



# Baden-Württemberg

REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG

ABTEILUNG UMWELT

## **Machbarkeitsstudie für ein Hot Dry Rock-Wärme- und Stromnutzungskonzept Bad Urach**

**Förderkennzeichen: 0327615A**

### **Teil: Hydrogeologie**

**Ingrid Stober**

Das Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9 Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) hat im Rahmen der Machbarkeitsstudie für ein Hot Dry Rock (HDR) Wärme- und Stromnutzungskonzept mit der Stadt Bad Urach eine Forschungsvereinbarung geschlossen. Diese Machbarkeitsstudie wurde vom BMU und der EnBW gefördert. Im Teil II Hydrogeologie dieser Vereinbarung sollen vom Regierungspräsidium Freiburg (RPF), Abteilung Umwelt, die hydraulischen Tests, die seit den Jahren 1978 im kristallinen Grundgebirge der beiden Forschungsbohrungen Urach 3 und Urach 4 durchgeführt wurden, zusammengetragen, ausgewertet und validiert werden.

Viele Versuche liegen bereits in ausgewerteter Form vor. Daneben gibt es einige Versuche aus den 70er Jahren und viele Versuche aus den Jahren 2002 bis 2004, bei denen die Messdaten noch nicht aufbereitet und ausgewertet wurden.

Die weitaus meisten Versuche stammen aus der Bohrung Urach 3 aus Tiefen über 3200 m. Im Rahmen des Projektes wurde an einer mathematischen Beziehung zwischen Injektionsrate und Durchlässigkeit in diesem Teufenbereich gearbeitet und an der Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf den höheren Bereich im Kristallin, der ggf. für eine spätere Stimulation vorgesehen ist und der von der Fa. HYDRO-DATA im Rahmen dieses Projektes modelliert wird.

Die von Herrn Dr. Hann, Geologisches Institut Universität Tübingen, vorgenommenen Aufnahmen der Bohrungen Urach 3 und 4 wurden benutzt, um daraus auf potentiell stärker Wasser führende Zonen zu schließen. Die Bohrungen Urach 3 und Urach 4 wurden dafür „hydraulisch ausgewertet“. Es wurde versucht, die beiden Ergebnisse zu korrelieren.

## Inhalt

1. Aufbereitung hydraulischer Daten
2. Auswertung der hydraulischen Tests im Kristallin der Bohrung Urach 3
  - 2.1 Drill-Stem-Test zwischen 1759,58 m und 1779,90 m Tiefe am 23.01.1978
  - 2.2 Pumpversuch aus 1808,5 m bis 2802,0 m Tiefe in der Zeit 06.-07.04.1978
  - 2.3 Drill-Stem-Test zwischen 3294,91 m und 3301,5 m Tiefe am 11.05.1978
  - 2.4 Zuflusstest im offenen Bohrloch 27.-29.05.1978
  - 2.5 Pumpversuch (25.-28.06.1978) aus der Perforation bei 1784 - 1764 m Tiefe
  - 2.6 Injektionstest Urach 3 am 25.06.02
  - 2.7 Injektion und Stimulation, Versuche im Zeitraum 21. – 30.08.2002
  - 2.8 Injektionsversuch Urach 3 in der Zeit 12.-20.09.02
  - 2.9 Fördertest Urach 3 (07.01.-27.06.03)
  - 2.10 Langzeitinjektionsversuch in der Bohrung Urach 3 (18.07.-01.08.03)
  - 2.11 Injektionsversuch (01.-22.08.2003)
  - 2.12 Auslaufversuch 22.-24.08.2003 Urach 3
  - 2.13 Auslaufversuch 24.-27.08.2003 Urach 3
  - 2.14 Injektionsversuch vom 08.-16.04.2004 in die Bohrung Urach 3
3. Interpretation und Wertung der hydraulischen Tests in der Bohrung Urach 3
4. Durchlässigkeiten im höheren kristallinen Grundgebirge der Bohrungen Urach 3 und Urach 4
  - 4.1 Bohrung Urach 4
  - 4.2 Bohrung Urach 3
5. Potenziell stärker Wasser führende Zonen und hydraulisch dichtere Bereiche auf der Basis der geologischen Aufnahmen
6. Wasserproben aus der Bohrung Urach 3
7. Dank
8. Literatur

## **1. Aufbereitung hydraulischer Daten**

Die Daten der 70er Jahre lagen ausschließlich in analoger Form vor. Von den meisten Versuchen gibt es nur wenige Informationen, so dass die Auswertungen häufig nur qualitative Hinweise erbrachten.

Im Hinblick auf die Aufgabenstellung mussten u.a. Versuche aus den Jahren 2002-2004 aufwändig aufbereitet und rekonstruiert werden, da die Daten beispielsweise in 3 verschiedenen Formaten vorlagen. Alle Daten wurden daher zunächst aufwändig konvertiert und in Excel-Dateien abgelegt.

Auch waren Versuchsteile mit gleichen, ähnlichen und z.T. unterschiedlichen Inhalten mehrfach in verschiedenen Dateien abgelegt. Die einzelnen bruchstückhaften Messdatenaufzeichnungen mussten daher zunächst identifiziert und zusammengesetzt werden.

Ein weiteres Problem bestand darin, dass häufig bis zu drei verschiedene Temperaturen, Drucke und Raten aufgezeichnet wurden, die vor einer Weiterverarbeitung zunächst identifiziert werden mussten. Manche Parameter mussten addiert werden, andere waren für die Auswertung irrelevant.

Da die einzelnen Messdaten bei den oft mehrere Tage oder Wochen dauernden Versuchen in der Regel sekundlich erfasst wurden, war für das Handling der Daten eine Ausdünnung der Messdaten unumgebar.

Von der Bohrung Urach 4 liegen dem RPF nur sehr wenige hydraulische Messdaten vor.

Dem RPF wurden am 05.03. und 06.06.09 weitere, noch auszuwertende Versuche übergeben.

## **2. Auswertung der hydraulischen Tests im Kristallin der Bohrung Urach 3**

Sämtliche dem RPF bekannten hydraulischen Tests wurden mit Auswertergebnis in Tabelle 1 zusammengestellt. Bei den hydraulischen Versuchen handelt es sich um Drill-Stem-Tests, Leak-Off-Tests, Frac-Versuche, Auffüllversuche, Slugtests,

Injektionsversuche, Stimulationsversuche, gedrosselte Auslaufversuche und um Fördertests. Die Versuche wurden bei unterschiedlicher Druckbeaufschlagung durchgeführt. In Tabelle 1 sind diese Angaben sowie jeweils die Tiefenbereiche, in denen die verschiedenen Tests durchgeführt wurden, eingetragen. Die Tabelle ist chronologisch aufgebaut. Viele Ergebnisse entstammen Berichten und Publikationen, die in der Literaturliste (Abschnitt 8) aufgeführt sind. Nachstehend werden die erstmals neu ausgewerteten Versuche kurz beschrieben.

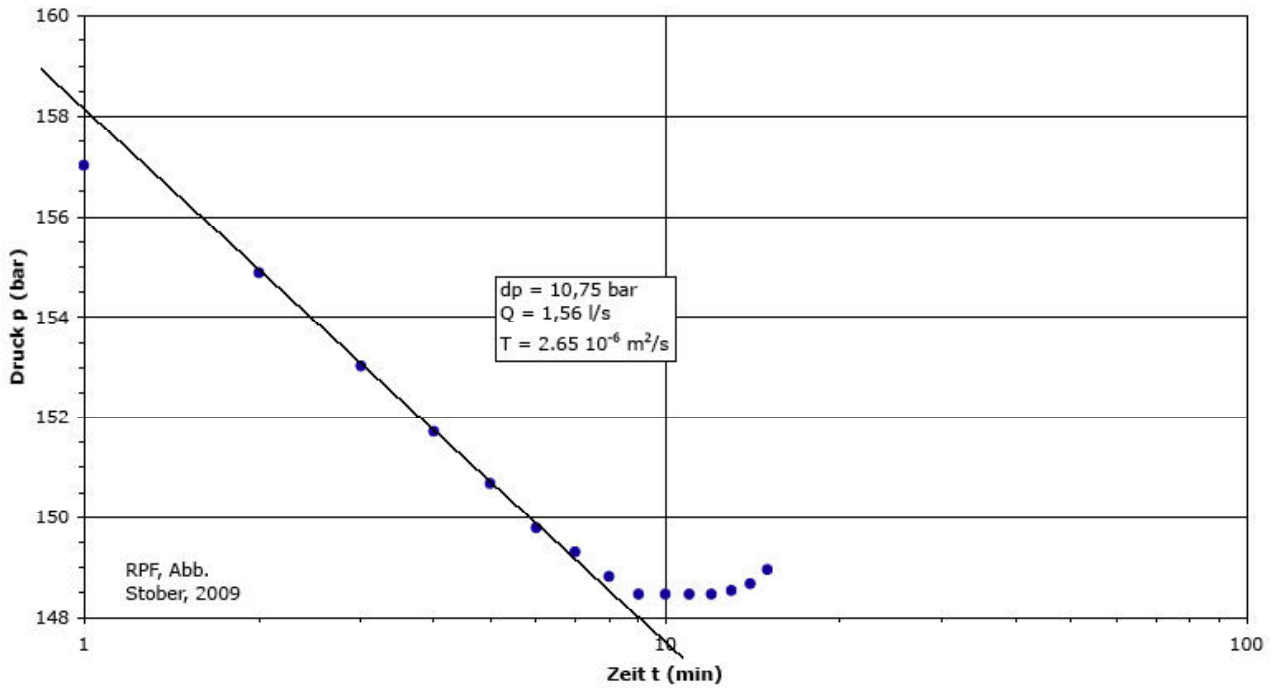
## **2.1 Drill-Stem-Test zwischen 1759,58 m und 1779,90 m Tiefe am 23.01.1978**

Während des Abteufens der Bohrung Urach 3 traten ab 1764 m Tiefe zum Teil erhebliche Spülungsverluste auf. Besonders hohe Spülungsverluste erfolgten im Teufenabschnitt 1764,6 – 1777,0 m. Als daher die Bohrung die Tiefe 1810,0 m erreichte, wurde in das damalige Open-Hole (1080 m - 1810 m Tiefe) ein Doppelpacker eingebracht, mit dem der Gebirgsabschnitt zwischen 1759,58 m und 1779,90 m durch einen Drill-Stem-Test (DST) hydraulisch getestet wurde. Nach Durchführung des DST wurde die Bohrung wegen der z.T. hohen Spülungsverluste auch im unteren Bereich mehrfach zementiert und wieder aufgebohrt, bevor ein 9<sup>5/8</sup>"-Liner eingebracht und die Bohrung weiter vertieft werden konnte.

Der DST wurde am 23.01.1978 durchgeführt und bestand aus zwei Fließ- und zwei Schließzeiten. Die beiden Fließzeiten dauerten 15 min und 33 min; die Schließzeiten 30 min und 33 min. Der Gesamtzufluss betrug 8950 l. Für die Auswertung der einzelnen hydraulischen Testphasen wurde der Gesamtzufluss anteilmäßig zur Dauer der Fließzeiten aufgesplittet. Die 2. Fließzeit war nicht auswertbar.

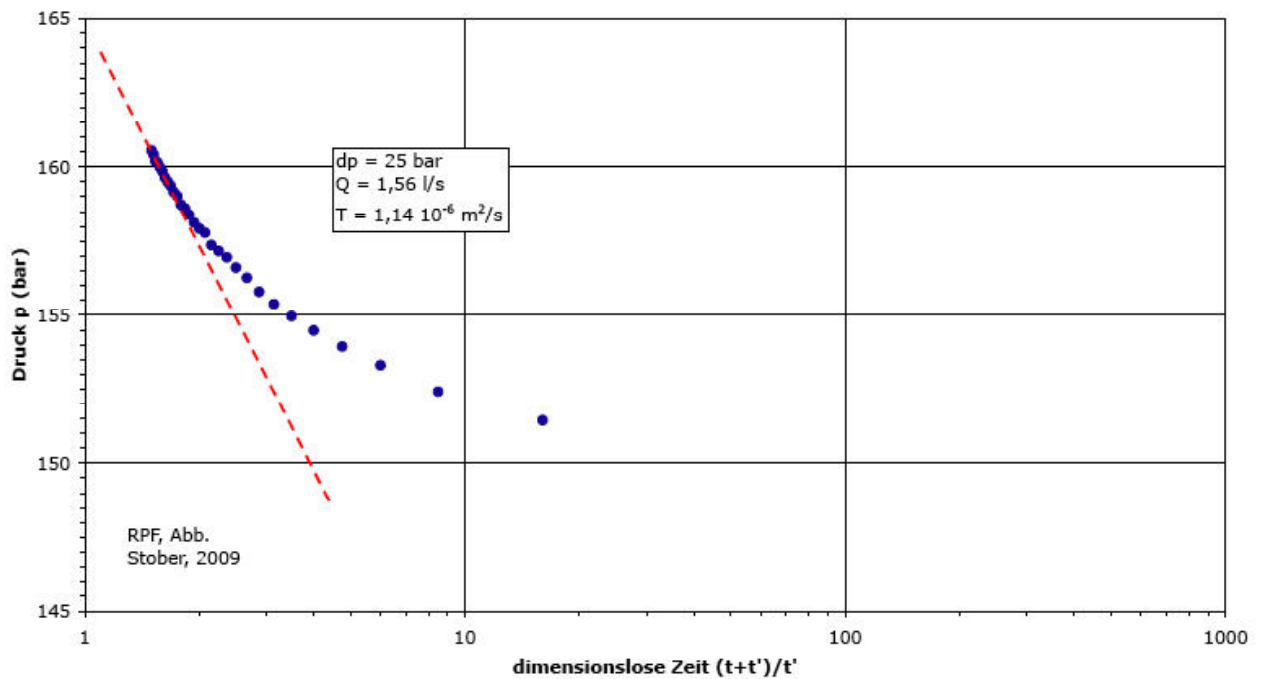
Aus der 1. Fließzeit konnte eine relativ hohe Transmissivität von  $T = 2,65 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  für den 20,32 m mächtigen Testbereich abgeleitet werden (Abb. 1). Die Abbildungen 2 und 3 zeigen die Auswertungen der beiden Schließzeiten, aus denen ebenfalls hohe Transmissivitäten von  $T = 1,14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  und  $T = 7,47 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  für den Testbereich ermittelt wurden. Für den Testbereich kann somit eine mittlere Transmissivität von  $T = 3,75 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  veranschlagt werden, bzw. für den Gebirgsabschnitt 1759,58 - 1779,90 m Tiefe eine daraus abgeleitete mittlere Durchlässigkeit von  $T/H = 1,85 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ .

**Drill-Stem-Test (1. Fliesen) in 1759,58-1779,9 m Tiefe**

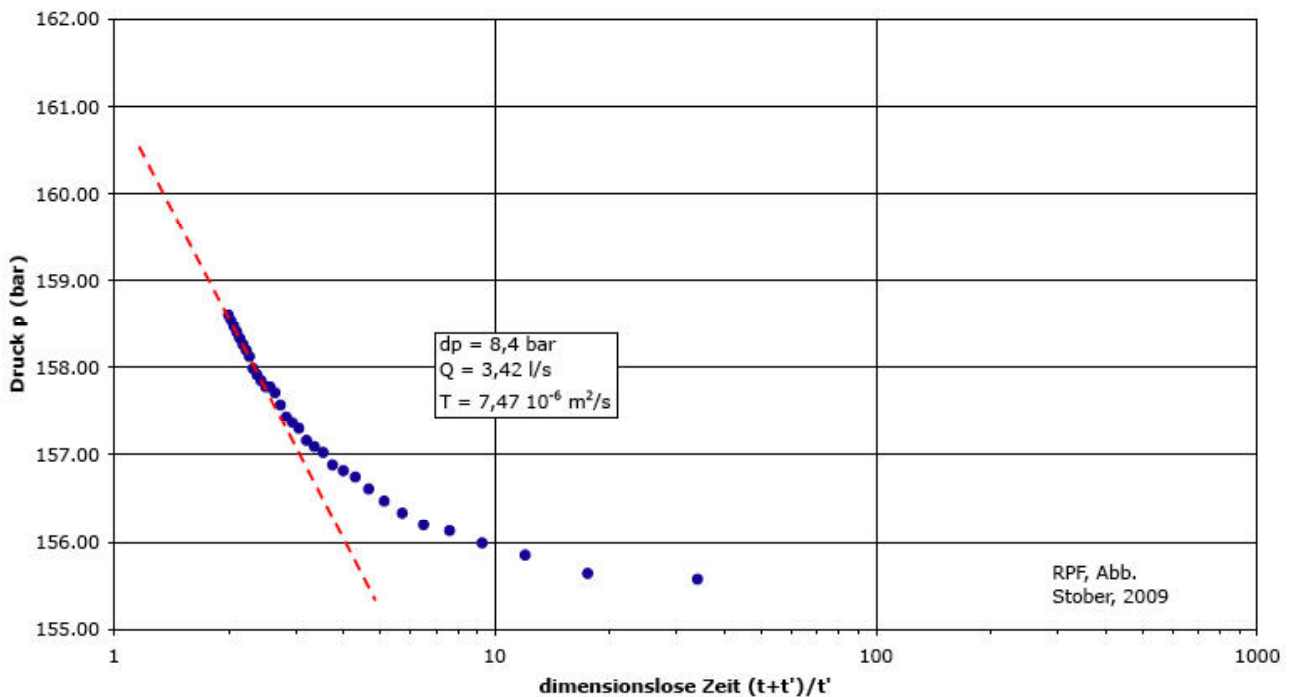


**Abb. 1: Auswertung der 1. Fließzeit des Drill-Stem-Tests vom 23.01.1978**

**Drill-Stem-Test in 1759,58-1779,9 m Tiefe (1. Schließen)**

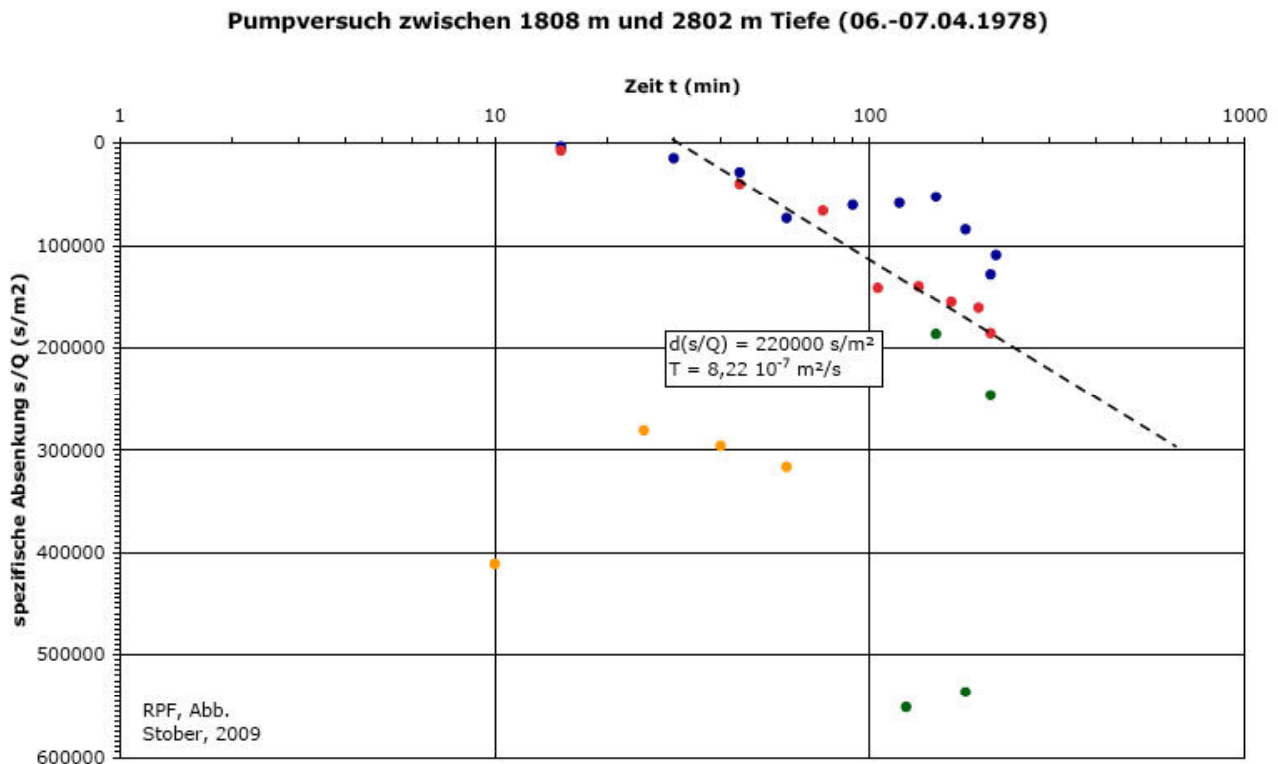


**Abb. 2: Auswertung der 1. Schließzeit des Drill-Stem-Tests vom 23.01.1978**

**Drill-Stem-Test, 2. Schließen, 1759,58-1779,9 m Tiefe****Abb. 3: Auswertung der 2. Schließzeit des Drill-Stem-Tests vom 23.01.1978****2.2 Pumpversuch aus 1808,5 m bis 2802,0 m Tiefe in der Zeit 06.-07.04.1978**

Das Bohrloch war in dieser Zeit 2802,0 m tief. Bis 1080,0 m war es mit einer hinterzementierten 13<sup>3/8</sup>"-Rohrtour ausgestattet. Der 9<sup>5/8</sup>"-Liner reichte bis 1808,5 m Tiefe. Das 8<sup>1/2</sup>"-Open-Hole war somit etwa 1000 m lang. Die Centriflumpumpe war noch oberhalb des 9<sup>5/8</sup>"-Linerkopfes abgehängt, mit Zufluss bei 951 m Teufe. Der Fluiddruck wurde in 963 m Tiefe gemessen.

Während des gesamten Pumpversuches, der in der Zeit vom 06.04. um 10:00 Uhr und 07.04.1978 um 13:00 durchgeführt wurde, kam es zu häufigen Pumpenausfällen. Außerdem wurde mit sehr heterogener Pumpenrate gefördert. Der Wiederanstieg wurde nicht beobachtet. Eine Temperaturkorrektur der Wassersäule (Dichteffekt) konnte mangels Daten nicht durchgeführt werden. Abbildung 4 zeigt einen p/Q-Plot. Durch die plausibelsten Messwerte wurde eine Ausgleichsgerade gelegt, aus deren Steigung die Transmissivität der Zone zwischen 1808,5 m und 2802,0 m zu  $T = 8,22 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s abgeschätzt wurde.

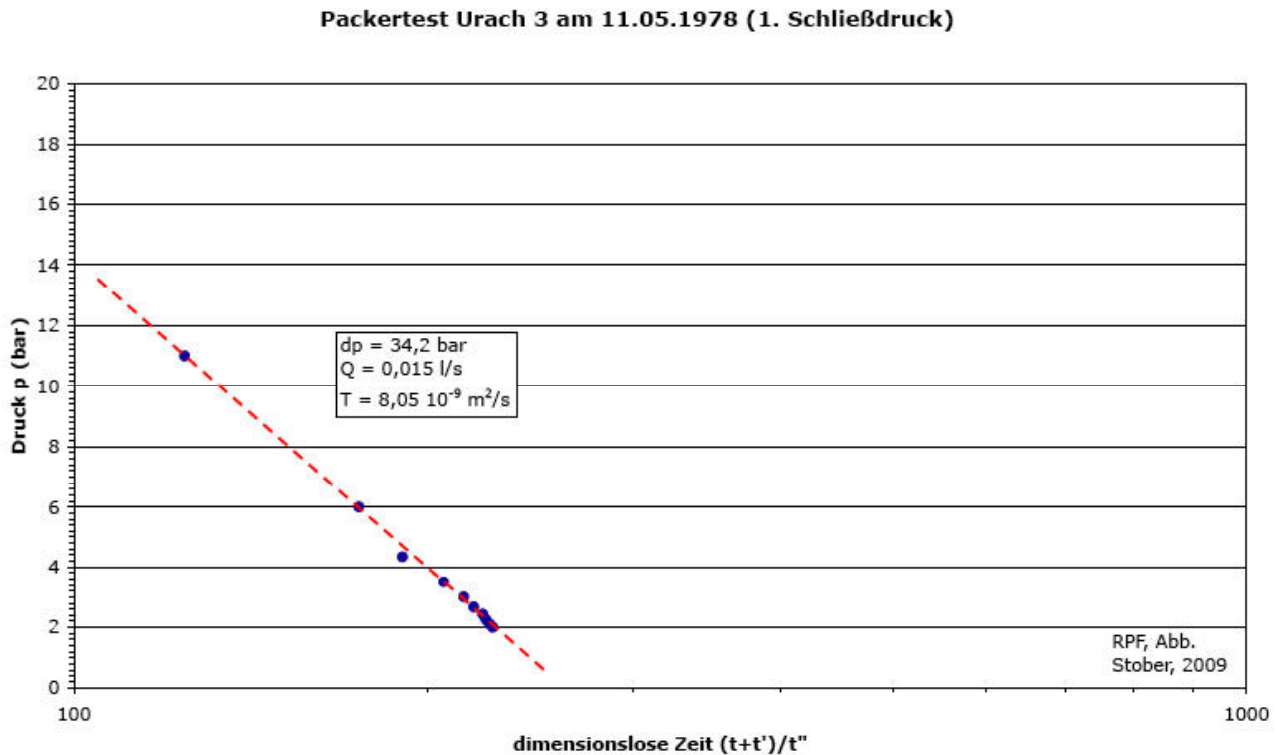


**Abb. 4: Auswertung des Pumpversuches vom 06.-07.04.1978 in Teufe 1808-2802 m**

### 2.3 Drill-Stem-Test zwischen 3294,91 m und 3301,5 m Tiefe am 11.05.1978

Als die Bohrung Urach 3 am 11.05.1978 die Tiefe von 3301,5 m erreichte, wurde ein Einfachpacker auf 3294,91 m abgesetzt und ein Drill-Stem-Test durchgeführt. Während der 1. Fliesszeit flossen nach Berechnungen der Preußag aus dem Kristallin innerhalb von 30 Minuten 93,27 l zu. Die anschließende Schießzeit mit Druckaufbau konnte geohydraulisch ausgewertet werden (Abb. 5) und eine Transmissivität von  $T = 8,05 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  für den 6,5 m langen Testbereich zwischen 3294,91 m und 3301,5 m Tiefe ermittelt werden. Dieser Wert ist sehr niedrig und entspricht einer mittleren Durchlässigkeit von  $T/H = 1,24 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ .





**Abb. 5: Auswertung der ersten Schließzeit des Drill-Stem-Tests vom 11.05.1978**

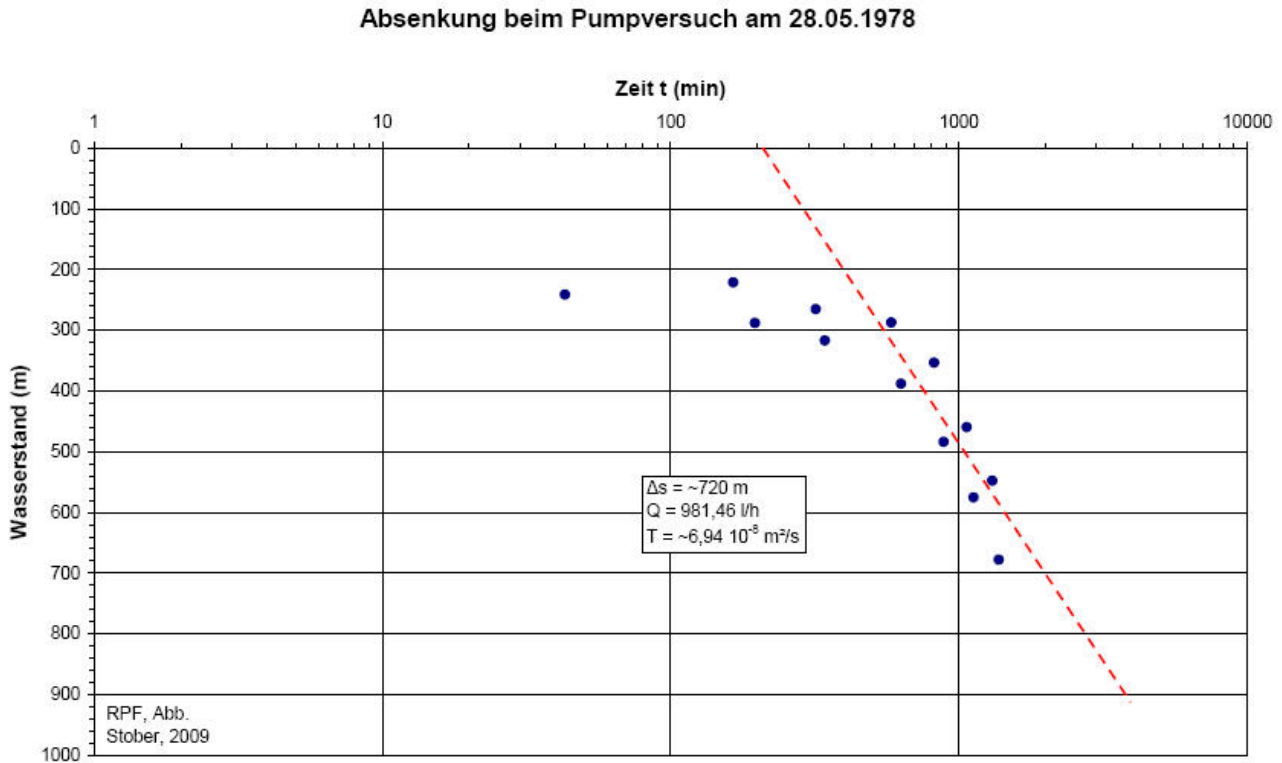
## 2.4 Zuflusstest im offenen Bohrloch 27.-29.05.1978

Am 27., 28. und 29.05.1978 wurden drei Zuflusstests in der Bohrung Urach 3 durchgeführt, von denen jedoch nur der zweite Test auswertbar war. Die Bohrung war zu diesem Zeitpunkt 3334 m tief. Der Ausbau entsprach jedoch demjenigen, wie er bereits beim Pumpversuch vom 06.-07.04.1978 vorlag, d.h. der 9<sup>5/8</sup>“-Liner reichte bis 1808,5 m Teufe, wobei der Linerkopf bei 980,47 m lag. Die Tauchkreiselpumpe und der Maihakgeber mit Hügelgerät waren bis 803,90 m Tiefe eingebaut. Der Pumpeneinlass war bei 786,08 m.

Beim ersten Test vom 27.05 um 17:39 Uhr bis zum 28.05.78 um 6:00 Uhr erfolgte innerhalb von 12,5 Stunden ein Gesamtzufluss in die Bohrung von 8643 l.

Der zweite Test begann am 28.05.1978 um 6:00 Uhr und dauerte bis zum 29.05.1978 um 4:55 Uhr. Der Gesamtzufluss betrug 23.555 l. Abbildung 6 zeigt die Absenkung während der Förderung. Der Temperatureinfluss auf die Absenkung (Dichteeffekt) konnte mangels Messdaten nicht korrigiert werden. Aus dem Test wurde eine Transmissivität für die Teststrecke zwischen 1808,5 m und 3334,0 m von  $T = 6,94 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  abgeschätzt.

Der dritte Test erfolgte in der Zeit vom 29.05.1978 um 4:55 Uhr und dem 30.05.1978 um 6:00 Uhr. In dieser Testphase wurde zusätzlich der Druckaufbau mehrfach beobachtet. Jedoch liegen zu wenig Messdaten für eine Auswertung vor.



**Abb. 6: Auswertung des zweiten Zuflusstests vom 28.-29.05.1978 in Teufe: 1808,5-3334,0 m**

Die aus dem Zuflusstest abgeschätzte Transmissivität ist insbesondere auch im Vergleich zu den Ergebnissen des Pumpversuches vom 06.-07.04.1978 relativ niedrig. Beide Tests wurden sehr kurz, mit stark schwankender Rate und ohne Aufzeichnung des Druckes durchgeführt, so dass die Ergebnisse beider Versuche nur als grobe Näherungswerte betrachtet werden können.

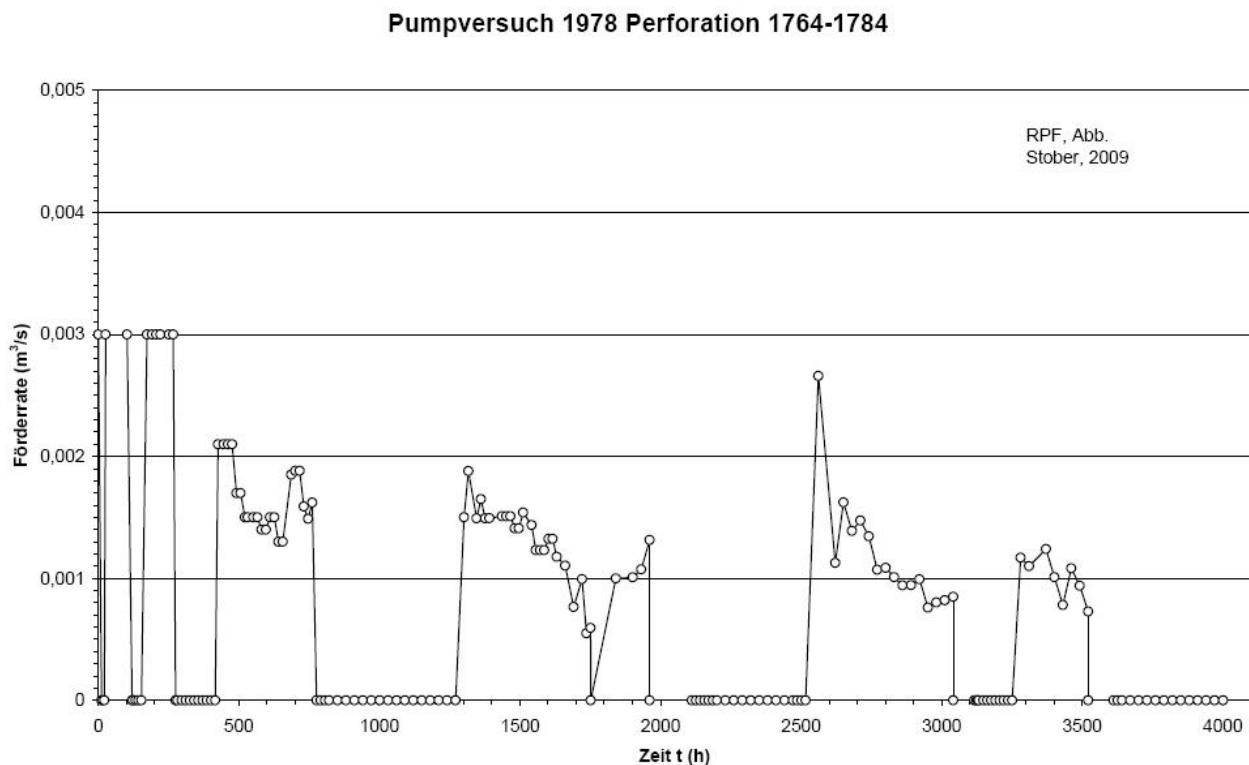
## 2.5 Pumpversuch (25.-28.06.1978) aus der Perforation bei 1784 - 1764 m Tiefe

Im Juni des Jahres 1978 wurde in der damals 3334 m tiefen Bohrung Urach 3 eine Zementbrücke bei 1838,4 - 1750,0 m gesetzt. Im Anschluss wurde der Zementkopf bei 1796,5 m Tiefe festgestellt. Danach wurden die 9<sup>5/8</sup>“-Futterrohre auf 9 m Länge zwischen 1784 - 1775 m und auf 4 m Länge zwischen 1768 - 1764 m perforiert. Eine Nachperforation erfolgte zwischen 1781,2 m und 1776,0 m.

In der Zeit vom 25. – 28.06.1978 wurde im Bereich der Perforationsstrecke zwischen 1784 m und 1764 m Tiefe aus dem Kristallin ein Pumpversuch gefahren. Dieser Bereich entspricht in etwa der Zone, die bereits im Januar 1978 während des Abteufens der Bohrung durch einen Drill-Stem-Test geohydraulisch getestet wurde (Abschnitt 2.1). Die Zone wurde damals zementiert bevor weitergebohrt wurde.

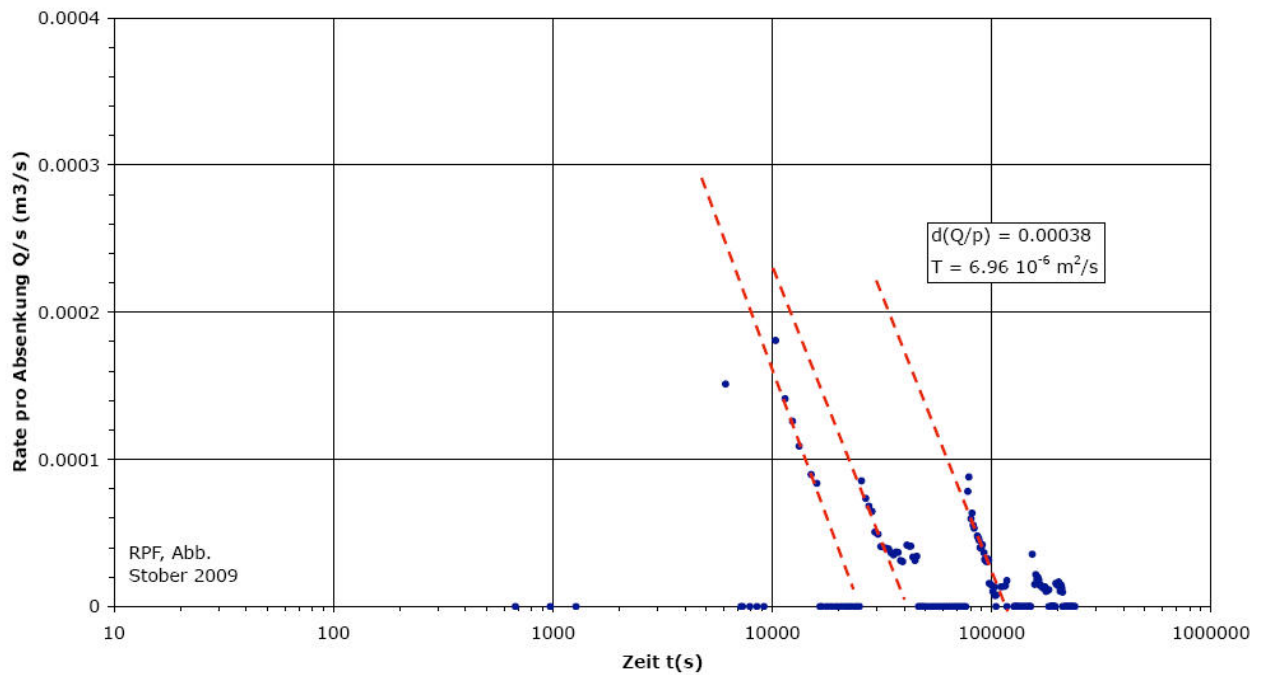
Der Pumpversuch, der im Juni 1978 aus dem Perforationsbereich durchgeführt wurde, bestand aus verschiedenen Pumpphasen mit verschiedenen Entnahmeraten. Die Förderraten lagen zwischen 0,5 und 3,0 l/s (Abb. 7).

Die Auswertung der relativ kurzen Wiederanstiegsphase erbrachte eine Transmissivität von ca.  $T = 2,16 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  (Schädel & Stober 1983). Die summarische Auswertung der einzelnen Pumpphasen, aufgetragen in einem Q/p-Plot gegen den Logarithmus der Zeit (Abb. 8) zeigt mit  $T = 6,96 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  einen etwas höheren Wert, der die tatsächlichen Verhältnisse besser wiedergibt. Dieser Wert passt zu den Ergebnissen, die bereits im Januar 1978 beim Drill-Stem-Test im noch unverrohrten Bohrloch ermittelt wurden (Abschnitt 2.1).

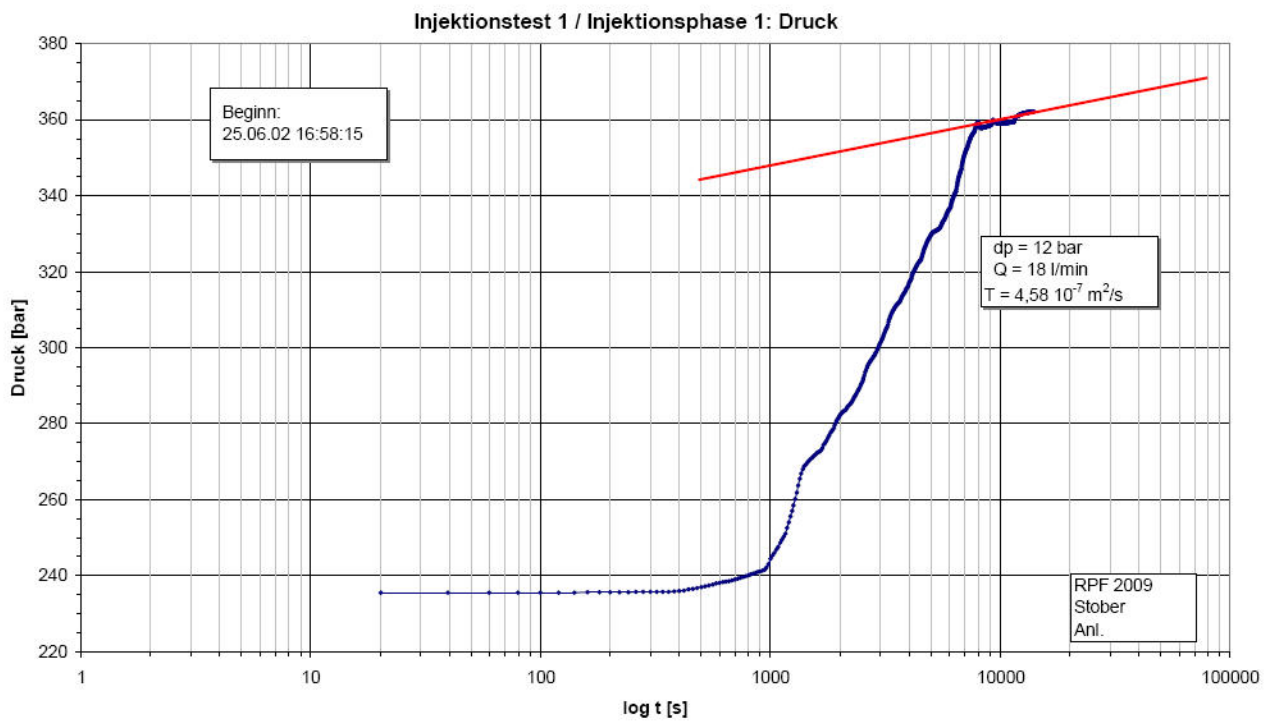


**Abb. 7: Pumpversuch in der Bohrung Urach 3 im Jahre 1978**

**Pumpversuch 25.-28.06.1978 Kristallin Perforation (1764-1784)**



**Abb. 8: Auswertung des Pumpversuches in einem Q/p-Diagramm**



**Abb. 9: Auswertung des Injektionsversuches**

## 2.6 Injektionstest Urach 3 am 25.06.02

Am 25.06.2002 wurde in der Bohrung Urach 3 ein Injektionstest mit einer Rate von 0,28 l/s durchgeführt. Die Injektionsdauer betrug etwa 10,2 Stunden. Der Kopfdruck stieg durch die Injektion am Ende des Versuches auf 245 bar an. Abbildung 9 zeigt den semilogarithmisch aufgetragenen Druckanstieg. Die Transmissivität des kristallinen Grundgebirges wurde zu  $T = 4,58 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  bestimmt.

## 2.7 Injektion und Stimulation, Versuche im Zeitraum 21. – 30.08.2002

Der Versuch begann am 21.08.2002 um 16:02 Uhr in der Bohrung Urach 3. Die Injektion betraf wie in allen folgenden Versuchen das Open Hole (3320 - 4444 m u.Gel.) sowie die drei Perforationsstrecken im unteren Bereich der Bohrung. Zunächst wurde mit einer Rate von etwa  $Q = 15 \text{ l/s}$  injiziert. Der Kopfdruck stieg daraufhin auf bis zu 300 bar an (Abb. 10). Trotz anschließender Steigerung der Injektionsrate auf  $Q = 28 \text{ l/s}$  fiel der Kopfdruck auf 270 bar ab. Eine weitere Steigerung der Injektionsrate auf  $Q = 41 \text{ l/s}$  resultierte in einem Kopfdruck von 310 bar (Abb. 10). Die gesamte Stimulation dauerte 32 Minuten. Nach Abschalten der Pumpe wurde der Druckabbau beobachtet, wobei gegen Ende das Bohrloch geöffnet, später wieder verschlossen wurde (Abb. 11).

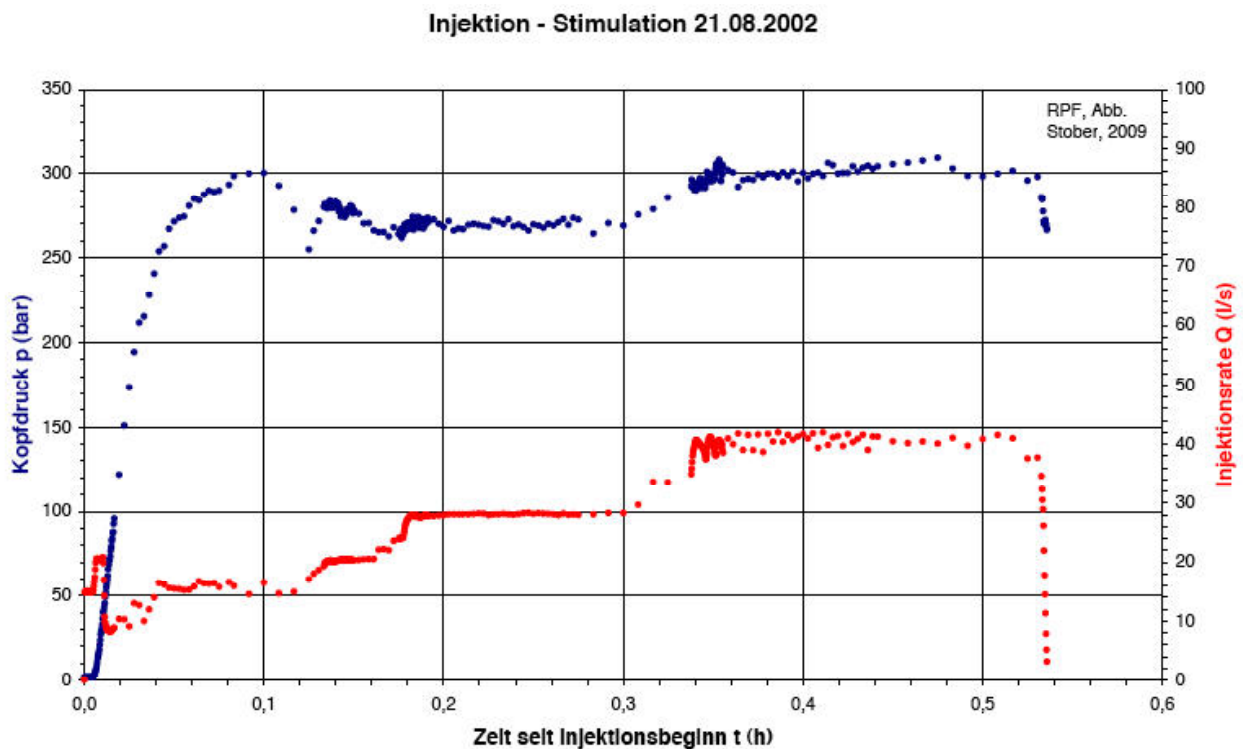
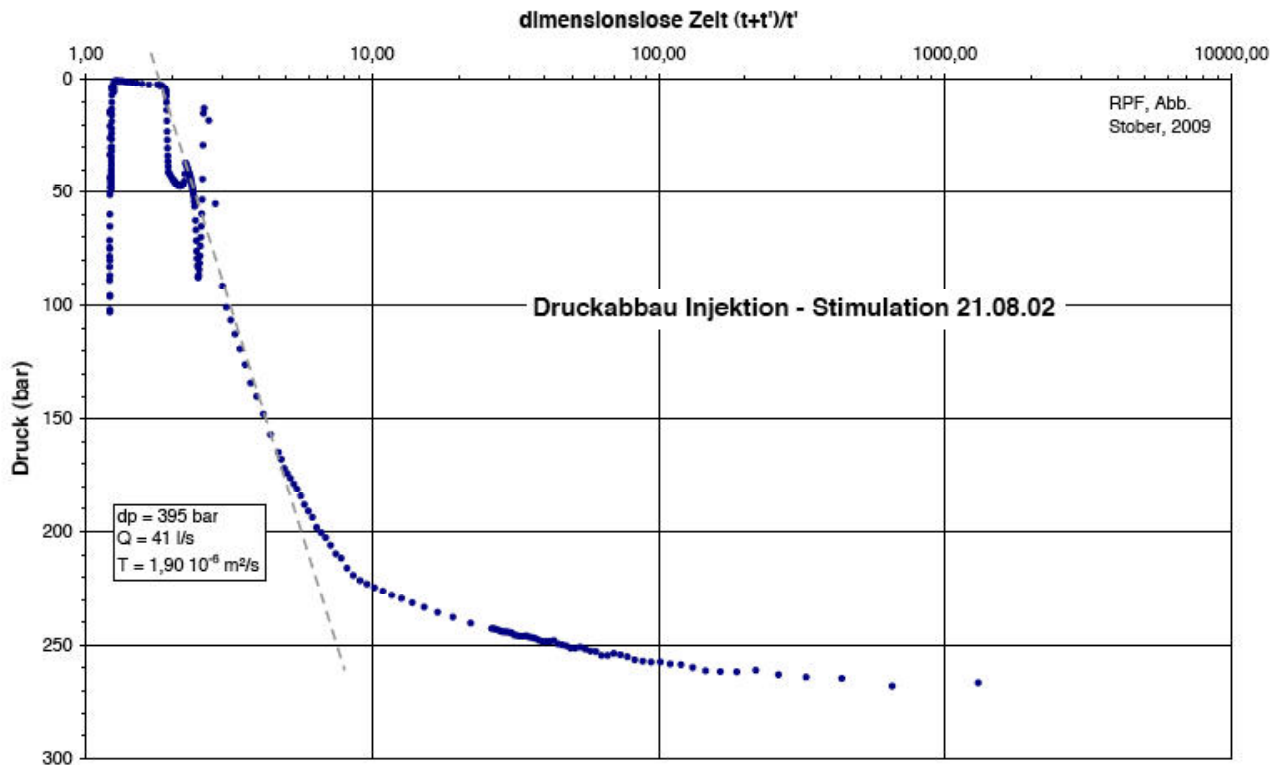


Abb. 10: Ablauf des Injektionsversuches am 21.08.2002



**Abb. 11: Druckaufbau nach Injektion am 21.08.2002**

Abbildung 12 zeigt den Stimulationsversuch, wobei Kopfdruck und Injektionsrate gegen den Logarithmus der Zeit aufgetragen wurden. Deutlich ist bereits nach ca. 2 Minuten der Beginn der elastischen Reaktion des Gebirges am reduzierten Druckaufbau erkennbar. Abbildung 10 veranschaulicht, dass trotz Steigerung der Injektionsrate von 15 l/s auf 41 l/s nur eine minimale Änderung im Kopfdruck resultierte. Aus dem ersten Teil des Versuches, vor der Weitung des vorhandenen Kluftsystems, konnte eine Transmissivität für das kristalline Grundgebirge von  $T = 6,87 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  bestimmt werden (Abb. 12). Aus dem Druckabbau, nach erfolgter Stimulation ergibt sich eine Transmissivität von  $T = 1,90 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  (Abb. 11). Die Durchlässigkeit des kristallinen Grundgebirges hat sich demnach durch die Stimulation mehr als verdoppelt.

Unmittelbar im Anschluss an den Druckabbau, der durch Ausbluten der Bohrung beschleunigt wurde, erfolgte am gleichen Tag um 18:16 Uhr eine weitere Stimulation. Über eine Zeitdauer von knapp einer Stunde wurde mit  $Q = 40 \text{ l/s}$  injiziert. Der resultierende Kopfdruck lag bei 325 bar (Abb. 13). Relativ rasch stellten sich quasi-stationnäre

Verhältnisse als Resultat der Weitung des vorhandenen Kluftsystems und damit einer zunehmenden Vergrößerung der Durchlässigkeit ein.

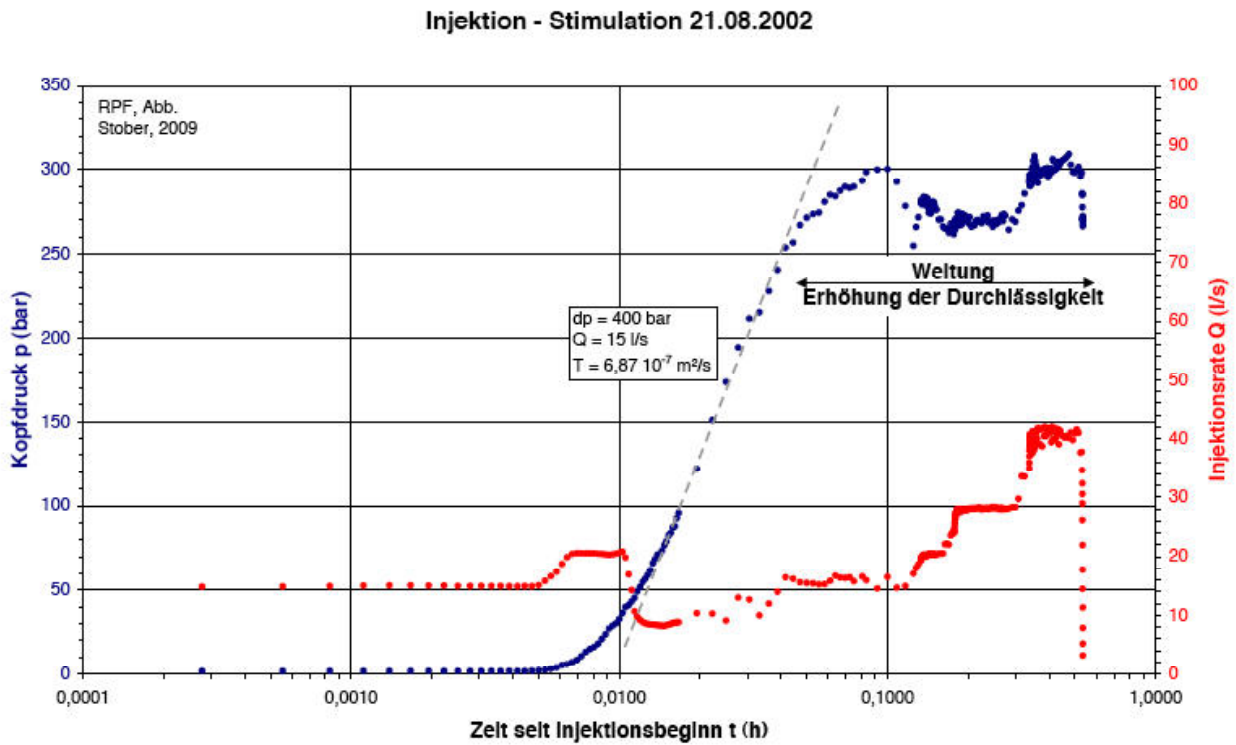


Abb. 12: Auswertung des Druckaufbaus, Injektionsversuch 21.08.2002

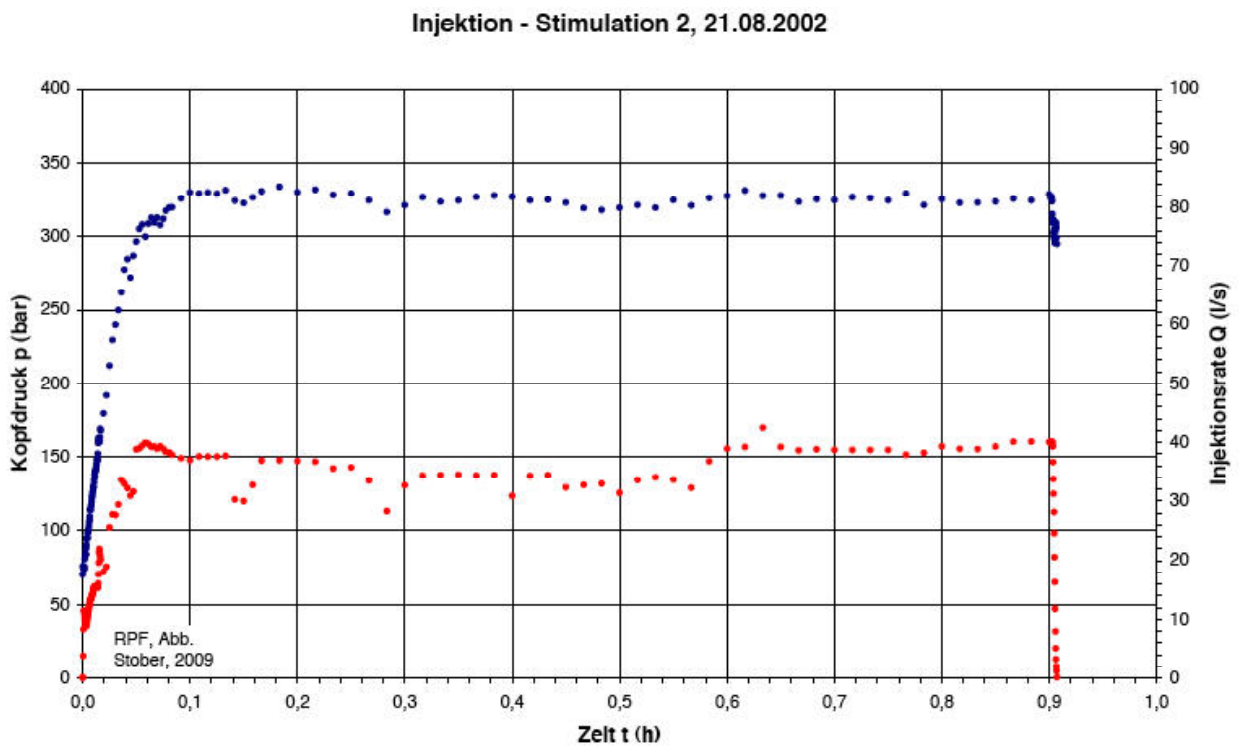
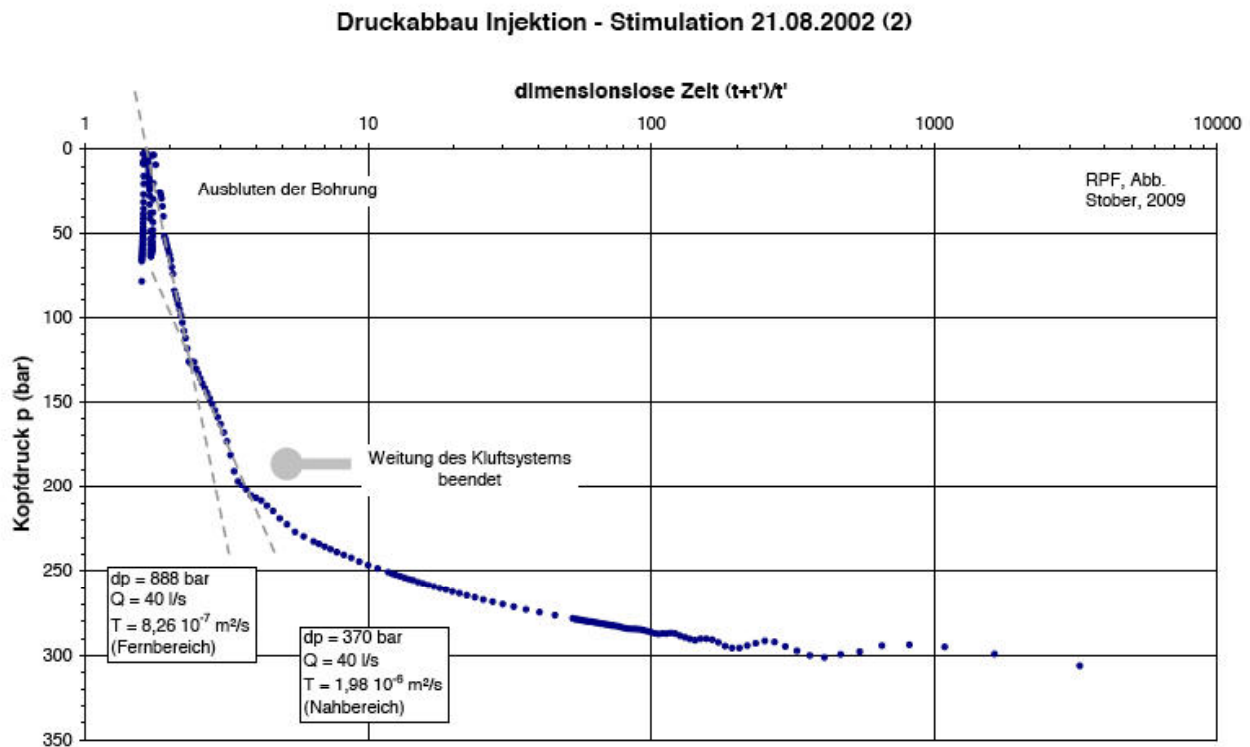


Abb. 13: Zweite Injektion – Stimulation am 21.08.2002



**Abb. 14: Druckabbau im Anschluss an die zweite Injektion – Stimulation am 21.08.2002**

Abbildung 14 zeigt den semilogarithmisch gegen die dimensionslose Zeit ( $(t+t')/t'$ ) aufgetragenen Druckabbau. Im Druckintervall von 190 bar auf 170 ist die elastische Verformung des Gebirges beendet. Der darunter liegende Druckbereich gestattet daher die Ermittlung der Transmissivität, die für den Nahbereich der Bohrung, d.h. den durch die Stimulation beeinflussten Bereich, zu  $T = 1,98 \cdot 10^{-6}$  und für den weiter entfernt liegenden Bereich zu  $T = 8,26 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s bestimmt wurde (Abb. 14). Im Anschluss an diesen Versuch ließ man die Bohrung wieder ausbluten.

Nach diesen beiden Kurzstimulationen erfolgte in der Bohrung Urach 3 eine massive hydraulische Stimulation, die 170 Stunden (21.-29.08.2002) dauerte (Abb. 15). Die Injektionsrate lag am Anfang kurzzeitig bei  $Q = 50$  l/s. Sodann wurde über einen Zeitraum von etwa 115 Stunden ca.  $Q = 10$  l/s injiziert, im Anschluss daran mit etwa  $Q = 6$  l/s und zum Schluss mit  $Q = 4$  l/s (Abb. 15). Während des gesamten Versuches war der Druck nahezu konstant. Er betrug zu Beginn der Injektion etwa 330 bar und stieg geringfügig auf ca. 340 bar am Ende der Stimulation an.



## Injektion - Stimulation 21.08.- 29.08.2002

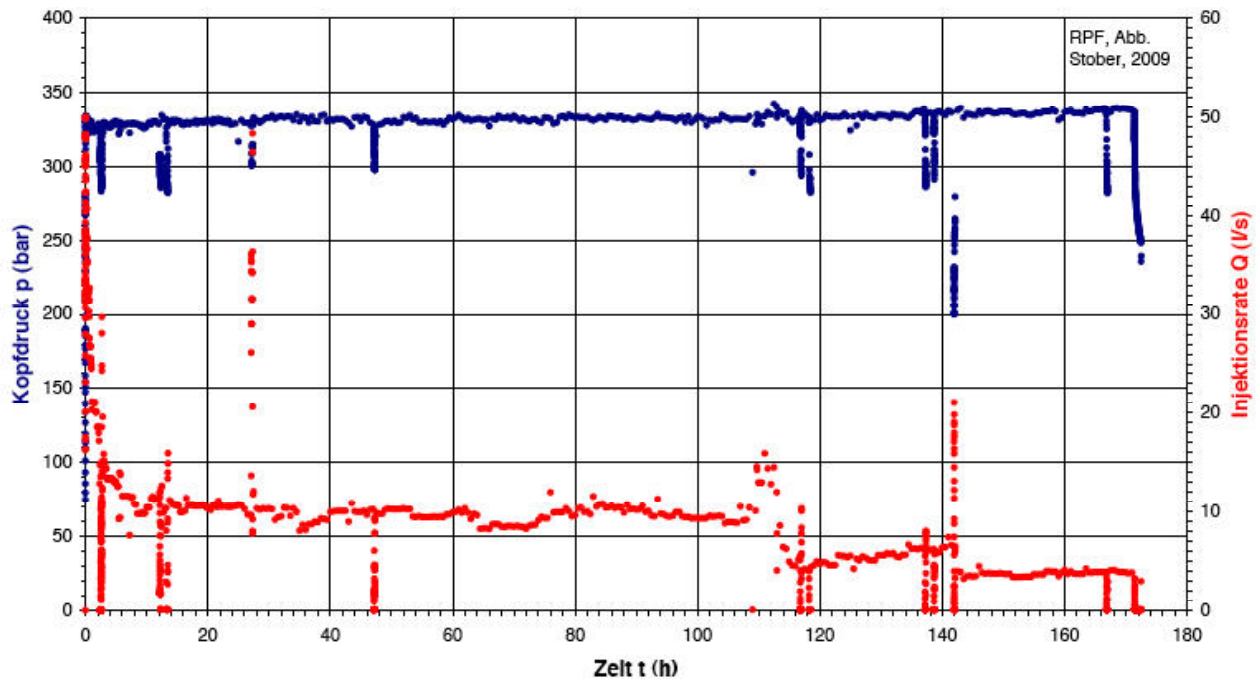


Abb. 15: Massive hydraulische Stimulation (21.-29.08.2002)

Unmittelbar im Anschluss an die massive hydraulische Stimulation erfolgte am 29.08.2002 ab 1:46 Uhr ein 3,5 stündiger Fördertest (gedrosselter Auslaufftest) aus der Bohrung Urach 3. Zu Beginn wurde die Entnahmerate kurzfristig bis auf  $Q = 30$  l/s gesteigert (Abb. 16). Der Kopfdruck fiel in dieser Zeit von 240 bar auf etwa 50 bar ab. Im Verlauf des Tests nahm die Förderrate dann kontinuierlich bis auf etwa 12 l/s ab. Der Kopfdruck betrug am Ende des Fördertests geringfügig über 5 bar. Zu Beginn des Förder- oder Auslaufftests lag der Kopfdruck deutlich oberhalb des so genannten Öffnungsdruckes, d.h. in dieser Zeitspanne war die Durchlässigkeit des Gebirges infolge elastischer Weitung des Kluftsystems deutlich erhöht ( $T = 7,33 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ). Nach Unterschreiten des Öffnungsdruckes betrug die Transmissivität  $T = 2,08 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  (Abb. 17).

Im Anschluss an die Stimulation wurde noch am selben Tag um 5:17 Uhr mit dem Ausbluten der Bohrung am Bohrkopf begonnen. Die erste Phase dauerte etwas länger als 7 Stunden. Die Auslaufrate belief sich zeitweise auf über 90 l/s; im Mittel lag sie jedoch bei 83,5 l/s. Der resultierende Kopfdruck erreichte dabei 147,2 bar. Nach etwa 4 Stunden wurde die Rate auf etwa 10 l/s gedrosselt. Der Kopfdruck reduzierte sich auf wenige Bar. Auf Abbildung 18 ist der Versuchsablauf dargestellt.

Fördertest 29.08.2002

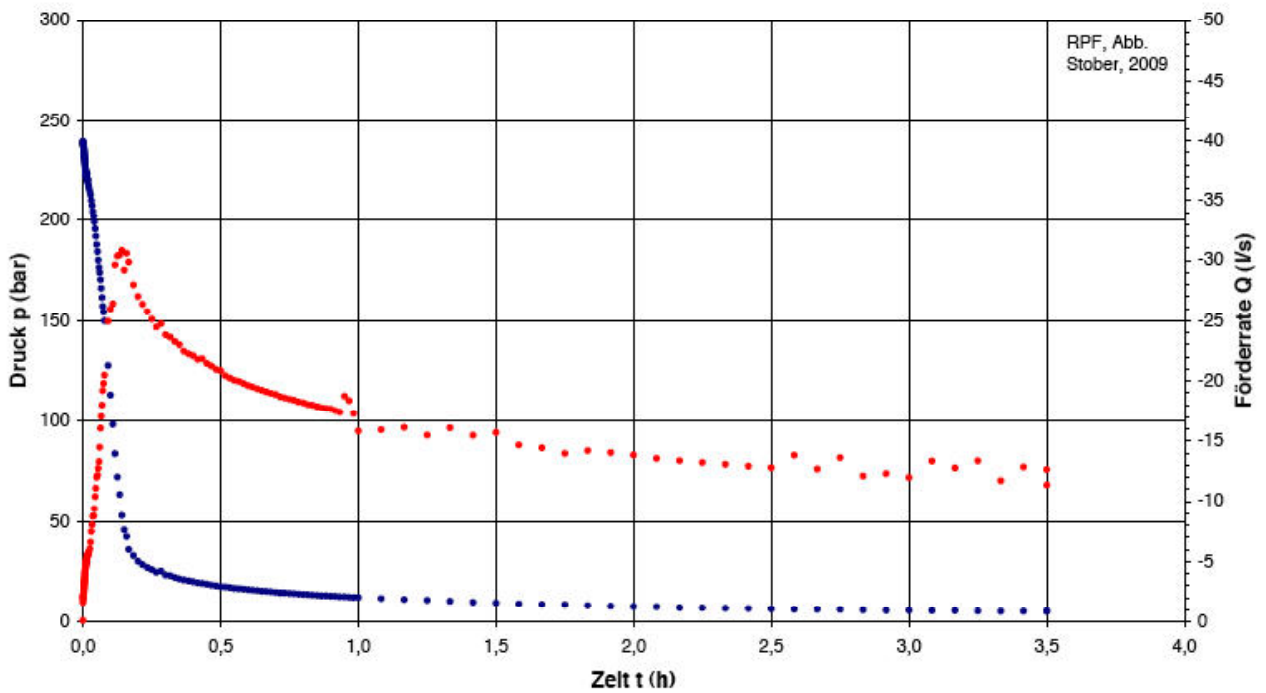


Abb. 16: Fördertest im Anschluss an die massive hydraulische Stimulation am 29.08.2002

Fördertest Urach 3 29.08.2002

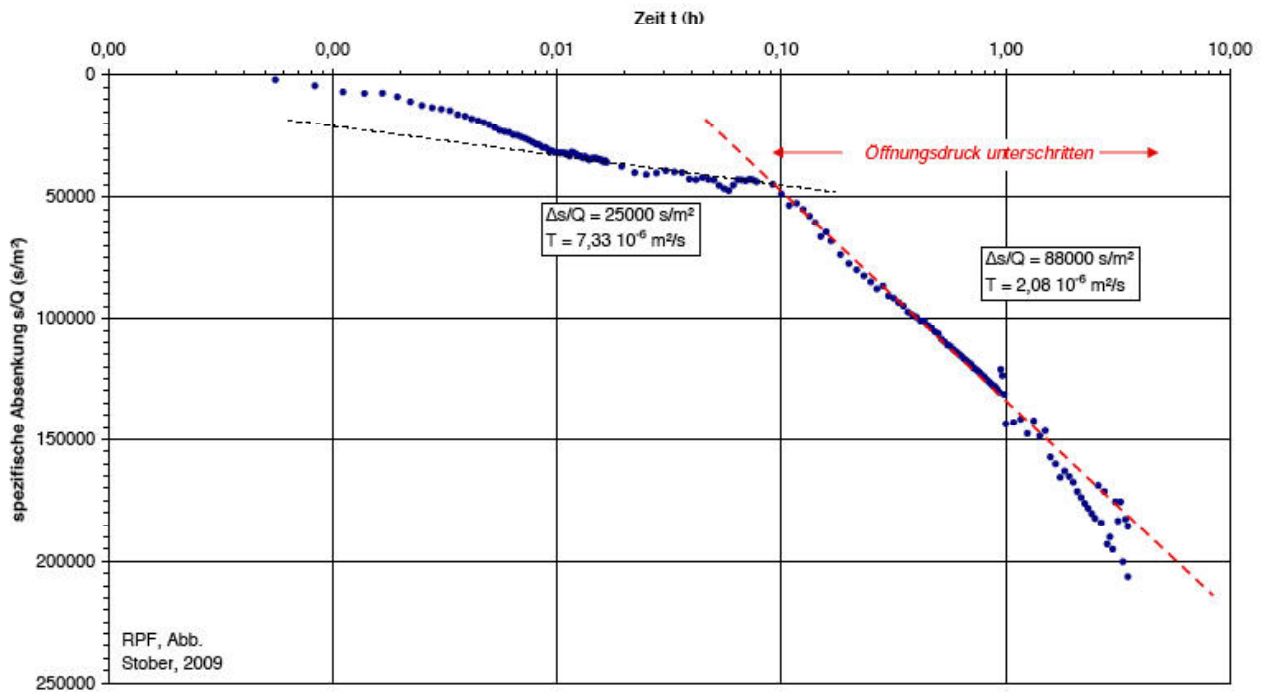
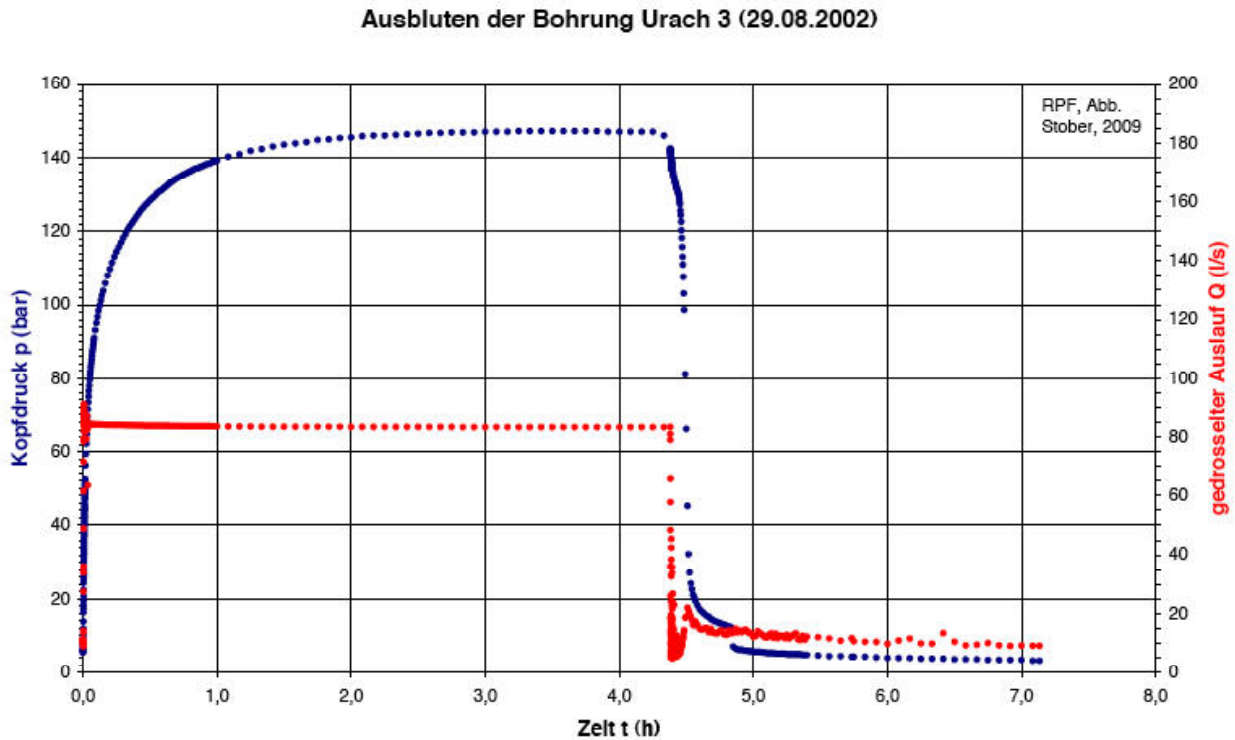


Abb. 17: Auswertung des Fördertests (29.08.2002)



**Abb. 18: Ausbluten der Bohrung am 29.08.2002**

Abbildung 19 zeigt zunächst die zweite Phase des Ausblutens der Bohrung beginnend am 29.08.02 um 12:25 Uhr über die Dauer von ca. 5 Stunden 20 Minuten. Der gedrosselte Auslauf betrug zeitweise bis über 70 l/s. Trotz stark schwankender Rate stieg der Kopfdruck kontinuierlich und gleichmäßig auf 130 bar an. Unmittelbar im Anschluss an das Ausbluten wurde bis zum 30.08.02 um 16:30 Uhr wieder mit einer Injektionsrate von  $Q = 5$  l/s bis  $Q = 4$  l/s injiziert. Daraufhin stieg der Kopfdruck auf etwa 340 bar an (Abb. 19). Dieser zweite Versuchsteil konnte ausgewertet und eine Transmissivität von  $T = 2,09 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s ermittelt werden (Abb. 20).

Im Anschluss daran erfolgte erneut ein gedrosselter Auslauf am Bohrlochkopf (Abb. 21) von bis zu 90 l/s. Im Verlaufe des Ausblutens fiel der Kopfdruck bis auf wenige Bar ab. Der kumulative Rücklauf bis Versuchsende am 30.08.2002 um 22:34 Uhr nach über 6 Stunden betrug 237 m<sup>3</sup>.

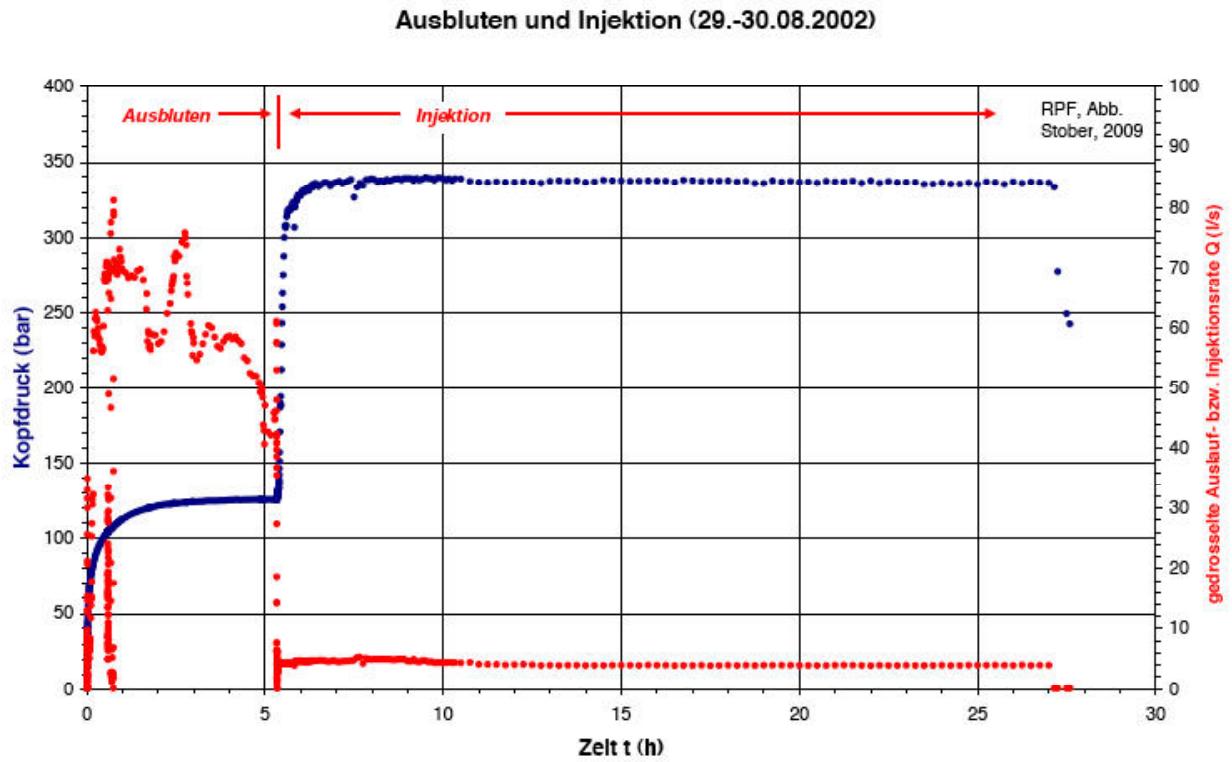


Abb. 19: Ausbluten und Injektion am 29.-30.08.2002

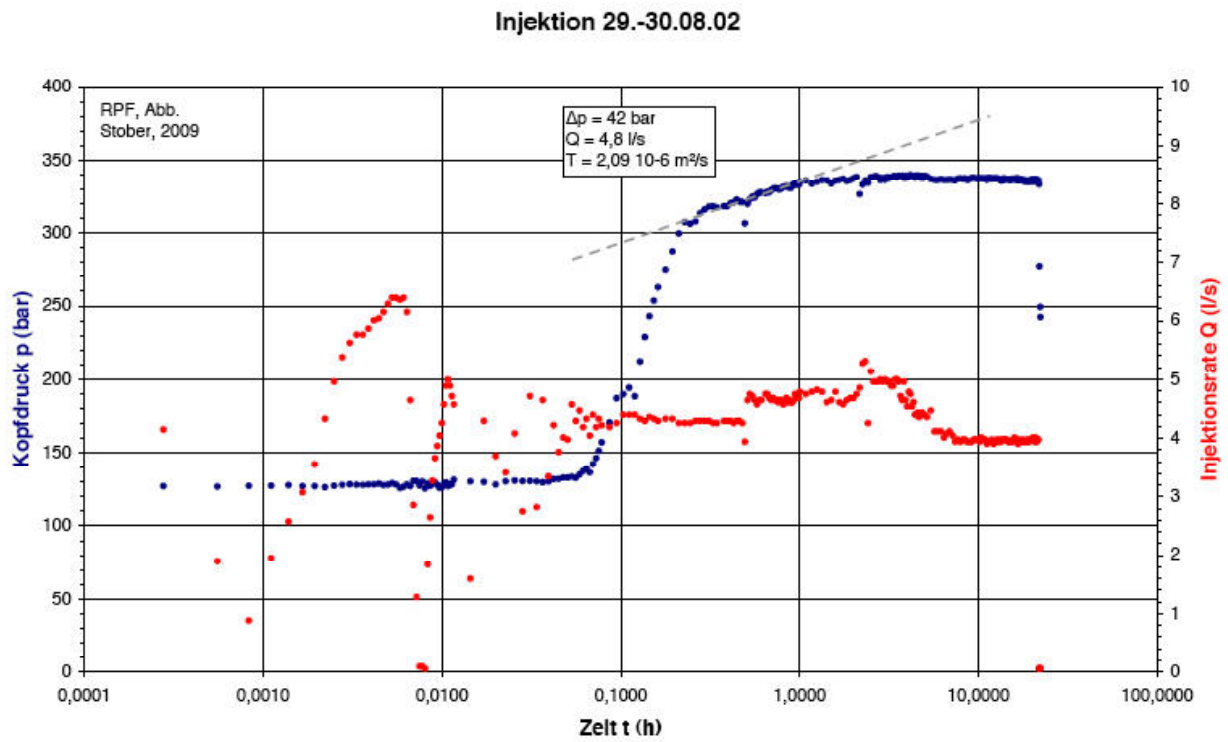
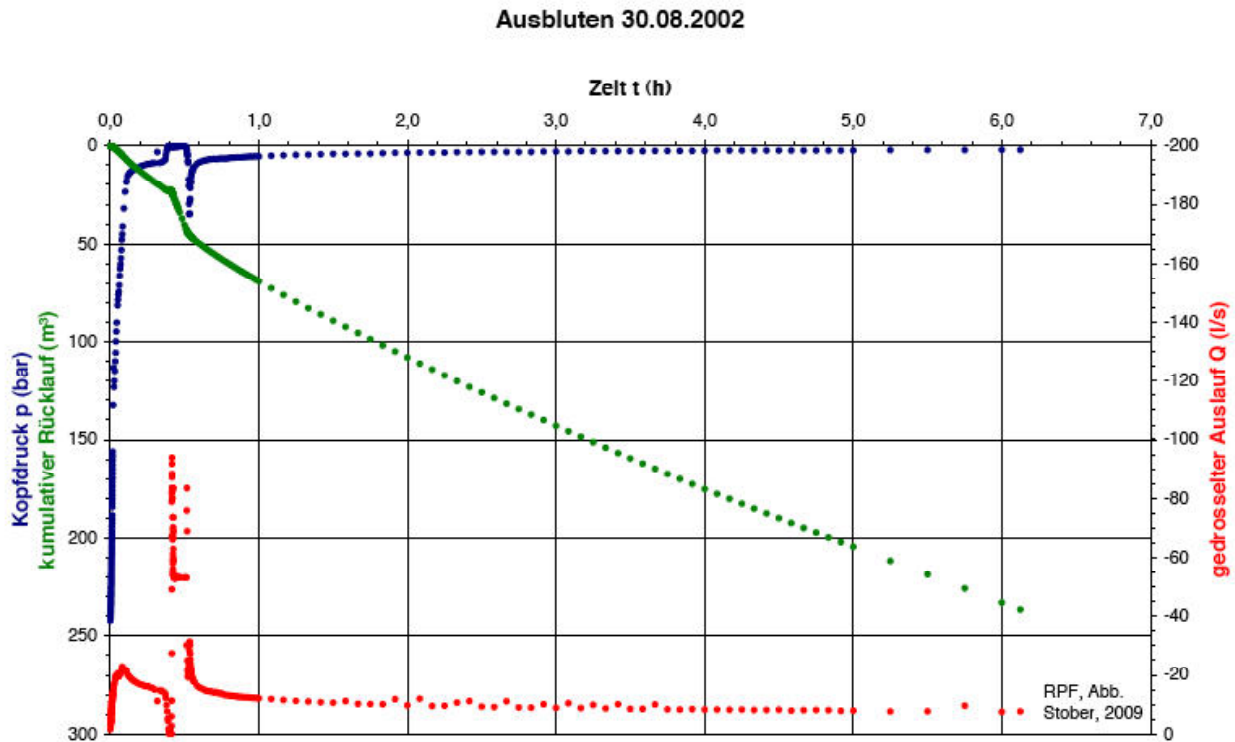


Abb. 20: Auswertung des Injektionsversuches am 29.-30.08.2002



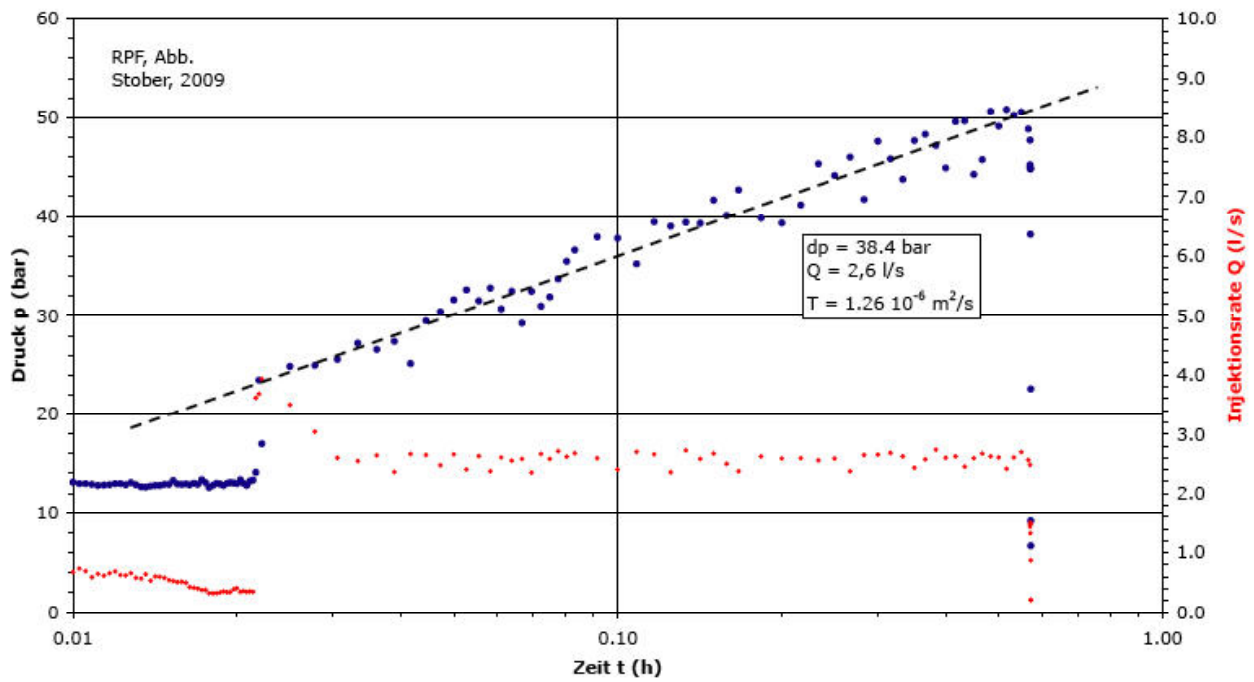
**Abb. 21: Ausbluten der Bohrung 30.08.2002**

## 2.8 Injektionsversuch Urach 3 in der Zeit 12.-20.09.02

Am 12.09.2002 wurde zunächst ein kurzer Injektionsversuch mit einer Injektionsrate von ca.  $Q = 2,6 \text{ l/s}$  für 0,57 Stunden in der Bohrung Urach 3 durchgeführt. Der Kopfdruck stieg infolgedessen bis auf 50,6 bar an. Nach einem kurzen Druckabbau wurde mit einem deutlich längeren Versuch begonnen (2. Test). Abbildung 22 zeigt den Druckaufbau und die Injektionsrate des ersten Tests aufgetragen gegen den Logarithmus der Zeit. Die Auswertung des Druckaufbaus dieses ersten Tests erbrachte eine Transmissivität von  $T = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  (Abb. 22). Die Druckabbauphase war nicht auswertbar.

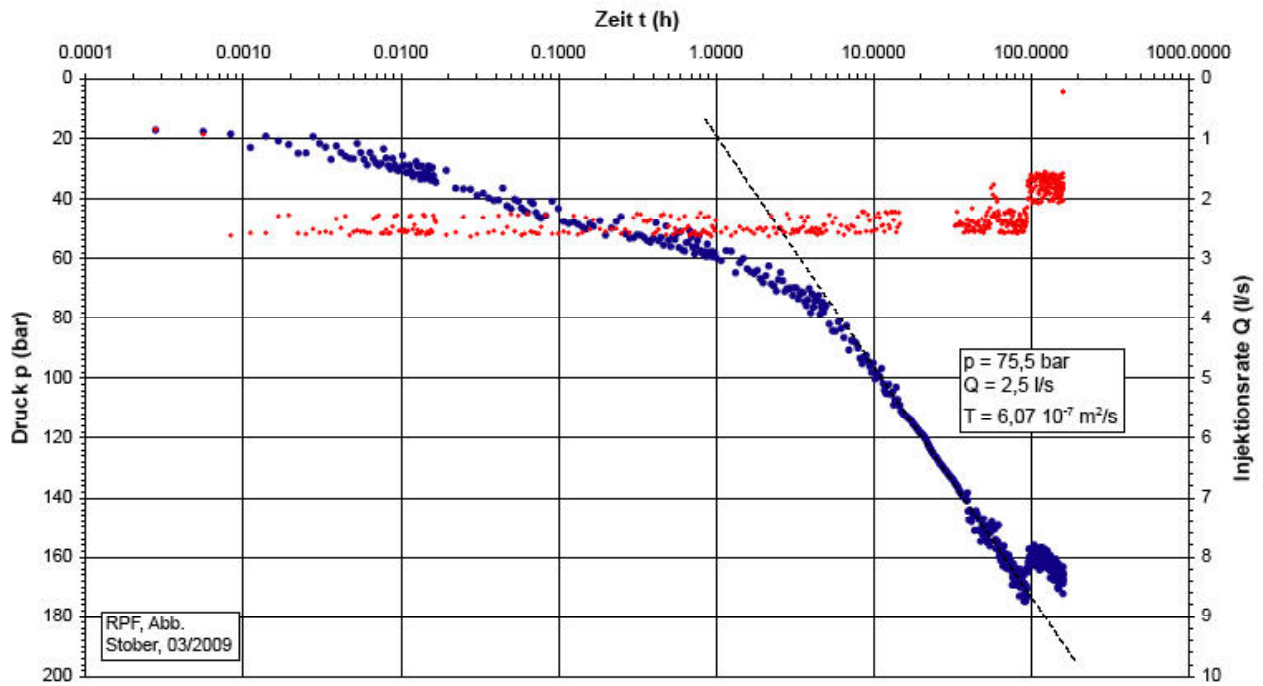
Am gleichen Tag wurde mit einem ca. 160 Stunden dauernden Injektionsversuch (Test 2) begonnen. Die Injektionsrate betrug zunächst  $Q = 2,5 \text{ l/s}$ , später  $Q = 1,8 \text{ l/s}$ . Am Ende der ersten Injektionsstufe wurde ein Kopfdruck von 174,7 bar gemessen, am Ende der 2. Stufe war er bis auf 165,5 bar abgefallen. Abb. 23 zeigt Rate und Druck aufgetragen gegen den Logarithmus der Zeit. Aus der ersten Versuchsphase konnte eine Transmissivität von  $T = 6,07 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  bestimmt werden.

**Injektionsversuch Urach 3 (12.09.2002, Teil 1)**

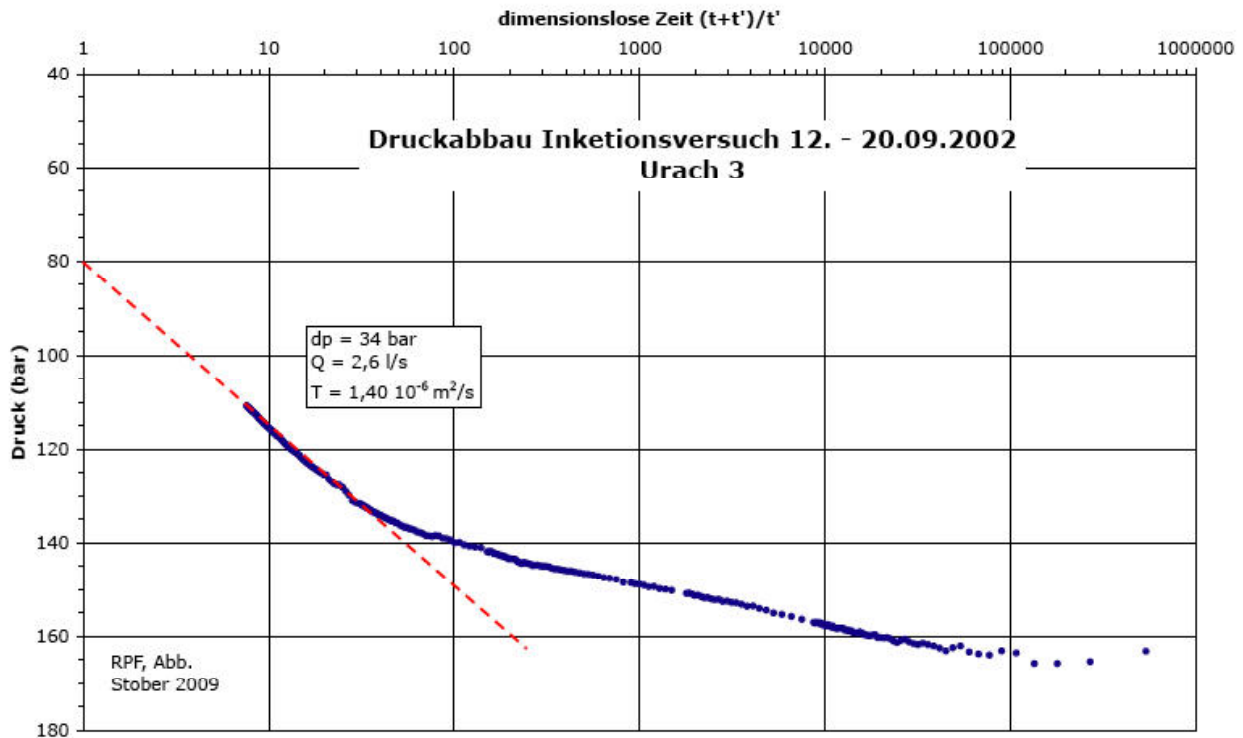


**Abb. 22: Auswertung des Injektionsversuches (1. Teil) am 12.09.2002**

**Injektionsversuch 12.-20.09.2002**



**Abb. 23: Auswertung des Injektionsversuches vom 12.-20.09.2002**



**Abb. 24: Auswertung des Druckabbaus des Injektionsversuches vom 12.-20.09.2002**

Abb. 24 zeigt den Druckabbau. Besonders schön ist in der ersten Phase des Druckabbaus (Datenauftrag von rechts nach links) der Einfluss einer Kluft direkt im Anschluss an den Druckabbau, der von den bohrlochspezifischen Effekten geprägt wird, erkennbar. Die Transmissivität wurde aus dem Druckabbau zu  $T = 1,40 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  bestimmt.

## 2.9 Fördertest Urach 3 (07.01.-27.06.03)

Am 7. Januar 2003 um 14:01 Uhr wurde in der Bohrung Urach 3 mit einem Fördertest bei einem Ausgangs-Kopfdruck von 114,4 bar begonnen. Die Förderung dauerte bis zum 27. Juni 2003 um 9:13 Uhr. Gefördert wurde mit nahezu konstanter Entnahmerate von  $Q = 0,95 \text{ l/s}$ , die jedoch gegen Ende des Versuches leicht abfiel (Abb. 25).

Am Ende des Fördertests betrug der Kopfdruck 70,5 bar. Die Temperatur des Wassers am Auslauf lag bei  $41,8^\circ\text{C}$ . Abbildung 26 zeigt die Auswertung des Fördertests. Die Transmissivität wurde zu  $T = 5,54 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  berechnet.

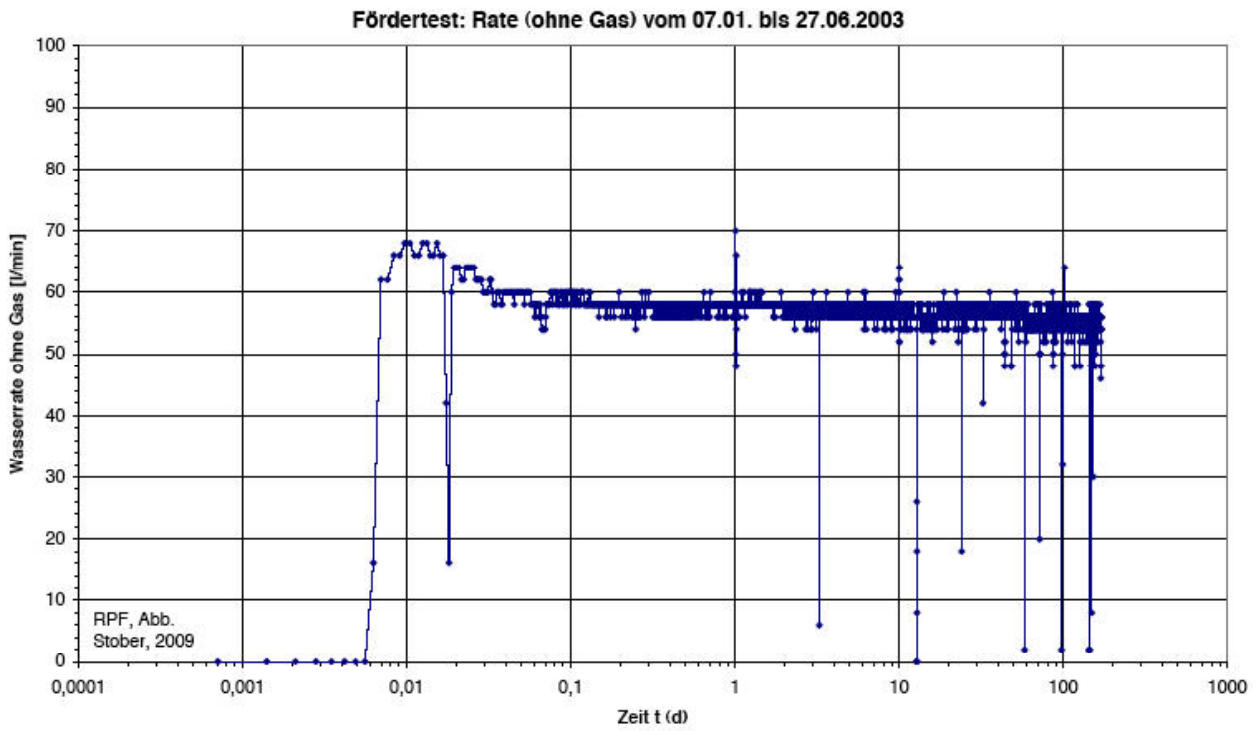


Abb. 25: Förderrate beim Test vom 07.01.-27.08.2003

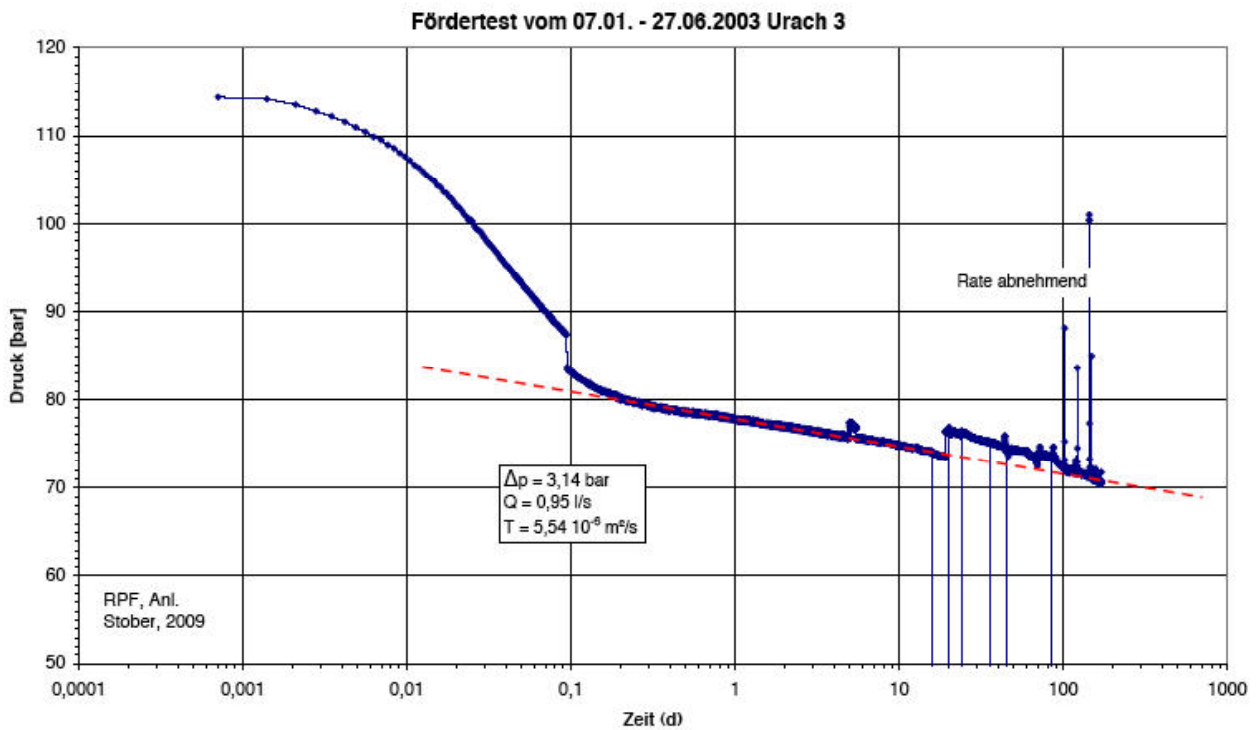
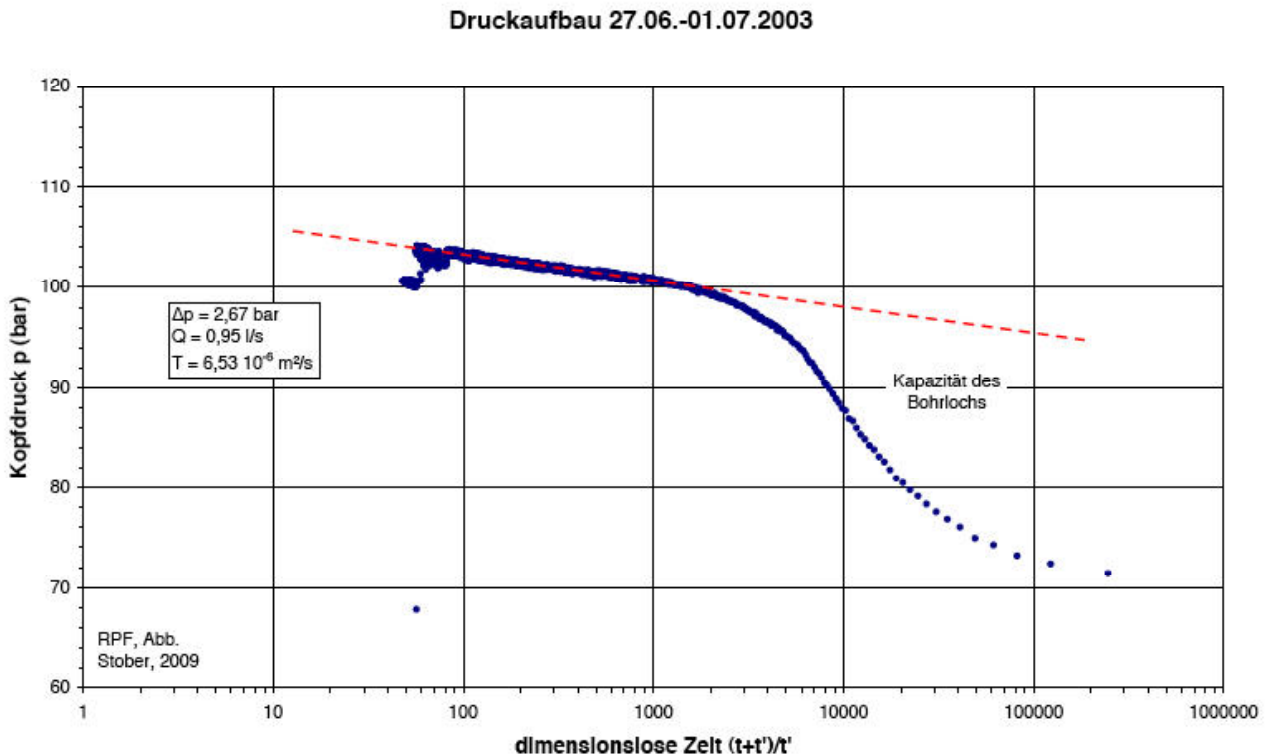


Abb. 26: Auswertung des Fördertests vom 07.01.-27.06.2003



Im Anschluss an die Förderung wurde die Bohrung wieder verschlossen und der resultierende Druckaufbau bis zum 1. Juli 2003 0:00 Uhr gemessen. Der Kopfdruck stieg in dieser Zeit wieder bis auf 100,6 bar an. Die Extrapolation gegen „unendlich“ ( $[(t+t')/t'] = 1$ ) zeigt einen Kopfdruck von 109 bar. Abbildung 27 zeigt den gegen die dimensionslose Zeit  $(t+t')/t'$  aufgetragenen Druckaufbau (Horner-Plot). Die Transmissivität, berechnet aus dem Druckaufbau, liegt mit  $T = 6,53 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  in einer ähnlicher Größenordnung wie der Wert aus der Druckabbauphase.



**Abb. 27: Auswertung des Druckabbaus (27.06.-01.07.2003)**

## 2.10 Langzeitinjektionsversuch in der Bohrung Urach 3 (18.07.-01.08.03)

Der Langzeitinjektionsversuch in der Bohrung Urach 3 begann am 18.07.2003 um 15:19 Uhr mit einer Rate von ca. 1,15 l/s. Der Kopfdruck stieg infolgedessen von 4,5 bar auf 84,6 bar an. Am 24.07.2003 um 9:20 Uhr wurde die Entnahmerate auf knapp 2,0 l/s erhöht. Die Injektion wurde am 28.07.2003 um 14:48 Uhr beendet. Am Ende des Injektionsversuches betrug der Kopfdruck 148,1 bar. Beim Langzeitinjektionsversuch wurden somit nur Kopfdrucke unterhalb einer elastischen Verformung des Gebirges (Weitung von Klüften) erreicht, d.h. mit diesem Versuch wurde die natürliche Durchlässigkeit des Gebirges getestet.

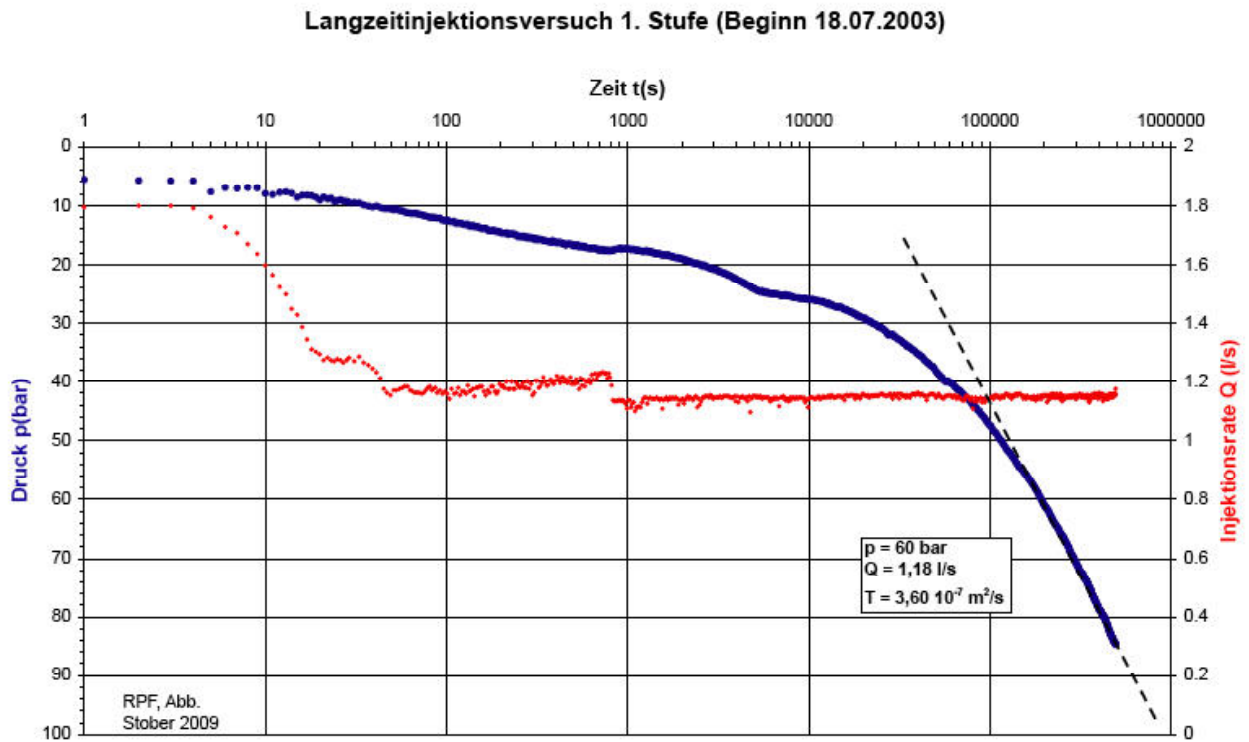


Abb. 28: Auswertung der ersten Injektionsstufe des Langzeitinjektionsversuches

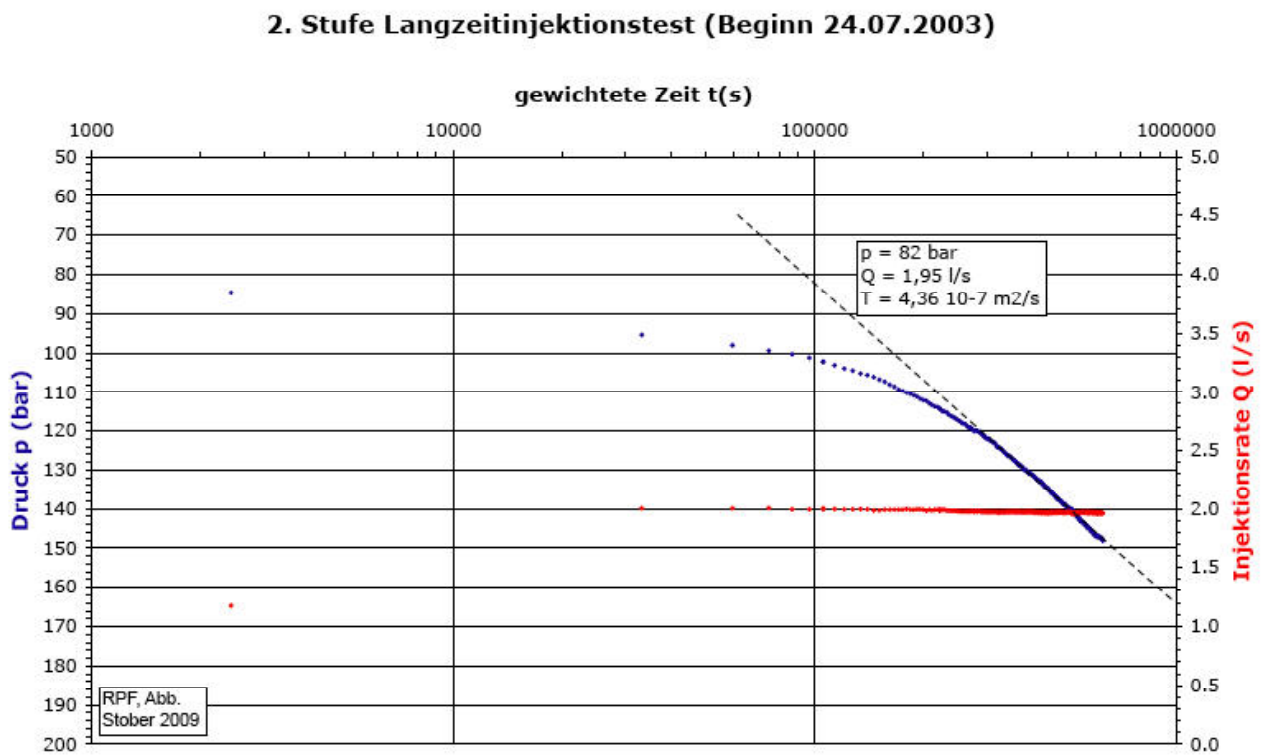
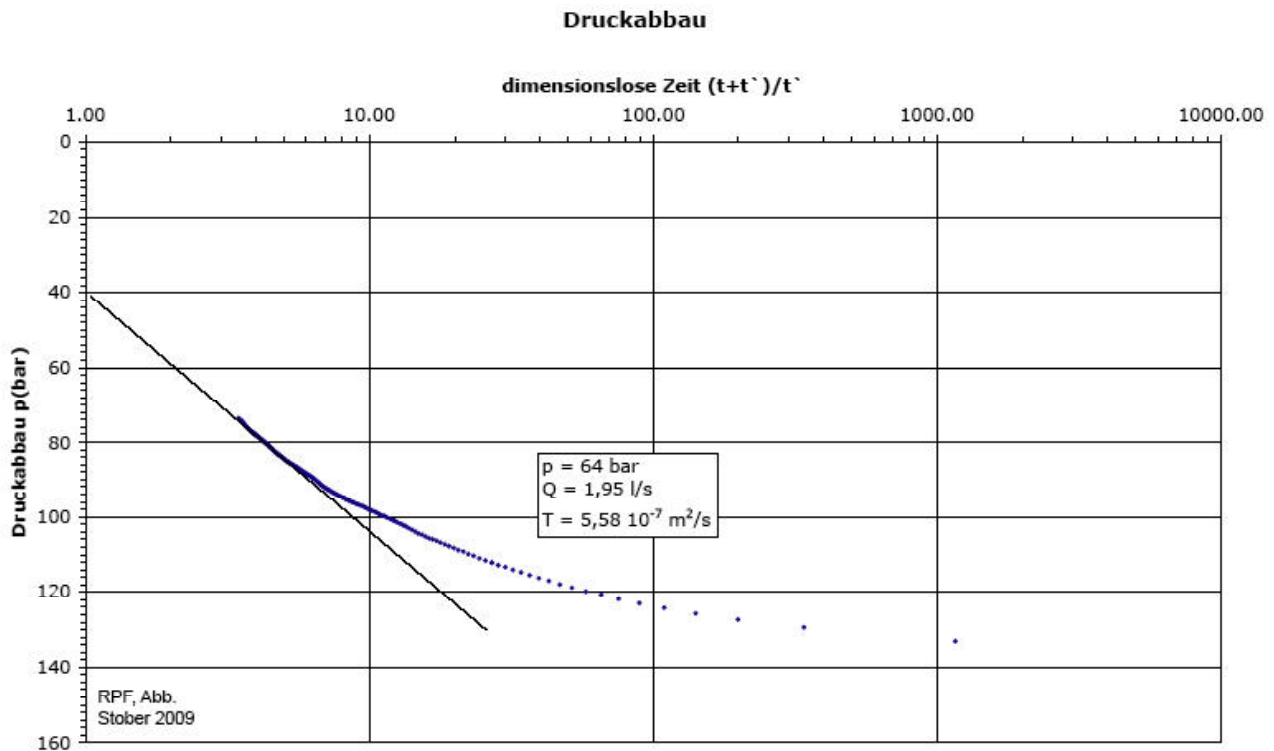


Abb. 29: Auswertung der zweiten Injektionsstufe des Langzeitinjektionsversuches

Der anschließende Druckabbau wurde bis zum 01.08.2003 00:00 Uhr aufgezeichnet. Der Druck war zu diesem Zeitpunkt bereits wieder auf 77,8 bar abgefallen.

Die Abbildungen 28 und 29 zeigen die jeweiligen Druckanstiege und die Raten der beiden Injektionsstufen. Kleinste Ratenschwankungen wirken sich auf den Druckverlauf aus. Die Transmissivitäten wurden zu  $T = 3,60 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  bzw.  $T = 4,36 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  bestimmt.



**Abb. 30: Auswertung des Druckabbaus des Langzeitinjektionsversuches**

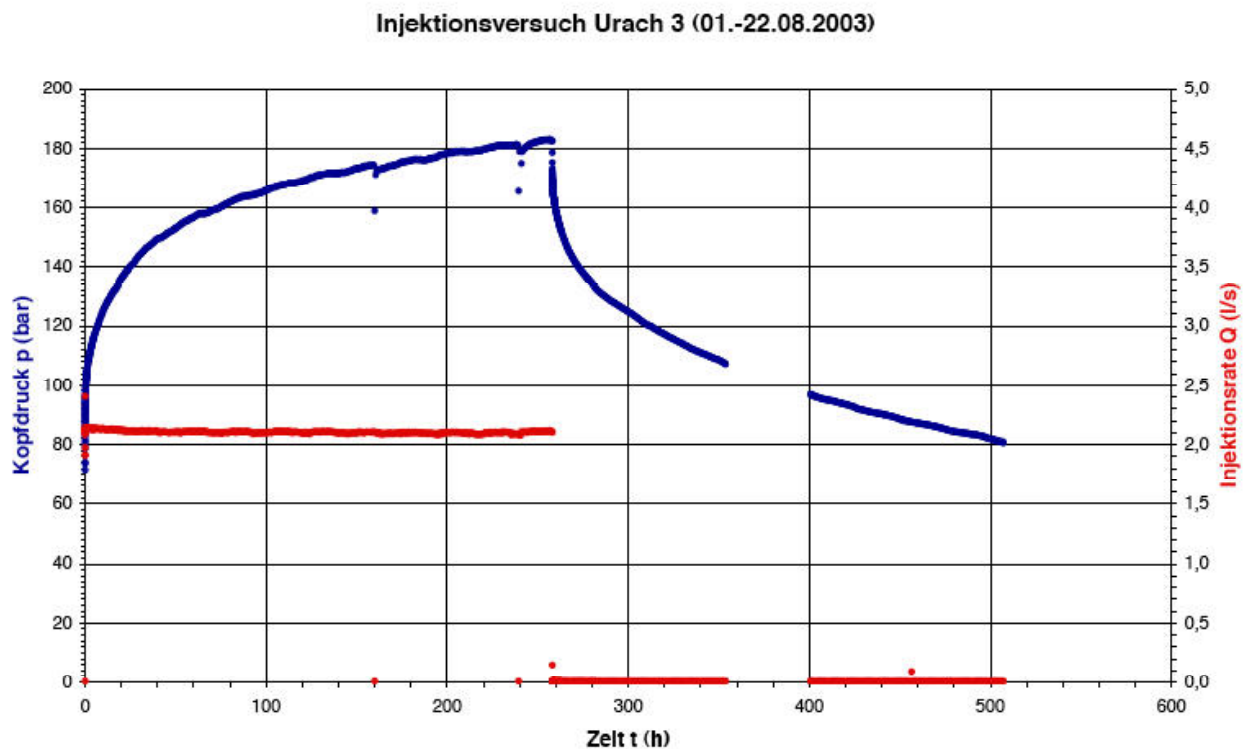
Aus dem Druckabbau (Abb. 30) wurde eine Transmissivität von  $T = 5,58 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  ermittelt. Dieser Wert dürfte allerdings etwas zu hoch liegen, da gegen Ende des Druckabbaus noch mit einer zunehmenden Versteilung und damit Verringerung der Transmissivität zu rechnen ist.

## 2.11 Injektionsversuch (01.-22.08.2003)

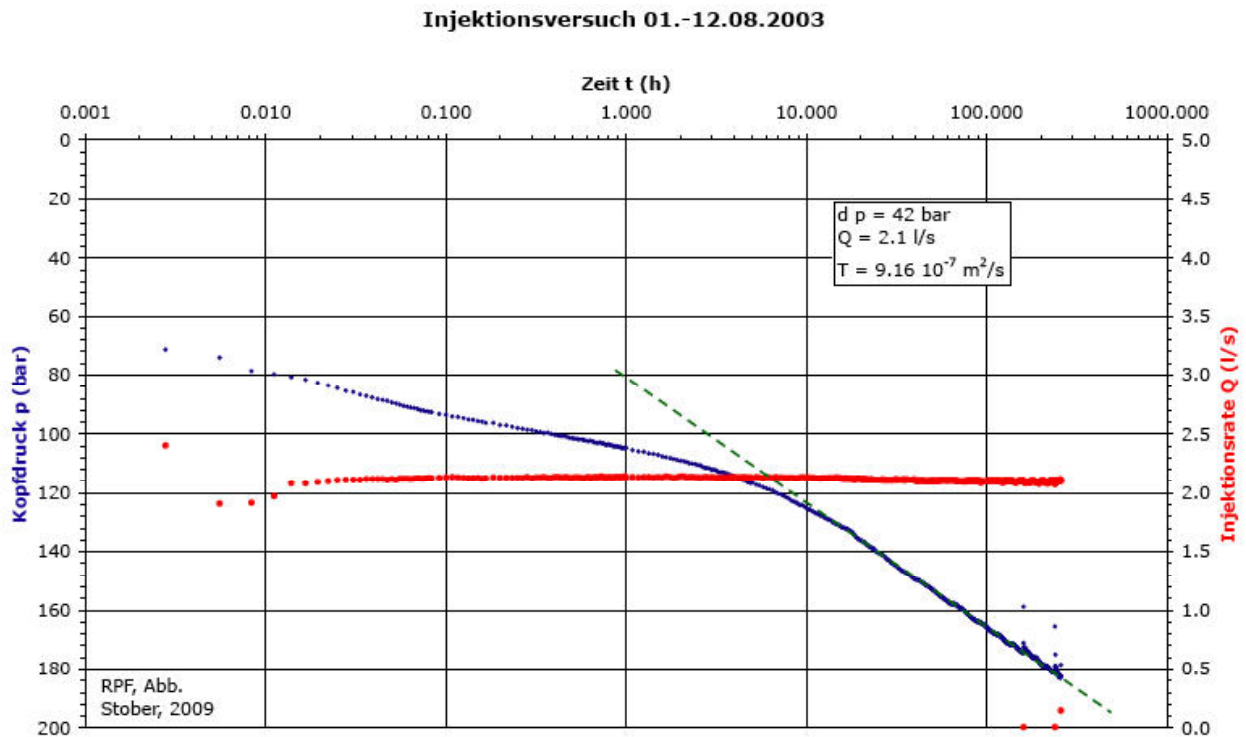
Im Anschluss an den Druckabbau des Langzeitinjektionsversuches wurde am 01.08.2003 mit einem Injektionsversuch begonnen, bei dem für die Dauer von 258 Stunden bis zum 12.08.2003 um 10:22 Uhr mit konstanter Rate von  $Q = 2,1 \text{ l/s}$  eingepresst wurde. Infolge der Injektion stieg der Kopfdruck von 72 bar auf 182 bar an (Abb. 31). Anschließend wurde

die Injektion gestoppt und der Druckabbau in der Zeit vom 12.-22.08.2003 aufgezeichnet. Am Ende des Versuchs war der Kopfdruck auf 80 bar gefallen. Aus dem Zeitintervall 370 – 400 h liegen keine Messdaten vor (Abb. 31). Der Druckabbau ist durch einen merkwürdig starken Abfall, der bis in die Endphase anhält, gekennzeichnet; der Druckabbau ist daher geohydraulisch nicht auswertbar.

Der Druckaufbau und die Injektionsrate sind auf Abbildung 32 gegen den Logarithmus der Zeit seit Injektionsbeginn aufgetragen. Die Auswertung erbrachte eine Transmissivität von  $T = 9,16 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ . Während des gesamten Injektionsversuches war keine elastische Reaktion des Gebirges feststellbar.



**Abb. 31: Injektionsversuch vom 01. bis 22.08.2003**



**Abb. 32: Auswertung des Injektionsversuches vom 01. bis 22.08.2003**

## 2.12 Auslaufversuch 22.-24.08.2003 Urach 3

Im Anschluss an diesen Injektionsversuch wurde am 22.08.2003 um 19:26 Uhr in der Bohrung Urach 3 mit einem gedrosselten Auslaufversuch begonnen. Die Auslafrate wurde bis auf ca. 2,4 l/s gesteigert, betrug jedoch meistens um 1,0 l/s (Abb. 33). Der Druck baute sich infolge von etwas über 80 bar Kopfdruck auf etwa 20 bar ab. Am 23.08.2003 um 14:46 Uhr wurde das Bohrloch oben wieder verschlossen und der Druckaufbau bis 24.08.03 um 12:07 Uhr registriert. Der Druck stieg bis auf über 69 bar an.

Abbildung 34 zeigt den semilogarithmisch gegen die Zeit aufgetragenen spezifischen Druckabbau ( $s/Q$  in  $s/m^2$ ). Die Auswertung des Auslaufversuches erbrachte eine Transmissivität von  $T = 1,67 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/s$ . Auf Abbildung 35 ist der Druckabbau gegen den Logarithmus der Zeit aufgetragen. Die Transmissivität liegt bei  $T = 1,08 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/s$  bis  $T = 1,37 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/s$ .

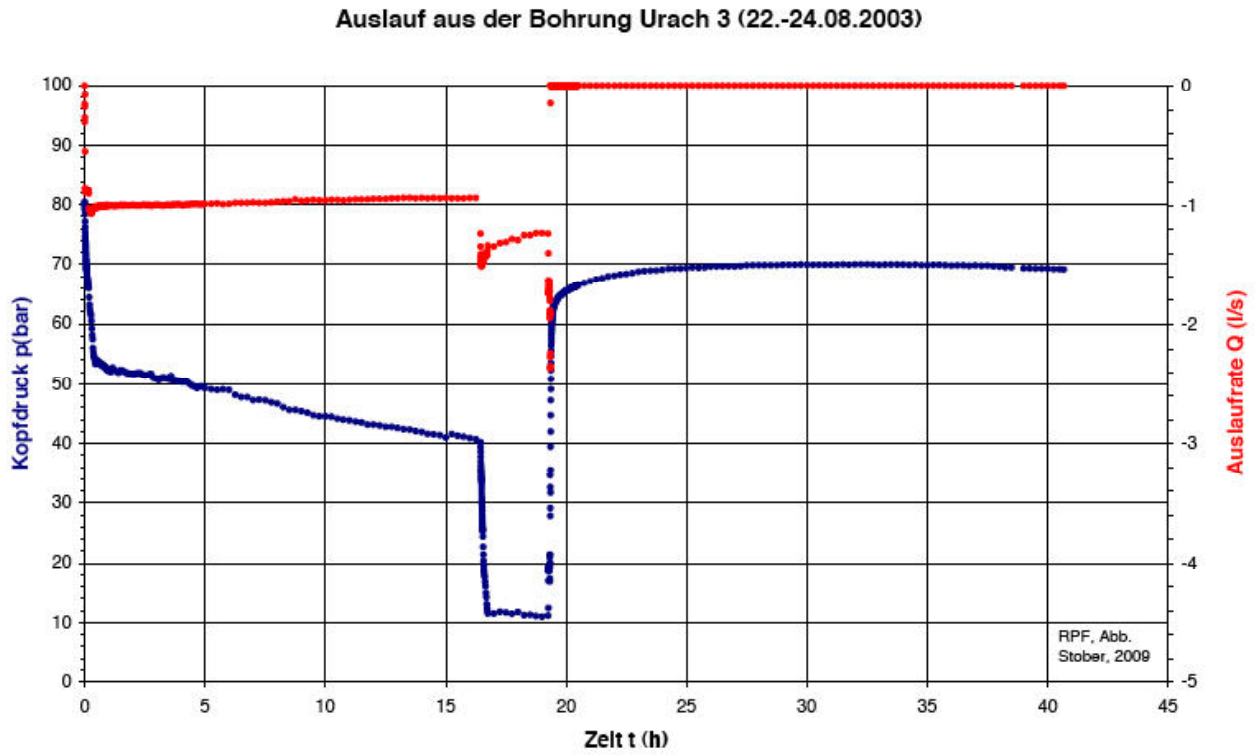


Abb. 33: Auslaufversuch vom 22. bis 24.08.2003

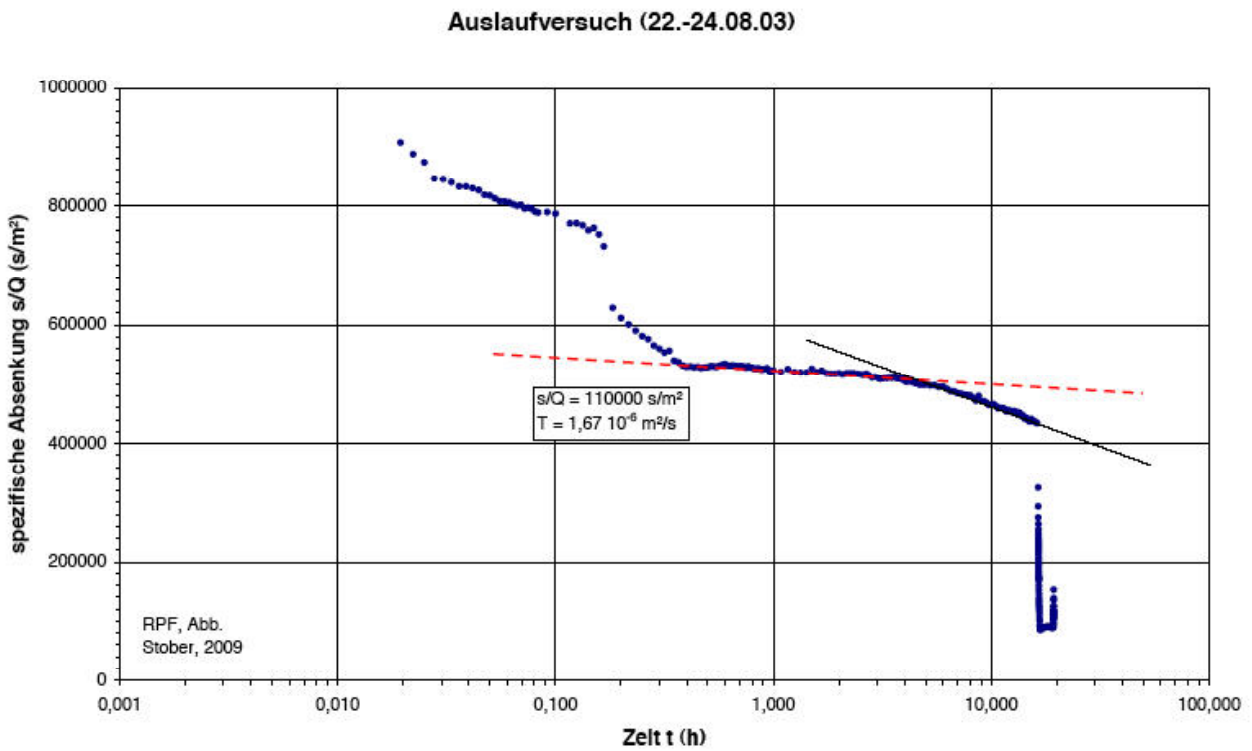
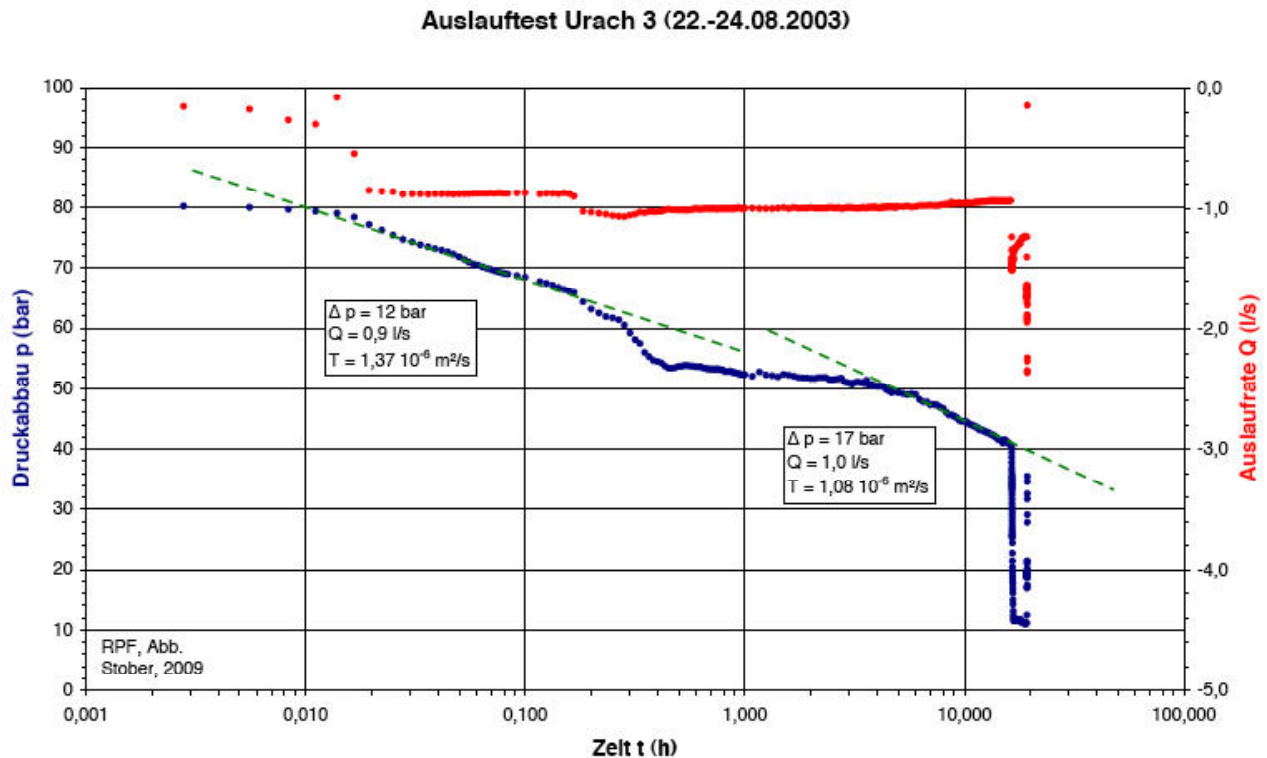


Abb. 34: Auswertung der spezifischen Absenkung beim Auslaufversuch (22. - 24.08.2003)



**Abb. 35: Auswertung des Druckabbaus beim Auslaufversuch (22. - 24.08.2003)**

### 2.13 Auslaufversuch 24.-27.08.2003 Urach 3

Am 24.08.2003 um 12:07 Uhr wurde in der Bohrung Urach 3 erneut mit einem gedrosselten Auslaufversuch begonnen. Die Auslaufrate wurde bis auf ca. 3,2 l/s gesteigert und fiel danach kontinuierlich bis auf 1,15 l/s ab (Abb. 36). Der Druck baute sich infolgedessen von knapp 70 bar Kopfdruck auf 6 bar ab. Am 27.08.2003 um 3:43 Uhr wurde das Bohrloch oben wieder verschlossen und der Druckaufbau registriert.

Abbildung 37 zeigt den semilogarithmisch gegen die Zeit aufgetragenen spezifischen Druckabbau ( $s/Q$  in  $s/m^2$ ). Die Auswertung des Auslaufversuches erbrachte eine Transmissivität zwischen  $T = 1,93 \cdot 10^{-6} m^2/s$  und  $T = 7,05 \cdot 10^{-6} m^2/s$ .

**Auslaufest mit Druckaufbau im Anschluss 24.-27.08.2003**

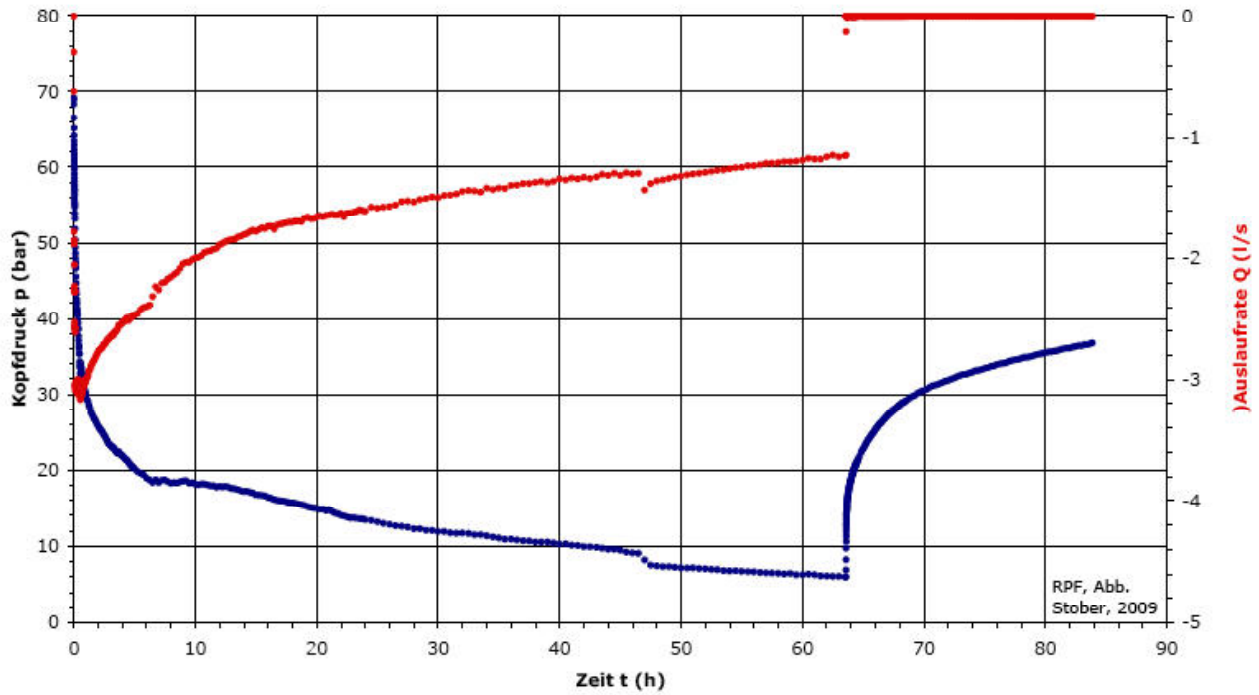


Abb. 36: Auslaufversuch (24. - 27.08.2003)

**gedrosselter Auslauf 24.-27.08.2003**

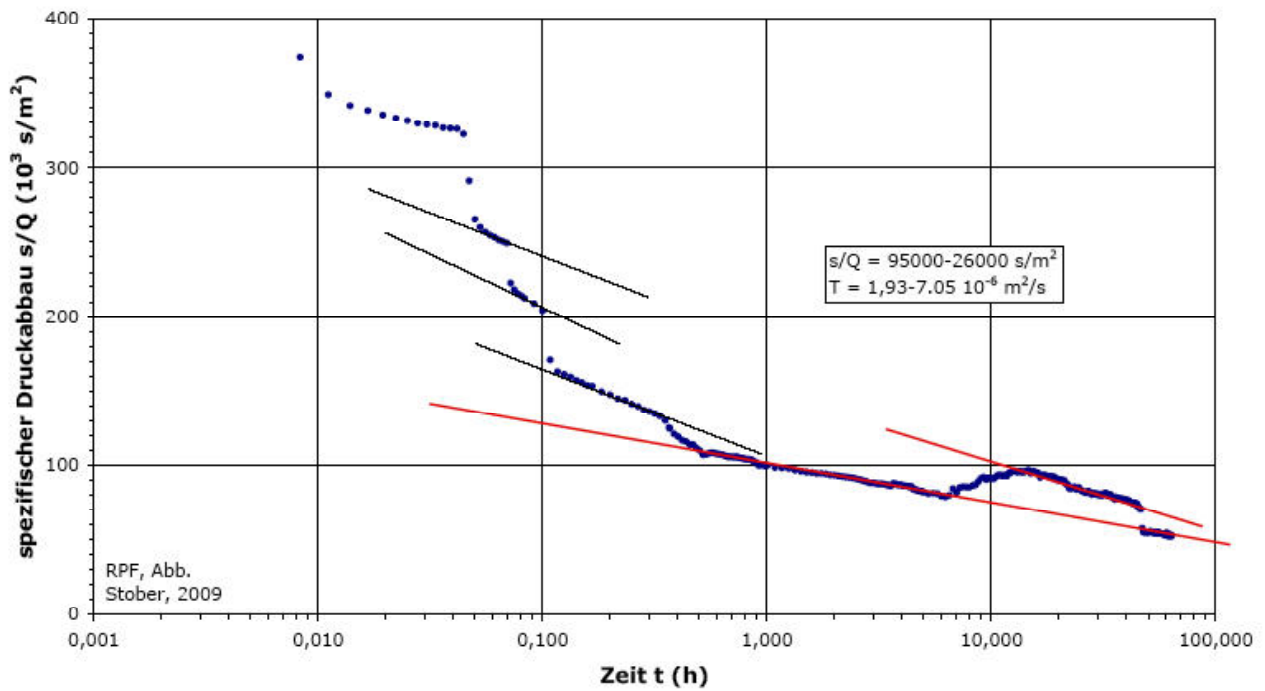


Abb. 37: Auswertung des Auslaufversuches (24. - 27.08.2003)



## 2.14 Injektionsversuch vom 08.-16.04.2004 in die Bohrung Urach 3

Am 8. April wurde ein erneuter Injektionstest in der Bohrung Urach 3 durchgeführt. Der Test wurde bei einem Anfangsdruck von 2,9 bar Kopfdruck begonnen. Die Injektionsrate lag während des gesamten, ca. 192 Stunden andauernden Tests bei  $Q = 0,85 \text{ l/s}$ . Der Kopfdruck stieg infolgedessen auf ca. 58,6 bar an. Im Anschluss an die Injektionsphase wurde der Druckabbau am 16.04.04 für die Dauer von 14,5 Stunden registriert. Aus der Druckaufbauphase konnte eine Transmissivität von  $T = 3,54 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  ermittelt werden (Abb. 38).

Der Druckabbau war für eine Auswertung zu kurz bemessen (Abb. 39). Der Druckabbau gestattete daher lediglich die Aussage, dass die Transmissivität deutlich geringer als  $1,56 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  sein muss. Die aus dem Druckaufbau ermittelte Durchlässigkeit passt somit sehr gut zu den Werten, wie sie aus den bisherigen Versuchen unterhalb des so genannten Öffnungsdruckes ermittelt wurden.

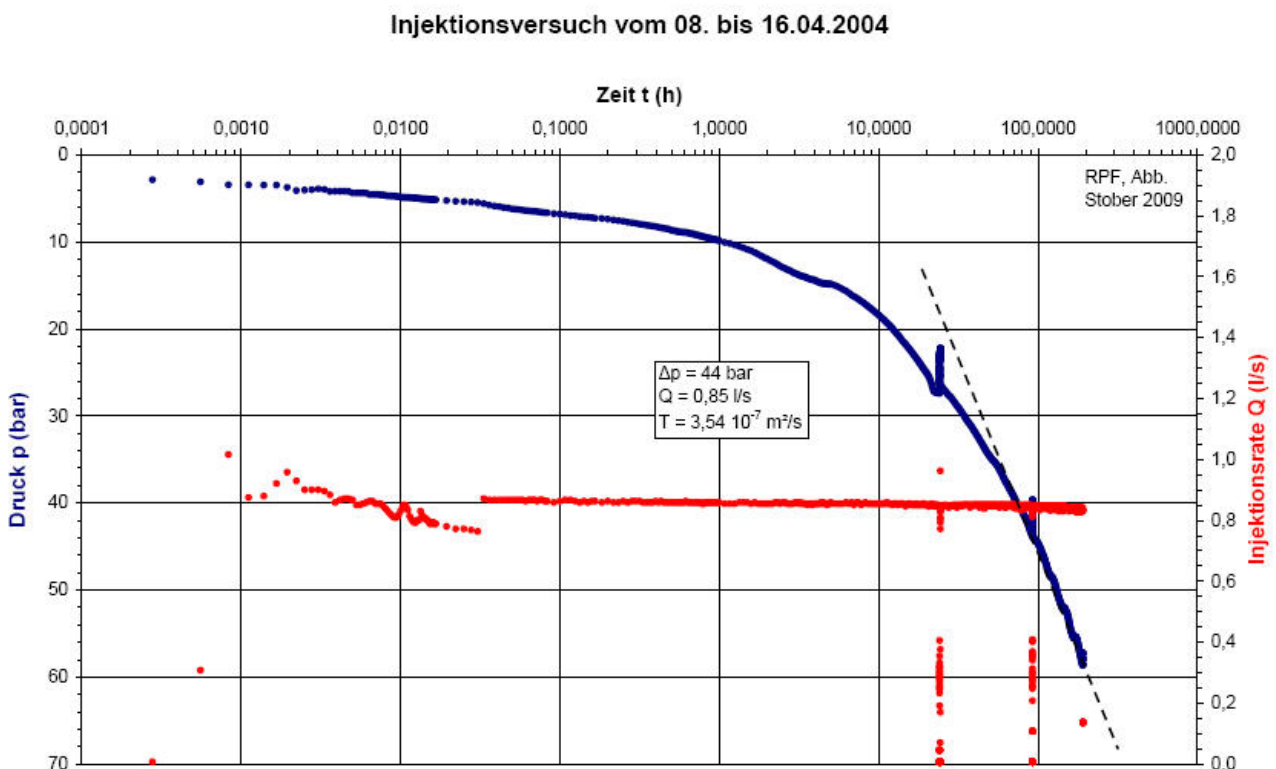


Abb. 38: Auswertung des Druckaufbaus des Injektionsversuches (08. - 16.04.2004)

### Druckabbau des Injektionstests in der Bohrung Urach 3 (08.-16.04.2004)

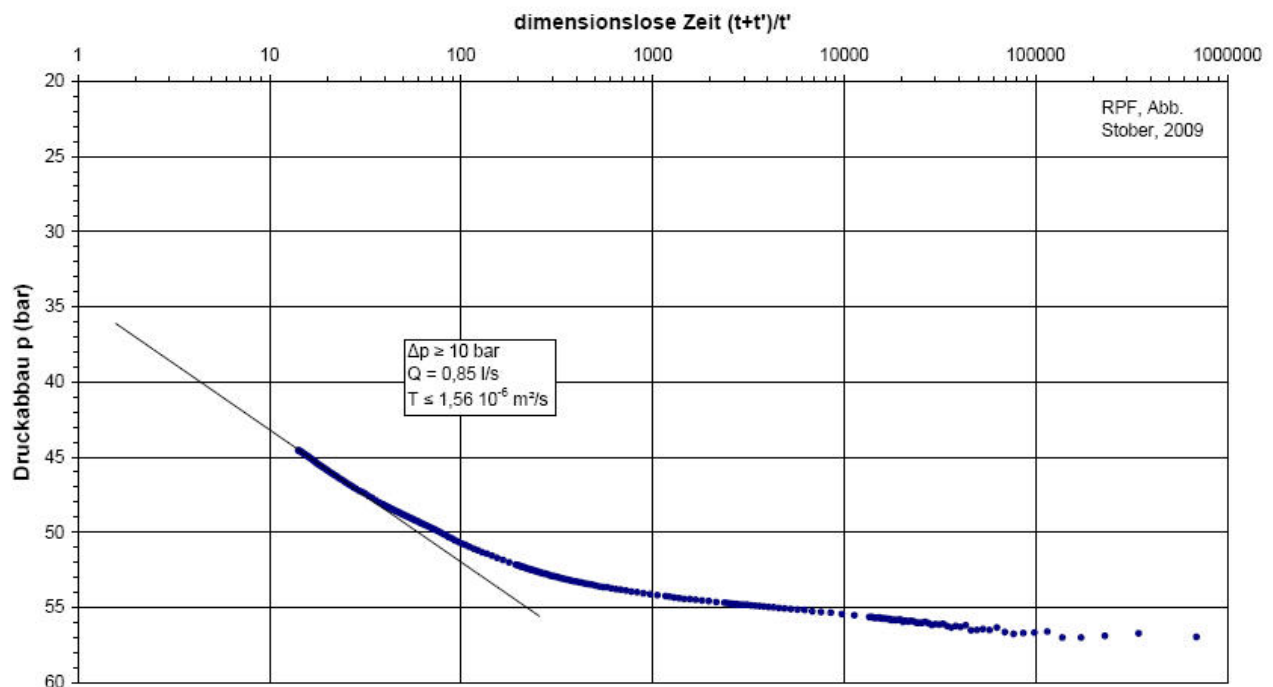


Abb. 39: Auswertung des Druckabbaus des Injektionsversuches (08. - 16.04.2004)

### 3. Interpretation und Wertung der hydraulischen Tests in der Bohrung Urach 3

In Tabelle 1 sind sämtliche dem RPF bekannten und auswertbaren hydraulischen Tests, die in der Forschungsbohrung Urach 3 seit dem Jahre 1978 durchgeführt wurden, enthalten.

Die Tests wurden in verschiedenen Teufen durchgeführt. Bei den meisten Versuchen wurde Wasser in das Gebirge injiziert, bei sehr wenigen wurde Wasser aus dem Gebirge gefördert. Bei Fördertests oder (gedrosselten) Auslaufftests wurden aufgrund der höheren Temperatur im Testbereich und damit geringeren Viskosität des Fluids grundsätzlich zwangsläufig etwas höhere Transmissivitäten ermittelt als bei Injektionsversuchen.

Manche hydraulische Versuche wurden durchgeführt, um die natürliche Durchlässigkeit des Gebirges zu testen. Diese Versuche wurden unterhalb des so genannten Öffnungsdruckes durchgeführt, der im tieferen Bereich der Bohrung Urach 3 bei ca. 170 bar Kopfdruck liegt (Schädel & Stober 1982). Andere Versuche dienten dazu, das natürlich vorhandene Kluftsystem zu weiten. Ursprünglich wollte man mit sehr hohen Kopfdrücken das Gebirge aufreißen, fracen. Es stellte sich jedoch heraus, dass das natürlich

vorhandene Kluftsystem auf die hohen Drucke durch eine verstärkte Öffnung reagierte (Stober 1986). Ein eigentliches "Fracen", wie es in der Erdöl-/Erdgasindustrie durchgeführt wird, war bei den Versuchen im Kristallin der Bohrung Urach 3 nicht möglich.

Die hydraulischen Tests unterscheiden sich auch bezüglich der Versuchsdauer. Es gibt Versuche, die mehrere 100 Stunden dauerten, andere nur wenige Minuten. Somit ist auch die Reichweite der Versuche in das Gebirge hinein sehr unterschiedlich. So haben beispielsweise Auffüllversuche mit ihrer geringen Druckbeaufschlagung und Versuchsdauer eine sehr geringe Reichweite. Mit Auffüllversuchen wird nur der Nahbereich um das Bohrloch herum getestet (Schädel & Stober 1984, Stober 1986). Da dieser Bereich stärker aufgelockert ist als der kompakte Fels in größerer Entfernung vom Bohrloch, weisen die Auffüllversuche in der Bohrung Urach 3 grundsätzlich höhere Transmissivitäten auf als hydraulische Tests mit einer längeren Versuchsdauer, die weiter in das Gebirge eindringen.

Aus den Auffüllversuchen aus dem Jahr 1982, mit denen das alte, nur 14 m mächtige Open-Hole (3320 m – 3334 m u.Gel.) und die drei Perforationsstrecken im unteren Bereich der Verrohrung getestet wurden, erhält man eine mittlere Transmissivität für den **bohrlochnahen Bereich** von  $T = 1,65 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Nach Vertiefung der Bohrung um 154 m (neues Open-Hole: 3320 m – 3488 m u.Gel.) ergibt sich für den bohrlochnahen Bereich aus den Ausfüllversuchen von 1984 eine nur geringfügig höhere Transmissivität von  $T = 2,08 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Die Vertiefungsstrecke erbrachte somit keinen nennenswerten Beitrag zur Erhöhung der Durchlässigkeit, obwohl zuvor durch Hochdruckinjektionsversuche sowohl das neue Open-Hole als auch die Perforationsbereiche stimuliert wurden.

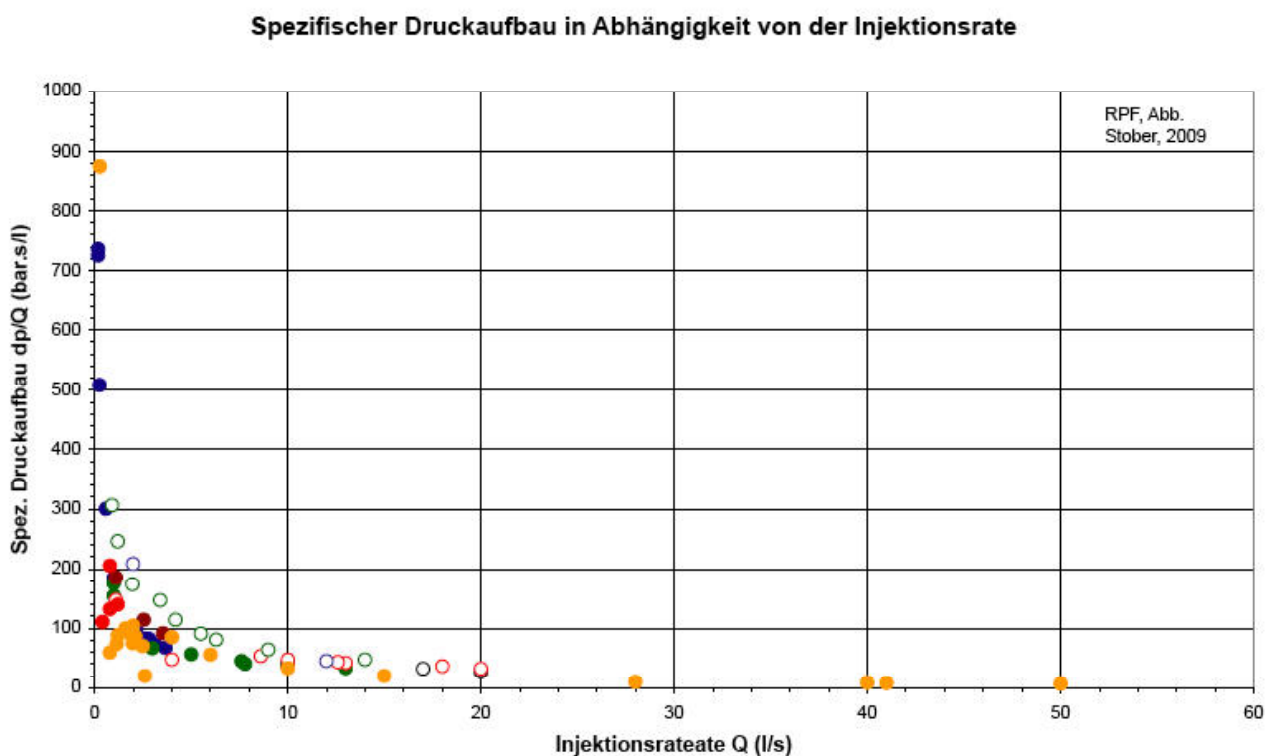
Die **natürliche Transmissivität** des Gneisgebirges im Bereich des neuen Open-Holes (3320 m – 3488 m u.Gel.) und der drei Perforationsstrecken (3259-3264 m, 3271-3276 m, 3290-3300 m) liegt nach den Versuchen von 1984 bei  $T = 2,88 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , d.h. bei rund einem Siebtel der Durchlässigkeit des aufgelockerten bohrlochnahen Bereichs. Nach erneuter Vertiefung der Bohrung um 956 m auf 4444 m Tiefe wurden im Jahre 2002 nur geringfügig höhere, natürliche Transmissivitäten um  $T = 4,50 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  bestimmt.

Allerdings ist bei allen hydraulischen Tests, ausgenommen bestimmte Packertests, zu berücksichtigen, dass der Impuls (Entnahme, Eingabe) für die hydraulische Reaktion (Wasserspiegelabfall, -anstieg) in der Vertikalen nach unten stark abnimmt, verstärkt durch die raue „Gebirgswandung“ und die Abnahme des Bohrdurchmessers mit der Tiefe. Die tiefer liegenden Bereiche sind somit hydraulisch schlechter angeschlossen und liegen daher quasi im **Druckschatten**. Dies betrifft insbesondere die Versuche im neuen (3320 –

3488 m) und verstärkt die Versuche im derzeitigen Open-Hole (3320 – 4444 m), die Mächtigkeiten von 168 m bzw. 1124 m (!! ) aufweisen, jeweils plus Länge der Perforationsstrecken von zusammen 20 m. Daher ist davon auszugehen, dass die natürliche Transmissivität des Gneisgebirges größer ist.

Nach erfolgter **Stimulation** im Jahre 2002 im derzeitigen Bohrloch Urach 3 (Open-Hole: 3320-4444 m; 3 Perforationen) konnten zunächst deutlich erhöhte Transmissivitäten um  $T = 1,30 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  festgestellt werden (Faktor: 2,9). Im Anschluss an einen mehrere Monate dauernden Fördertest Anfang 2003 war die Transmissivität jedoch wieder auf den Ursprungswert um  $T = 4,50 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  gesunken.

Diese durch die vorangegangene Stimulation induzierte und zunächst vorhandene Durchlässigkeitserhöhung wird durch das zunächst noch im Gebirge verbliebene, hohe injizierte Wasservolumen verursacht. Durch das eingepresste Wasser wird die Kommunikation der natürlich vorhandenen Wasserwegsamkeiten im Gebirge erhöht - beispielsweise durch Kompression lokal vorhandener, leicht zusammendrückbarer Kluffüllungen - so dass dadurch Klüfte bzw. Kluftsysteme etwas besser und effizienter miteinander verbunden werden. Mit der elastischen Kluftweitung im eigentlichen Sinne ist dieser Vorgang jedoch nicht zu vergleichen.



**Abb. 40: Summarische Zusammenstellung des spezifischen Druckabbaus in Abhängigkeit von der Injektionsrate bei verschiedenen Versuchen in der Bohrung Urach 3**

Datum	Versuch	Injektionsmittel	Injektionsmenge (m <sup>3</sup> )	Rückfluss (m <sup>3</sup> )	max. Rate (m <sup>3</sup> / s)	max. Kopfdruck (bar)	Injektionsdauer (h)	Injektionsstelle	Transmissivität (m <sup>2</sup> / s)	
									Druckaufbau	Druckabbau
23.01.78	Drill-Stem-Test	Fluid	-	8,95	0,0031	-	0,5	1759,58-1779,90	~2,65 · 10 <sup>-6</sup> (G)	1,14 · 10 <sup>-6</sup> (G) 7,47 · 10 <sup>-6</sup> (G)
06.-07.04.78	Pumpversuch	Fluid	-	62,6	0,0036	-	22	1808,5-2802,0	~8,22 · 10 <sup>-7</sup> (G <sub>Q</sub> )	-
11.05.78	Drill-Stem-Test	Fluid	-	0,0933	0,015 l/s	-	0,5	3294,91-3301,5	-	8,05 · 10 <sup>-9</sup> (G)
28.-29.05.78	Zuflusstest	Fluid	-	23,56	0,0031	-	24	1808,5-3334,0	~6,94 · 10 <sup>-8</sup> (G)	-
25.-28.06.78	Pumpversuch	Fluid	-	-	-0,003	-	-	Perforation 1764-1784	6,96 · 10 <sup>-6</sup> (G)	~2,16 · 10 <sup>-7</sup> (G)
30.05.79	Leak-off Test 1	Wasser	0,45	~0,55	0,0010	155	0,21	Altes Open-Hole (3320-3334 m)	~ 2,57 · 10 <sup>-7</sup> (A)	2,46 · 10 <sup>-6</sup> (A)
30.05.79	Leak-off Test 2	Wasser	0,80	~0,63	0,0010	176	0,37	Altes Open-Hole (3320-3334 m)	2,57 · 10 <sup>-7</sup> (A) 2,57 · 10 <sup>-7</sup> (G) 2,41 · 10 <sup>-7</sup> (E)	1,50 · 10 <sup>-6</sup> (A)
30.05.79	Leak-off Test 3	Wasser	0,75	~0,72	0,0030	200	0,08	Altes Open-Hole (3320-3334 m)	6,82 · 10 <sup>-7</sup> (A) 5,18 · 10 <sup>-7</sup> (G)	-
31.05.79	Frac-Versuch 1.1	Wasser	10,60	3,5	0,0080	315	0,50	Altes Open-Hole (3320-3334 m)	1,59 · 10 <sup>-6</sup> (G <sub>1</sub> ) 3,59 · 10 <sup>-6</sup> (G <sub>2</sub> ) 3,37 · 10 <sup>-6</sup> (G <sub>3</sub> ) 1,38 · 10 <sup>-6</sup> (T <sub>1</sub> ) ~1,31 · 10 <sup>-6</sup> (A <sub>1</sub> )	1,68 · 10 <sup>-6</sup> (G) 2,93 · 10 <sup>-6</sup> (A)
31.05.79	Frac-Versuch 1.2	Wasser	25,00	4,2	0,0130	427	0,73	Altes Open-Hole (3320-3334 m)	2,84 · 10 <sup>-6</sup> (G <sub>1</sub> ) 3,74 · 10 <sup>-6</sup> (A <sub>1</sub> ) 1,4-2,2 · 10 <sup>-6</sup> (E <sub>1</sub> )	~ 2,26 · 10 <sup>-6</sup> (G) ~ 2,20 · 10 <sup>-6</sup> (A)
06.06.79	Frac-Versuch 2.1a	Wasser	11,20	0,0	0,0100	411	0,32	Perforation 1 3259-3264 m	2,09 · 10 <sup>-6</sup> (G) 2,81 · 10 <sup>-6</sup> (A)	1,77 · 10 <sup>-6</sup> (G) 1,01 · 10 <sup>-6</sup> (C)
06.06.79	Frac-Versuch 2.1b	Wasser	9,60	0,0	0,0200	541	0,21	Perforation 1 3259-3264 m	2,22 · 10 <sup>-6</sup> (G) 4,07 · 10 <sup>-6</sup> (A)	4,08 · 10 <sup>-6</sup> (C)
06.06.79	Frac-Versuch 2.1c	Wasser	13,30	19,1	0,0200	565	0,31	Perforation 1 3259-3264 m	-	~1,52 · 10 <sup>-6</sup> (C)
11.06.79	Frac-Versuch 3.1a	Wasser	20,00	0,0	0,0100	470	0,75	Perforation 2 3271-3276 m	1,24 · 10 <sup>-6</sup> (G <sub>1</sub> ) 1,62 · 10 <sup>-6</sup> (G <sub>2</sub> ) 2,15 · 10 <sup>-6</sup> (A <sub>1</sub> )	2,54 · 10 <sup>-6</sup> (G) 1,53 · 10 <sup>-6</sup> (C)
11.06.79	Frac-Versuch 3.1b	Wasser	5,00	0,0	0,0130	546	0,12	Perforation 2 3271-3276 m	2,84 · 10 <sup>-6</sup> (G) 4,80 · 10 <sup>-6</sup> (A)	1,20 · 10 <sup>-6</sup> (G) ~1,50 · 10 <sup>-6</sup> (C)
11.06.79	Frac-Versuch 3.1c	Wasser	8,00	0,0	0,0200	640	0,15	Perforation 2 3271-3276 m	4,53 · 10 <sup>-6</sup> (G) 4,41 · 10 <sup>-6</sup> (A)	9,58 · 10 <sup>-7</sup> (G) ~2,99 · 10 <sup>-6</sup> (C)
19.06.79	Leak-off Test 1	Wasser	-	-	>0,00111	~ 123	~ 0,18	Perforation 2 3271-3276 m	2,97 · 10 <sup>-7</sup> (G)	-
19.06.79	Leak-off Test 2	Wasser	2,40	1,0	0,00111	164	0,21	Perforation 2 3271-3276 m	2,42 · 10 <sup>-7</sup> (G)	-
19.06.79	Leak-off Test 3	Wasser	-	-	0,0040	188	0,07	Perforation 2 3271-3276 m	≥ 1,23 · 10 <sup>-7</sup> (G)	-
26.06.79	Frac-Versuch 4.1a	Wasser	5,00	0,0	0,0020	417	1,00	Perforation 3 3294-3299 m	1,88 · 10 <sup>-7</sup> (G) 3,90 · 10 <sup>-7</sup> (A)	1,10 · 10 <sup>-7</sup> (G) 9,54 · 10 <sup>-8</sup> (A)
26.06.79	Frac-Versuch 4.1b	Wasser	6,50	0,0	0,0120	540	0,32	Perforation 3 3294-3299 m	2,70 · 10 <sup>-7</sup> (G <sub>1</sub> ) 1,33 · 10 <sup>-6</sup> (G <sub>2</sub> ) 7,55 · 10 <sup>-7</sup> (A <sub>1</sub> )	8,31 · 10 <sup>-7</sup> (G) 5,58 · 10 <sup>-7</sup> (G)

18.- 19.11.82	Auffüll- versuch 1	Wasser	1,800	-	-	-	-	A. O.-H. 3320- 3334 m P1, P2, P3	-	$1,29 \cdot 10^{-6}$ (P)
19.- 22.11.82	Auffüll- versuch 2	Wasser	1,305	-	-	-	-	A. O.-H. 3320- 3334 m P1, P2, P3	-	$2,57 \cdot 10^{-6}$ (P)
22.- 23.11.82	Auffüll- versuch 3	Wasser	1,203	-	-	-	-	A. O.-H. 3320- 3334 m P1, P2, P3	-	$1,87 \cdot 10^{-6}$ (P)
23.- 24.11.82	Auffüll- versuch 4	Wasser	1,007	-	-	-	-	A. O.-H. 3320- 3334 m P1, P2, P3	-	$1,93 \cdot 10^{-6}$ (P)
24.- 25.11.82	Auffüll- versuch 5	Wasser	0,750	-	-	-	-	A. O.-H. 3320- 3334 m P1, P2, P3	-	$1,05 \cdot 10^{-6}$ (P)
25.- 26.11.82	Auffüll- versuch 6	Wasser	0,770	-	-	-	-	A. O.-H. 3320- 3334 m P1, P2, P3	-	$1,38 \cdot 10^{-6}$ (P)
26.11.- 01.12.82	Auffüll- versuch 7	Wasser	>0,4	-	-	-	-	A. O.-H. 3320- 3334 m P1, P2, P3	-	$1,45 \cdot 10^{-6}$ (P)
15.01.83	Injektions- versuch I	Wasser	60,0	> 3,4	0,00355	326	6,7	Neues Open Hole (3320 - 3488 m), P1, P2, P3	$5,90 \cdot 10^{-7}$ (A) $1,2-2,6 \cdot 10^{-7}$ (T)	$2,13 \cdot 10^{-6}$ (A) $4,06 \cdot 10^{-7}$ (T) $1,54 \cdot 10^{-6}$ (E)
22.01.83	Injektions- versuch II	Wasser	88,4	> 3,0	0,01400	660	3,1	P1, P2, P4 (3290-3300 m)	—	$9,03 \cdot 10^{-7}$ (A) $8,21 \cdot 10^{-7}$ (T) $6,84 \cdot 10^{-7}$ (C) $4,61 \cdot 10^{-7}$ (R)
23.01.83	Injektions- versuch III	Wasser	4,1	> 0,7	0,00195	340	2,0	P1, P2, P4	$1,21 \cdot 10^{-7}$ (A) $6,23 \cdot 10^{-8}$ (T)	$1,07 \cdot 10^{-7}$ (A) $2,11 \cdot 10^{-7}$ (T)
25.01.83	Injektions- versuch IV	Wasser	36,4	> 2,7	0,00630	510	4,6	P1, P2, P4	$6,57 \cdot 10^{-7}$ (T)	$6,78 \cdot 10^{-7}$ (A) $7,58 \cdot 10^{-7}$ (T) $2,48 \cdot 10^{-7}$ (R)
14.03.84	Auffüll- versuch 1	Wasser	1,365	-	-	-	-	N. O.-H. 3320-3488 m, P1, P2, P4	-	$1,98 \cdot 10^{-6}$ (P)
16.03.84	Auffüll- versuch 2	Wasser	1,125	-	-	-	-	N. O.-H. 3320-3488 m, P1, P2, P4	-	$1,95 \cdot 10^{-6}$ (P)
19.03.84	Auffüll- versuch 3	Wasser	0,947	-	-	-	-	N. O.-H. 3320-3488 m, P1, P2, P4	-	$1,38 \cdot 10^{-6}$ (P)
20.03.84	Auffüll- versuch 4	Wasser	0,824	-	-	-	-	N. O.-H. 3320-3488 m, P1, P2, P4	-	$2,05 \cdot 10^{-6}$ (P)
21.03.84	Auffüll- versuch 5	Wasser	0,696	-	-	-	-	N. O.-H. 3320-3488 m, P1, P2, P4	-	$1,88 \cdot 10^{-6}$ (P)
23.03.84	Auffüll- versuch 7	Wasser	0,541	-	-	-	-	N. O.-H. 3320-3488 m, P1, P2, P4	-	$2,08 \cdot 10^{-6}$ (P)
26.03.84	Auffüll- versuch 8	Wasser	0,457	-	-	-	-	N. O.-H. 3320-3488 m, P1, P2, P4	-	$1,44 \cdot 10^{-6}$ (P)
27.03.84	Auffüll- versuch 9	Wasser	0,433	-	-	-	-	N. O.-H. 3320-3488 m, P1, P2, P4	-	$1,80 \cdot 10^{-6}$ (P)
04.- 07.04.84	Brunnen- test	Wasser	172,8	19,4	0,0012	168	60	N. O.-H. 3320-3488 m, P1, P2, P4	$2,60 \cdot 10^{-7}$ (G) $1,90 \cdot 10^{-7}$ (R)	$3,27 \cdot 10^{-7}$ (G)
09.- 17.04.84	Aquifer- test	Wasser	576	217,4	0,0008	164	200	N. O.-H. 3320-3488 m, P1, P2, P4	$2,41 \cdot 10^{-7}$ (G) $2,28 \cdot 10^{-7}$ (T) $1,42 \cdot 10^{-7}$ (R)	$3,24 \cdot 10^{-7}$ (G)
12.06.87	Auffüll- versuch	Wasser	~3,1	-	-	-	-	N. O.-H. 3320-3488 m, P1, P2, P4	-	$9,50 \cdot 10^{-7}$ (P)
13.06.87	1. Injek- tions- versuch	Wasser	10	-	0,0008	-	2,2	N. O.-H. 3320-3488 m, P1, P2, P4	$1,06 \cdot 10^{-6}$ (G)	-
14.- 15.06.87	2. Injek- tions- versuch	Wasser	121	~60	0,0020	207,8	26	N. O.-H. 3320-3488 m, P1, P2, P4	$1,63-8,87 \cdot 10^{-7}$ (A)	-

26.04.- 03.05.02	Produktionstest	Fluid	-78,5	-	0,0011	-	-	O.-H. 3320-4444 m, P1, P2, P4	$\sim 3,88 \cdot 10^{-7}$	-
06.- 11.06.02	Slugtest 2	Wasser	-	-	-	-	-	O.-H. 3320-4444 m, P1, P2, P4	-	$1,38 \cdot 10^{-6}$ (P)
25.- 27.06.02	Injektions- test 1	Wasser	-	-	0,0028	245	10,2	O.-H. 3320-4444 m, P1, P2, P4	$4,58 \cdot 10^{-7}$ (G)	-
27.06.- 01.07.02	Injektions- test 2	Wasser	-	-	0,0037	250	7,8	O.-H. 3320-4444 m, P1, P2, P4	$\sim 3,91 \cdot 10^{-7}$ (G)	-
01.- 07.07.02	Injektions- test 3	Wasser	-	-	0,00018	245	19,4	O.-H. 3320-4444 m, P1, P2, P4	-	$1,46 \cdot 10^{-7}$ (G)
08.- 12.07.02	Injektions- test 4	Wasser	-	-	0,00018	245	34,7	O.-H. 3320-4444 m, P1, P2, P4	$4,80 \cdot 10^{-7}$ (G)	$4,48 \cdot 10^{-7}$ (G)
21.08.02	Injektion / Stimula- tion (1)	Wasser	-	-	0,015 0,028 0,041	300 270 310	0,16 0,14 0,23	O.-H. 3320-4444 m, P1, P2, P4	$6,87 \cdot 10^{-7}$ (G)	$1,90 \cdot 10^{-6}$ (G)
21.08.02	Injektion / Stimula- tion (2)	Wasser	-	-	0,040	325	0,9	O.-H. 3320-4444 m, P1, P2, P4	-	$1,98 \cdot 10^{-6}$ (G), n $8,26 \cdot 10^{-7}$ (G), f
21.- 29.08.02	Injektion / Stimula- tion (3)	Wasser	-	-	0,050 0,010 0,006 0,004	334 330 335 340	170	O.-H. 3320-4444 m, P1, P2, P4	-	-
29.08.02	Fördertest	Fluid	-	-	< 0,0308	>160 < 150	3,5	O.-H. 3320-4444 m, P1, P2, P4	$7,33 \cdot 10^{-6}$ (G <sub>Q</sub> ) $2,08 \cdot 10^{-6}$ (G <sub>Q</sub> )	-
29.08.02	Injektion/ Stimula- tion (5)	Wasser	-	-	0,0910 0,0835	147,2	7,1	O.-H. 3320-4444 m, P1, P2, P4	-	-
29.- 30.08.02	Injektion/ Stimula- tion (6)	Wasser	-	237	0,0048	340	20,0	O.-H. 3320-4444 m, P1, P2, P4	$2,09 \cdot 10^{-6}$ (G)	-
12.09.02	Injektions- test, Teil 1	Wasser	-	-	0,0026	50,6	0,57	O.-H. 3320-4444 m, P1, P2, P4	$1,26 \cdot 10^{-6}$ (G)	-
12.- 20.09.02	Injektions- test	Wasser	-	-	0,0025 0,0018	174,7 165,5	160,3	O.-H. 3320-4444 m, P1, P2, P4	$6,07 \cdot 10^{-7}$ (G)	$1,40 \cdot 10^{-6}$ (G)
07.01.- 27.06.03	Fördertest	Fluid	-	-	< 0,00095	< 115	4176	O.-H. 3320-4444 m, P1, P2, P4	$5,54 \cdot 10^{-6}$ (G)	-
18.07.- 01.08.03	Langzeit- injektions- versuch	Wasser	-	-	0,00118 0,00195	84,5 148,1	137,7 239,2	O.-H. 3320-4444 m, P1, P2, P4	$3,60 \cdot 10^{-7}$ (G) $4,36 \cdot 10^{-7}$ (G)	$5,58 \cdot 10^{-7}$ (G)
01.- 12.08.03	Injektions- versuch	Wasser	-	-	0,0021	182,8	258	O.-H. 3320-4444 m, P1, P2, P4	$9,16 \cdot 10^{-7}$ (G)	-
22.-24.08. 03	Auslauf- test	Fluid	-	-	< 0,0024	< 80	19,4	O.-H. 3320-4444 m, P1, P2, P4	$1,67 \cdot 10^{-6}$ (G <sub>Q</sub> ) $1,37 \cdot 10^{-6}$ (G) $1,08 \cdot 10^{-6}$ (G)	-
24.- 27.08.03	Auslauf- test	Fluid	-	-	< 0,0032	< 70	63,6	O.-H. 3320-4444 m, P1, P2, P4	$1,93 - 7,05 \cdot 10^{-6}$ (G <sub>Q</sub> )	-
08.- 16.04.04	Injektions- test	Wasser	580	-	0,00085	58,6	192	O.-H. 3320-4444 m, P1, P2, P4	$3,54 \cdot 10^{-7}$ (G)	$\leq 1,56 \cdot 10^{-6}$ (G)

Auswerteverfahren: A: Agarwal et al. (1970), C: Cino et al. (1978), E: Earlougher & Kersch (1974), G: Geradlinienverfahren, G<sub>Q</sub> – s/Q  
Verfahren, L: lineargraphisch, P: Papadopulos et. Al. (1973), R: Russell & Truitt (1964), T: Theis (1935),  
Abkürzungen: n – Nahbereich, f – Fernbereich

**Tabelle 1: Zusammenstellung der hydraulischen Versuche mit Auswertungen in der Bohrung Urach 3 im Zeitraum 1978 - 2004**

Erst bei Überschreitung eines Mindestdruckes (Öffnungsdruck) reagiert das Gebirge elastisch. Diese **elastische Reaktion** wurde in der Bohrung Urach 3 in verschiedenen Tiefen mehrfach getestet. Abbildung 40 zeigt eine summarische Zusammenstellung der Versuche in der Bohrung Urach 3, die zwischen 1979 und 2003 durchgeführt wurden.

Die ausgefüllten Kreise in Abbildung 40 beziehen sich auf Versuche in den verschiedenen Open-Holes der Bohrung Urach 3, die offenen Kreise auf Versuche in den Perforationsstrecken (Tab. 1).

Abbildung 40 zeigt, dass bei allen Versuchen grundsätzlich mit steigender Injektionsrate  $Q$  eine markante Abnahme des spezifischen Kopfdruckes  $p/Q$  festzustellen ist, also genau umgekehrt als bei den klassischen Versuchen (Brunnentest) in der Wassererschließung. Die Abbildung veranschaulicht, dass in die Bohrung problemlos auch mit Raten von mehreren 10er l/s aufgrund der **elastischen Eigenschaften** des Gneisgebirges injiziert werden kann und dies bei relativ niedrigem spezifischem Druckaufbau (z.B. Abschnitt 2.7).

Die elastischen Eigenschaften zwischen Injektionsrate  $Q$  (l/s) und spezifischem Kopfdruck  $p/Q$  (bar.s/l) können für die Injektions- und Stimulationsversuche in den unterschiedlichen Open-Holes der Bohrung Urach 3 (inkl. Perforationsstrecken durch nachstehende Potentialfunktion (Gleichung 1) beschrieben werden.

$$p/Q = 154.5 Q^{-0.744} \quad (1)$$

Für die entsprechenden Versuche in den Perforationsbereichen gilt:

$$p/Q = 258.3 Q^{-0.710} \quad (2)$$

Die gefitteten Parameter für die einzelnen hydraulischen Tests in den verschiedenen Open-Holes zeigen keine großen Unterschiede. Ebenso gering sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Tests in den verschiedenen Perforationsbereichen. Daher werden hier lediglich die beiden gefitteten Potentialfunktionen für die Open-Holes einerseits und die Perforationsstrecken andererseits wiedergegeben.

Die beiden Funktionen (Gleichung 1 und 2) zeigen, dass die hydraulischen Tests in den Perforationsstrecken notwendigerweise zu höheren Drucken führen als diejenigen in den verschiedenen Open-Holes. Der größere Exponent bei den Tests im Perforationsbereich trägt diesem Umstand Rechnung; er bewirkt eine Parallelverschiebung der gefitteten Kurve in der Vertikalen nach "oben" zu höheren spezifischen Drucken. Der größere Faktor



der gefitteten Kurve für die Tests in den Perforationsbereichen (Gleichung 2) vermindert die Krümmung der Potenzialkurve, so dass sich die gefittete Kurve weiter vom Ursprung entfernt.

Das injizierte Wasservolumen gelangt durch länger andauernde Tests in das weitere Umfeld um das offene Bohrloch, verteilt sich und breitet sich als komprimiertes Fluid dem Gradienten folgend in weiter entfernte Gebirgsbereiche aus, allerdings mit sehr reduzierter, radial abnehmender Tendenz, da zum einen die Durchlässigkeit des Gneisgebirges grundsätzlich gering ist und da zum anderen der "Druckgradient" mit zunehmender Entfernung vom Bohrloch signifikant abnimmt. Lässt der Druck im Bohrloch nach, strömt das Injektionsgut, das sich zwischenzeitlich mit dem Formationsfluid vermischt, weitere Inhaltstoffe aufnahm und sich zunehmend erwärmte, dem Gradienten folgend wieder zurück Richtung Bohrung. Der Vorgang kehrt sich um, wie bei einem aufgepumpten Ballon, aus dem die eingepresste Luft wieder entweichen kann. Bei Unterschreitung des so genannten Öffnungsdruckes stellt sich aufgrund der Elastizität des Gebirges die ursprünglich vorhandene Wasserwegsamkeit weitgehend wieder her. Dieser Effekt wird gestützt durch die Messung einer vergleichsweise geringen Seismizität bei den Stimulationsversuchen, die vermuten lässt, dass das Gebirge unter keinem nennenswerten Stress steht, so dass es durch die massive hydraulische Stimulation auch nicht zu einem merklichen Versatz von Kluffflächen gegeneinander infolge Stressabbau kommt.

## **4. Durchlässigkeiten im höheren kristallinen Grundgebirge der Bohrungen Urach 3 und Urach 4**

### **4.1 Bohrung Urach 4**

Von der Bohrung **Urach 4** liegen dem RPF nur sehr wenige hydraulische Messdaten zu einem Injektionsversuch vor. In der Bohrung wurde am 23.03.2004 ein nur 15 Minuten dauernder Injektionsversuch, ein so genannter Leakoff-Test, mit stark schwankenden Raten von bis zu 168 l/min durchgeführt. Das gesamte Injektionsvolumen betrug 1214 l. Durch die Injektion stieg der Kopfdruck bis auf 144 bar an. Abbildung 41 zeigt den Versuchsablauf.

Leakoff-Test Urach 4 (ET: 2759 m), 23.03.2004

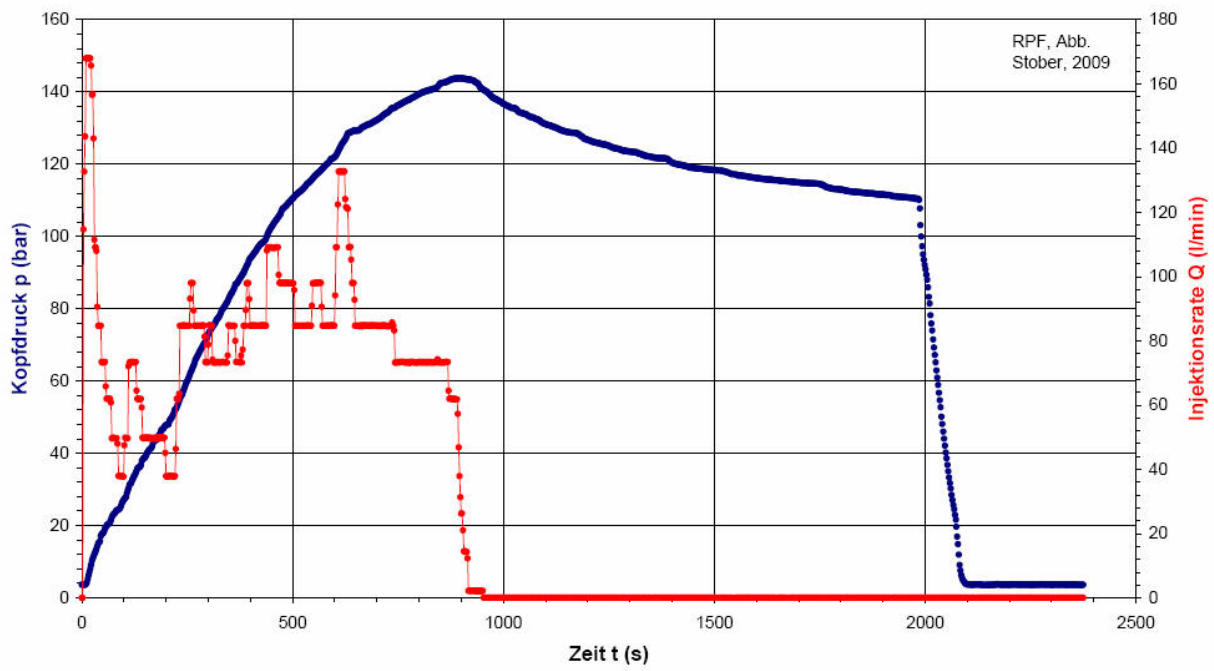


Abb. 41: Durchführung des Leakoff-Tests in der Bohrung Urach 4 am 23.03.2004

Spezifische Absenkung Leak-Off Test

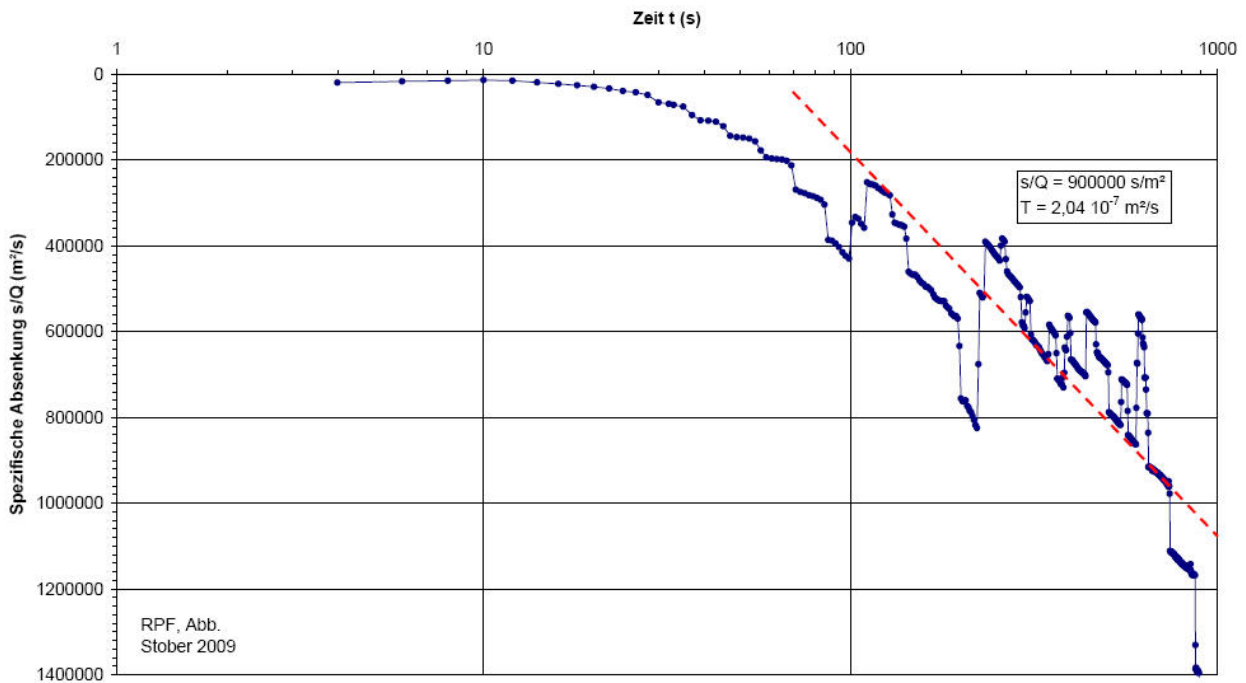
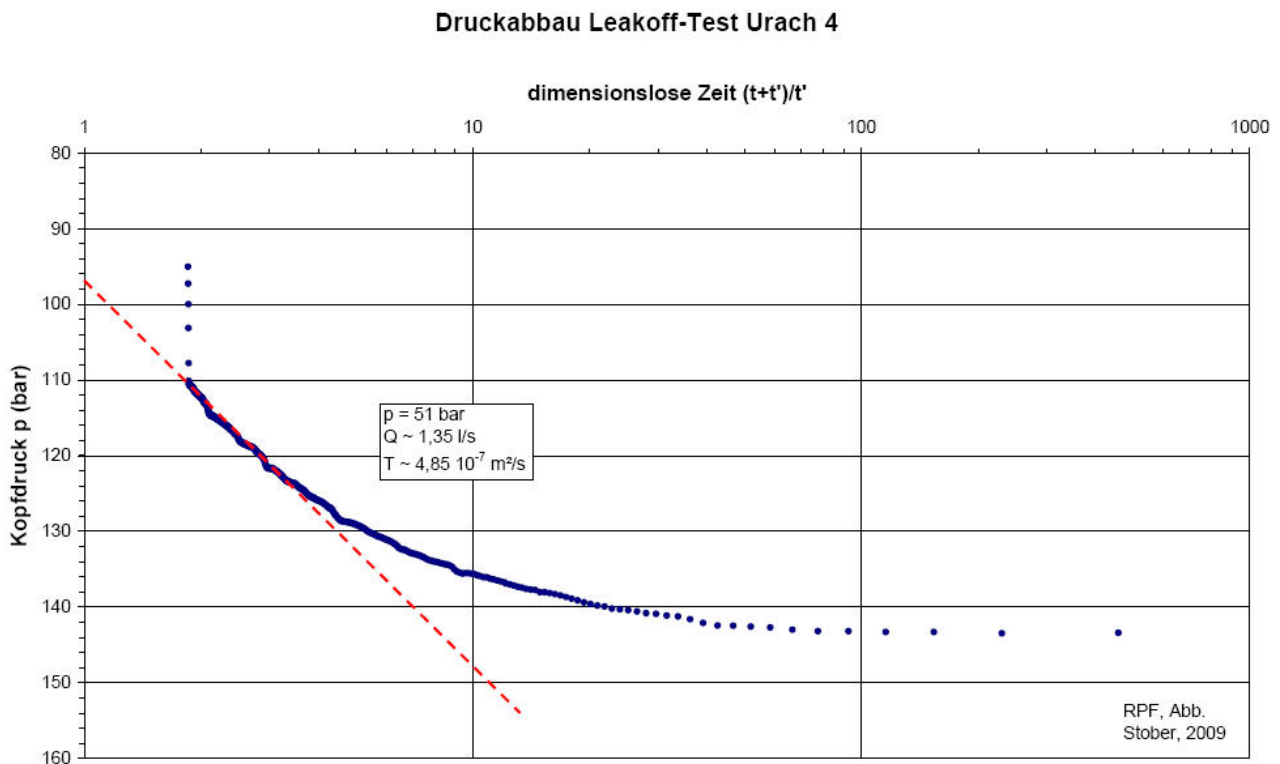


Abb. 42: Auswertung des Druckaufbaus beim Leakoff-Test in der Bohrung Urach 4

Zum Zeitpunkt des Leakoff-Tests war die Bohrung 2759 m tief. Die 8<sup>1/2</sup>“ offene Bohrlochstrecke lag während des Versuches zwischen 2400 m und 2759 m und hatte somit eine Länge von  $H = 359$  m. In der Bohrung Urach 3 konnte keine Reaktion auf den Injektionsversuch in der Bohrung Urach 4 festgestellt werden.

Auf Abbildung 42 wurde der spezifische Druckaufbau gegen den Logarithmus der Zeit aufgetragen und daraus die Transmissivität des getesteten Gebirgsabschnittes zu  $T = 2,04 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  ermittelt. Die starken Schwankungen der Injektionsrate sind auf der Abbildung deutlich erkennbar.



**Abb. 43: Auswertung des Druckabbaus des Leakoff-Tests in der Bohrung Urach 4**

Abbildung 43 zeigt die Auswertung des Druckabbaus auf einem so genannten Horner-Plot. Der Berechnung wurde eine mittlere Injektionsrate von  $Q \sim 1,35 \text{ l/s}$  zugrunde gelegt. Die Transmissivität wurde mit diesem Verfahren zu etwa  $T = 4,85 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  bestimmt.

Die Transmissivität liegt somit für den Gebirgsabschnitt zwischen 2400 m und 2759 m in der Bohrung Urach 4 bei etwa  $T = 3,45 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , d.h. die Durchlässigkeit kann zu ca.  $T/H = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$  abgeschätzt werden.

## 4.2 Bohrung Urach 3

Aus dem höheren Bereich im kristallinen Grundgebirge, das durch die Bohrung Urach 3 erschlossen wurde, liegen dem RPF nur aus dem **Teufenbereich zwischen 1760 m und 1784 m Tiefe** vertrauensvolle Ergebnisse zur Transmissivität vor (Tab. 1). Für diesen Teufenbereich kann eine Durchlässigkeit von  $T/H = 2,0 \cdot 10^{-7}$  m/s veranschlagt werden. Die Transmissivität ist in diesem Bereich etwa um eine Größenordnung höher als diejenige des derzeitigen Open-Holes (Abschnitte 2.1, 2.5, 3), das auch nach den Aufnahmen von Dr. Hann (Abschnitt 5) in einem Bereich geringerer Durchlässigkeit liegt.

Nach den Untersuchungen in Abschnitt 2.2 scheint die Transmissivität für den **Teufenbereich 1809 – 2802 m** ebenfalls größer zu sein, als im derzeitigen Open-Hole. Allerdings ließen sich aus den Versuchsdaten nur grobe Abschätzungen vornehmen. Aus der für diesen Bereich näherungsweise berechneten Transmissivität von  $T = 8,22 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s ergibt sich eine mittlere Durchlässigkeit von  $T/H = 8,27 \cdot 10^{-10}$  m/s. Allerdings gelten auch hier dieselben Anmerkungen zur Ermittlung der Durchlässigkeit aus Tests, die über sehr lange Teststrecken durchgeführt wurden, wie sie in Abschnitt 3 im Detail aufgeführt sind. Die hier angegebene Durchlässigkeit liegt daher eher an der unteren Grenze. Andererseits stellen Werte, wie sie im Teufenabschnitt 1760 – 1784 m beobachtet wurden, sicherlich eine Ausnahme für einzelne lokale Gebirgsabschnitte dar.

Untersuchungen im kristallinen Grundgebirge in SW-Deutschland und angrenzender Gebiete haben gezeigt, dass die Durchlässigkeit von Gneisgebirgen im Mittel bei  $T/H = 5,0 \cdot 10^{-8}$  m/s liegt (Stober 1995). Da die Durchlässigkeit mit zunehmender Tiefe jedoch abnimmt, ist von einem etwas niedrigeren Wert auszugehen (Stober & Bucher 2007).

Für die geplante Modellierung im **Teufenbereich 2300 – 2800 m** wird daher eine natürliche Durchlässigkeit zwischen  $T/H = 1,0 \cdot 10^{-9}$  m/s und  $T/H = 2,0 \cdot 10^{-8}$  m/s empfohlen.

Eine Zunahme der Durchlässigkeit wird erst bei Überschreitung des so genannten **Öffnungsdruckes**, der im Teufenbereich von 2500 m bei etwa 130 – 150 bar Kopfdruck liegen dürfte, erwartet (Stober 1986). Die vorgenommene Abschätzung zur Berechnung des Öffnungsdruckes basiert auf ähnlichen petrophysikalischen Eigenschaften des Gebirges (Gesteinsdichte, Poissonzahl, Neigungswinkel der meisten Klüfte, u.a.) wie im tieferen Bereich der Bohrung.

Bei Injektionen oberhalb von ca. 130 – 150 bar Kopfdruck kann mit zunehmend höheren Zirkulationsraten gefahren werden, ohne dass der Druck in entsprechender Höhe ansteigt.

Der spezifische Druck und die Injektionsrate dürften in diesem Tiefenbereich (2300 – 2800 m) analog den Ergebnissen in Abschnitt 3, in dem für Tiefen in über 3320 m eine Beziehung zwischen spezifischen Druck und Injektionsrate abgeleitet wurde, einer Potentialfunktion folgen. Für eine erste grobe Abschätzung für die Größe des Kopfdruckes  $p$  (bar) für Injektionsversuche, die mit entsprechend hohen Injektionsraten  $Q$  (l/s) gefahren werden, kann bei Annahme einer mittleren Durchlässigkeit von  $T/H = 6,0 \cdot 10^{-9}$  m/s, bzw. Transmissivität von  $T = 3,0 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, für den Tiefenbereich 2300 – 2800 m nachstehende Gleichung benutzt werden:

$$p/Q = 278,6 Q^{-0.744} \quad (3)$$

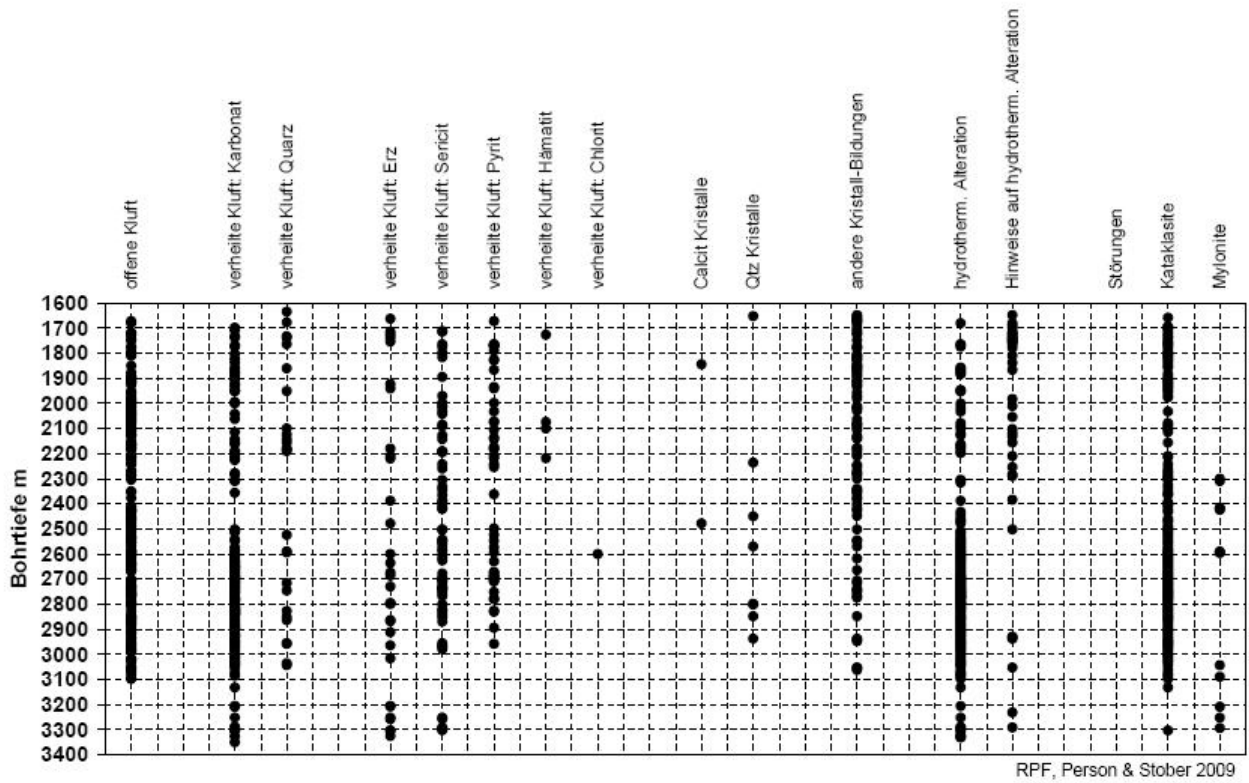
## 5. Potenziell stärker Wasser führende Zonen und hydraulisch dichtere Bereiche auf der Basis der geologischen Aufnahmen

Die von Herrn Dr. Hann, Geologisches Institut Universität Tübingen, Herrn Dr. Martin und Herrn Zedler, beide RPF Abt. 9 LGRB, vorgenommenen Aufnahmen der Bohrungen Urach 3 und 4 wurden dazu benutzt, um daraus auf potentiell stärker Wasser führende Zonen und auf hydraulisch dichtere Bereiche zu schließen und um zu versuchen, die Ergebnisse der beiden Bohrungen miteinander zu korrelieren.

Zu diesem Zweck wurde die geologische Aufnahme zunächst auf „**offene Klüfte**“ in der Beschreibung der Meißelproben durchsucht, wobei allerdings nicht immer ersichtlich war, ob damit Klüfte in einzelnen Mineralen, Kristallen oder in der Matrix gemeint waren. Im Gegensatz dazu wird davon ausgegangen, dass „**verheilte Klüfte**“, insbesondere mit Quarz oder Pyrit verheilte Klüfte, keine marginale hydraulische Wegsamkeit aufweisen.

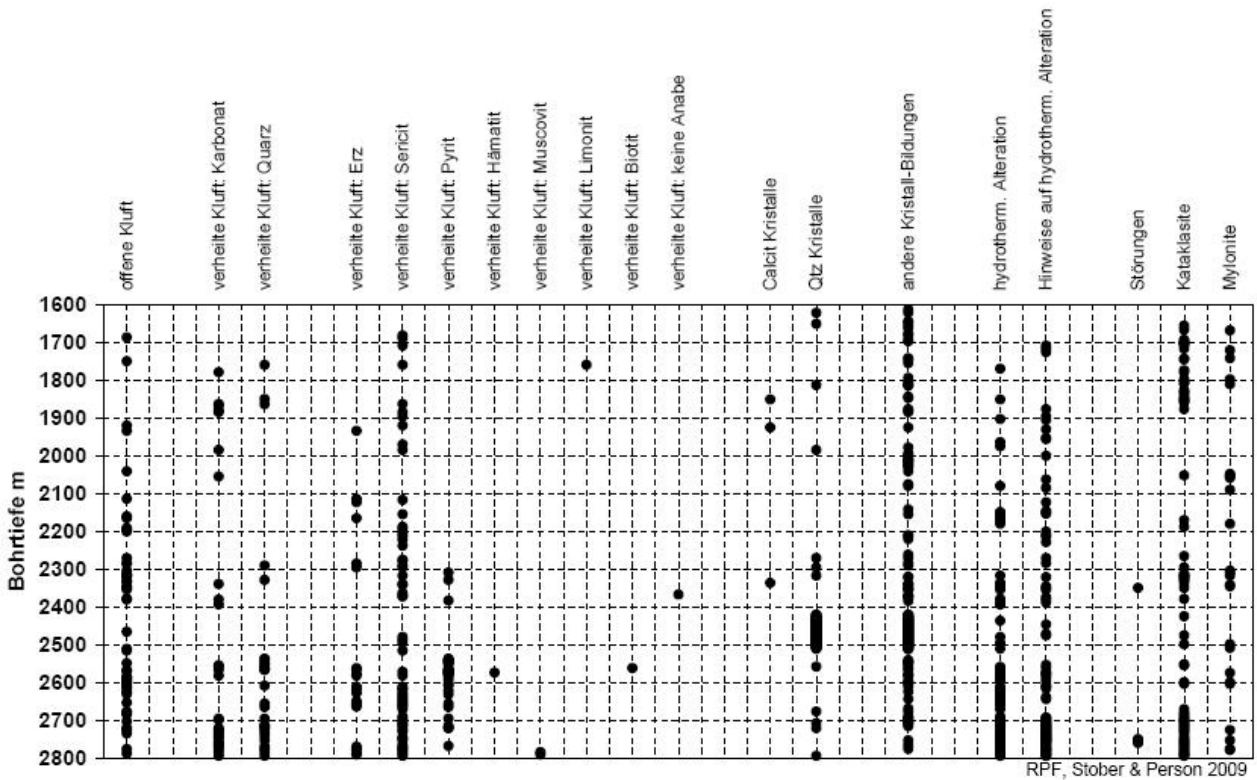
Die geologische Aufnahme von Dr. Hann wurde auch nach einzelnen **Kristallbildungen** gesichtet, da davon ausgegangen wird, dass beispielsweise Quarz- oder Calcitkristalle in Fluid erfüllten Hohlräumen auftreten. Die geologische Aufnahme gestattete jedoch nicht immer eindeutig eine Zuordnung, ob Einzelkristalle oder eine Kristallumbildung in der Matrix gemeint war. Rein aus Gründen der Vollständigkeit sind neben den Quarz- und Calcitkristallen weitere Kristallbildungen aufgeführt.

Aus der geologischen Aufnahme wurden zusätzlich Zonen mit einer **hydrothermalen Alteration** zusammengestellt, als Bereiche ehemaliger und daher vielleicht auch rezenter Wasserführung. Hinweise auf hydrothermale Alterationen wie karbonatisierte Feldspäte oder gebleichte Biotite wurden aus diesem Grund separat zusammengestellt.



RPF, Person & Stober 2009

Abb. 44: Potenziell stärker Wasser führende Zonen und hydraulisch dichtere Bereiche in der Bohrung Urach 3



RPF, Stober & Person 2009

Abb. 45: Potenziell stärker Wasser führende Zonen und hydraulisch dichtere Bereiche in der Bohrung Urach 4

Da **Störungen** oftmals Bereich verstärkter Wasserführung darstellen, wurden aus der Aufnahme von Dr. Hann Störungen bzw. Störungsflächen zusammengestellt, ebenso **Kataklasite**, oder auch kataklastische Quarze oder Feldspäte oder vermutete Kataklaste. Zusammengestellt wurden ebenfalls **Mylonite**, aber auch z. B. mylonitisch rekristallisierte Quarze oder „mylonitische Aspekte“ oder mylonitischer Gneis.

In den Abbildungen 44 und 45 sind diese Informationen für die Bohrungen Urach 3 und Urach 4 zusammengestellt. Die Abbildungen zeigen, dass demnach in beiden Bohrungen Bereiche mit sehr unterschiedlichen Durchlässigkeiten zu erwarten sind. So werden beispielsweise in der Bohrung Urach 4 offene Klüfte verstärkt im Tiefenbereich 2250-2370 m und 2540-2750 m angetroffen. In der Bohrung Urach 3 sind die Zonen mit offenen Klüften anscheinend verstärkt ausgebildet, dennoch liegen auch hier Zonen mit unterschiedlicher Klüftigkeit vor, wie z.B. im Bereich 2300 – 2400 m Tiefe, der sich durch deutlich weniger offene Klüfte auszeichnet.

In beiden Bohrungen können hydrothermale Alterationen verstärkt unterhalb von 2500 m vor (bis 2800 m, ET von Urach 4) beobachtet werden. In der deutlich tieferen Bohrung Urach 3 fällt auf, dass ab etwa 3100 m Tiefe mit einer markanten Abnahme der Anzahl offener Klüfte, von Kataklasiten und letztlich auch hydrothermalen Alteration zu rechnen ist.

Auf der Basis dieser Auswertung allein scheint jedoch keine Korrelation zwischen den beiden Bohrungen Urach 3 und Urach 4 möglich zu sein.

## 6. Wasserproben aus der Bohrung Urach 3

Dem RPF wurden von den Stadtwerken Bad Urach verschiedene Wasserproben aus dem Jahr 1979 übergeben. Es handelte sich zum einem um 1 l Polybottles zum anderen um kleine braune Flaschen, wie sie vom ehemaligen Geologischen Landesamt für Markierungsversuche verwendet wurden. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Beprobungszeitpunkte mit Angabe der Uhrzeit. Soweit die Etiketten auf den Flaschen noch lesbar waren, wurde der entsprechende Text in die Spalte 4 der Tabelle übernommen. Am Flaschenboden befand sich mehr oder weniger viel Bodensatz.

Die Wasserproben wurden vom geowissenschaftlichen Labor des RPF (Abt. 9, LGRB) auf Uranin untersucht. Die Wasserproben wurden aufgrund ihres teilweise hohen

Trübstoffgehaltes zunächst aufwändig filtriert. Die verbleibende Restwassermenge erlaubte nur bei einer Probe eine weitergehende hydrochemische Untersuchung.

Datum	Uhrzeit	Flasche	Etikett	Auffälligkeiten
13.06.79	15:30	1 l Polybottle	Superprop 20/40, Frac 3, 2. Perforation (3271-3276m), Stützmittel mit Gel, 30 g/l, 1. Stufe	gelblicher Bodensatz mit Ausfällungen (0,5 cm)
13.06.79	15:30	1 l Polybottle	Superprop 20/40, Frac 3, 2. Perforation (3271-3276m), Stützmittel mit Gel, 120 g/l	dunkler Bodensatz mit Ausfällungen (0,5 cm)
18.06.79	13:30	klein, braun	Rücklauf am Ringraum, DP/7", Frac 2/3	Bodensatz mit Ausfällungen (0,5 cm), Schwebstoffe
18.06.79	13:40	klein, braun	Rücklauf	Bodensatz mit Ausfällungen (1 cm)
21.06.79	10:50	klein, braun	Rücklauf vom Gestänge, Wasserprobe aus dem Frac-Bereich 3 (2. Perforation 3271-3276)	Bodensatz mit Ausfällungen (0,3 cm)
22.06.79	10:50	klein, braun	Rücklauf (Ringraum 7"/Gestänge), Wasserprobe Frac-Bereich2 (1. Perforation 3259-3264m)	etwas Bodensatz mit Ausfällungen
22.06.79	17:30	klein, braun	Rücklauf (Gestänge), Wasserprobe Frac-Bereich3, 2. Perforation 3271-3276m	etwas Bodensatz mit Ausfällungen
22.06.79	17:30	klein, braun	Rücklauf (Ringraum Bereich/7"), Wasserprobe Frac-Bereich 2, 1. Perforation 3259-3264m	etwas Bodensatz mit Ausfällungen
08.07.79		1 l Polybottle	Schaum aus Schlammgrube, nach Zirkulation und Eingabe von Uranin	braun

**Tabelle 2: Übersicht über die Wasserproben aus der Bohrung Urach 3 von einem Markierungsversuch mit Uranin**

In den beiden Proben vom 18.06.79 war Uranin mit bloßem Auge noch gut an seiner grüngelb fluoreszierenden Farbe erkennbar. Die Sichtbarkeitsgrenze von Uranin liegt bei 10 - 30 µg/l. Die Proben wurden mit dem Fluoreszenz-Spektrometer des geowissenschaftlichen Labors des RPF untersucht. Durch die relativ hohen pH-Werte (Tab. 3) war gewährleistet, dass Uranin nahezu seine maximale Fluoreszenz erreichte. Auffallend war, dass die Spektren teilweise schwach zum kürzer- oder längerwelligen Bereich um 2 - 8 nm verschoben waren. Gründe dafür können zum einen die zum Teil hohen Uraninkonzentrationen sein, zum anderen Veränderungen des Uraninmoleküls durch Alterungsprozesse wie zum Beispiel Abbau- oder Umbauprozesse. In jedem Fall war es möglich, die Uraningehalte in den Proben trotz der 30 jähriger Standzeit (in einem kühlen, dunklen Raum) zu ermitteln.

Uranin gehört zwar zu den gering sorptiven Stoffen, dennoch kann sich in Gegenwart von Feststoffen (Bodensatz bzw. Schwebstoffe, vgl. Tab. 2) ein Sorptionsgleichgewicht ausbilden, was je nach Korngröße und Material unterschiedlich ausfallen kann. Bei den Proben, die in Kunststoffbehältern aufbewahrt wurden, können außerdem Verluste durch



Sorption von Uranin an der Gefäßwandung aufgetreten sein. Die tatsächlichen Uraningehalte könnten daher aus den oben genannten Gründen zum Zeitpunkt der Probennahme eventuell höher gewesen sein als die jetzt nach 30 Jahren analysierten Werte (Tab. 3).

Leider ist es nicht möglich die Wasserproben einem einzigen Versuch zuzuordnen. Der aus der Literatur bekannt Tracerversuch wurde erst am 07.07.79 durchgeführt (Schädel & Dietrich 1979). Der Tracerversuch vom 07.07.09 erbrachte den Nachweis, dass das in die Perforationsbereiche (P1, P2, P3) injizierte Wasser über das Kluftsystem im Gebirge wieder zurück ins Open-Hole gelangte.

Datum	Uhrzeit	pH-Wert	Uranin-Gehalt [ $\mu\text{g/l}$ ]
13.06.1979	15:30	8,83	2,20
13.06.1979	15:30	8,00	0,95
18.06.1979	13:30	7,83	321,00
18.06.1979	13:40	8,41	883,00
22.06.1979	10:50	8,15	24,10
22.06.1979	10:50	8,11	18,20
22.06.1979	17:30	8,11	29,20
22.06.1979	17:30	8,13	18,00
08.07.1979	-	7,4	102,5

**Tabelle 3: Uraningehalte und pH-Werte der Wasserproben**

Zum Zeitpunkt der in den Tabellen 2 und 3 aufgelisteten Proben wurden zwei Frac-Versuche auf die 2. Perforation (13.06.1979) und die 1. Perforation (18.06.1979) sowie ein Leak-off-test (19.06.1979) in der ersten Perforation durchgeführt. Um diese verschiedenen Versuche in der Bohrung Urach 3 ausführen zu können, mussten jeweils zuvor Packer gesetzt und anschließend wieder gezogen werden. Bei den Frac-Versuchen auf die Perforationen wurde zusätzlich zum Markierungsstoff ein Gel-Propping-Gemisch eingebracht.

Die beiden Proben vom 13.06.79 (Tab. 3) wurden offensichtlich während des zweiten Frac-Versuches (test no. 3.3) auf die 2. Perforation gezogen. Zu diesem Zeitpunkt befand sich oberhalb des Open-Holes bei 3306 m zur Abdichtung eine Zementbrücke (Bridgeplug) und zwischen der Perforation 2 (3271-3276 m) und der Perforation 1 (3259-3264 m) ein Packer. Die Perforation 3 war noch nicht ausgeführt. Die Injektion beim Frac-Versuch erfolgte über ein 3<sup>1/2</sup>"-Gestänge. Die vorliegenden Wasserproben (Tab. 2) entstammen dem 3<sup>1/2</sup>"-Gestänge, dem Bereich, der mit der 2. Perforation verbunden ist. Sie entstammen nicht dem 7"-Ringraum, zu dem die 1. Perforation Verbindung hat. Die vorliegenden Wasserproben haben somit keine Zirkulation über das Gebirge nachgewiesen.

Bei den Proben vom 18.06.1979 war ein Bridgeplug bei 3269 m Tiefe gesetzt, d.h. zwischen der ersten und zweiten Perforation. Der Packer befand sich bei 3216 m Tiefe, d.h. oberhalb der 1. Perforation. Der Frac-Versuch auf die 1. Perforation wurde am 18.6. mit Gel- und Propping-Material durchgeführt und dabei Kopfdrucke bis 650 bar erreicht (test no. 2.3). Im Anschluss an den Frac-Versuch wurden der Druckabbau und der Rücklauf gemessen. Die beiden Markierungsversuchsproben entstammen somit dem Perforationsbereich P1, in den der Tracer beim Fracen hineingepumpt und aus dem er wieder zurückfloss. Dies erklärt auch die hohe Konzentration des Markierungsstoffes.

Im Anschluss an den Frac-Versuch auf die 1. Perforation wurde am 19.06.1979 unter den gleichen Ausbaubedingungen zusätzlich ein Leak-off-Test ausgeführt. Im Anschluss daran wurde vom 20.-22.06.79 ein weiteres Bridgeplug bei 3304 m, d.h. genau oberhalb des ersten Bridgeplugs, gesetzt. Außerdem wurde ein Packer bei 3267 m, d.h. zwischen die beiden Perforationsbereiche, gesetzt. Der Versuchsaufbau entsprach daher weitgehend dem Test vom 13.06.1979. Aus den Unterlagen ist jedoch kein Versuch für den 22.06.1979 dokumentiert. Die Versuche starteten erst am 23.06.79. Wahrscheinlich handelt es sich bei den Proben noch um Reste des Rücklaufs des Frac-Versuches vom 13.06.79, die jetzt mit erneutem Öffnen des zuvor abgeschlossenen Bohrlochabschnittes unterhalb von 3269 m wieder zutage traten.

Die Uranin-Gehalte in den beiden Wasserproben aus dem 7"-Ringraum vom 22.06.79 (Tab. 3) könnten somit belegen, dass beim Frac-Versuch auf die 2. Perforation zwischen den beiden Perforationen nicht nur eine Druck-Verbindung, wie bei Schädel & Dietrich (1979) ausgeführt, sondern dass auch eine hydraulische Verbindung über das Gebirge bestand. Die Tracerproben könnten über die 2. Perforation in das Gebirge hinein gelangt sein und aus der 1. Perforation aus dem Gebirge wieder zurück in die Bohrung. Dieser Versuch könnte somit eine erste Zirkulation von der Bohrung in das Gebirge und wieder zurück belegen. Andererseits ist jedoch auch eine Kontamination durch den Tracerversuch vom 18.06.79 nicht völlig auszuschließen.

Das hydrochemische Labor der Abt. 9 im RPF untersuchte eine abfiltrierte Wasserprobe vom 13.06.1979 (15:30 Uhr) auf die Hauptinhaltsstoffe. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 4. Der Gesamtlösungsinhalt liegt bei 1197 mg/l. Die ausgefallenen und ausgefilterten Inhaltsstoffe fehlen natürlich in der Analyse. Das Wasser hat einen ungewöhnlich hohen Nitratgehalt. Es handelt sich um kein Tiefenwasser aus dem Kristallin. Zum Vergleich wurde eine Wasseranalyse aus der Erms, dem Flüsschen durch Bad Urach, aus demselben Zeitraum in die Tabelle 4 eingetragen. Beide Wässer sind jedoch

grundverschieden. Die Wasserprobe aus der Bohrung Bad Urach muss daher künstliche Zusatzstoffe enthalten, die mit dem Bohren und/oder den Frac-Arbeiten in Verbindung standen.

Parameter	Wert	Ermswasser vom 21.05.79
pH-Wert (Labor)	8,12	8,35
el. Leitfähigkeit (25 °C)	1395 µS/cm	480
Calcium	91,9 mg/l	110,2
Magnesium	30,6 mg/l	0,9
Natrium	189 mg/l	-
Kalium	8,24 mg/l	-
Chlorid	55,6 mg/l	29,5
Hydrogencarbonat	482 mg/l	297,7
Nitrat	222 mg/l	14,6
Sulfat	106 mg/l	15,4
Phosphat	0,204 mg/l	0,51
Fluorid	190 µg/l	-
Bromid	150 µg/l	-
Kieselsäure (SiO <sub>2</sub> )	11,4 mg/l	5,5
Ionenbilanzfehler	1,70 %	-

**Tabelle 4: Ergebnisse der hydrochemischen Analyse der Probe vom 13.06.79**

## 7. Dank

Vielen Dank Herrn Dr. H.-G. Dietrich für vielseitige Unterstützung, ebenso den Herren H. Stang der Firma Q-con und F. Ronschke der Fa. GEO-data. Den studentischen Hilfskräften des RPF Johannes Dick und Ralf Person recht herzlichen Dank für die Unterstützung bei der Konvertierung und Ausdünnung der hydraulischen Testdaten.

## 8. Literatur

Schädel, K. & Dietrich, H.-G. (1979): Results of the Fracture Experiments at the Geothermal Research Borehole Urach 3.- In: Haenel, R. (ed): The Urach Geothermal Projekt (Swabian Alb, Germany), p.323-344, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

Schädel, K. & Stober, I. (1982): Ingenieurgeologische Probleme bei der Schaffung von Wärmeaustauschflächen im Kristallin (Hot Dry Rock).- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Dokumentation 59: Geothermie, S. 91-94, 6 Abb., Zürich.

- Schädel, K. & Stober, I. (1983): Jahresbericht: Felsmechanik – Geohydraulik (1982/83) des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg, Freiburg (unveröffentlicht).
- Stadtwerke Bad Urach (SWU) (1983): Erweiterte Zirkulation wässriger Fluide im Hot Dry Rock-System (Gneisgebirge) der Bohrung Urach 3.- 1. Zwischenbericht, Berichterstatter: Dr. H.-G. Dietrich, Bad Urach (unveröffentlicht).
- Stadtwerke Bad Urach (SWU) (1984): Erweiterte Zirkulation wässriger Fluide im Hot Dry Rock-System (Gneisgebirge) der Bohrung Urach 3.- 2. Zwischenbericht, Berichterstatter: Dr. H.-G. Dietrich, Bad Urach (unveröffentlicht).
- Schädel, K. & Stober, I. (1984): Auswertung der Auffüllversuche in der Forschungsbohrung Urach 3.- Jh. Geol. Landesamt Baden-Württemberg, H. 26, S. 27-34, Freiburg.
- Dietrich, H.-G., Althaus, E., Bauer, F., Hänel, R., Michel, W., Neth, G., Schädel, K., Stober, I. & Zoth, G. (1985): Erweiterte Zirkulation wässriger Fluide im Hot Dry Rock-System (Gneisgebirge) der Bohrung Urach 3.- Statusbericht zum Forschungsvorhaben 03E-6060-A, S. 74.-86, KFA Jülich.
- Stadtwerke Bad Urach (SWU) (1985): Erweiterte Zirkulation wässriger Fluide im Hot Dry Rock-System (Gneisgebirge) der Bohrung Urach 3.- 3. Zwischenbericht, Berichterstatter: Dr. H.-G. Dietrich, Bad Urach (unveröffentlicht).
- Stober, I. (1986): Strömungsverhalten in Festgesteinsaquiferen mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen.- Geologisches Jahrbuch Reihe C, Heft 42, 204 S., Hannover.
- Jung, R. (1987): Ergebnisse eines hydraulischen Intervalltests in der Forschungsbohrung Urach 3.- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Archiv-Nr.: 101277, Tagebuch-Nr.: 12092/87, 21 S., Hannover.
- Schädel, K. & Stober, I. (1987): Zwischenbericht der Auswertung der hydraulischen Versuche in der Forschungsbohrung Urach 3 vom Juni 1987.- Bericht des Geologischen Landesamts, 17 S., 14 Anl., Freiburg (unveröffentlicht).
- Stadtwerke Bad Urach (SWU) (1987): Erweiterte Zirkulation wässriger Fluide im Hot Dry Rock-System (Gneisgebirge) der Bohrung Urach 3.- Endbericht, Berichterstatter: Dr. H.-G. Dietrich, Bad Urach (unveröffentlicht).
- Dietrich, H.-G., Althaus, E., Bauer, F., Draxler, J., Hänel, R., Michel, W., Neth, G., Schädel, K., Stober, I., Schellschmidt, R., Tenzer, H., Zoth, G. (1988): Erweiterte Zirkulation wässriger Fluide im Hot Dry Rock-System (Gneisgebirge) der Bohrung Urach 3.- Statusbericht zum Forschungsvorhaben 03E-8060-A, S. 401-412, KFA Jülich.
- Stober, I. (1995): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges.- Enke Verlag, 191 S., Stuttgart.

Franz, M. & Stober, I. (2004): Geologische und hydrogeologische Untersuchungen im Zuge der Planung für die zweite Tiefbohrung für das HDR-Projekt in Bad Urach.- Bericht des LGRB vom 10.01.04, Freiburg (unveröffentlicht).

Stober, I. (2004): Hydrogeologische Untersuchungen im kristallinen Grundgebirge im Zuge der Planung für die zweite Tiefbohrung für das HDR-Projekt in Bad Urach.- Ber. Naturf. Ges. Freiburg i.Br., H. 95/1, S. 237-253, Freiburg.

Stober, I. & Bucher, K. (2007): Hydraulic properties of the crystalline basement.- Hydrogeology Journal, 15, 213-224.