

Hydrogeologische Untersuchungen im kristallinen Grundgebirge im Zuge der Planung für die zweite Tiefbohrung für das HDR-Projekt in Bad Urach

Ingrid Stober

Stichwörter

kristallines Grundgebirge, HDR-Verfahren, Stimulation, hydraulische Tests, Tiefenwasser

Zusammenfassung

Im Vorfeld des Abteufens einer zweiten 4500 m tiefen Bohrung in das kristalline Grundgebirge wurden in der bestehenden Tiefbohrung Urach 3 verschiedene hydraulische Tests durchgeführt. Zum einen um die Gebirgsdurchlässigkeit vor den Stimulationsversuchen nach einer mehrjährigen Ruhephase festzustellen, zum anderen um die Reaktion des Gebirges auf eine systematisch erhöhte hydraulische Druckbeaufschlagung (Stimulation) in der Bohrung und im Umfeld zu verfolgen. Zu diesem Zweck wurden 5 Seismikbohrungen abgeteuft. Zuvor konnte im Zuge eines vierwöchigen Produktionstestes erstmals das in einer Tiefe von etwa 4000 m u. Gel. auf den Klüften im Gneisgebirge zirkulierende Fluid gewonnen und hydrochemisch untersucht werden. Es handelt sich um ein hochkonzentriertes Na-Cl-Fluid mit einem Gesamtlösungsinhalt von 65 g/l. Die Durchlässigkeit (Transmissivität) des Gebirges vor der Stimulation betrug $T = 4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ und im stärker geklüfteten Nahbereich der Bohrung $T = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Anschrift der Verf.:
Prof. Dr. Ingrid Stober
Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Albertstraße 5, D-79104 Freiburg i. Br.

Hydraulic and hydrochemical investigations in the 4.5 km deep Urach 3 borehole in crystalline basement rocks

Key words

crystalline basement, HDR-technology, hydraulic fracturing, permeabilities, brine

Abstract

The permeability (transmissivity) of the gneisses of the Variscian crystalline basement has been determined from several hydraulic tests in the Urach 3 borehole. The tests revealed a typical $T = 4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ and in the vicinity of the more fractured borehole $T = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Water samples and hydrochemical data were collected during a pumping test of 4 weeks duration. These are the first chemical data from the 4km deep Urach test site. Total dissolved solids amount to about 65 g/l; the main components are sodium and chloride. It is now planned to drill a second 4500 m deep borehole, Urach 4, in the context of the Urach "Hot-Dry-Rock" project and to carry out further hydraulic stimulations in the Urach 4 borehole.

1. Einleitung

Am 26. 04. 02 wurde die Bohrung Urach 3, am Fuße der Schwäbischen Alb, ein weiteres Mal aufgewältigt, diesmal jedoch mit der Vorgabe: Abteufen einer zweiten 4500 m tiefen Bohrung in das kristalline Grundgebirge und "Bau eines HDR-Systems zur Stromproduktion". Damit rückte die bereits in den 70er Jahren abgeteufte und in späteren Jahren immer wieder vertiefte Bohrung Urach 3 (DIETRICH 1982a, 1982b, STENGER 1982, STOBBER 1986) erneut in das Rampenlicht der Öffentlichkeit.

Mit Förderung durch die Europäische Union, die Bundesregierung, das Land Baden-Württemberg und Eigenanteile der Stadt Bad Urach sowie von Industrieunternehmen wurden in den letzten Jahren grundlegende und richtungsweisende Erkenntnisse der Hot-Dry-Rock-Technologie (HDR) erworben. Im Rahmen des Zukunftsinvestitionsprogramm der Bundesregierung (ZIP) konnte Ende 2001 aufbauend auf den bisherigen Ergebnissen mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit ein Pilotvorhaben zur Umsetzung der geothermischen Strom- und Wärmeversorgung begonnen werden.

Im Frühjahr und Sommer 2002 wurden in der Forschungsbohrung Urach 3 verschiedene hydraulische Tests zur Abschätzung der natürlich vorhandenen Wasseraufnahmefähigkeit des Gneisgebirges durchgeführt; u.a. auch ein Produktionstest, bei dem Wasserproben entnommen und analysiert wurden (LGRB 2004). Die Bohrung Urach 3 wurde anschließend mit hohen hydraulischen Drucken stimuliert, d.h. das im Untergrund vorhandene Kluft- und Rissystem wurde geweitet, und dadurch die Wasseraufnahmefähigkeit des Gebirges gesteigert. Im Umfeld der Tiefbohrung Urach 3 wurden 5 Seismikbohrungen nie-

Hydrogeologische Untersuchungen im kristallinen Grundgebirge im Zuge der Planung für die zweite Tiefbohrung für das HDR-Projekt in Bad Urach

dergebracht, um die bei diesen Stimulationsversuchen auftretenden "Geräusche" zu orten und so die bevorzugte Ausbreitungsrichtung des eingepressten Wassers zu verfolgen. Die neu bewilligte Bohrung Urach 4 soll in diesen stimulierten Bereich hinein abgeteuft werden. Die Aufzeichnungen in den Seismikbohrungen dienen somit der Präzisierung der Bohr-Richtung und der Festlegung des Landepunktes der neuen Tiefbohrung. Vorliegende Arbeit beschreibt die wesentlichen Ergebnisse der hydrogeologischen Untersuchungen im Vorfeld des Abteufens der neuen Tiefbohrung Urach 4.

2. Produktionstest in der Bohrung Urach 3

Zu Beginn dieser entscheidenden Phase wurde in der Bohrung Urach 3 ein Wasserspiegel von ca. 189 m u. Gel. beobachtet. Am selben Tag wurde begonnen das Bohrloch verschiedentlich mit Frischwasser aufzufüllen, den Wasserspiegel abzusenken und Wiederanstiege zu messen. Danach wurde mit unterschiedlichen Raten gefördert und bis auf maximal 275 m u. Gel. abgesenkt. Vom 06. bis 27. 05. 02 wurde zyklisch gefördert und auf diese Weise die Absenkung konstant zwischen 260 m und max. 280 m u. Gel. gehalten. Bis zum 29. Mai 2002 wurde in der Bohrung Urach 3 ein insgesamt vierwöchiger Produktionstest durchgeführt.

Mit diesem Versuch sollten die Ausgangsbedingungen mit den zu erwartenden hohen Fließwiderständen dokumentiert werden. Bei dem Produktionstest wurden aus der Bohrung insgesamt 75 m³ Wasser gefördert. Die Pumpe und der Drucksensor waren 285 m u. Gel. abgehängt. Über der Pumpe verblieb dauerhaft eine Wassersäule von über 10 m. Zu Beginn des Produktionstests betrug die Förderrate 5 l/min, sank dann allerdings rasch ab und verblieb gegen Ende des Tests bei einer Rate von 0,7 l/min. Am Bohrlochkopf wurde kontinuierlich die elektrische Leitfähigkeit des geförderten Fluids gemessen. Sie stieg von etwa 0,5 mS/cm auf über 90 mS/cm an und war gegen Ende des Produktionstests nahezu konstant.

Aus der Gesamtentnahme während des 4-wöchigen Produktionstests und der erzielten Absenkung wurde die Transmissivität des Aquifers abgeschätzt zu $T = 3,88 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Dieser Wert passt gut zu den Ergebnissen der Versuche der 80er und 90er Jahre (STOBER 1986, 1995, STOBER & BUCHER 2000). Der Wiederanstieg wurde nicht aufgezeichnet.

3. Hydrochemische Untersuchungsergebnisse

Vor dem eigentlichen Produktionstest wurde aus der Bohrung Urach 3 im Zuge der o.g. Wiederanstiegstests deutlich mehr Wasser entnommen als eingebracht wurde. Eine Abschätzung ergibt, dass bereits vor dem Produktionstest netto etwa 3,5 m³ entnommen wurden. Die Gesamtentnahme betrug somit zuzüglich der 75 m³ durch den Produktionstest etwa 78,5 m³. Dieses Wasservolumen ist geringfügig höher als die Wassermenge, die sich vor Versuchsbeginn im verrohrten Abschnitt der Bohrung befand.

Daten zum Ausbau der Bohrung: 7"-Verrohrung bis 3320 m u. Gel., 1. Perforation: Beginn bei 3259 m u. Gel., ET: 4444 m, WSP vor Testbeginn: 189 m u. Gel.

Die Überschlagsrechnung zeigt, dass trotz der einmonatigen Förderung bei nahezu Konstanz der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers am Ende des Produktionstests und trotz

der hohen Gesamtentnahme von etwa $78,5 \text{ m}^3$ das am Ende des Produktionstests geförderte Fluid nicht ausschließlich aus dem Aquifer stammen dürfte. Es ist anzunehmen, dass am Ende des Testes das Förderwasser noch immer Anteile des Stagnationswassers aus dem verrohrten Bohrloch aufweist.

Die Hauptmenge des am Ende des Produktionstests geförderten Fluids stammt jedoch aus dem kristallinen Grundgebirge, aus dem Bereich zwischen 3259 m (oberste Perforation) und 4444 m u. Gel. (Endteufe), also einer Gebirgs-Strecke von insgesamt 1185 m. Der größte Teil des aus dem kristallinen Grundgebirge zuströmenden Wassers wird aus den Bereichen mit den höchsten Durchlässigkeiten auf dieser Strecke, das ist der Gebirgsabschnitt unmittelbar unterhalb des Rohrschuhes zwischen 3320 m und 3340 m u. Gel. (STOBER 1986) gefördert.

Am Bohrlochkopf wurde vor Ort gegen Ende des Produktionstests jeweils ein pH-Wert von 8,0 und eine Dichte von 1050 kg/m^3 gemessen. Am 27.05.02 erfolgte eine Bestimmung der Gasgehaltsanteile durch das Urach-Team zu: $\text{CH}_4 = 53,1\%$, $\text{CO}_2 = 0\%$ und $\text{O}_2 = 2,9\%$. Messungen, die einige Tage zuvor durchgeführt wurden, lieferten deutlich höhere CH_4 -Anteile. Die absoluten Gasgehalte sind nicht bekannt. Die relativ niedrigen HCO_3^- -Gehalte und pH-Werte, die später im Labor des Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) gemessen wurden (Tabelle 1), belegen, dass in dem Fluid aus dem kristallinen Grundgebirge nur wenig oder kaum CO_2 enthalten sein kann.

Vom LGRB wurden die beiden Wasserproben, die gegen Ende des Produktionstests am 27.05.03 und am 29.05.03 vom Urach-Team gezogen wurden, hydrochemisch mit der ICP-OES untersucht (Tabelle 1). Beide Wasserproben waren bei Ankunft im Labor des LGRB trüb und zeigten Ausfällungen an den Verschlüssen der Behälter. Die Proben wurden weder vor Ort filtriert noch angesäuert. Die Analysendaten sind somit mit Unsicherheiten behaftet. Der SiO_2 -Gehalt ist unplausibel niedrig und deutet auf Ausfällungen. Die realen Sulfat-Gehalte dürften niedriger, die Chlorid-Gehalte etwas höher sein.

Die Wasserproben wurden außerdem auf die Elemente Arsen, Beryllium, Chrom, Kobalt, Cadmium, Blei, Vanadium, Molybdän und Wismut untersucht, die allerdings nur spurenhaf nachgewiesen werden konnten. Da in den Proben Niederschläge sichtbar waren, wurden die Wässer nach einer Erstanalyse im LGRB-Labor mit 10 ml konz. Salpetersäure suprapur angesäuert, membranfiltriert und anschließend erneut auf bestimmte Parameter untersucht (geklammerte Werte in Tabelle 1).

Der Gesamtlösungsinhalt des Fluids aus der Bohrung Urach 3 liegt bei 65 g/l und ist etwa doppelt so hoch wie der von Meerwasser (35 g/l). Die Hauptinhaltsstoffe sind Natrium (etwa 90% der Kationen) und Chlorid (über 95% der Anionen). Die relativen und absoluten Anteile von Natrium und Chlorid haben sich gegenüber der Analyse aus dem Jahr 1978, als die Bohrung Urach 3 noch eine Endteufe von 1784 m aufwies, stark erhöht. Auch hat der Gesamtlösungsinhalt mit der Tiefe um mehr als das Doppelte zugenommen (Abb. 1). Die niedrigen Cl/Br-Verhältnisse von Cl/Br = 202 bzw. 205 (mg-Basis) zeigen, dass die hohe Salinität des geförderten Wassers zu wesentlichen Teilen aus dem Grundgebirge stammen muss (Meerwasser Cl/Br = 288).

Hydrogeologische Untersuchungen im kristallinen Grundgebirge im Zuge der Planung für die zweite Tiefbohrung für das HDR-Projekt in Bad Urach

Tab. 1 Zusammenstellung der hydrochemischen Ergebnisse von Wasserproben aus der Bohrung Urach 3 (Labor LGRB)

Parameter (mg/l)	27.05.2002 (angesäuert)	29.05.2002 (angesäuert)
pH-Wert Lab.	6,60	6,52
Temp. Lab. (°C)	15,6	15,1
Calcium	1513	1108
Magnesium	152	156
Natrium	21859	22827
Kalium	1083	1074
Eisen	(14,0)	(12,0)
Mangan	(3,7)	(3,9)
Lithium	3,7 (69,0)	79,0 (69,0)
Strontium	7,0 (139,0)	33,0 (141,0)
Barium	0,09 (1,28)	1,4 (1,28)
Zink	(145,0)	(52,0)
Aluminium	(545,0)	(149,0)
Kupfer	n. b.	n. b.
Chlorid	37226	38289
Hydrogencarbonat	415	397
Sulfat	1268	1256
Fluorid	1,35	1,33
Brom	184	187
Jod	1,8	1,4
Bor	29	35
SiO ₂	18	17

Wasser (H₂O) verbrauchende Reaktionen, hauptsächlich die Zeolitisierung von Feldspat (Plagioklas), führen zu einer Aufmineralisation des Fluids unter Beibehaltung des pH-Wertes (BUCHER & STÖBER 2000). Durch diesen Mechanismus steigt der Gesamtlösungsinhalt im Fluid passiv an. Die Alteration von Plagioklas mit Umwandlung von Albit (Hauptkomponente des Plagioklases in den Gneisen von Urach) in Zeolith (Natrolit) führt dazu, dass Wasser (H₂O) in das neu gebildete Mineral eingebaut wird, so dass ein "Wasserverlust", ein Aufbrauch von H₂O, entsteht. Die Restlösung wird aufmineralisiert.

Der Wasseraufbrauch führt letztlich auch dazu, dass das hydraulische Potential mit zunehmender Tiefe immer geringer wird. Der Wasseraufbrauch ist in größeren Tiefen des Gneisgebirges im ungestörten Zustand (ohne Eingriff durch eine Bohrung) größer als der Nachschub (Neubildung) von oben, aus dem Hangenden. Das liegt zum einen an den geringen Durchlässigkeiten, zum anderen an den äußerst niedrigen hydraulischen Gradienten. In der Bohrung Urach 3 konnte sich demzufolge bei jeder Endteufe kein "Ruhepotential" ein-

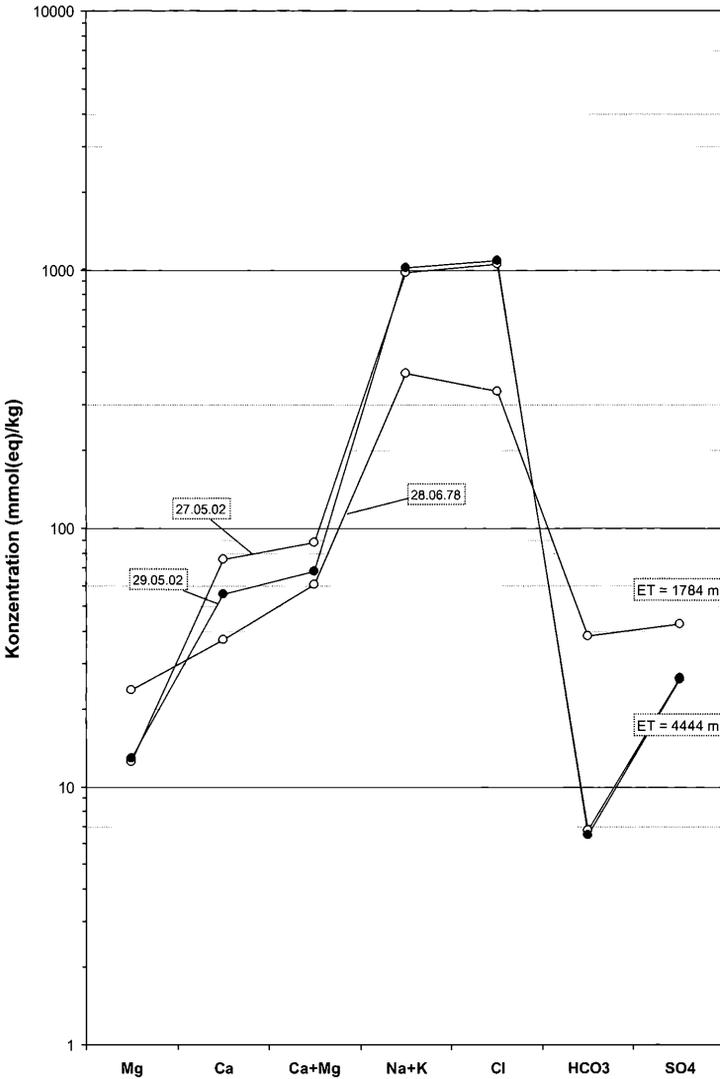


Abb. 1: Schoeller-Diagramm der Wässer aus dem kristallinen Grundgebirge der Bohrung Urach 3.

stellen, auch nahmen die hydraulischen Potentiale mit jeder Vertiefung der Bohrung ab. Durch die offene Bohrstrecke (Open Hole) von letztlich weit über 1000 m wurden spontan und direkt verschiedene Tiefenbereiche mit nach unten abnehmenden hydraulischen Potentialen verbunden, so dass damit neu über die Bohrung ein spürbarer Wasserfluss von oben nach unten erzwungen wurde.

Hydrogeologische Untersuchungen im kristallinen Grundgebirge im Zuge der Planung für die zweite Tiefbohrung für das HDR-Projekt in Bad Urach

4. Slugteste

Im Anschluss an den Produktionstest wurden Anfang Juni 2002 in der Forschungsbohrung Urach 3 insgesamt drei Slugteste vergleichbar mit denen der 80er Jahre durchgeführt (SCHÄDEL & STOBBER 1984). Von diesen konnten aufgrund der Kürze der Beobachtungsdauer nur der zweite Versuch geohydraulisch ausgewertet werden. Mit diesen Tests sollte qualitativ die Ergiebigkeit bzw. quantitativ die Durchlässigkeit der früheren Jahre verglichen werden. Slugtest 2 wurde mit den Typkurven nach PAPADOPULOS et al. (1973) ausgewertet. Aus diesem Versuch wurde die Transmissivität zu $T = 1,38 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ und der Speicherkoeffizient zu $S = 4,43 \cdot 10^{-5}$ berechnet. Abbildung 2 zeigt die Auswertung und die Anpassung an die Typkurven.

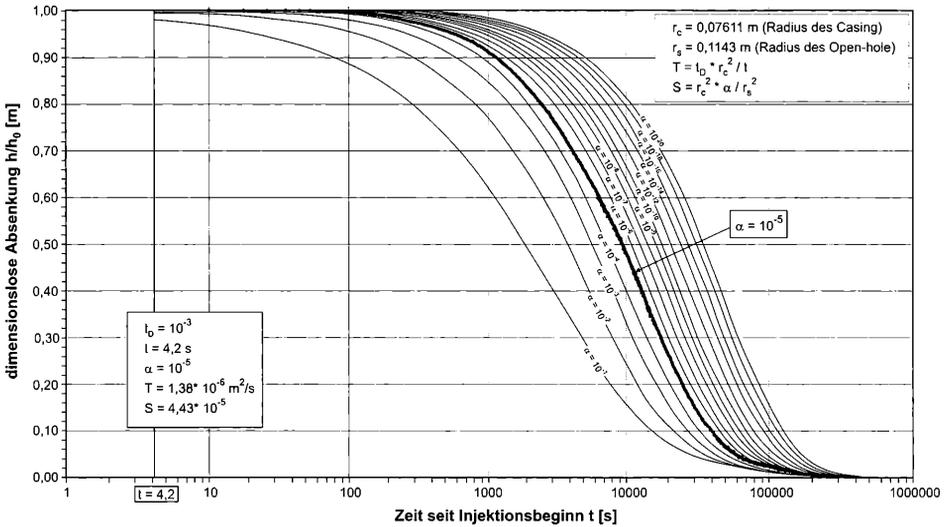


Abb. 2: Auswertung des Slugtests vom 06.-11.06.02 mit Typkurven nach Papadopulos et al. (1973).

Die Ergebnisse stimmen mit jenen Ergebnissen der Versuche vom November 1982 überein, als die Bohrung nach einer 3-jährigen Ruhepause neu aufgewältigt wurde. Die Endteufe lag damals bei 3334 m u.Gel. Der in den späteren Jahren hinzugewonnene Teufenabschnitt (1110 m Kristallin!) bis 4444 m führte zu keiner hydraulisch erkennbaren Durchlässigkeitszunahme.

Die in der Bohrung Urach 3 durchgeführten Slugteste erbrachten bereits früher in der Bohrung Urach 3 generell größere Transmissivitäten als die Injektionsversuche, die unterhalb des Öffnungsdruckes gefahren wurden (STOBBER 1986). Dieser Unterschied ist verfahrensbedingt. Mit Slugtests kann aufgrund der kurzen Versuchszeit und der geringen eingebrachten Wasservolumina lediglich der engste Gebirgsbereich um das Bohrloch herum getestet werden. Aus Slugtests erhält man daher hydraulische Parameter des

Übergangsbereiches vom Bohrloch in das anstehende Gebirge. Im kristallinen Grundgebirge ist dieser Übergangsbereich durch den Bohrvorgang und die Entlastung des Gebirges zumeist stärker geklüftet und daher durchlässiger. Injektionsversuche reichen aufgrund der längeren Versuchszeit mit den größeren Injektionsmengen wesentlich weiter in das Gebirge hinein und geben daher Auskunft über Gebirgsabschnitte in wesentlich größerer Entfernung vom Bohrloch (einige 10 bis mehrere 100 m). Die hier angetroffenen Durchlässigkeiten sind i. d. R. geringer als in Bohrlochnähe.

5. Injektionsteste

Ende Juni bis Mitte Juli 2002 wurden in der Bohrung Urach 3 insgesamt vier Injektionsversuche durchgeführt, um das Gebirge zu stimulieren und um die Ausbreitung der Risse über Geophone, die in den neu abgeteufte, zwischen 220 und 280 m tiefen Bohrungen installiert waren, zu orten. Bei den ersten beiden Injektionsversuchen (Abb. 3, 4) wurden Drucke von 245 bar Kopfdruck und 475 bar "Basisdruck" (Abhängtiefe der Drucksonde etwa 2350 m) erreicht, bei den anderen Injektionsversuchen "Basisdrucke" von etwa 370 bar (Abb. 5, 6). Im Anschluss an die jeweiligen Injektionsphasen wurde die Bohrung verschlossen und der Druckabfall so lange beobachtet, bis wieder nahezu Ausgangsbedingungen vorlagen, d. h. über viele Stunden bis Tage. Das injizierte Wasser breitete sich in dieser Zeit im Gebirge aus.

Der erste Injektionstest erfolgte mit 5 verschiedenen Raten; es wurde successive von 15 l/min auf 170 l/min gesteigert. Der "Basisdruck" stieg dadurch von 235 bar auf 475 bar (Kopfdruck: 245 bar) an (Abb. 3). Infolge der Injektion von kühlem Oberflächenwasser fiel die Temperatur im Bereich der Messsonde (2350 m u. Gel.) von 115°C auf 103°C ab. Der zweite Injektionstest wurde vierstufig durchgeführt. Begonnen wurde diesmal mit einer Injektionsrate von 130 l/min und gesteigert auf bis zu 220 l/min. Der Druck stieg daraufhin bis auf 250 bar Kopfdruck bzw. 480 bar "Basisdruck" an (Abb. 4). Im Bereich der Messsonde nahm die Temperatur von 114,5°C auf 91,5°C ab. Der dritte und vierte Injektionsversuch wurden jeweils einstufig mit einer Injektionsrate von 11 l/min gefahren und "Basisdrucke" von über 370 bar bzw. von etwa 368 bar (Kopfdrucke: > 138 bar bzw. 136 bar) erreicht (Abb. 5, 6). Im Bereich der Messsonde nahm die Temperatur um 2°C bzw. um 2,5°C ab.

5.1 Elastische Reaktionen

Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, dass unterhalb eines Öffnungsdruckes von 170 bar Kopfdruck keine nennenswerte Gesteinskompression auftritt, da das Gebirge durch den Überlagerungsdruck elastisch verspannt ist. Unterhalb des Öffnungsdruckes verhält sich das Gebirge wie ein gespannter Aquifer. Darüber werden vorhandene Klüfte geöffnet und geweitet, wodurch die "Durchlässigkeit" des Gebirges erhöht wird (STOBER 1986).

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse der vier Injektionsversuche. Die Injektionsversuche 3 und 4 wurden unterhalb des sog. Öffnungsdruckes durchgeführt. Injektionsversuch 1 begann noch unterhalb des Öffnungsdruckes, jedoch wurden gegen Ende der zweiten Injektionsstufe bereits Drucke erreicht, die eine elastische Reaktion des Gebirges hervorriefen. Während im ersten Teil des Injektionstest 1 die Druckzunahme pro Ratensteigerung

Hydrogeologische Untersuchungen im kristallinen Grundgebirge im Zuge der Planung für die zweite Tiefbohrung für das HDR-Projekt in Bad Urach

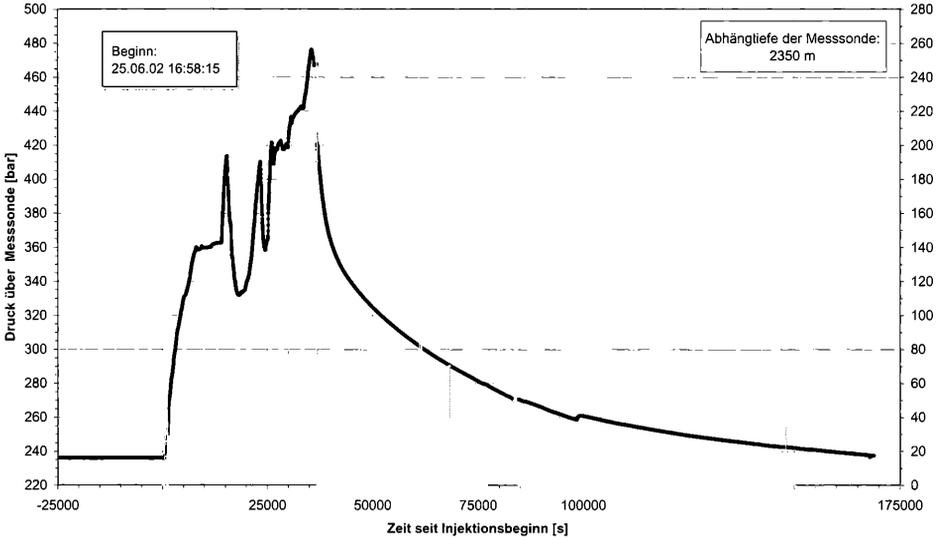


Abb. 3: Injektionstest 1 vom 25.-27.06.02, Injektionsrate und Druckverlauf.

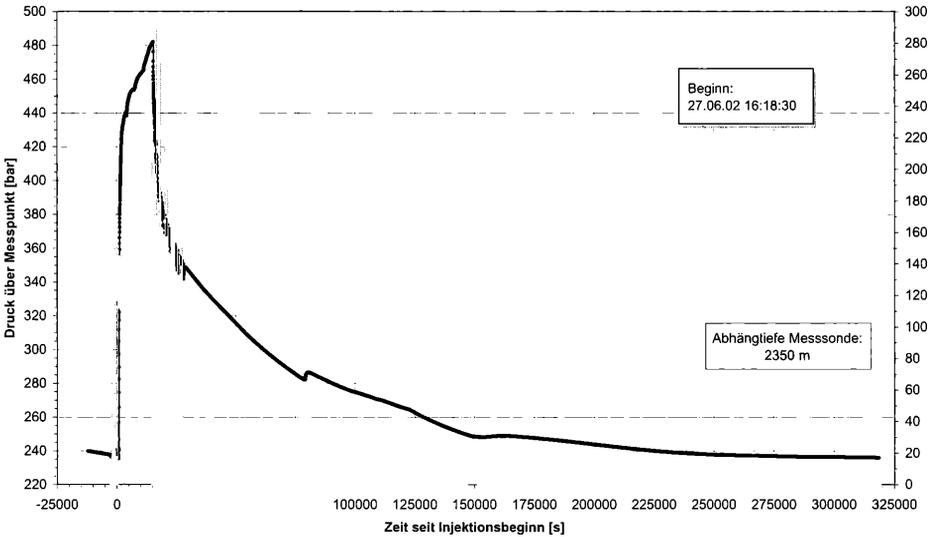


Abb. 4: Injektionstest 2 vom 27.06.-01.07.02, Injektionsrate und Druckverlauf.

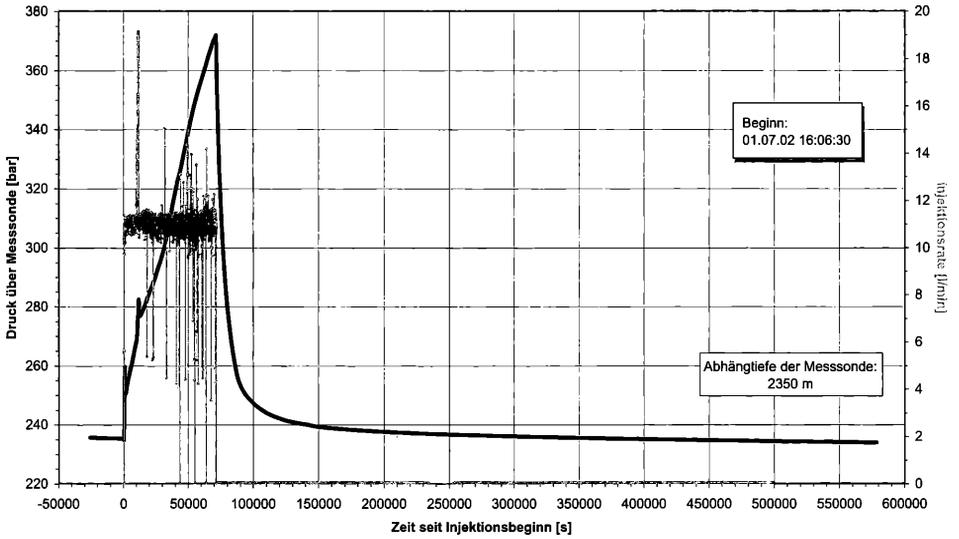


Abb. 5: Injektionstest 3 vom 01.07.-07.07.02, Injektionsrate und Druckverlauf.

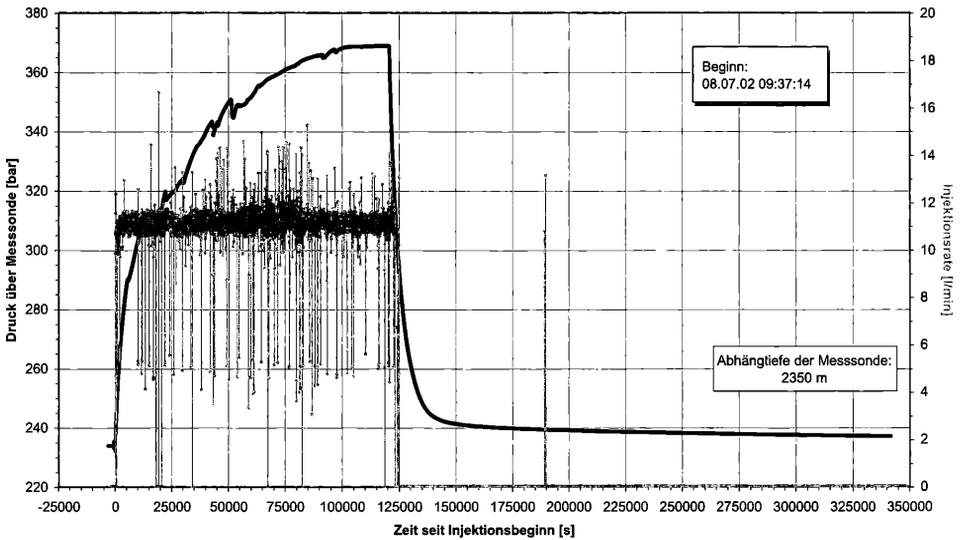


Abb. 6: Injektionstest 4 vom 08.07.-12.07.02, Injektionsrate und Druckverlauf.

$(\Delta p/\Delta Q)$ relativ groß ist, nimmt dieser Quotient oberhalb des Öffnungsdruckes drastisch ab. Mit dem zweiten Injektionsversuch wurde das Gebirge stark elastisch beansprucht. Dieser Versuch kann gebirgsmechanisch fast als "Fortsetzung" des Injektionstests I betrachtet werden. Die "Versuchskette" auf Anlage 7 zeigt auch, dass sich von Injektionsversuch zu Injektionsversuch nach jedem Druckabbau (Abb. 3-6) wieder nahezu gleiche Ausgangsbedingungen einstellen. Oberhalb des sog. Öffnungsdruckes nimmt der Druck scheinbar proportional mit zunehmender Injektionsrate zu (Abb. 7). Eine größere Durchlässigkeitssteigerung auf diesem Druckniveau ist nicht erkennbar. Es scheint, als wären die Injektionsversuche auf zwei verschiedenen Durchlässigkeitsniveaus durchgeführt worden (Abb. 7): unterhalb des "Öffnungsdruckes" und darüber, bei etwa 10-fach so hohen Durchlässigkeiten.

Abbildung 8 zeigt die Abhängigkeit zwischen Injektionsrate Q (l/s) und spezifischer Druckzunahme p/Q (bar s/l) des Gebirges, die bei den vier Injektionstests gemessen wurden. Die Beziehung zwischen Injektionsrate und spezifischer Druckzunahme kann durch eine Exponentialfunktion beschrieben werden (Abb. 8):

$$y = 183.24 x^{-0.7989} \quad (1)$$

wobei "y" die spezifische Druckzunahme p/Q ist und "x" die Injektionsrate Q . Nach dieser Gleichung wäre bei einer Injektionsrate von 50 l/s eine spezifische Druckzunahme von ca. $p/Q = 8 \text{ bar/(l/s)}$ oder ein Kopfdruck von etwa $p = 400 \text{ bar}$ zu erwarten, falls eine derart weite Extrapolation überhaupt zulässig ist. Abbildung 8 zeigt auch, dass die stärksten Änderungen zwischen dem Verhältnis von Injektionsrate und spezifischer Druckzunahme im Bereich einer Injektionsrate von 0,5 - 1,0 l/s und einer spezifischen Druckzunahme des Gebirges von 160 - 180 bar/(l/s) erfolgen. In diesem Bereich liegt der "Öffnungsdruck" (170 bar Kopfdruck), der rechnerisch (Gleichung 1) bei einer Injektionsrate von 0,7 l/s erreicht wird.

5.2 Hydraulische Auswertung unterhalb des "Öffnungsdruckes"

Da die Injektionsrate bei allen Versuchen schwankte und demzufolge auch die erzielten Drucke, war eine hydraulische Auswertung - unterhalb des "Öffnungsdruckes" - schwierig (Abb. 3-6). Der einzige Versuch, bei dem näherungsweise die Druckaufbauphase ausgewertet werden konnte, war Injektionsversuch 4. Die Transmissivität wurde aus der Injektionsphase zu $T = 4,80 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ abgeschätzt (Abb. 9). In der ersten Phase des Injektionsversuchs wird der Druckverlauf von der Eigenkapazität des Bohrlochs und vom direkt angeschlossenen Kluftsystem bestimmt (GRINGARTEN & RAMEY 1974), so dass die radiale Fließperiode erst relativ spät einsetzt.

Abbildung 10 zeigt den Druckabbau des Injektionsversuches 4 im Anschluss an die Injektion. In der ersten Phase des Druckabbaus dominieren wiederum die Strömungsvorgänge, die durch das Bohrloch und die Klüfte vorgegeben werden. Allmählich setzt die radiale Fließperiode ein, aus der die Transmissivität zu $T = 4,48 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ bestimmt wurde. Beide Ergebnisse liegen nahe beieinander und bestätigen frühere Daten.

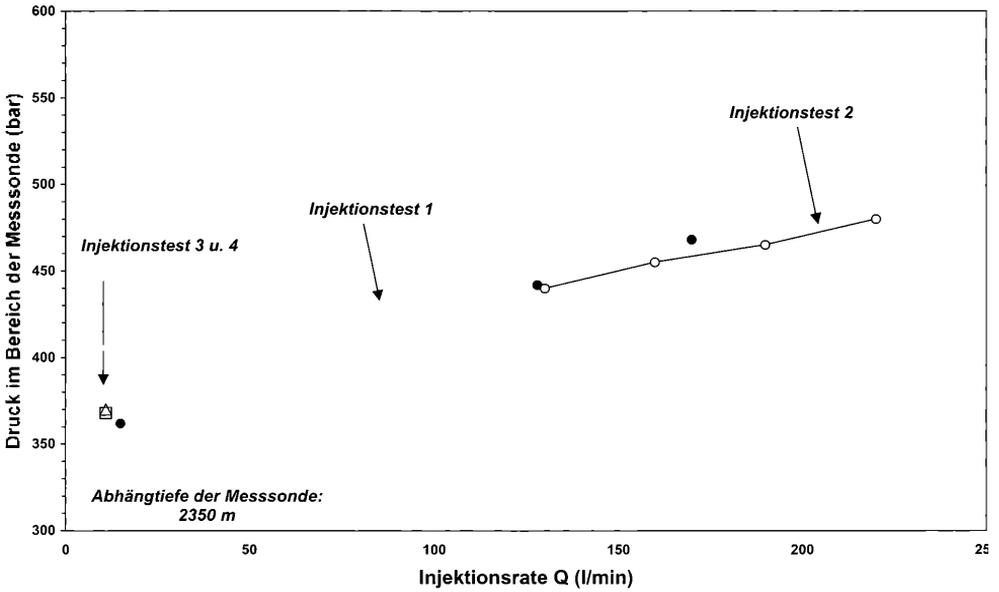


Abb. 7: Vergleich der Injektionstests von 2002.

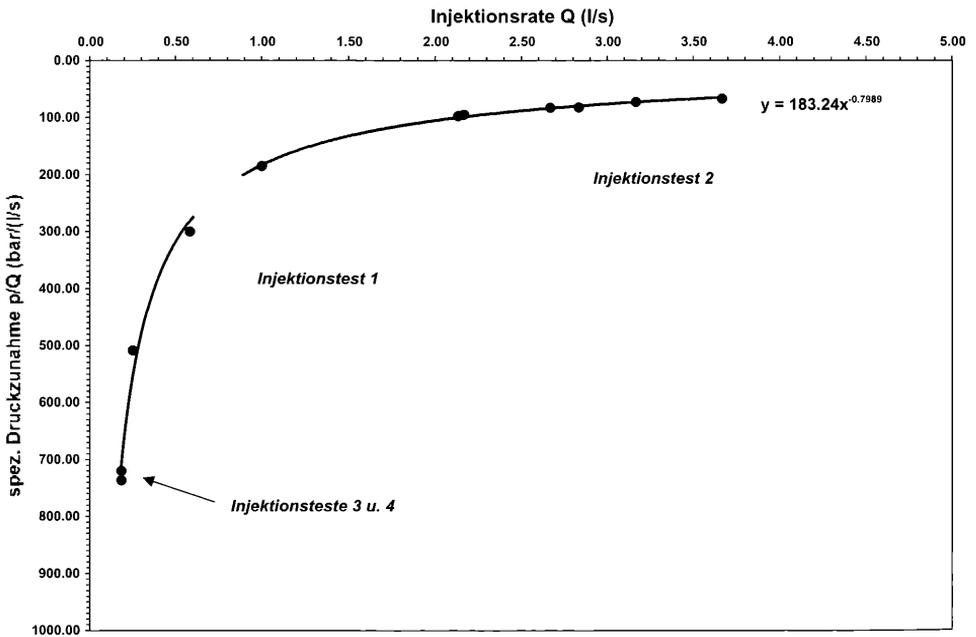


Abb. 8: Spezifische Aufnahmefähigkeit des Gneisgebirges in der Bohrung Urach 3.

Hydrogeologische Untersuchungen im kristallinen Grundgebirge im Zuge der Planung für die zweite Tiefbohrung für das HDR-Projekt in Bad Urach

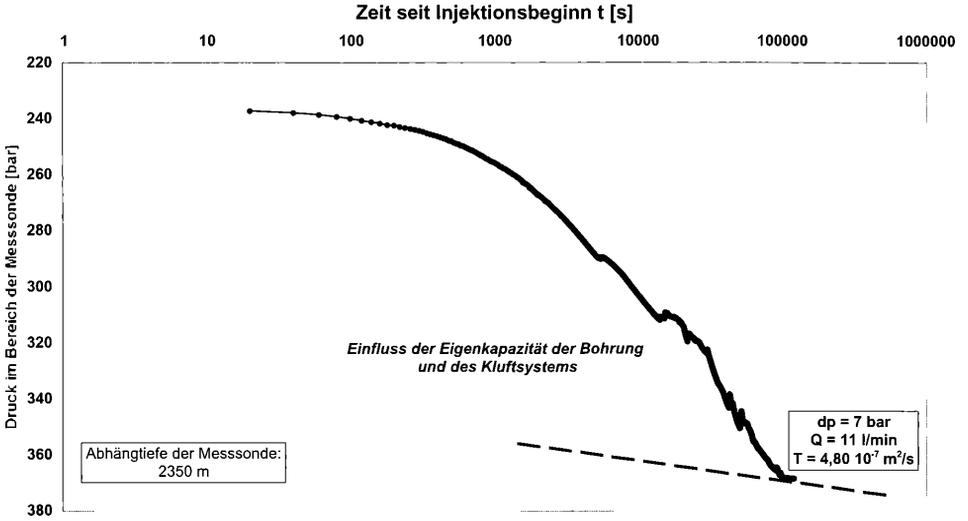


Abb. 9: Geohydraulische Auswertung des Druckaufbaus während des Injektionsversuches 4.

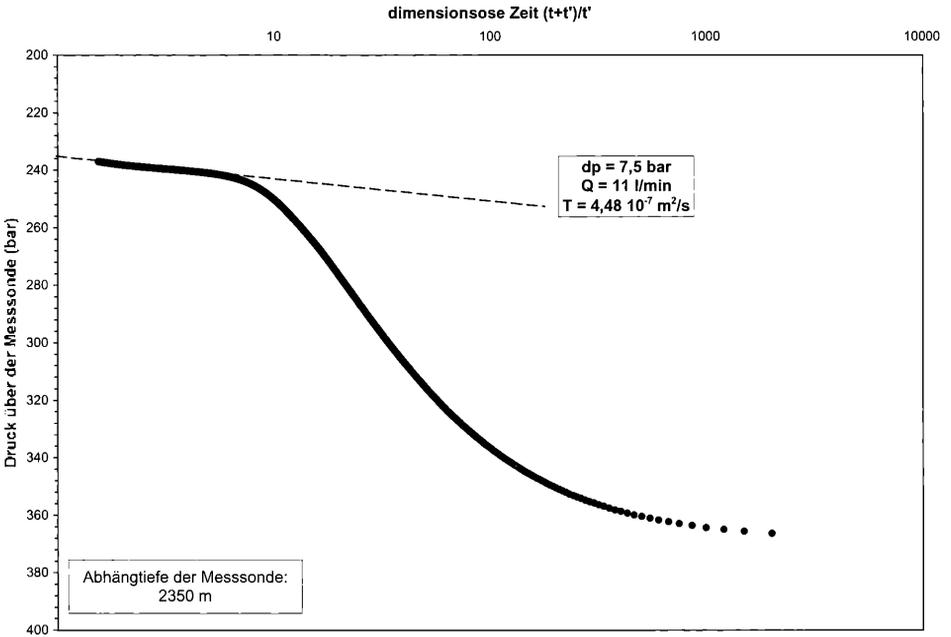


Abb. 10: Geohydraulische Auswertung des Druckabbaus des Injektionsversuches 4 (HORNER PLOT).

6. Anmerkungen zu den Temperaturmessungen in der Bohrung Urach 3 und in den Seismikbohrungen SB4 und SB5

Während der Injektion von kühlem Oberflächenwasser in die Bohrung Urach 3 nahm die Temperatur im gesamten Bohrloch ab. Im Bereich der Messsonde waren es beim Injektionsversuch 4 pro Log-Dekade $\Delta T = 1,5^\circ\text{C}$ (Abb. 11). Die Stärke der Abkühlung ergibt sich aus dem Wechselspiel von Wärmenachschub (Wärmestrom aus dem Gebirge) und Wärmeentzug (Einbringen von "Kälte" durch die Injektion). Aus der Injektionsmenge, der Dichte und Wärmekapazität von Wasser kann daher aus der Abkühlungsrate die mittlere Wärmeleitfähigkeit des gesamten Bohrlochabschnittes zwischen Bohrlochkopf und Abhängtiefe der Messsonde (2350 m) abgeschätzt werden zu $\lambda = 2,00 \text{ J}/(\text{s m}^\circ\text{K})$. Die so berechnete Wärmeleitfähigkeit ist ein Mittelwert aus den Wärmeleitfähigkeiten der insgesamt 1600 m mächtigen Sedimentgesteine, des kristallinen Grundgebirges sowie der Verrohrung und Zementation der Bohrung.

Von den GGA, Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben Hannover, wurden in den Seismikbohrungen SB4 und SB5 (Ansatzpunkt im Oxford 1) Temperaturmessungen durchgeführt. Die Seismikbohrungen SB1 – SB3 waren zu diesem Zeitpunkt, da bereits Geophone einzementiert waren, nicht mehr zugänglich. Die Bohrungen SB4 und SB5 waren bis 220 m bzw. bis 165 m u. Gel. (a11 bzw. a12) befahrbar. In beiden Bohrungen wurden bereits in 160 m Tiefe die Temperaturwerte von 20°C überschritten.

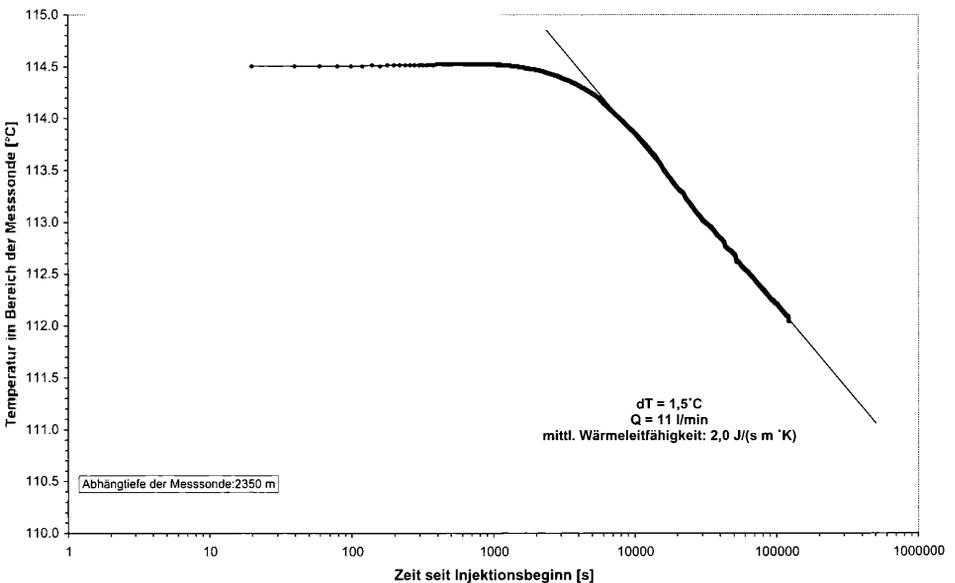


Abb. 11: Temperaturverlauf im Bereich der Messsonde während des Injektionsversuches; Ermittlung der mittleren Wärmeleitfähigkeit.

Hydrogeologische Untersuchungen im kristallinen Grundgebirge im Zuge der Planung für die zweite Tiefbohrung für das HDR-Projekt in Bad Urach

Aus den Temperaturprofilmessungen wurden Temperaturgradienten berechnet (bspw. Abb. 12). Der normale Temperaturgradient von ca. $2,8^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ist in beiden Bohrungen stark erhöht. Er beträgt bei SB4 über die gesamte Messstrecke im Mittel $6,87^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ und in SB5 $7,46^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Der mittlere Gradient in SB4 ist etwas geringer als in SB5, da die Temperaturzunahme in der Bohrung SB4 im unteren Abschnitt nur noch sehr gering ist (Abb. 12). Beide Bohrungen haben die große positive geothermische Anomalie im Raum Urach-Boll bestätigt (ZOTH 1982).

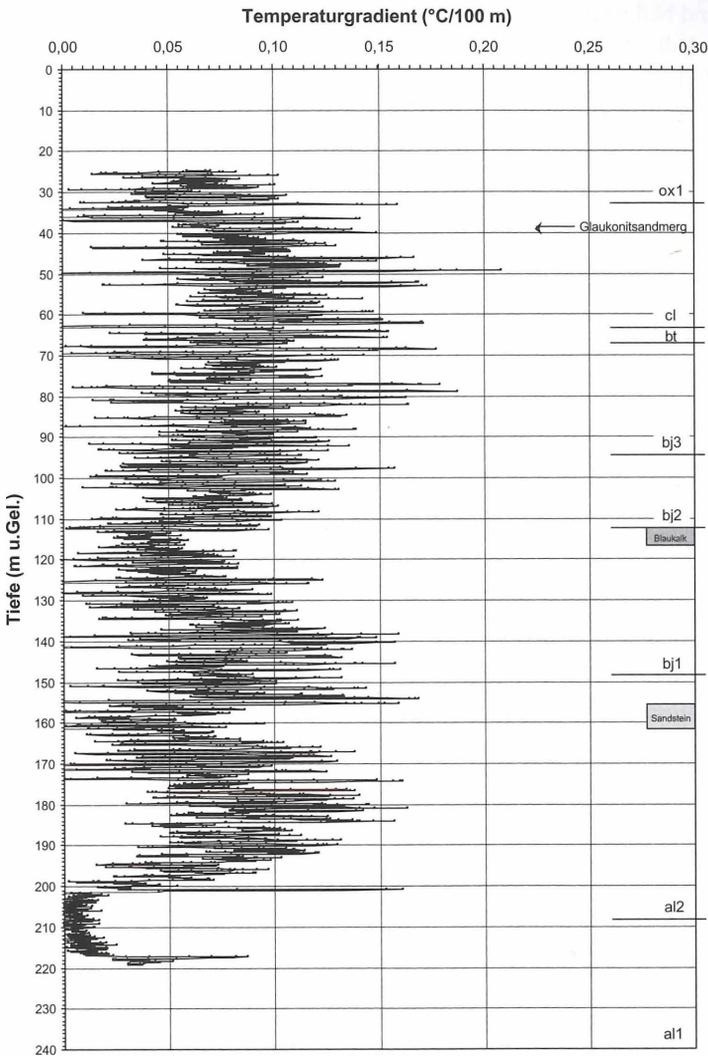


Abb. 12: Interpretation des Temperaturgradienten in der Seismikbohrung SB4.

Die Temperaturmessungen in den Bohrungen SB4 und SB5 zeigen, dass die Temperaturgradienten in der Vertikalen nicht konstant sind (vgl. Gradienten-Darstellung auf Abbildung 12). Es werden bereichsweise Werte von über $10^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ erreicht. Auf der rechten Seite der Abbildung 12 wurde das geologische Profil (Aufnahme: M. FRANZ) eingetragen. Eine Abhängigkeit des Temperaturgradienten von den angetroffenen Schichten ist deutlich für den Blaukalk (im bj1) und den Concavasandstein (im al2) erkennbar. Möglicherweise beruhen die niedrigeren Temperaturgradienten im Blaukalk und Concavasandstein auf konduktivem Wärmetransport; konvektive Effekte sind jedoch nicht völlig auszuschließen. Kalksteine und Sandsteine haben im Mittel eine höhere Wärmeleitfähigkeit als Tone bzw. Tonsteine und bedingen somit bei konstantem Wärmestrom einen niedrigeren Temperaturgradienten. Außerdem neigen Tone bzw. Tonsteine zu einer starken Anisotropie der Wärmeleitfähigkeit.

Verdankungen

Dem Urach-Team (H. Tenzer, Dr. H.-G. Dietrich) recht herzlichen Dank für die Überlassung des umfangreichen Datenmaterials und die harmonische Zusammenarbeit. Dank auch an Herrn M. Jodocy für die Mithilfe bei der Aufbereitung der Daten. Vielen Dank an das LGRB-Labor (H. Maucher) für die hydrochemischen Untersuchungen der schwierigen Wasserproben. Den GGA Hannover herzlichen Dank für die Temperaturmessungen in den beiden Seismikbohrungen. Vielen, vielen Dank an Dr. Wilhelm Schloz für sein reges Interesse und seine vielfältige Unterstützung in Sachen tiefer Geothermie, so auch "HDR Urach" und Ansiedlung als Projekt im LGRB. Ihm ebenso herzlichen Dank für seine stetige, fruchtbare Diskussionsbereitschaft.

Eingang des Manuskripts: 20.02.2004

Angeführte Schriften

- BUCHER, K., STOBER, I. (2000): The composition of groundwater in the continental crystalline crust.- In: STOBER, I., BUCHER, K. (eds.) (2000): Hydrogeology in crystalline rocks.- KLUWER academic Publishers, p.141-176, Dordrecht/Boston/London.
- DIETRICH, H.-G. (1982a): Geological results of the Urach 3 Borehole and the Correlation with other Boreholes.- In: HAENEL, R. (ed.) (1982): The Urach Geothermal Project,- Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, p. 49-58, Stuttgart.
- DIETRICH, H.-G. (1982b) Technical Details of the Geothermal Well Urach 3: Planning and Realization.- In: HAENEL, R. (ed.) (1982): The Urach Geothermal Project, p. 7-35. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- GRINGARTEN, A.C., RAMEY, H.J. (1974): Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single horizontal fracture, partial penetration, or restricted entry.- Soc. Petrol. Engineers Journal, 413-426.

Hydrogeologische Untersuchungen im kristallinen Grundgebirge im Zuge der Planung für die zweite Tiefbohrung für das HDR-Projekt in Bad Urach

- LGRB (2004): Geologische und hydrogeologische Untersuchungen im Zuge der Planung für die zweite Tiefbohrung für das HDR-Projekt in Bad Urach.- Bericht des Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau B.-W. (LGRB), AZ: 4715//040101, 27 S., 27 Anl., Anhang, Bearbeiter: FRANZ, M., STOBER, I., Freiburg.
- PAPADOPULOS, I.S., BREDEHOEFT, J.D., COOPER, H.H. (1973): On the Analysis of 'Slug Test' Data.- Water Resources Research, vol. 9: 4, p. 1087-1089, Washington D.C.
- SCHÄDEL, K., STOBER, I. (1984): Auswertung der Auffüllversuche in der Forschungsbohrung Urach 3.- Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, H. 26, S. 27-34, Freiburg i.Br.
- STENGER, R. (1982) Petrology and Geochemistry of the Basement Rocks of the Research Drilling Projekt Urach 3.- In: HAENEL, R. (ed.) (1982): The Urach Geothermal Project, p. 41-48. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- STOBER, I. (1986): Strömungsverhalten in Festgesteinsaquiferen mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen.- Geologisches Jahrbuch, Reihe C, Heft 42, 204 S., Hannover.
- STOBER I. (1995): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges.- Enke-Verlag, 191 S., Stuttgart.
- STOBER, I., BUCHER, K. (2000): Hydraulic properties of the upper continental crust: data from the Urach 3 geothermal well.- In: STOBER, I., BUCHER, K. (eds.) (2000): Hydrogeology in crystalline rocks.- KLUWER academic Publishers, p. 53-78, Dordrecht/Boston/London.
- ZOTH, G. (1982): The temperature Field of the Urach Area.- In: HAENEL, R. (ed.) (1982): The Urach Geothermal Project, p. 205-221. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte der naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau](#)

Jahr/Year: 2005

Band/Volume: [95](#)

Autor(en)/Author(s): Stober Ingrid

Artikel/Article: [Hydrogeologische Untersuchungen im kristallinen Grundgebirge im Zuge der Planung für die zweite Tiefbohrung für das HDR-Projekt in Bad Urach 237-253](#)