

Erschließung von Thermalwasser in Waldshut-Tiengen

Ingrid Stober & Roland Vicedom

Stichwörter

kristallines Grundgebirge, Thermalwasser, Geothermie, hydraulische Tests, Hydrochemie

Zusammenfassung

Nach seismischer Vorerkundung wurde im Jahre 2001 im Schlüchtal bei Waldshut-Tiengen eine Erkundungsbohrung auf Thermalwasser („Geothermiebohrung“) niedergebracht. Analog zu dem bekannten Wasservorkommen in Zurzach/Schweiz suchte die Stadt Waldshut-Tiengen nach Thermalwasser, das für die geplante Sanierung des Freibades in Tiengen genutzt werden konnte. Zur Erreichung einer Mindesttemperatur von $> 20\text{ °C}$ verlief die Bohrung bis 120 m im Deckgebirge, darunter bis 603 m (Endteufe) im Grundgebirge des hier nach Süden abtauchenden Schwarzwaldes. Im Anschluss an hydraulische Testversuche und Bohrlochmessungen wurde die Bohrung zur Produktionsbohrung erweitert. Ein im Jahr 2002 laufender Dauerpumpversuch wies eine förderbare Wassermenge von 2,3 l/s bei einer Absenkung im Bohrloch von ca. 135 m nach. Die Transmissivität des durch die Bohrung erschlossenen kristallinen Grundgebirges berechnete sich zu $T = 3,95 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Die Temperatur des aus dem Grundgebirge mit fast 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ mineralisierten Wassers betrug 24,4 °C. Gefördert wird ein $\text{Na-SO}_4\text{-HCO}_3$ -Wasser mit einem ungewöhnlich hohen Fluoridgehalt von 10,8 mg/l. Im Ruhezustand ist die Bohrung artesisch gespannt. Während des Dauerpumpversuches wurden Wasserstandsmessungen im Umkreis der Bohrung und in Zurzach zur Beweissicherung durchgeführt. Eine gegenseitige Beeinflussung war nicht feststellbar.

Anschriften d. Verf.:

Prof. Dr. Ingrid Stober

Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Albertstraße 5, D-79104 Freiburg i. Br.

Dipl.-Geol. Roland Vicedom

Fritz Planung GmbH, Am Schönblick 1, D-72574 Bad Urach

A new borehole for thermal water

Key words

crystalline basement, thermal water, permeability, hydrochemical properties

Abstract

During 2001 an exploration well was drilled in SW-Germany at the margin of the Black-Forest near the Swiss border. The aim was to get thermal water for geothermal purposes. The well has a total depth of 603 m. Below a sedimentary cover of 120 m thickness we drilled in crystalline basement rocks with gneisses and granites alternating. In the production well a long term pumping test with a rate of 2.3 l/s was carried out and water samples for chemical analyses and isotopic investigations were taken. The transmissivity of the crystalline basement aquifer is on the order of $T = 3.95 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. The thermal water can be characterized as $\text{Na-SO}_4\text{-HCO}_3$ -type with an amazing amount of fluoride: 10.8 mg/l.

1. Einleitung

Waldshut-Tiengen liegt im westlichen Klettgau am Südostrand des Schwarzwaldes. Hier taucht der Schwarzwaldschild unter dem Hochrhein nach Süden ab und wird von immer jüngeren Sedimenten des Deckgebirges (Trias, Jura) überdeckt. Südlich des Rheins beginnen bereits der Schweizer Tafeljura und der Aargau (METZ 1980, METZ & REIN 1958).

Das kristalline Grundgebirge des Schwarzwaldes, aus dem die Geothermiebohrung Waldshut-Tiengen und die Thermalquellen von Zurzach gespeist werden, steigt nördlich von Waldshut-Tiengen schnell auf über 1000 m an. Hydrographisch ist das Gebiet durch den von Ost nach West fließenden Hochrhein und seine Nebenflüsse Wutach und Aare geprägt. In die Wutach entwässern bei Tiengen die Schlücht und die Steina. Der Verlauf der beiden Flüsse dürfte durch nach Norden gerichtete tektonische Schwächezonen geprägt sein (BITTERLI & MATOUSEK 1991).

Ziel der Erkundung war die Erschließung von Thermalwasser, d. h. Wasser, dessen Temperatur am Ort der Entnahme am Bohrlochkopf mehr als 20 °C aufweist. Da im benachbarten Zurzach für den Badebetrieb Thermalwasser mit einer Temperatur von über 30°C genutzt wird, vermutete man auch auf der deutschen Rheinseite ein ähnliches Vorkommen.

Problematisch war die Tiefenlage des artesisch gespannten Grundwassers, das in Zurzach direkt an der Erdoberfläche austritt, in Waldshut-Tiengen dagegen erst unter einer sedimentären Deckschicht von 120 m erschlossen werden musste. Neben der Wassertemperatur und dem Chemismus musste auch ein entsprechendes Hohlraumvolumen im Gestein zur Gewährleistung ausreichender Wassermengen vorhanden sein, was in Grundgebirgsgesteinen nicht immer realisiert werden kann. Zur Lokalisierung von geologischen Strukturen wie Störungen und größeren Kluftsystemen, die eine höhere Wasserführung erwarten lassen,

Erschließung von Thermalwasser in Waldshut-Tiengen

wurden daher vorab im Schlüchtal seismische Messungen zur Lokalisierung einer Probebohrung durchgeführt.

Die Bohrarbeiten und alle hydraulischen Testversuche wurden beim Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden Württemberg (LGRB) bzw. der Unteren Wasserbehörde (Landratsamt Waldshut) in Form eines Betriebsplans beantragt und in Folge zugelassen. Wegen der angrenzenden Wohnbebauung waren zusätzliche Lärmschutzmaßnahmen erforderlich. Da die Gemeinde Zurzach (Schweiz) und die dort ansässige „Thermalquelle AG Zurzach“ Bedenken gegen eine mögliche Übernutzung eines potentiell gemeinsamen Wasservorkommens vortrug, musste von der Stadt Waldshut-Tiengen ein langer Behördenweg beschritten werden. Alle geplanten Maßnahmen wurden beim LGRB beantragt und zusammen mit dem Landratsamt Waldshut, dem Regierungspräsidium Freiburg i. Br. sowie dem Baudepartement des Kantons Aargau, Schweiz, berg- und wasserrechtlich geprüft und letztlich genehmigt.

Die Geothermiebohrung Waldshut-Tiengen und die Lage des Thermalbades in Zurzach sind in der Übersichtskarte (Abb. 1) dargestellt. Die Luftlinienentfernung zwischen beiden Lokalitäten beträgt ca. 5 km.

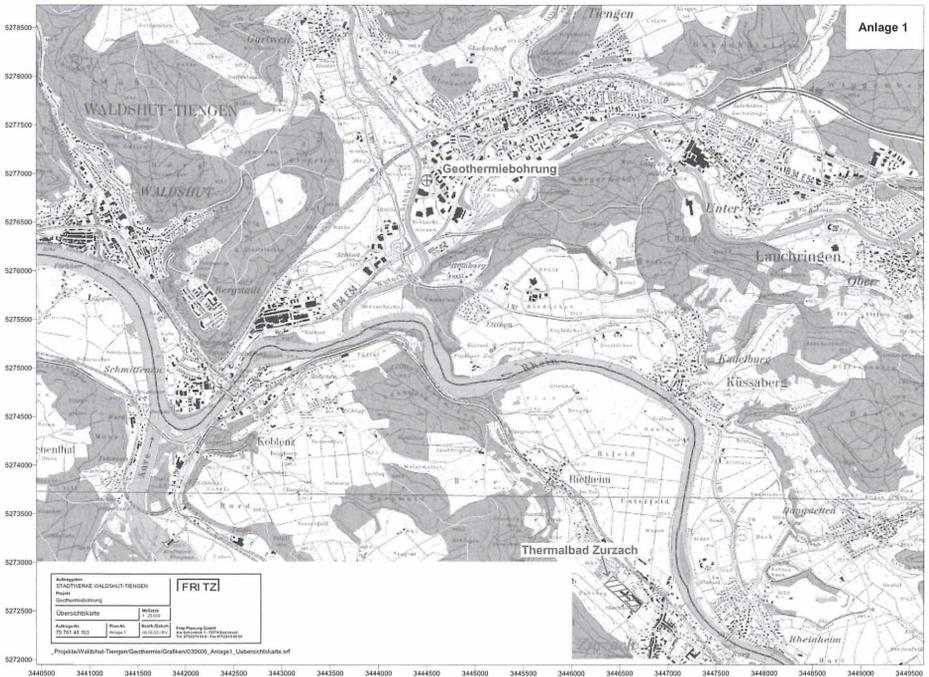


Abb. 1: Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes.

2. Seismische Voruntersuchungen

Zur Erkennung von Bruchzonen des tieferen Untergrundes im Bereich des Schlüchttales erfolgte im Dezember 1999 eine Kombination aus refraktions- und reflexionsseismischen Messungen. Um den geologischen Aufbau bis in mehrere 100 m Tiefe beurteilen zu können, wurden im Untersuchungsgebiet südlich des bestehenden Freibades sechs seismische Längs- und Querprofile angeordnet (Abb. 2).

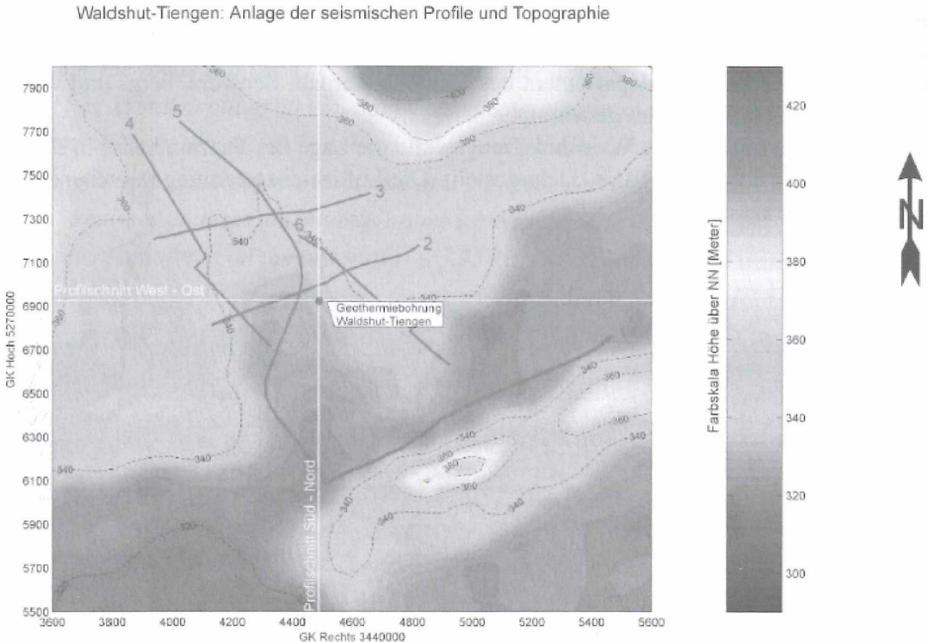


Abb. 2: Lage der seismischen Profile und Topographie (Quelle: Fa. Geofact 2003).

Durch den Einsatz der Refraktionstomographie konnte ein Geschwindigkeitsprofil des Untergrundes gewonnen und nach der Korrelation mit geologischen Aufnahmen aus benachbarten Bohrungen die Quartärmächtigkeit im Schlüchttal mit ca. 25 m bestimmt werden. Im Liegenden waren bei Laufzeiten zwischen 3000 und 4000 m/s bis zu einer Tiefe von ca. 120 -150 m vorwiegend Sedimentgesteine der Trias bzw. verwittertes Grundgebirge zu erwarten.

Die aufgenommenen reflexionsseismischen Profile zeigen z. T. deutliche, fast vertikale Bruchstrukturen (Abb. 3). Die wichtigsten Reflektoren kennzeichnen Schicht- bzw. Dichtegrenzen, wobei die auf Abbildung 3 eingetragene graue Linie als besonders markanter Horizont der Oberkante des Grundgebirges entsprechen dürfte.

Wichtig für die Festlegung des Bohrpunktes war vor allem das Profil 9005 (Abb. 3). Hier ist eine Bruchzone ausgebildet, an der die Reflektoren deutlich versetzt werden. Die

Erschließung von Thermalwasser in Waldshut-Tiengen

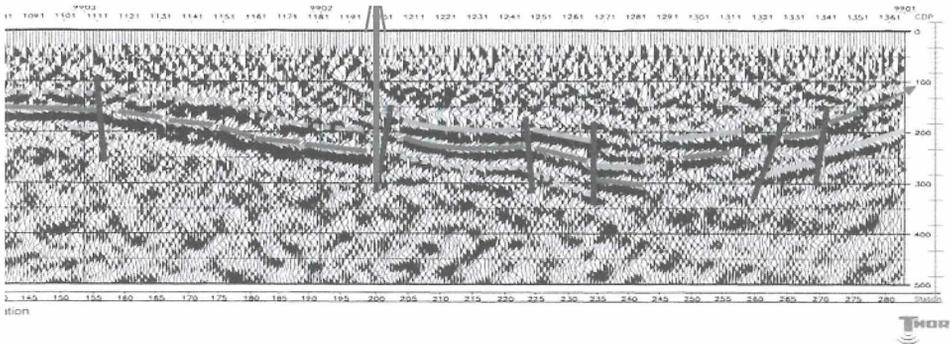


Abb. 3: Reflexionseismisches Profil 9905 mit vorgeschlagener Bohrung, deutlich ist der Versatz der zwei Hauptreflektoren / Gesteinsschichten zu sehen. Unterhalb des "dicken" / grauen Reflektors, der die mutmaßliche Grundgebirgsoberkante darstellt, werden die Reflexionen im ungeschichteten Grundgebirge naturgemäß chaotisch.

vertikale Sprunghöhe beträgt ca. 30-40 m, wobei sich im Nordosten die Tiefscholle, im Südwesten des Profilsabschnitts die Hochscholle befindet. Wegen des Einfallens der Schichten nach Süden, handelt es sich um eine antithetische Abschiebungszone, die etwa 55 m breit ist.

Generell sind im Profil 9905 noch weitere Bruchstrukturen (Störungen) zu erkennen, die das Bild eines staffelbruchartig versetzten Grabens ergeben. Am südlichen Ende des Profils sind die Reflektoren aufgebogen, was den grabenartigen Charakter des Profils noch verstärkt. Betrachtet man den Verlauf des grauen Reflektors über die gesamte Profillänge (9905), so beträgt der Gesamtversatz sogar 200 m.

In größeren Tiefen erscheinen die seismischen Signale nur noch undeutlich, so dass eine Fortsetzung der Strukturen unterhalb ca. 330-350 m Bohrtiefe nur vermutet werden kann. Die zusammenfassende räumliche Interpretation der seismischen und geologischen Daten nach dem Abteufen der Bohrung ist auf Abbildung 4 erkennbar. Hier ist auch die Geothermiebohrung eingetragen. Seismische Reflektoren sind deutlich zu erkennen:

Der Reflektor 1 zeichnet die Unterkante des Quartärs (pleistozäne Kiese) nach. Reflektor 2 entspricht der Obergrenze des Grundgebirges bei ca. 120 m Tiefe. Die Reflektoren 1 und 2 werden als Reflexionen aus dem Grundgebirge interpretiert, die möglicherweise härteren, d.h. dichteren Gesteinspaketen wie Erz- und Mineralgängen entsprechen (GEOFACT 2003).

3. Geologische Verhältnisse und Bohrlochausbau

Das Grundgebirge besteht im Oberlauf der Schlucht aus Gneisanatexiten vom Typ „Murgtal“ mit eingeschalteten Granitporphyren und Teilen des „St. Blasier Granites“ (METZ 1980, GEOLOGISCHES LANDESAMT 1997). Die das kristalline Grundgebirge überlagernden Schichten des Buntsandsteins im Einzugsgebiet der Bohrung sind dunkelrote, z.T. grünfleckige Ton- und Schluffsteine mit zum Liegenden weißen und roten mittel- bis grobkörnigen Sandsteinen. Die Mächtigkeit wird mit 10-20 m angegeben (meist Oberer

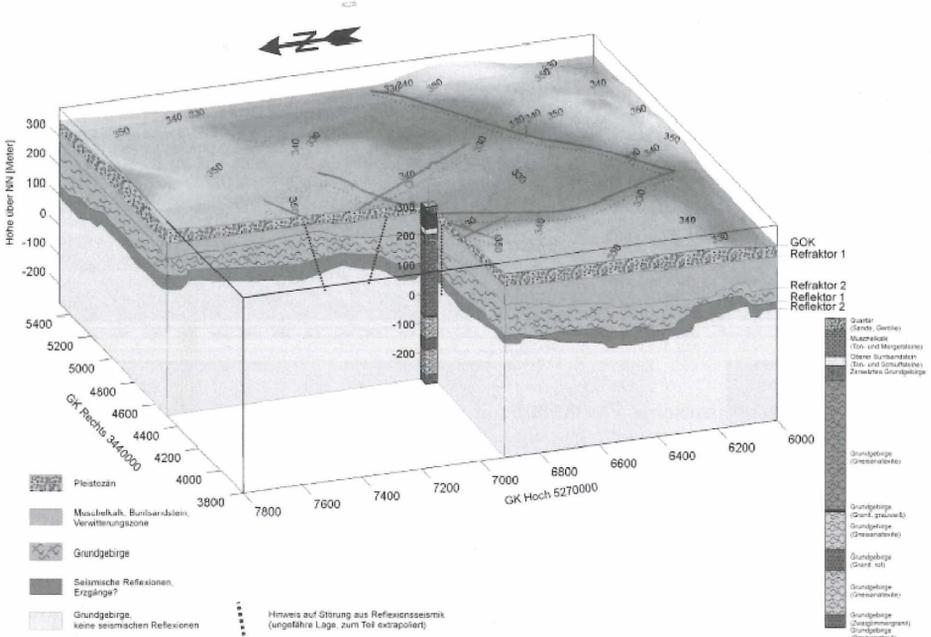


Abb. 4: Blockbild mit der zusammenfassenden Interpretation der seismischen und geologischen Daten im Umfeld der Geothermiebohrung von Tiengen.

Buntsandstein). Die hangenden Schichten des Muschelkalkes setzen sich aus Ton- und Mergelsteinen (Unterer Muschelkalk, 40-50 m mächtig), dem dolomitisch und salinar geprägten Mittleren Muschelkalk (ca. 30-80 m mächtig, je nach Auslaugungsgrad) und dem bis 60 m mächtigen hauptsächlich kalkigen Oberen Muschelkalk zusammen. Darüber folgen im Schlüchtal meist würmeiszeitliche Schotter der Niederterrasse, die aus größeren Kiesen und Sanden bestehen und bis 15 m mächtig werden. Auf den höher gelegenen Terrassen und Talhängen stehen riß- und mindelzeitliche Schotter und Moränensedimente an, die Mächtigkeiten bis über 50 m erreichen können. Die jüngsten Ablagerungen bilden die Auelehme des Talbodens, die sich nach unten mit den Niederterrassenschottern der letzten Eiszeit (Würm) verzahnen (GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 1997).

Die in der Geothermiebohrung angetroffenen Gesteine wurden durch Geologen der FRITZ PLANUNG GmbH und des LGRB geologisch und petrographisch aufgenommen. Die angetroffene Schichtenfolge ist in Tab. 1 zusammengefasst wiedergegeben.

Die Bohrung wurde mit einer Anlage der Fa. Daldrup (Hakenlast von 400 kN) im Jahr 2001 niedergebracht. Im Tag- und Nachtbetrieb wurde zuerst eine Erkundungsbohrung mittels Rollenmeißel im Lufthebeverfahren durchgeführt. Bei Einsatz einer Ton-Wasser-Spülung wurden die quartären Schmelzwassersedimente (mit festen Nagelfluhbänken) und die Deckschichten aus Trias und verwittertem Grundgebirge durchfahren und durch zementierte Sperrrohre bzw. eine Ankerrohrtour aus Stahl gegen Zuflüsse abgesperrt. Das Bohrprofil ist in der Abb. 5 zusammen mit geophysikalischen Bohrlochmessungen dargestellt.

Erschließung von Thermalwasser in Waldshut-Tiengen

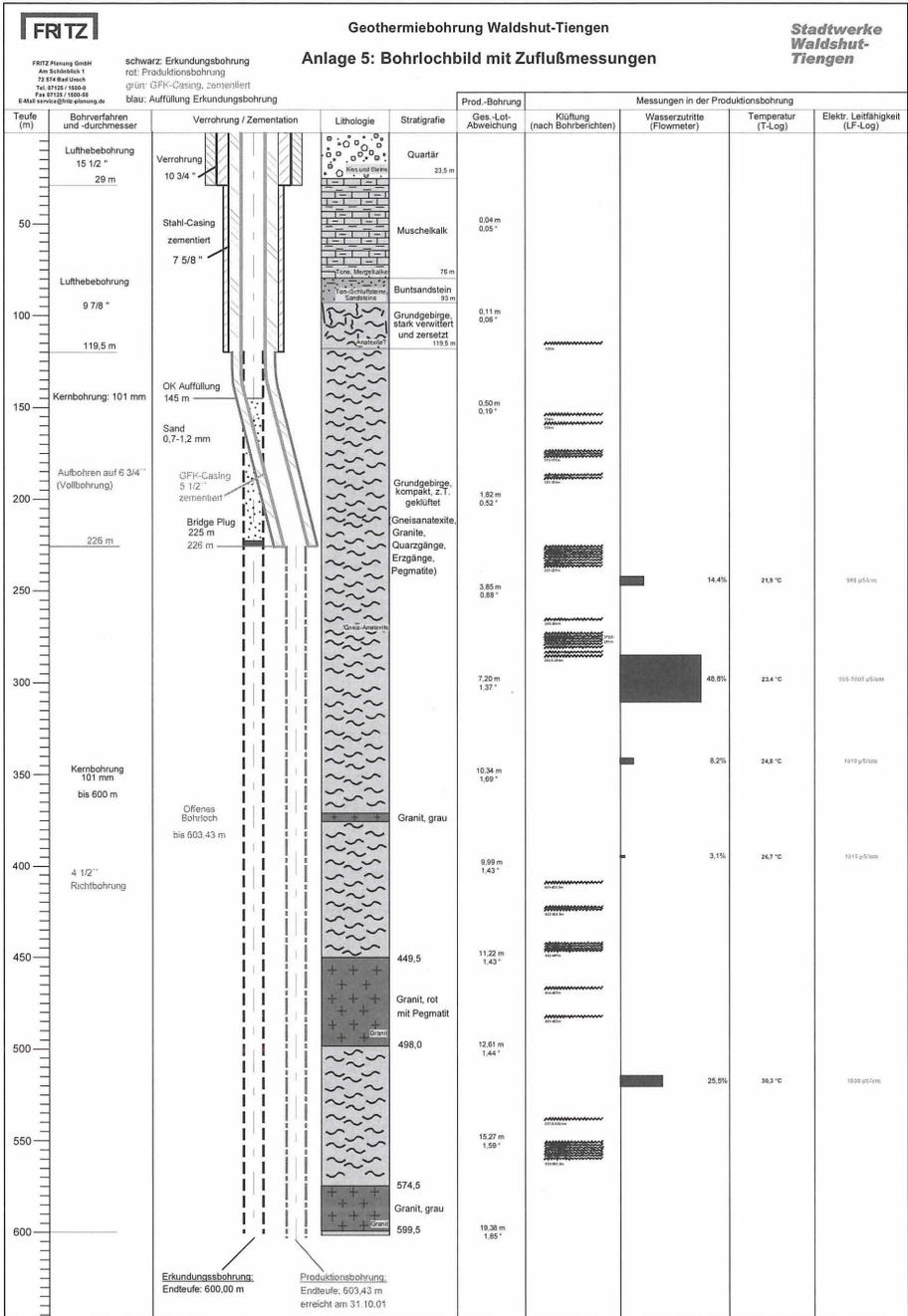


Abb. 5: Bohrlochbild der Geothermiebohrung mit Zuflussmessungen.

Tab. 1 Vereinfachtes geologisches Profil der Geothermiebohrung mit Angaben zur Petrographie / Lithologie und Stratigraphie.

Tiefe der Schichten (m)	Petrographische Ansprache / Lithologie der Gesteine	Stratigraphische Einstufung
0 - 23,7	Sandige Schmelzwasserkiese mit größeren Geröllanteilen; Glazialton an der Basis.	Pleistozän (Riß- und Würmglazial?)
23,7 – 76,0	Graue bis grünschwarte Ton- und Mergelsteine bis Mergelkalke	Unterer und evtl. Mittlerer Muschelkalk
76,0 – 93,0	Rotbraune bis olivgrüne, oft sandige Ton- und Schluffsteine, karbonatisch.	Oberer Buntsandstein (Röt)
93,0 – 119,5	Intensiv zersetztes Grundgebirge (Tonsteine, sandig, grusig).	Verwitterungslehme / zersetztes Grundgebirge.
119,5 – 372,3	Gneisanatexite mit wechselnd ausgeprägter Bänderung, durchschlagen von Erzgängen mit hydrothermalen Mineralisierung	Grundgebirge
372,3 – 375,7	Granit, grauweiß	Grundgebirge
375,7 – 449,5	Gneisanatexite mit Erzgängen und Einschaltungen von Pegmatiten	Grundgebirge
449,5 – 487,8	Granit, grobkörnig, rot mit Erzgängen	Grundgebirge
487,8 – 574,5	Gneisanatexite mit Erzgängen, Quarzadern und Pegmatiten	Grundgebirge
574,5 – 598,7	Zweiglimmergranit, grauweiß	Grundgebirge
598,7 – 603,0	Gneisanatexit, schlecht gebändert	Grundgebirge

Ab ca. 118 m Bohrteufe wurde das vorher stark zersetzte, tonig-schluffige bis grusige Grundgebirge kompakter. Zum besseren Austrag des Bohrgutes wurde eine CMC-Spülung verwendet. Bei Absatzteufe 119,5 m wurde das gesamte Deckgebirge durch Einbau und Zementation eines 7 5/8“-Casings aus Stahl abgesperrt (Sperrrohtour). Anschließend wurde die Pilotbohrung im Seilkernverfahren (Kernrohrdurchmesser 101 mm) fortgesetzt. Bei 125 m trat artesisch gespanntes Grundwasser im Grundgebirge auf, dessen Schüttung vom Bohrmeister mit 0,4 l/s bei einer Auslauftemperatur von 14,1 °C und einer elektrischen Leitfähigkeit zwischen 900 und 1000 µS/cm erfasst wurde. Die einzelnen Kernmärsche waren infolge starker Klüftung und daraus resultierender „Kernklemmer“ meist sehr kurz (1-4 m). Ab ca. 200 m Tiefe wurde ein verstärkter Quarzanteil beim Bohren festgestellt, der durch die sauren Granite und Gneisanatexite bedingt war und bis zur Endteufe bei 600 m anhielt. Nachdem durch geophysikalische Bohrlochmessungen Zuflüsse von > 2 l/s ermittelt worden waren, wurde beschlossen, die Erkundungsbohrung als Förderbohrung auszubauen.

Am 28. Mai 2001 begannen die eigentlichen Aufweitungsarbeiten der Bohrung im Durchmesser 171 mm. Hierbei wurde die Bohrung unterhalb der zementierten Mantelrohtour von 119,50 bis 226 m im Durchmesser 171 mm (6 3/4“) aufgebohrt und kühlere Zuflüsse durch ein GFK-Sperrrohr abgesperrt. Um die Achse der früheren Erkundungsbohrung möglichst beizubehalten wurde die Bohrung jetzt mit einem Warzenmeißel im Durchmesser 4 1/2“ vertieft und zusätzlich ca. alle 50 m mittels Bohrmotor zurück zur Vertikalen

gerichtet. Am 31. Oktober 2001 war die Endteufe der Geothermiebohrung von 603 m erreicht (FRITZ PLANUNG GmbH 2002, 2003).

4. Geophysikalische Zuflussmessungen in die Bohrung

Die Tiefenlage der Zuflüsse in der Erkundungsbohrung ist auf Abbildung 5 dargestellt. In der bis 226 m verrohrten und darunter offenen Produktionsbohrung wurden im April 2002 abschließende Zuflussmessungen ausgeführt. Durch Temperatur- und Leitfähigkeits-Logs sowie durch Flowmetermessungen sollten die Wasserzutritte in der ausgebauten Bohrung ermittelt werden. Die Untersuchungen fanden sowohl im Ruhezustand (ohne Förderung) als auch bei laufender Pumpe statt.

Bei Pumpbetrieb wurden Wasserzutritte zwischen 225 m und 520 m festgestellt. Die Temperatur der Zuflüsse erhöhte sich auf dieser Strecke von 21,9 °C (bei 245 m u.Gel.) auf 30,3 °C (bei 517 m - 515 m u.Gel.). Direkt unterhalb des eingebauten GFK-Sperrohrs bei 226 m erfolgte kein Zufluss. Auch die Leitfähigkeits-Logs und die Flowmetermessungen lassen die gleichen Zuflusshorizonte erkennen. Generell wurden Werte der elektrischen Leitfähigkeit zwischen 980 und 1030 $\mu\text{S}/\text{cm}$ gemessen. Tabelle 2 zeigt die Zuflussbereiche im kristallinen Grundgebirge sowie die anhand des Flowmeter-Logs ermittelten Anteile an der Gesamt-Fördermenge und die absoluten Zuflüsse aus den jeweiligen Zuflussbereichen.

Der Hauptzufluss befindet sich demnach zwischen 285 m und 310 m u.Gel. und beträgt 48,8 % der Fördermenge (im Test: $4,8 \text{ m}^3/\text{h} = 1,33 \text{ l/s}$). Weitere ergiebige Zuflüsse liegen zwischen 514 und 521 m (25,5 %), zwischen 242 und 247 m (14,4 %) sowie bei etwa 340 m (8,2 %) und 395 m (3,1 %).

Tab. 2 Wasserzutritte in der Produktionsbohrung (Messungen: Fa. Händel).

Tiefe der Wasserzutritte (m)	Produktionsanteil (%)	Produktionsanteil (m^3/h)
242,0 – 247,3	14,4	0,8
284,9 – 310,2	48,8	2,3
341,3 – 343,1	8,2	0,4
393,8 – 395,3	3,1	0,1
513,8 – 520,7	25,5	1,2

5. Hydraulische Untersuchungsergebnisse des Dauerpumpversuches

In der Erkundungsbohrung vor Ausbau zur Geothermiebohrung Waldshut-Tiengen wurden bereits während des Abteufens bei den Bohrteufen 500 m und 600 m durch Einsatz eines Einfach-Packers verschiedene Gebirgsabschnitte durch Kurzpumpversuche hydraulisch getestet. Zu diesem Zeitpunkt war das sedimentäre Deckgebirge bis 119,5 m abgesperrt. Die Untersuchungen bestätigten im Wesentlichen die in Abschnitt 4 beschriebenen Ergebnisse.

Der Dauerpumpversuch wurde in der ausgebauten Bohrung durchgeführt, d.h. die Zuflüsse können auf dem Streckenabschnitt zwischen 226 m und 600 m u.Gel. (Openhole)

aus dem kristallinen Grundgebirge in den Brunnen gelangen. Der Durchmesser des Openholes beträgt 4 1/2", der verrohrte Abschnitt im Hangenden hat einen Durchmesser von 5 1/2". Die Planung des Pumpversuches erfolgte durch das LGRB und das Ingenieurbüro FRITZ PLANUNG GmbH (FRITZ PLANUNG GmbH 2002, LGRB 2002a, 2002b). Die Durchführung oblag der Firma Göritz Büro für Geotechnik.

Das erschlossene Thermalwasser ist im Ruhezustand mit einem Überdruck von ca. 13,9 m über Flur artesisch gespannt. Vor Beginn des Dauerpumpversuches am 25.06.02 erfolgte eine 12-tägige Ruhedruckmessung. Dieser "Ruhewasserspiegel" wird von den Erdzeiten beeinflusst, mit je zwei maximalen und minimalen Wasserständen pro Tag und einer maximalen Amplitude von etwa 18 cm zur Zeit der Springtide. In der Thermalwasserbohrung Zurzach 3 wurden ebenfalls zeitenbedingte Wasserspiegelschwankungen beobachtet.

Im Anschluss an die Ruhedruckmessung wurde die Bohrung geöffnet, so dass der Brunnen artesisch frei auslief und eine Unterwasserpumpe in etwa 185 m u.Gel. abgehängt werden konnte. Der Dauerpumpversuch in der Geothermiebohrung Waldshut-Tiengen wurde mit einer konstanten Förderrate von $Q = 2,3 \text{ l/s}$ (Abb. 6) in der Zeit 25.06. – 06.08.02, insgesamt somit 42 Tage bzw. 6 Wochen lang, durchgeführt. Die daran anschließende Wiederanstiegsmessung dauerte insgesamt bis zum 19.09.02 (44 Tage). Zunächst wurde der Wiederanstieg bis zum artesischen Überlauf (14.08.02) gemessen, danach die Pumpe ausgebaut, die Bohrung verschlossen und der Druckaufbau bis zum 19.09.02 beobachtet. Dieses Vorgehen war für die technische Durchführung des Pumpversuches erforderlich; es stellte jedoch eine beträchtliche Erschwernis für die Auswertung des Pumpversuches dar.

Die maximale Absenkung am Ende des Dauerpumpversuches betrug 134,44 m u.Gel., hinzuzurechnen sind ca. 13,9 m artesischer Überdruck, so dass die reale "Gesamt-Absenkung" am Ende des Pumpversuches bei etwa $s = 150 \text{ m}$ lag.

Nach Anschalten der Pumpe fiel der Wasserspiegel relativ rasch auf über 90 m u.Gel. ab (Abb.6). Im weiteren Verlauf des Pumpversuches erfolgte die Absenkung nicht mehr ganz so steil. Die semilogarithmisch gegen die Zeit seit Pumpbeginn (eigentlich seit dem Öffnen der Bohrung) aufgetragenen Messdaten folgen zwei Geradenabschnitten mit verschiedener Steigung (Abb. 6). Ähnlich verhielt sich der Wiederanstieg. Sofort nach Abschalten der Pumpe stieg der Wasserspiegel in kürzester Zeit ($t' = 20 \text{ min}$) um ca. 120 m an. Dieser dramatische Wasserspiegel-Abfall (bzw. – Anstieg) unmittelbar nach Einschalten (bzw. Abschalten) der Pumpe ist auf bohrlochnahe hydraulische Widerstände, einen sogenannten positiven Skin, in Verbindung mit der Eigenkapazität der Bohrung zurückzuführen.

Die Transmissivität des Aquifers wird aus der Steigung des ersten Geradenabschnitts der semilogarithmisch aufgetragenen Messdaten zu $T = 3,95 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ berechnet. Aus dem Schnittpunkt dieser Geraden mit $s = 0$ kann der scheinbare Speicherkoeffizient (STOBER 1986) zu $S^* = 2,92 \cdot 10^{-9}$ bestimmt werden. Der tatsächliche Speicherkoeffizienten des Aquifers wird durch die nachstehende Gleichung abgeschätzt zu:

$$S = H \rho g n c_W = 10^{-5}$$

wobei "H" die Mächtigkeit des bepumpten Aquifers ($H = 374 \text{ m}$), " c_W " die Kompressibilität ($c_W = 5 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$) und " ρ " die Dichte des Wassers ($\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$), " g " die Erdbeschleunigung ($g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$) und " n " der Hohlraumgehalt des Gebirges ist. Für die Porosität wurde der Erfahrungswert $n = 0,5\%$ zugrunde gelegt. Der Skinfaktor s_F berechnet sich aus dem scheinbaren und dem realen Speicherkoeffizienten (STOBER 1986) zu:

Erschließung von Thermalwasser in Waldshut-Tiengen

$$s_F = 0,5 \ln(S/S^*) = 4,03$$

Der Skinfaktor bewirkt einen zusätzlichen Absenkungsverlust von:

$$\Delta s_{\text{Skin}} = s_F Q / (2 \pi T) = 37,31 \text{ m}$$

Der "Knick" im Absenkungsverlauf auf Abbildung 6 nach ca. 5 Tagen Förderzeit kann als Einfluss einer Störungszone (bzw. einer Grabenstruktur) mit teilweise abdichtender Wirkung interpretiert werden. Die Entfernung vom Brunnen liegt rechnerisch bei etwa 2 km. Unmittelbar nach Abschalten der Pumpe, zu Beginn des Wiederanstiegs stieg der Wasserstand im Brunnen sehr rasch an und erreichte letztlich wieder den ursprünglichen Wert (Ruhedruck) vor Beginn des Versuches und belegt damit die rasche Erneuerung des Systems.

Während des Pumpversuches wurden am Bohrlochkopf die Temperatur und die elektrische Leitfähigkeit des Förderwassers kontinuierlich aufgezeichnet. Die Temperatur war weitestgehend konstant und betrug 24,4°C. Die elektrische Leitfähigkeit des Förderwassers, ein Maß für den Grad der Mineralisation, war ebenfalls konstant und belief sich auf nahezu 1000 µS/cm.

Im Verlauf des Pumpversuches wurden die Wasserstände in Messstellen im näheren Umfeld der Geothermiebohrung, die in den hangenden Sedimenten verfiltert sind, digital aufgezeichnet. Außerdem wurden die drei Bohrungen und Quellen des Thermalbades Zurzach AG digital, bzw. z.T. auch manuell, zusammen mit der Schüttung der Quellen registriert. Eine gegenseitige Beeinflussung war nicht feststellbar (FRITZ PLANUNG 2002, LGRB 2003, 2004).

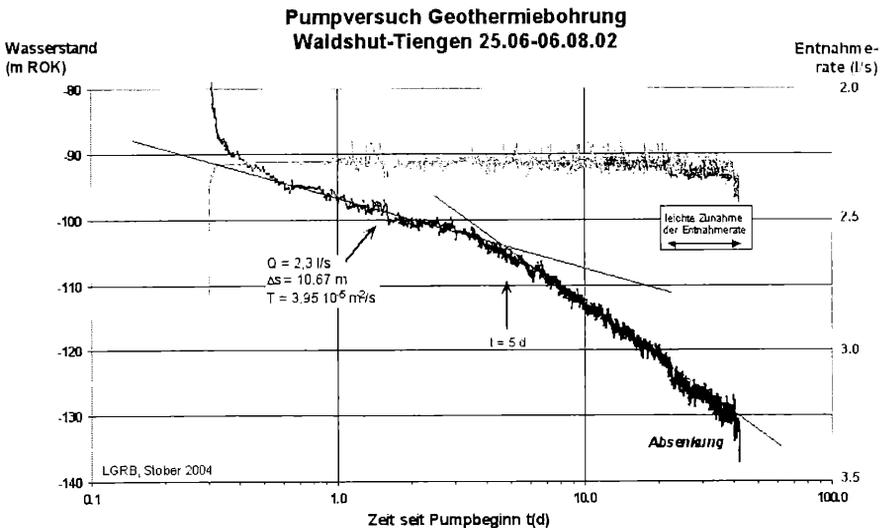


Abb. 6: Verlauf der Absenkung in der Geothermiebohrung beim Dauerpumpversuch.

6. Hydrochemische und isotonenphysikalische Ergebnisse

In der Geothermiebohrung Waldshut-Tiengen wurden aus dem kristallinen Grundgebirge in verschiedenen Tiefen Wasserproben gezogen und hydrochemisch untersucht. Die Wasserproben aus den verschiedenen Bohrtiefen sind quasi identisch. Hydrochemische Änderungen des Förderwassers während des Dauerpumpversuches waren ebenfalls nicht feststellbar. In der Bohrung Waldshut-Tiengen wurde derselbe Wassertyp wie in den Zurzacher Bohrungen (CADISCH 1956, SAUER 1986) jedoch mit niedrigeren Konzentrationen erschlossen. Die neuen Analysenbefunde des Thermalwassers von Zurzach (Z1, Z2) entsprechen denen von vor einigen Jahren und belegen die dortige Konstanz der Mineralisation des Förderwassers.

In der Geothermiebohrung Waldshut-Tiengen wurde eine fluoridhaltige Therme mit den nachstehenden wesentlichen Inhaltsstoffen erschlossen (Probe vom 06.08.02, Analyse Institut Fresenius):

Temperatur	24,4°
pH	8,40

Na	205 mg/l	F	10,8 mg/l
K	3,0 mg/l	Cl	53,0 mg/l
Ca	13,1 mg/l	Br	0,43 mg/l
Mg	0,3 mg/l	SO ₄	240 mg/l
Sr	0,50 mg/l	HCO ₃	163 mg/l
Ba	0,020 mg/l	H ₂ SiO ₃	20,4 mg/l

Es handelt sich somit um ein Na-SO₄-HCO₃-Wasser mit einem ungewöhnlich hohen Fluoridgehalt. Dieser Wassertyp, dem die Thermalwässer von Zurzach und Waldshut-Tiengen angehören, wird im kristallinen Grundgebirge sehr selten vorgefunden (SCHMASS-MANN 1984, STOBER 1995).

Der Wassertyp ist letztlich auf die Alteration des kristallinen Wirtgesteins, d.h. auf eine intensive Wasser-Gesteins-Wechselwirkung, zurückzuführen. Das Mineral, das gegen die Verwitterung am wenigsten resistent ist und im Gestein in großen Anteilen vorliegt, ist Plagioklas. Da der Plagioklas im dortigen Kristallin äußerst Ca-arm ist ($X_{An} \ll 0,1$) (MARTIN & HUBER-ALEFFI 1984), ist auch das Ca/Na-Verhältnis im Wasser entsprechend gering ($X_{An} = Ca/(Ca+Na) = 0,10$). Nur durch den ungewöhnlich niedrigen Ca-Gehalt im Fluid wird der hohe Fluorid-Gehalt (10,8 mg/l) im Wasser möglich.

Der Chlorid-Gehalt des Thermalwassers liegt mit 53 mg/l deutlich über den Werten, wie sie für anthropogen unbelastete, oberflächennahe Wässer erwartet werden. Das im Verhältnis zu Meerwasser (Cl/Br = 288, mg-Basis) niedrige Cl/Br-Verhältnis von Cl/Br = 123 (mg-Basis) des Thermalwassers von Waldshut-Tiengen zeigt, dass die Salinität aus dem kristallinen Grundgebirge selbst stammt. Geogene Chlorid-Quellen stellen beispielsweise Fluid-Inclusions und Minerale, wie Biotit, Hornblende oder Apatit, bei denen durch Alteration Chlorid aus dem Kristallgitter freigesetzt werden kann, dar. Außerdem können Halogene auf Korngrenzen auftreten und von dort gelöst werden. Salinare Fluide, die genetisch auf Salzablagerungen zurückzuführen sind, besitzen wesentlich höhere Cl/Br-Verhältnisse, die

weit über dem Wert von Meerwasser liegen (STOBER & BUCHER 2000). Das in Waldshut-Tiengen erschlossene Thermalwasser belegt durch sein niedriges Cl/Br-Verhältnis eine intensive Wasser-Gesteins-Wechselwirkung.

Das aus der Geothermiebohrung Waldshut-Tiengen geförderte Wasser ist an der Erdoberfläche bei der Temperatur 24,4°C und pH = 8,4 bezüglich Baryt nahezu gesättigt und bezüglich Calcit und Fluorit leicht übersättigt. Die Berechnung erfolgte mit dem Programm PHREEQE (PARKHURST et al. 1980). Mit zunehmender Temperatur, d.h. Annäherung an die Lagerstättenbedingungen (Quarz-Geothermometer nach FOURNIER 1981: 54,5°C) wird Fluorit-Sättigung erreicht. Der pH-Wert nimmt mit der Temperatur ab. Die erwartete Calcit-Sättigung ist dann bei pH = 7,9 gegeben. Unter "Lagerstättenbedingungen", d.h. bei 54,5°C und pH = 7,9, wäre das Wasser unter den oben genannten Bedingungen bezüglich Quarz, Calcit und Fluorit gesättigt. Nach den Löslichkeitsuntersuchungen von RIMSTIDT (1997) ist die Sättigung des Thermalwassers von Waldshut-Tiengen bezüglich Quarz allerdings bereits bei niedrigeren Temperaturen erreicht.

Die isotopenphysikalischen Untersuchungen, die im Jahr 2002 in der Geothermiebohrung Waldshut-Tiengen und in den beiden Bohrungen von Zurzach (Z1 und Z2) vom Institut Fresenius durchgeführt wurden, sind sehr ähnlich. Das durch die Tiefbohrung Waldshut-Tiengen erschlossene Thermalwasser ist Tritium-frei. Das $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnis liegt im Bereich der Niederschlagsgeraden. Der ^{14}C -Gehalt im Wasser entspricht einer mittleren Verweilzeit des Wassers in der Größenordnung von über 10.000 Jahren. Deuterium- und Sauerstoff-18-Untersuchungen in den beiden Zurzacher Thermalwässern aus den 80er Jahren bis 2002 lassen für das in Zurzach geförderte Thermalwasser einen Trend zu verstärkten Einflüssen holozäner Witterungsverhältnisse erkennen (BGC 2002).

7. Herkunft und Genese des Thermalwassers

Aufgrund des sehr ähnlichen Chemismus der Zurzacher Thermen und des Wassers aus der Geothermiebohrung Waldshut-Tiengen ist es sehr wahrscheinlich, dass sowohl die Zurzacher Bohrungen als auch die Bohrung Waldshut-Tiengen Thermalwasser aus demselben granitischen Milieu fördern. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass es sich um dasselbe Reservoir handelt.

Das in Waldshut-Tiengen erschlossene Thermalwasser ist geringer mineralisiert als die genutzten Zurzacher Thermalwässer. Zurzach (Z1, Z2) hätte somit das aufsteigende Thermalwasser zentraler, Waldshut-Tiengen „randlich“ erschlossen. Auch die Bohrung Zurzach Z3 erschließt Thermalwasser geringerer Mineralisation als die Bohrungen Z1 und Z2. Zwischen Zurzach Z3 und den beiden Zurzacher Hauptquellen verläuft eine Störung bzw. eine Grabenstruktur. Dennoch reagieren die Zurzacher Bohrungen hydraulisch aufeinander.

Die Fördertemperaturen der beiden Zurzacher Thermalwasserbohrungen Z1 und Z2 betragen zwischen 38,5°C und 39,5°C. Das Thermalwasser in Bohrung Z3 ist mit 34,4 °C etwas kühler. Das Wasser der neu erschlossenen Bohrung Waldshut-Tiengen ist deutlich kälter und beträgt 24,4°C. Anhand des Silika-Geothermometers (FOURNIER 1981) kann aus dem gemessenen H_2SiO_3 -Gehalt die Temperatur der Lagerstätte bzw. die Tiefe, aus der das jeweilige Wasser stammt, abgeschätzt werden. Die Berechnung ergibt für die beiden

Zurzacher Quellen Z1 und Z2 eine Tiefe von ca. 2400 m und für die Waldshut-Tiengener Quelle ca. 1700 m.

Nach derzeitigem hydrogeologischen Kenntnisstand gelangt das im Südschwarzwald einsickernde Niederschlagswasser über Klüfte in den tieferen Untergrund, erwärmt sich dort und reagiert auf seinem Weg, den es mit sehr geringen Fließgeschwindigkeiten zurücklegt, mit dem umgebenden Gestein und mineralisiert sich dadurch auf. Der Fließweg wird zum einen durch die hydraulische Potentialdifferenz zwischen den Höhen des Südschwarzwaldes und dem Vorland vorgegeben, zum anderen durch Zonen oder Gebirgsbereiche erhöhter Durchlässigkeit. Das im Kristallin des Schwarzwaldes mit „Ausläufern“ bis in die N-Schweiz zirkulierende Wasser wird wahrscheinlich auch hier, ähnlich wie in Bad Säckingen, vor dem Permokarbondrog der Nordschweiz, der wegen seiner geringen Durchlässigkeit als hydraulische Barriere aufgefasst werden kann, aufgestaut. Die generelle Fließrichtung mit stetigem Abstieg in immer größere Tiefen (vgl. Ergebnisse aus dem Silika-Geothermometer) dürfte vorzugsweise aus N- bis WNW-Richtungen nach S bis ESE erfolgen.

Verdankungen

Für die freundliche Unterstützung durch die Stadtwerke Waldshut-Tiengen, insbesondere durch Herrn Geschäftsführer Schilling und Herrn Wassermeister Ebner, möchten wir uns herzlich bedanken.

Eingang des Manuskripts: 28.07.2004

Angeführte Schriften

- BGC (2002): Recherchen zur Herkunft des Thermalwassers in Waldshut-Tiengen. – Unveröff. Gutachten; Potsdam.
- BITTERLI, T & MATOUSEK, F. (1991): Die Tektonik des östlichen Aargauer Tafeljuras. – Mitt. Aarg. Naturf. Ges. Bd. XXXIII, S. 5-30.
- CADISCH, J. (1956): Über die Wiedererbohrung der Therme von Zurzach (Kt. Aargau).- Ecl. geol. Helv., 49, 2, S. 313-316, Basel.
- FOURNIER, R.O. (1981): Application of Water Geochemistry to Geothermal Exploration and Reservoirengineering.- In: RYBACH, L. & MUFFLER, L.J.P. (Hrsg.): Geothermal Systems Principles and Case Histories, p.109-143, Chichester (John Wiley).
- FRITZ PLANUNG GmbH (2002): Thermalwassererschließung Tiengen (Geothermiebohrung). Abschlussbericht über die Bohrarbeiten und Pumpversuche vom 21.10.02. – Bearbeiter: Dipl.-Geol. R. Vicedom, Bad Urach.

- FRITZ PLANUNG GmbH (2003a): Geothermiebohrung Waldshut-Tiengen. – Bergwasserrechtliches Verfahren – Aktennotiz zur Besprechung bei den Stadtwerken Waldshut-Tiengen am 31.03.03; Bad Urach.
- FRITZ PLANUNG GmbH (2003b): Geothermiebohrung Waldshut-Tiengen. - Schreiben des LGRB vom 09.12.02 (AZ: 4715/02 7382) – Stellungnahme vom 04.04.03; Bad Urach.
- FRITZ PLANUNG GmbH (2003c): Thermalwassererschließung Tiengen (Geothermiebohrung). Hydrogeologisches Gutachten zur weiteren Nutzung des Thermalwasservorkommens vom 30.06.03. – Bearbeiter: Dipl.-Geol. R. Vicedom, Bad Urach.
- GEOFACT GMBH (2003): 2D-Seismik Waldshut-Tiengen. Graphische Darstellung der Ergebnisse. – Kurzbericht mit 6 Anlagen; Bearbeiter: Dr. Janik, Bonn.
- GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG, GLA (1997): Vorläufige Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25.000, Blatt 8315 Waldshut-Tiengen mit Erläuterungen; Stuttgart.
- INSTITUT FRESENIUS (2002a): Begutachtung HEILWASSER der Heilquelle „Thermalwasserbohrung“ der Stadtwerke Waldshut-Tiengen (Pr.Nr. 102TW084571/84572/84573, Auftrags-Nr. 102/13763-00). – Analyse/Gutachten vom 11.10.02, Bearbeiter: Prof. Dr. Kußmaul, Herr Zerbe, Taunusstein.
- INSTITUT FRESENIUS (2002b): Interpretation der Wasserbeschaffenheit der Thermalwasserbohrung in Tiengen in Bezug auf deren Herkunft und Genese. (Pr.Nr. 102TW084571, Auftrags-Nr. 102/13763-00). – Gutachten vom 05.12.02, Bearbeiter: Prof. Dr. Kussmaul; Dr. von Storch, Taunusstein.
- LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU BADEN-WÜRTTEMBERG, LGRB (2002a): Geothermiebohrung Tiengen, Dauerpumpversuch, Gutachten des LGRB vom 03.04.02 (AZ: 4715//02 1637), Bearbeiter: Prof. Dr. Stober, Freiburg.
- LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU BADEN-WÜRTTEMBERG, LGRB (2002b): Stellungnahme zum Bericht des Ingenieurbüro Fritz Planung GmbH über die Thermalwassererschließung Tiengen (Geothermiebohrung) – Abschlußbericht über die Bohrarbeiten und die Pumpversuche, Gutachten des LGRB vom 09.12.02 (AZ: 4715//02 7382), Bearbeiter: Prof. Dr. Stober, Freiburg.
- LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU BADEN-WÜRTTEMBERG, LGRB (2003): Antrag der Stadtwerke Waldshut-Tiengen GmbH auf wasserrechtliche Erlaubnis zur Entnahme und Ableitung von Grundwasser aus der Geothermiebohrung der Stadt Waldshut-Tiengen, Gutachten des LGRB vom 30.10.03 (AZ: 4715-601.45/3/3), Bearbeiter: Prof. Dr. Stober, Freiburg.

- LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU BADEN-WÜRTTEMBERG, LGRB (2004): Geothermiebohrung Waldshut-Tiengen, Gutachten des LGRB vom 15.04.04 (AZ: 4715//04 2766), Bearbeiter: Prof. Dr. Stober, Freiburg.
- MARTIN, D. & A. HUBER-ALEFFI (1984): Das Kristallin des Südschwarzwaldes.- Nagra Technischer Bericht, 84-30, Baden/Schweiz.
- METZ, R. (1980): Geologische Landeskunde des Hotzenwaldes.- M. Schauenburg Verlag, Lahr.
- METZ, R. & REIN, G. (1958): Erläuterungen zur Geologisch-petrographischen Übersichtskarte des Südschwarzwaldes 1 : 50.000.- Lahr (Moritz Schauenburg Verlag).
- PARKHURST, D.L., D.C. THORSTENSON & L.N. PLUMMER (1980): PHREEQE - a computer program for geochemical calculations.- U.S. Geological Survey, Water Resources Investigations 80-96, revised and reprinted May 1982, 210 p.
- RIMSTIDT, J.D. (1997): Quartz solubility at low temperatures.- *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 61, no. 13, pp. 2553-2558.
- SAUER, K. (1986): Geologie und chemische Beschaffenheit des Zurzacher Heilwassers.- *Zeitschrift für Physikalische Medizin, Balneologie Med. Klimatologie*, H. 3, Jg. 15, S. 158-160, Gräfelting.
- SCHMASSMANN; H., BALDERER, W., KANZ, W. & PEKDEGER, A. (1984): Beschaffenheit der Tiefengrundwässer in der zentralen Nordschweiz und angrenzenden Gebieten. – Technischer Bericht 84-21 der NAGRA; Baden/Schweiz.
- STADTWERKE WALDSHUT-TIENGEN (2003): Antrag auf wasserrechtliche Erlaubnis zur Entnahme und Ableitung von Grundwasser aus der Geothermiebohrung der Stadt Waldshut-Tiengen vom 03.07.2003.- Aufgestellt: Fritz Planung GmbH, Bad Urach.
- STADTWERKE WALDSHUT-TIENGEN (2003): Antrag auf Erteilung einer Bewilligung zur Gewinnung von Erdwärme gemäß § 10 des Bundesberggesetzes (BBergG) vom 04.07.2003.- Aufgestellt: Fritz Planung GmbH, Bad Urach.
- STOBER, I. (1986): Strömungsverhalten in Festgesteinsaquiferen mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen.- *Geol. Jahrb., Reihe C*, H.42, 204 S., Hannover.
- STOBER, I. (1995): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges.-191 S., Enke-Verlag, Stuttgart.
- STOBER, I. & BUCHER, K. (2000): Herkunft der Salinität in Tiefenwässern des Grundgebirges – unter besonderer Berücksichtigung der Kristallinwässer des Schwarzwaldes.- *Grundwasser*, H. 3, Bd. 5, S.125-140, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- THOR GEOPHYSIKALISCHE PROSPEKTION GmbH (2000): 2D-Seismik Waldshut-Tiengen. Bericht zum Processing und zur Interpretation. – Unveröff. Bericht mit 32 Anlagen; Kiel / Bonn.

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, Vicedom Roland

Artikel/Article: [Erschließung von Thermalwasser in Waldshut-Tiengen 173-188](#)