilities 15 (4), p. 255-261.
- Cinco-Ley, H., Samaniego-V., F. (1981). Transient pressure analysis for fractured wells. Journal of petroleum technology, Sept. 1981, pp. 1749-1766.
- Dyer, B. (2005). Soultz GPK4 Stimulation September 2004 to April 2005. Seismic Monitoring Report. (EEIG internal report).
- Economides, M.J., Cikes, M., Pforter, H., Thomas, H., Uroda, P. (1989). The stimulation of a tight, very-high-temperature gas-condensate well. SPE Formation Evaluation, March 1989, p. 63.

- Gringarten, A.C., Ramey, H.J., Raghavan, R. (1974). Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single infinite-conductivity fracture. Soc. Pet. Eng. J., Trans., AIME, **257**, 347-360.
- Hettkamp, T., Teza, D., Michelet, S., Baumgärtner, J., Baria, R. (2004). Technical report on the Soultz 2003 hydraulic testing and stimulation program, Report No.: EEIG 01/2004.
- Hilbert, R., (1979). PVT-Daten von Wasser und von wässrigen Natriumchlorid-Lösungen bis 873 K, 4000 bar und 25 Gewichtsprozent NaCl. Dissertation an der Universität Karlsruhe. Hochschulsammlung Ingenieurwissenschaft und Chemieingenieurwesen Band 2, Hochschulverlag Freiburg, 212 S.
- Homeier, G., Baumgärtner, J. (2004). Geologische Interpretation der Bohrung GPK4. Bericht: Stadtwerke Bad Urach / Bestec.
- IAPWS (1995). Thermodynamic properties of water: Tabulation from the International Association for the properties of water and steam (IAPWS) formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use. zum Beispiel in: (<http://www.nist.gov/data/webguide/nist10v2.2/NISTIR5078.htm>)
- Jung, R., Baumgärtner, J., Rummel, F., Tenzer, H., Tran-Viet, T. (1998). Erfolgreicher Langzeit-Zirkulationstest im Europäischen HDR Versuchsfeld Soultz-sous-Forêts. In: Geothermische Energie, Nr. 22-23, 6.Jahrg., Heft 2/3, S. 1-8.
- Jung, R. (1999). HDR-Projekt Soultz, Erschließung permeabler Rißzonen für die Gewinnung geothermischer Energie aus heißen Tiefengesteinen. Schlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben 0326690A, 82 S.
- Jung, R., Weidler, R. (2000). A conceptual model for the stimulation process of the HDR-system at Soultz. Geothermal Resources Council Transactions, 24, p. 143-147.
- Streltsova, T., S. (1988). Well testing in heterogeneous formations. Wiley&Sons, New York.
- TAB, (2003). Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland. Studie im Auftrag des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), Bericht 84. Hrsg.: Paschen, H., Oertel, D., Grünwald, R., 128 S.
- Weidler, R., Gerard, A., Baria, R., Baumgärtner, J., Jung, R. (2002). Hydraulic and micro-seismic results of a massive stimulation test at 5 km depth at the European Hot-Dry-Rock test site Soultz, France. Proceedings, 27th workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, California, January 28-30.
- Weidler, R., Baisch, S. (2004). European HDR project Soultz – Q-con final report (April 2001 – Juli 2004), 48 S.