

# **Geologie und Geschichte der Mineral- und Thermalquellen im Schwarzwald**

**Ingrid Stober**

## **Stichwörter**

Kristallines Grundgebirge, Hydrogeologie, Mineral-/Thermalwässer, Schwarzwald

## **Zusammenfassung**

Die Thermal- und Mineralquellen des Schwarzwaldes sind seit alters bekannt. Einige Thermalquellen wurden bereits von den Römern besucht. Vorliegende Arbeit gibt einen historischen und (hydro)geologischen Überblick. Die Herkunft und Genese der Wässer wird nach derzeitigem Kenntnisstand beschrieben.

Die Mineralwässer (-Säuerlinge) unterscheiden sich hydrochemisch deutlich von den Thermalwässern. Bei beiden kann der Gesamtlösungsinhalt zwar einige 1000 mg/l betragen, jedoch sind die Mineralwässer reich an Calcium und Hydrogenkarbonat, teilweise mit beträchtlichen Na-Gehalten, während die Thermalwässer Natrium- und Chlorid-reich sind. Die Mineralwässer (-Säuerlinge) treten im geringer durchlässigen Gneisgebirge zutage, die Thermalwässer ausschliesslich in den höher durchlässigen Graniten des Schwarzwald-Kristallins.

Es würde den Rahmen der Arbeit sprengen, alle Mineral- und Thermalwasservorkommen beschreiben zu wollen. Von daher wurde eine Auswahl getroffen, die zum einen willkürlich erscheinen mag, zum anderen wurden jedoch bevorzugt seit alters im kristallinen Grundgebirge genutzte Vorkommen beschrieben. Von daher sind beispielsweise Bäder wie Badenweiler mit Bohrbrunnen im Bereich der "Vorbergzone" nicht aufgeführt, genauso wie Mineral-/Thermalwasservorkommen, die nicht genutzt werden, wie z.B. Hubbad, Ohlsbach, Erlenbad u.a.

---

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

# ***Geology and History of Mineral- and Thermal Waters in the Black Forest***

***Ingrid Stober***

## ***Abstract***

*The thermal- and mineral waters of the Black Forest have a long tradition. Some thermal spas even were used by Romans and Celts. This paper gives an overview of the history and hydrogeology of these waters. Their genesis is described as far as known today.*

*CO<sub>2</sub>-rich mineral waters and thermal waters differ extremely from each other. Both reach TDS-values of several 1000 mg/l, but while mineral waters are rich in Ca and HCO<sub>3</sub>, sometimes with an amount of Na, the dominant ions in thermal waters are Na and Cl. Mineral waters occur in the lower permeable gneisses of the Black Forest, thermal waters exclusively in the more permeable granites.*

## 1. Geologischer Überblick

Das kristalline Grundgebirge des Schwarzwaldes wird nach Westen durch den Oberrheingraben tektonisch sowie morphologisch begrenzt. Den Übergang zur Oberrheinischen Tiefebene bildet bereichsweise die Vorbergzone, die aus höheren, den Sedimentationsspiegel im Graben überragenden Randstaffeln besteht. Nach Norden und Osten taucht das kristalline Grundgebirge unter das Deckgebirge aus Perm- und Triasgesteinen. Die südöstliche Grenze markiert der Hochrhein zwischen Waldshut und Säckingen, der etwa entlang des steil unter den Tafeljura einfallenden Grundgebirges verläuft. Im Südwesten wird das kristalline Grundgebirge durch die Weitenauer Vorberge und den Dinkelberg begrenzt. Die heutige Lage des Grundgebirgsausbisses des Schwarzwaldes und seine Morphologie sind die Folge seiner jungen Heraushebung (WALTER 1992).

Das kristalline Grundgebirge des Schwarzwaldes besteht aus metamorphen Serien und Tiefengesteinen unterschiedlichsten Alters. Mächtige Abfolgen von präkambrischen Sedimenten bilden zu wesentlichen Teilen die Ausgangsprodukte der metamorphen Gesteine. Im Zuge der kaledonischen Gebirgsbildung kam es durch Regionalmetamorphose zur Vergneisung und später zur Anatexis (GENSER 1992). In dieses alte metamorphe Gebirge setzte im ausklingenden Karbon die Intrusion von Magmatiten ein. Als magmatische Nachphasen entstanden hydrothermale Erz- und Mineralgänge.

Zur regionalen Gliederung des Schwarzwälder Grundgebirges ziehen GEYER & GWINNER (1986) die variszischen Intrusionskomplexe, die Granite, heran, die durch Aufschmelzung und magmatische Durchtränkung aus Gneisen entstanden (Abb. 1):

die **Nordschwarzwälder Granitmasse** im äußersten Norden  
 die **Triberger Granitmasse** im Osten  
 die **Südschwarzwälder Granitmasse** im äußersten Süden

Das Gebiet zwischen den Graniten wird von prävariszischen Gneisen eingenommen. Überwiegend liegen Gneis-Anatexite vor. Das **Zentralschwarzwälder Gneisgebiet** erstreckt sich von der Nordschwarzwälder Granitmasse nach Süden bis an die Zone von Badenweiler-Lenzkirch. Innerhalb und südlich der Südschwarzwälder Granitmasse liegen ebenfalls Gneise vor.

Der Grundgebirgssockel des Schwarzwaldes wird von zahlreichen Gängen und Störungen durchzogen. Die Gänge können oft über weite Erstreckungen aushalten und sind von Nachschüben granitischen Magmas erfüllt (Ganggranite, Granitporphyre, Aplite, Lamprophyre). Im Südschwarzwald verlaufen die Gänge überwiegend in nordwestlicher Richtung, im Zentralschwarzwald meistens nach Nordosten. Das kristalline Grundgebirge erfährt eine weitere regionale Gliederung durch Zonen mit paläozoischen Sedimentgesteinen (Baden-Badener-Senke, Zone von Badenweiler-Lenzkirch, Zinken-Elme-Zone, Diersburg-Berghauptener-Zone). Schließlich wird das Grundgebirge des Schwarzwaldes durch die Bildung von Rotliegend-Senken weiter gegliedert. Der Vulkanismus des Rotliegenden hat auch hier bedeutende Spuren hinterlassen. Die Quarzporphyre drangen in Bruchspalten bzw. in Schloten empor und breiteten sich zusammen mit Tuffen in teilweise mächtigen und ausgedehnten Decken aus (GEYER & GWINNER 1986, METZ & REIN 1958, METZ 1977, 1980, GROSCHOPF u.a. 1996). Das variszische Grundgebirge unterlag bereits im Karbon und Rotliegendem wieder der Abtragung, so dass variszisch ausgerichtete Senken und Tröge aufge-

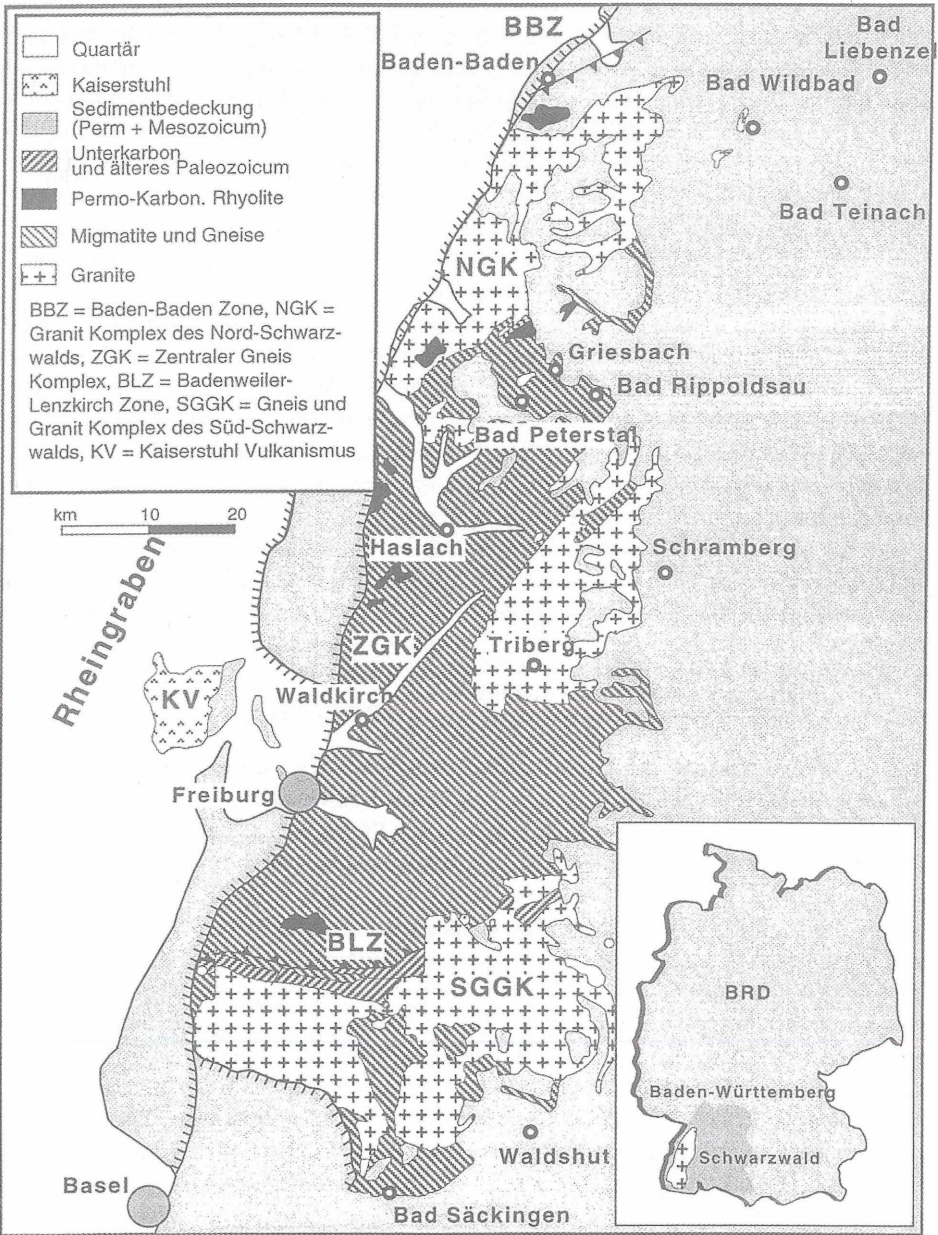


Abb. 1: Schematische geologische Karte des Schwarzwaldes.

füllt wurden und eine Einebnung erfolgte (Permische Landoberfläche). Im Zusammenhang mit bruchtektonischen Ereignissen steht die vulkanische Tätigkeit im Rotliegenden (Tuffe, Porphyridecken).

Das kristalline Grundgebirge wurde im Laufe der Geschichte bis ins Tertiär und Quartär hinein von zahlreichen tektonischen Ereignissen betroffen und immer wieder überprägt (GENSER 1992). Klüfte brachen auf, Gänge bildeten sich, verheilten erneut durch Ausfällung von Sekundärmineralen, kurz: es wurden immer wieder neue Wasserwege geschaffen, alte z.T. belebt oder erneut verheilt und damit abgedichtet. Wenn wir heute als Hydrogeologen das kristalline Grundgebirge betrachten, so schauen wir nicht so sehr auf die Matrix, also den eigentlichen Granit oder Gneis, sondern auf die zahlreichen Klüfte und Gänge, die ihn durchziehen, auf die Risse und Haarrisse, die bis hinein in das einzelne Mineralkorn reichen.

## 2. Die Mineralquellen

### 2.1 Bad Freyersbach, Bad Peterstal-Griesbach

Bad Freyersbach, unmittelbar südlich von Bad Peterstal gelegen, und Bad Peterstal-Griesbach liegen im zentralen Teil des Schwarzwaldes (Abb. 1) im Renchtal, das in diesem Bereich in südsüdwestlicher Richtung verläuft, um südlich von Bad Freyersbach unvermittelt nach Nordnordwesten abzuschwenken. Das Renchtal ist schmal; seine Talflanken sind steil. Der Talverlauf ist wohl an Störungszonen gekoppelt. An der Erdoberfläche steht Gneis an, bereichsweise mit mehr oder weniger granitischen Einschaltungen.

Das Gebiet ist seit vielen Jahrhunderten für seine Sauerwasseraustritte bekannt, die zum Teil als frei auslaufende Quellen seit alters einfach vorhanden waren oder aber durch den Menschen geschürft wurden. Das Wasser der Mineralquellen wurde schon sehr früh zu Trink- und Badekuren verwandt.

Die ältesten Quellen besitzt das Fachkrankenhaus für Innere Krankheiten in **Bad Peterstal**. Wann diese Quellen entdeckt worden sind, läßt sich nicht mit Bestimmtheit angeben. Noch um die Mitte des 16. Jahrhunderts soll das Bad lediglich aus einigen ärmlichen Bauernhäuschen bestanden haben, die um den "Petersbrunnen" herum lagen. Erst Johann von Manderscheid, Bischof von Straßburg (1569-1592), ließ den Peterstaler Sauerbrunnen "in brauchbaren Zustand setzen" und veranlaßte auf Anraten des Arztes Johann Jakob Theodor von Bergzabern, genannt Tabernaemontanus, den Ankauf der Quelle (1584) und die Errichtung eines Badehauses. Ab diesem Zeitpunkt nahm die Zahl der Badegäste gewaltig zu. Dazu trug auch das um jene Zeit erschienene Buch von Tabernaemontanus bei "New Wasserschatz d.i. von den heylsamen Metallischen Mineralbädern und Wassern, sonderlich aber von den neverfundenen Sauerbrunnen zu Peterstal und Griebach"

Da im 17. Jahrhundert besonders viele Franzosen und Schweizer das Bad besuchten, wurde es allgemein auch das "welsche Bad" genannt. Noch im 17. Jahrhundert stand Peterstal in internationalem Ansehen und das Kur- und Badeleben zeigte damals ein nicht viel anderes Gepräge als z.B. das in Baden-Baden oder Badenweiler. Wie überall gab es eine strenge Badeordnung. Unter Strafandrohung wurde die Einhaltung von Zucht und Ordnung zur Pflicht gemacht.

In der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts fiel die württembergische Pfandherrschaft fort, die Badeordnungen verfielen und an die Stelle des wohlgeordneten Kurbgebrauchs trat ein sittenloses, schwelgerisches Kurleben. Hinzu kam, dass während der Kriege Ludwigs XIV. von Frankreich die Ortschaften im Renchtal schwer in Mitleidenschaft gezogen wurden. So kam das Kurhaus von Peterstal im Jahre 1696 an das Kloster Allerheiligen und das von **Griesbach** an das Kloster Schuttern (KURVERWALTUNG BAD PETERSTAL 1966).

Einen erneuten Aufschwung erlebte das Bad mit dem Übergang an das Haus Baden. Die badische Regierung beauftragte im Jahre 1804 den Professor der Chemie und Physik, Hofrat Böckmann zu Karlsruhe, mit der physikalisch-chemischen Untersuchung der Heilquellen im Renchtal. Im Jahre 1810 erschien sein Werk "Physikalische Beschreibung der Renchbäder", das viel zu einer erneuten Hebung des Badebetriebes beitrug. Das Kurleben erfuhr eine neue Blütezeit; Peterstal wurde von zahlreichen berühmten Persönlichkeiten besucht, zu ihnen zählen Kaiser Wilhelm I mit Familie oder Zar Alexander II von Russland mit seinem gesamten Hofstaat.

**Bad Freyersbach**, unmittelbar südlich von Bad Peterstal gelegen, ist besonders berühmt durch seine Schwefelquelle, die einzige im gesamten Renchtal und Umgebung. Erwähnt wird die Quelle erstmals durch Dr. Böhler aus Straßburg im Jahre 1762. Diese Quelle wird ausdrücklich in der Beschreibung von Hofrat Böckmann empfohlen. Da sie in einem "verwahrlosten Zustand" war, wollte man sie Anfang des 19. Jahrhunderts wieder neu herrichten. Bei der Aufgrabung der Quelle fand man eine zweite, bereits seit 1762 gefasste Quelle, den sog. Sauerbrunnen.

Ende des 19. Jahrhunderts zeigten sich auf dem Gelände der Schlüsselwirtschaft (später Schlüsselbad) Spuren einer austretenden Quelle. Bei Grabungen stiess man auf die Umfassungsmauern aus Sandsteinquadern und in Kellertiefe auf eine kunstgerecht gefasste Quelle. In einen Sandsteinquader ist die Jahreszahl 1377 in römischen Ziffern eingemeißelt. Die zweite im Schlüsselbad vorhandene Mineralquelle wurde erst Ende des 19. Jahrhunderts entdeckt (KURVERWALTUNG BAD PETERSTAL 1966).

Bis zur zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts war die Benutzung der Quellen und Bäder des Kurhauses Bad Peterstal nur den Kurgästen, den Fremden, gestattet. Als daher der Müller Schmiederer die auf seinem Anwesen gelegene Stahlquelle im Jahre 1876 fassen liess und eine Badeanstalt für Jedermann errichtete, erfreute sich diese rasch allgemeiner Beliebtheit. Das Anwesen ging 1936 durch Kauf in den Besitz der Freyersbacher Mineralquellen über. Bei der Ausführung von Instandsetzungsarbeiten wurde im Keller eine neue Mineralquelle mit wesentlich höherer Schüttung entdeckt.

Auf kohlenensäurehaltiges Mineralwasser wurde erst Ende des zweiten Weltkrieges gebohrt; zuvor war man gewohnt, Quellen zu graben und den meistens recht gering ergiebigen Austritten auf vielfach verschlungenen Wegen nachzugehen. Die Grabungen erreichten Höchsttiefen von bis zu 8 m, die meist von den Grundstücksbesitzern selbst getätigt wurden. Viele dieser Quellen wurden im Keller des entsprechenden Wohngebäudes vom Hausbesitzer "erschürft". Diese Gebäude befinden sich alle im Talgrund und da das Tal schmal ist, lagen sie in unmittelbarer Nähe zur Rench. Daher warfen diese Flachfassungen auf Dauer hygienische aber auch rechtliche Probleme auf, zumal hinsichtlich Quellspiegel und Ergiebigkeit zwischen den einzelnen Schürfungen Zusammenhänge bestanden. Schutzvorkehrungen gegen bedrohende Oberflächengewässer und zunehmende Verschmutzungsgefahren mußten getroffen werden. Außerdem ergab sich durch den gestiegenen Wasserbedarf

insbesondere durch den Mitte letzten Jahrhunderts einsetzenden bedeutenden Mineralwasserversand - die Notwendigkeit, nach neuen Wegen der Mineralwassererschließung zu suchen. Eine erhöhte Bohrtätigkeit in immer größere Tiefen setzte ein (SAUER 1959, KURVERWALTUNG BAD PETERSTAL 1966, YAHYA 1975, MAYASI 1976).

## 2.2 Bad Rippoldsau

Im Tal der Wolf bei Bad Rippoldsau (Abb. 1) erbringen auf 500 m Tallänge mehrere Schacht- und Schurffassungen eisenhaltige Sauerlinge. Das Wolfstal, in dem vorwiegend NW-verlaufende Erz- und Baryt-Gänge aufsetzen, verläuft in diesem Bereich von Nordwesten nach Südosten. Es schwenkt auf der Höhe von Gaisbach nach Süden und bei Burghach nach Südwesten um. An der Erdoberfläche steht Gneis an, bereichsweise mit mehr oder weniger großen granitischen Einschaltungen. Das Tal ist eng mit steilen Talflanken. Die umliegenden Hochflächen werden z.T. aus Überlagerungen von Mittlerem und Unterem Buntsandstein gebildet.

Die Austritte von Mineral-Kohlensäurelingen in Bad Rippoldsau stehen in Zusammenhang mit dem Prosper- oder Sauerbrunnen-Gang und dem Leopold-Gang des Rippoldsauer Grubenreviers. Die Gruben des Reviers dienten der Ausbeute der hydrothermalen Kupfererzgänge, die sich in der Gegend von Bad Rippoldsau häufen. Der Verlauf der Erzgänge steht mit dem Streichen der Eruptivgesteine in Einklang (SW-NE, NW-SE). Die Mineralisation der Gänge wird in der Hauptsache durch Quarz und Schwerspat gebildet (BLIEDTNER & MARTIN 1986).

Die Entdeckung der ersten Heilquellen dürfte bis in die Mitte des 12. Jahrhunderts zurückreichen. Das Bad: Rippoldsau wurde 1140 am Oberlauf der Wolf von Mönchen der Benediktiner-Abtei St. Georgen gegründet. Der Sauerbrunnen wird bereits im Buch von Tabernaemontanus (1584) erwähnt. Der Straßburger Stadtarzt Dr. Ulrich Geiger fertigte 1577 und 1579 die erste stoffliche Analyse des Rippoldsauer Sauerwassers an. Der Bergbau reicht bis in diese Zeit zurück. Schon früh gab es Konflikte zwischen Bergbau und Mineralquellen, die teilweise so viel Kohlensäure förderten, dass "man einen Balg hat müssen hineinblasen lassen". Auch befürchtete man ein Ausbleiben der Kurgäste, da "die Gäst zue Nachts von Schlaf mit Schrecken erweckht" werden durch den Bergbaubetriebslärm.

Die Fürstenquelle, häufig auch Kunstschacht-Quelle genannt, liegt im Kellergeschoß des sogenannten Fürstenhauses. Sie verdankt ihre Existenz dem Bergbau auf Kupfer. Der Austritt erfolgt an mehreren Stollenabgängen in einem 35 m tiefen Brunnenschacht aus Felsspalten, die bis zu 12 m Tiefe in den Fels hineingetrieben wurden. Der Kunstschacht wurde in der Zeit von 1700 bis 1714 gesenkt und betrieben. Er diente vornehmlich der Zutaufförderung der in den einzelnen Stollenvortrieben anfallenden Grubenwässer. Östlich des Kunstschachtes war ein sogenannter Fahrschacht geteuft, der dem Transport des Erzes und der Bergleute diente, um die Wasserkunst im Kunstschacht nicht zu gefährden. Die eigentlichen Schächte waren auf den NNW-SSE streichenden Prosper-Gang angesetzt.

Rund 70 m NNW vom Kunstschacht befindet sich der ca. 16 m unter Gelände getriebene Küchenschacht, der ebenfalls auf den Prosper-Gang angesetzt war. Mit ihm begann 1685 der Bergbau auf den Gang und damit die Grube Prosper. Man gewann sehr viel Erz, konnte aber nur unter großen Schwierigkeiten arbeiten, weil auf der Schachtsohle eine armdicke Quelle aufgeschlossen wurde, die große Mengen Kohlendioxid entwickelte. Da die Kluftzone, aus der der Sauerbrunnen entsprang, mit Streichen 118° und 70° Nordfallen nur

ca. 5 m nördlich des Küchenschachtes den Prosper-Gang querte, hegte man Besorgnis für die Mineralquellen und stellte den Bergbau 1686 ein. Die Fassung der Küchenquelle rekrutiert sich auf insgesamt 10 Einzelaustritte, deren jeweilige Feststoffgehalte und Gehalte an freier Kohlensäure differieren (BLIEDTNER & MARTIN 1986, REES 1958, SAUER 1959).

### 2.3 Bad Teinach

Bad Teinach liegt südwestlich von Calw im östlichen Randbereich des Schwarzwaldes (Abb. 1), der in diesem Bereich oberflächlich aus dem sich schwach nach Osten neigenden permotriadischen Deckgebirge besteht. Die Mineral- und Thermalwasservorkommen von Bad Teinach befinden sich im Unterlauf der Teinach, die sich während der jüngsten Erdgeschichte in einem schmalen und steilen Tal rund 200 m in die umgebende Buntsandstein-Landschaft eingeschnitten hat. Auf über 4 km Tallänge sind zahlreiche Sauerlinge für die Mineralwasser-Produktion erschlossen worden. Durch eine über 1000 m tiefe Bohrung wird im Bad Teinacher Raum auch Thermalwasser erschlossen.

Die Hochfläche bildet der Plattensandstein des Oberen Buntsandsteins, die Talhänge das Hauptkonglomerat, der Bausandstein und der Eck'sche Horizont des Mittleren Buntsandsteins. Der Eck'sche Horizont reicht bis ins Niveau der heutigen Talsohle oder knapp darunter. Unter ihm folgen noch ca. 30 m Unterer Buntsandstein, der das Rotliegende überlagert. Das EW-gerichtete Teinachtal verläuft entlang des nördlichen Randes des Offenburger Rotliegend-Troges. Die Mächtigkeit des Rotliegenden nimmt von wenigen Metern an dieser Stelle in südlicher Richtung rasch auf etwa 120 m zu. Unterhalb der Rotliegend-Sedimentgesteine beginnt das kristalline Grundgebirge mit dunklen Paragneisen der zentralschwarzwälder Gneismasse und jüngeren intrudierten Graniten. Die Grenze zum nord-schwarzwälder Granitgebiet im Nordwesten verläuft bei Hirsau.

Bruchtektonisch ist die Umgebung von Bad Teinach durch das NW-streichende Graben- und Staffelschollen-System von Neubulach sowie durch die NNE-verlaufenden, wenig bedeutenden Teinacher Verwerfungen geprägt. Es sind durchweg Abschiebungen, also durch Zerrung entstandene, etwa mit 65° einfallende Scherflächen, die eine Ausweitung der Kruste verursachten.

Der Neubulacher Graben ist ein 10 km langes Bruchsystem, das auf einer Länge von 5 km als bis zu 2 km breiter Graben mit maximalen Absenkungen von 25 m entwickelt ist. Der Neubulacher Graben gehört einer mehrfach unterbrochenen Störungszone (Wildberg-Herrenalber-Verwerfungszone) an, die sich vom Rand des Oberrheingrabens bei Waldprechtsweiler über Herrenalb, Enzklösterle, Neubulach und Herrenberg bis zum Bebenhäuser Bruchsystem verfolgen läßt. Dieser Graben überschreitet auf Höhe des Lauterbachhofes das Teinachtal. In den mittelalterlichen Erzabbauen nach Kupfer, Wismut und Silber fand man beide Grabenrand-Störungen. Eine weitere NW-streichende Störungszone wird auf der Höhe des Katharinenplaisirs ins Teinachtal einmündende Emberger Tal vermutet. Sehr bedeutungsvoll für das Teinacher Mineralwasser-Vorkommen sind die beiden NNE-streichenden, nach Osten einfallenden Verwerfungen, die am Badehotel und am Schwimmbad das Tal queren (ORTLAM 1974, CARLÉ 1982).

Die erste urkundliche Nachricht datiert aus dem Jahre 1345. Die Quellen wurden früher fast ausschließlich zu Badezwecken genutzt. Der heute so dominierende Mineralwasserversand begann bereits im 17. Jahrhundert. In Krügen wurde damals das Mineralwasser von



Trägern in Rückenkörben über Land, vor allem in die Bäder Wildbad und Liebenzell, sowie nach Calw und Hirsau gebracht. Unterwegs mußte das Handelsgut im Wasser frischer Quellen gekühlt werden (CARLÉ 1982).

Im Laufe der Jahre war man gezwungen die durch "Wildwasser verdünnten" (oberflächennahe Wässer) Quellen mehrfach zu sanieren. 1838 setzte erstmals eine Mineralwasser-Erschließung durch Bohrungen ein, bei der das Mineralwasser unter den mächtigen Talablagerungen im anstehenden Buntsandstein gefaßt wurde. Da das Wasserdargebot bald nicht mehr ausreichte, wurden in mehreren Bohrkampagnen Quellen neu und tiefer - bis weit in das kristalline Grundgebirge hinein - erbohrt.

### **3. Die Thermalquellen**

#### **3.1 Bad Wildbad**

Bad Wildbad liegt im Nordschwarzwald an der in diesem Bereich nach Norden fließenden Großen Enz südöstlich von Bad Herrenalb und westlich von Bad Liebenzell (Abb. 1). Der Ort liegt wie die Thermalquellen von Bad Liebenzell, Bad Herrenalb und Baden-Baden auf einem Granitsockel -dem nordschwarzwälder Granitmassiv-, der in mehreren Phasen im Oberkarbon intrudierte. Der Granit intrudierte dort, wo der Faltenbau des Saxothuringikums an den zentralen Kern des variskischen Gebirges angrenzt. Die Südgrenze dieses Granitstockes verläuft auffallend geradlinig in Richtung N 60°E vom Kinzigtal oberhalb Offenburg bis zum Nagoldtal zwischen Calw und Hirsau. Im Südwesten, im Rheintalgraben bei Offenburg, wurde die Fortsetzung dieses Plutons mit einer Tiefbohrung erfaßt. Im Norden taucht der Granitstock auf einer weitgespannten und durch Bruchtektonik verstellten Bogenlinie ab (V. ALBERTI 1826, KIDERLEN 1977, METZ 1977, GEYER & GWINNER 1986).

Im Raum Bad Wildbad liegen zwei Granitvarietäten auf engstem Raum beieinander. Man unterscheidet den hellen, grobkörnigen Zweiglimmer-Forbachgranit bzw. Kegelbachgranit von dem biotitreichen, daher dunklen, und mit großen porphyrischen Kalifeldspäten gespickten Wildbadgranit. Der Wildbadgranit besitzt Gneishabitus. Der Forbachgranit (Kegelbachgranit) durchdringt von Südosten her den älteren Wildbadgranit auf einer bis zu 250 m breiten Zone. Die Grenzzone zieht unterhalb des Thermalgebietes von SSW kommend in Richtung NNE mitten durch die Stadt. Der Wildbadgranit ist wesentlich geringer geklüftet als der Forbachgranit (Kegelbachgranit). Das Thermalgebiet ist daher auf das Areal des Forbachgranites (Kegelbachgranit) beschränkt. Der Wildbadgranit fungiert in diesem Bereich quasi wie eine hydraulische Barriere.

Die Nordschwarzwälder Schwelle, das Granitmassiv, ist im Bereich Bad Wildbad in quer zum Enztal orientierte Rücken und Mulden gegliedert. In den Mulden und von Osten her auch auf die Rücken übergreifend kam das Obere Rotliegende zur Ablagerung. Seine Mächtigkeit ist daher stark schwankend. Innerhalb des Rotliegenden wird das Korn von unten nach oben rasch feiner; schluffige und tonige Gesteine stellen sich ein. Wo das Rotliegende auf dem Granit aufliegt, wirkt es hydraulisch gesehen abdichtend. Unter dem Rotliegenden ist der Granit örtlich bis zu 2 m tief mürbe verwittert. Über dem Rotliegenden wurde der etwa 35-40 m mächtige Untere Buntsandstein abgelagert. Bereichsweise liegt der Buntsandstein auch direkt auf dem Granit.

Als Regenerationsflächen für die Wildbader Quellen kommen nach KIDERLEN (1977) vor allem die Abschnitte des Enz- und Eyachtals in Betracht, in welchen der Granit zutage austreicht. Niederschlagswässer können bis in große Tiefen in den Granitpluton einsickern, zumal sein Kluftnetz das Gebirge gleichartig und zusammenhängend durchzieht. Auf dem Weg in die Tiefe wird das eindringende Wasser erwärmt und aufmineralisiert. Das zirkulierende Wasser tritt im Quellgebiet von Bad Wildbad aus der Tiefe aufsteigend wieder zutage. BENDER (1995) gibt Zirkulationszeiten von ca. 8000 Jahren an. Die Lage des Quellgebietes ist durch die geringe Durchlässigkeit des gneisähnlichen Wildbadgranits im NNW und durch das Auskeilen des Rotliegenden im Norden, Osten und Süden bestimmt. Wildbadgranit und Rotliegendes fungieren als hydraulische Sperren, begrenzen damit sowohl den Fießweg als auch den unterirdischen Durchsatz und zwingen das Thermalwasser aufgrund der hydraulischen Potentialdifferenz dort zum Austritt, wo Forbachgranit ansteht. Das geologische Profil der Thermalwasserbohrung VI hat gezeigt, daß im Thermalgebiet unterhalb des gut durchlässigen Kegelbach- und Forbachgranites die geringer durchlässigen Gesteine des Wildbadgranites anstehen, die nach Nordwesten auskeilen und somit eine zusätzliche Einengung für das Fließregime in der Vertikalen darstellen und den Aufstieg des aus südlichen bis östlichen Richtungen stammenden und somit "schräg aufsteigenden" Thermalwassers erzwingen.

In Bad Wildbad wurde bereits im 12. Jahrhundert (Hohenstaufferzeit) gebadet (Abb. 2). Bis 1838 waren jedoch nur die "Spaltenquellen" in den fünf Badebecken und einige "wilde" Thermalwasseraustritte rechts der Enz bekannt. Diese teils natürlichen, teils nahe der Erdoberfläche erschürften Thermalquellen befanden sich auf einem leicht geschwungenen, in Nord-Süd-Richtung etwa 70 m langen und 10-15 m breiten, Streifen zwischen dem Enzbett und dem rechten Hangfuss. Als die aus Buntsandsteinquadern gemauerten, z.T. sehr alten Gemeinschaftsbadebecken dem Badebetrieb nicht mehr genügten, begann man in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts mittels Bohrungen rechts der Enz Thermalwasser zu fassen und die natürlichen Quellaustritte abzudichten. Eine weitere Bohrperiode auf der linken Talseite im Gelände des späteren Königkarlsbad schloß sich 1862-1864 an. Insgesamt wurde damit in Bad Wildbad das Thermalwasser in über 40 kleinkalibrige Bohrungen, die zwischen 10 m und 40 m tief waren, erschlossen. Die erste systematische Erkundung des Thermalgebietes erfolgte in den 50-iger Jahren dieses Jahrhunderts durch Bodentemperaturmessungen (KIDERLEN 1977). Das eigentliche Thermalgebiet hat demnach eine Nord-Süd-Erstreckung von ca. 330 m und eine Ost-West-Ausdehnung von ca. 260 m. Innerhalb dieses Bereiches gibt es drei Zentren: auf der linken Enztalseite beim Königkarlsbad und auf der rechten Talseite beim Eberhardsbad und südlich davon.

Die geothermischen Ergebnisse führten dazu, daß in den folgenden Jahren 1959-1964 insgesamt vier Tiefbrunnen niedergebracht wurden. Dadurch war erstmals der Einbau von Unterwasserpumpen möglich. Ausserdem liess sich dadurch eine hygienische Kontrolle des Thermalwassers einwandfrei gestalten, und das Wasser war vor Verunreinigungen geschützt.

# Tractat der Wildbeder natuer wirkung vnd eigenschafft mitsampt vnderweisung wie sich ein yeder bereiten sol ee er badet/auch wie man baden/ vnd erliche zufell der badenden wenden sol/Gemacht mit grossen fleiß durch Laurentium phriesen der freien kunst vnnid arhys doctoriem. Neptunus Ein Privilegio



Abb. 2: Phries L. (1519) Titelpage of Bädertraktat, Strasbourg; (cited in Föhl Th E., Wildbad, Die Chronik einer Kurstadt als Baugeschichte (1988) pp. 20. Staatsbad Wildbad, Müller, Neuenbürg.)

## 3.2 Bad Liebenzell

Bad Liebenzell (Abb. 1) liegt nördlich von Calw im Nagoldtal, das in diesem Bereich ca. 280 m tief in die ungestörten Schichten des Buntsandstein eingeschnitten ist. Der Obere Buntsandstein bildet die Hochfläche zu beiden Seiten des Tales. Der Mittlere und Teile des Unteren Buntsandsteins nehmen die Talhänge ein. Der Grundgebirgssockel besteht aus einer turmalinreichen Abart des nordschwarzwälder Zweiglimmergranits. Wahrscheinlich handelt es sich dabei um einen Granitrücken als ein Teil der im permischen Relief hervor-

tretenden Nordschwarzwälder Grundgebirgsschwelle. 2,3 km talaufwärts, in Hirsau, und in Calw trafen Bohrungen bereits auf Gneis. Die Gesamtform des Granitplutons bei Bad Liebenzell deutet darauf hin, daß er schon wenig nördlich von Liebenzell abtaucht (KIDERLEN 1981). Unmittelbar nördlich dieses Granitrückens erfolgt ein vermutlich staffelförmiger Abbruch zu einer schmalen tektonischen Grabenstruktur, die mit Rotliegendesedimenten gefüllt ist. Mehrere Verwerfungen kreuzen das Nagoldtal mit Abschiebungsbeträgen von einigen Metern. Ausserdem gibt es Hinweise auf eine alt angelegte Nord-Süd-Störung, die zwischen Paracelsus- und Helenenquelle verläuft. Auf dem Granit liegt im Thermalgebiet als hydraulische Trennschicht zum hangenden Unteren Buntsandstein das schwer durchlässige Rotliegende. Im Bereich der Grundgebirgsschwelle fehlt es. Auch kann es bei minderer Mächtigkeit durch Bruchtektonik stark geklüftet sein, so daß örtlich hydraulische Kontakte zwischen dem Granit und dem nach Osten einfallenden Buntsandstein möglich sind. Die eigentlichen Quellbezirke liegen von Bad Liebenzell ausgehend nach Süden bis zur Mündung des Kollbaches in das Nagoldtal. Auf 1,3 km Tallänge erstrecken sich drei Quellbezirke.

Bereits seit dem 15. Jahrhundert sind Thermalwasserfassungen von Bad Liebenzell aktenkundig. Zu ihnen gehören die Hausquelle des Oberen Bades und die Urquelle des Unteren Quellbezirkes. Letztere war in einem aus Buntsandsteinquadern gemauerten "Badkasten" gefaßt und stieg von der offenen Schachtsohle her aus den Kiesen und Sanden der Talfüllung auf (METZ 1977).

### 3.3 Baden-Baden

Baden-Baden ist im weiten Talkessel der Oos und auf den ihn umgebenden Hügeln erbaut; eingebettet ist die Landschaft in die hohen, bis über 1000 m aufragenden Schwarzwald-Berge und den im Westen befindlichen niedrigen Vorbergen zum Rheintal hin (Abb. 1). Auf dem Florentiner Berg im nordöstlichen Stadtteil erhebt sich das Neue Schloß von Baden-Baden. Unmittelbar unterhalb des Schloßes an den Talflanken in den Gärten am Florentiner Berg entspringen die alten, zum Teil in Stollen gefaßten Quellen von Baden-Baden. Das Quellgebiet ist etwa 110 m breit und 80 m bis 90 m tief. Es liegt zwischen der Stiftskirche im Westen und der Westfassade des Frauenklosters zum Heiligen Grab, der Höhenlinie 195 m im Florentinerberg im Norden und der Römischen Badruine im Süden. Der mittlere Gesamterguß der Baden-Badener Thermen liegt bei 8,9 l/s mit Temperaturen, die von 54°C bis 68,8°C reichen.

Baden-Baden liegt in der Badener Oberkarbon-Rotliegend-Senke, welche durch SW-NE-Streichen gekennzeichnet ist. Ihr Kern ist die in gleicher Richtung verlaufende Battert-Aufwölbung, in deren Norden die Rotenfelser Senke und in deren Süden die Lichtentaler Senke angelegt ist, kleine Teiltröge des gesamten Badener Troges. Diese drei Zentraleinheiten werden durch Verwerfungen voneinander getrennt. Die Trogfüllung ist nach bisheriger Kenntnis über 1000 m mächtig, ca. 400 m Oberkarbon und ca. 600 m Rotliegendes (KIRCHHEIMER 1959, SAUER 1957 u. 1966, CARLÉ 1975, MAUS & SAUER 1972).

Die historischen Thermen traten im Grenzbereich der Battert-Aufwölbung und der Lichtentaler Teilsenke entlang von Thermalwasserspalten auf Verwerfungszonen aus und hinterliesen dabei einen 6 m mächtigen, nachrömischen Sinterkegel aus kieselsäurehaltigem Kalk etwa 20 m über dem Talgrund. Die Hauptthermalspalte verläuft vom Beutig über das

Kurhaus zum Neuen Schloß am Florentiner Berg. Die Thermalquellen treten am Südhang des Florentiner Berges südöstlich der Hauptthermalspalte im Bereich einer stark zerrütteten, durch Störungen umgrenzten Oberkarbonscholle aus. Sie wurden von 1868 bis 1871 größtenteils durch Stollen und Schächte gefaßt.

An die Oberkarbon-Rotliegend-Senke grenzt im Süden, getrennt durch die SW-NE verlaufende Gernsbacher Störungszone, das höher aufragende Nordschwarzwälder Granitmassiv an, dessen Oberfläche nach Norden unter die Senke abtaucht. Als Regenerationsgebiet für die Thermalwässer wird das südlich der Lichtentaler Senke gelegene Granitmassiv betrachtet. Das von dort in die Lichtentaler-Senke vordringende Wasser wird im Grenzbe- reich zur Battert-Aufwölbung in der Hauptthermalspalte zum Austritt gezwungen (KIDER- LEN 1953). Die ungewöhnliche Lage der Thermalwasseraustritte ca. 30 m über Talniveau wird durch eine Abdichtung bestehend aus tonigem Gesteinsmaterial bewirkt. Die Radium- und Urangehalte der Thermalwässer sollen aus den Sedimenten des Oberkarbon stammen. Es sind Schwemmfächerablagerungen bestehend aus dem Material des erodierten Granites im Süden der Lichtentaler-Senke (MAUS 1971).

### 3.4 Bad Säckingen

Bad Säckingen liegt am Fuß des südlichen Schwarzwaldes direkt am Hochrhein (Abb. 1). In den Klostermatten nördlich Säckingen entsprangen einst auf natürliche Weise drei warme und eine kalte Quelle so eng zusammen, daß sie zwar gemeinsam in einem gemau- erten Schacht gefaßt werden mussten, jedoch jede separat in diesen hineinfließt. Der Aus- tritt dieser mit 29,5°C wärmsten Quelle (Natrium-Chlorid-Therme), genannt Badquelle, ist urkundlich seit 1453 belegt, mit Sicherheit aber schon früher bekannt gewesen. Nach hand- schriftlichen Aufzeichnungen soll die älteste Fassung der Badquelle aus dem Jahre 1364 stammen. HASEMANN (1928) führt weitere ehemals in Bad Säckingen ausgetretene, warme Quellen auf. Durch Spengungen des Rheinkraftwerkes Säckingen AG im Rhein im Jahre 1964 wurde ungewollterweise eine direkte Verbindung ("Thermenlinie") zur Badquelle nachgewiesen.

Geologisch liegt Bad Säckingen an der Stelle, wo der aus Granit und Gneis bestehende kristalline Kern des Schwarzwaldes an Verwerfungen ziemlich rasch nach Süden unter das Deckgebirge aus permotriassischen Sedimenten abtaucht (Abb. 3). Das kristalline Grund- gebirge tritt im nördlichen Stadtbereich zu Tage. Auf den Anhöhen Maisenhardt und Egg- berg im Norden der Stadt wird es von Buntsandstein überdeckt. Dieser Teil des Grundge- birgsschwarzwaldes wird Vorwaldscholle genannt. Sie wird im Westen durch die etwa N-S verlaufende Bruchzone des Wehratales gegen den Dinkelberg und im Norden durch die Vor- waldverwerfung gegen den höheren Südschwarzwald begrenzt.

Im Oberkarbon erfolgte die Intrusion des Säckinger Granites, der im Gebiet von Bad Säckingen stellenweise bis an die Erdoberfläche tritt (Abb. 3). Im südlichen Stadtteil von Bad Säckingen wird er vom Rotliegenden und Quartär geringmächtig überdeckt. Die Gren- zen des Plutons in die Tiefe sind nicht bekannt. Es wird eine batholitische Form angenom- men. In der Umgebung des Granitstockes wird der Gneis von zahlreichen Gängen durchzo- gen.

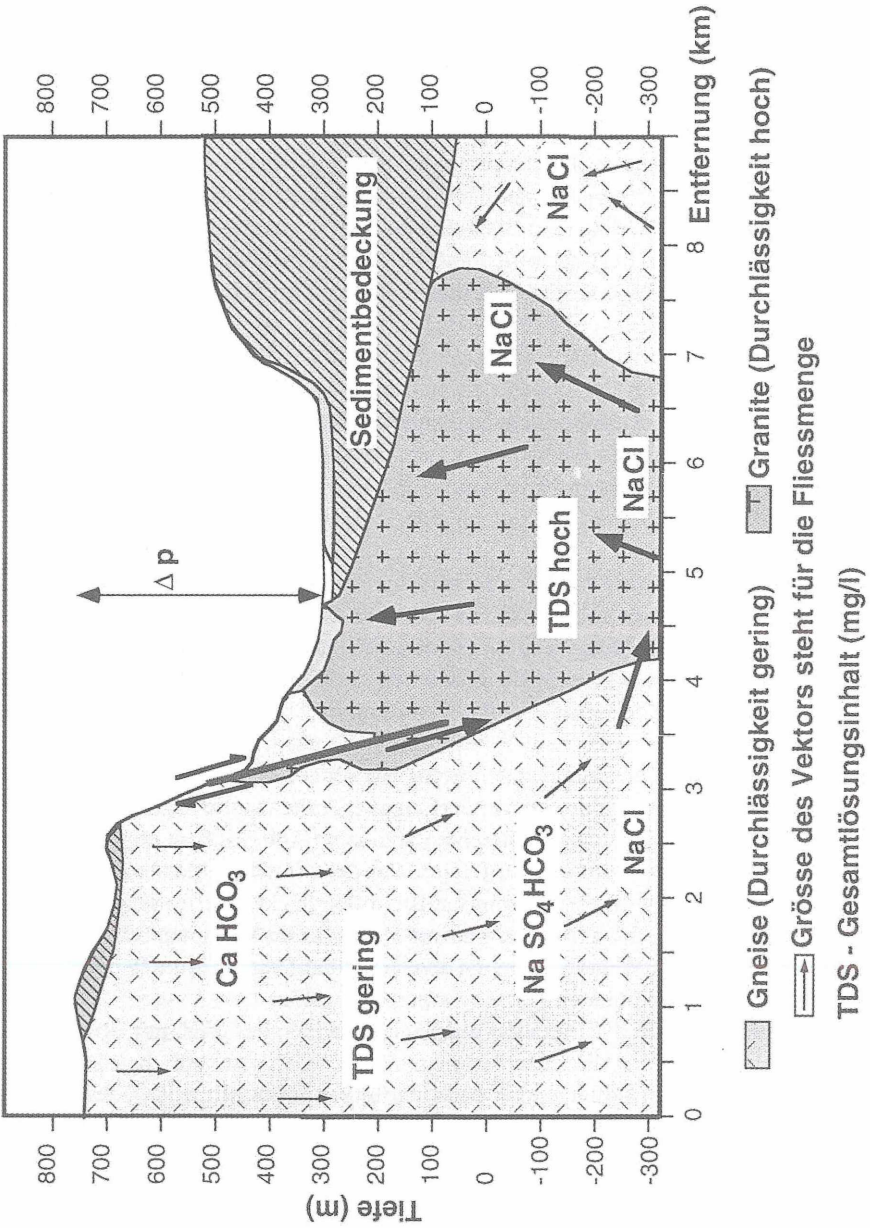


Abb. 3: Schematischer geologischer Schnitt durch das Thermalwassergebiet von Bad Säckingen im Süd-Schwarzwald – eingetragen ist die Thermalwasserzirkulation.



Nach Norden wird der Pluton durch die hier etwa ost-west streichende Eggberg-Verwerfung abgeschnitten, die im wesentlichen aus zwei parallelen steil nach Süden einfallenden Störungen besteht. Der Versatz beträgt maximal 200 m. Die nord-süd streichenden Störungen, welche den Wehratalabbruch im Osten begleiten und bis in das Säckinger Gebiet hineinreichen, treffen sich mit jenen, die ost-west verlaufen und im Bereich der eigentlichen Vorwaldzone, im Süden der Eggberg-Verwerfung, mit dieser etwa parallel gehen. Von Bedeutung ist schließlich, daß die Störungen Ergebnis von Zerrbewegungen sind, hervorgerufen durch die Bildung des Oberrheingrabens, Hebung des Schwarzwaldes und vermutlich bereits auch durch die Bildung des Permokarbondtroges der Nordschweiz. Die Störungen sind häufig geöffnet und mit Mineralen besetzt (SAUER 1962, 1969, SCHMASSMANN u.a. 1984).

Als Regenerationsgebiet für die Säckinger Thermen wird der nördliche Hotzenwald zwischen Wehra und Murg betrachtet. Die hier fallenden Niederschläge gelangen teilweise als unterirdischer Abfluß über die Verwitterungszone bis in Klüfte des Granites in größere Tiefen hinab, heizen sich auf und treten südlich entlang einer elliptischen Bahn wieder zutage aus (Abb. 3). Das von Norden nach Süden im Granit in größeren Tiefen strömende und sich dabei aufheizende und aufmineralisierende Wasser stösst im Süden unterhalb der sedimentären Deckschichten in der Nordschweiz auf einen Bereich geringerer Durchlässigkeit (Begrenzung des Granitplutons gegen die geringer durchlässigen Gneise und/oder den Permokarbondtrog), wodurch ein Stau mit Überdruck entsteht. Das Thermalwasser steigt dort auf, wo die auf dem Granitpluton im Süden lagernden, abdichtenden Schichten des Rotliegenden im Norden auskeilen. Begünstigt wird dieser Aufstieg durch die generell höhere Durchlässigkeit des Granites sowie durch Verwerfungsspalten, wie sie beispielsweise bei Sanierungsarbeiten an der Badquelle und bei ihrer Neufassung angefahren wurden (STOBER 1995).

#### **4. Modellvorstellung zur Genese der Mineral- und der Thermalwässer**

##### **4.1 Strömungsverhalten**

Die Wasserführung und das Fließsystem des kristallinen Grundgebirges läßt sich allgemein folgendermaßen beschreiben: Die Gesteinsmatrix ist äußerst gering durchlässig. Die Hauptdurchlässigkeit ist an diskrete Zonen gebunden. Diese Zonen können zwischen wenigen Zentimetern und mehreren Metern mächtig sein. Die Orientierung und die Abstände dieser Zonen sind sehr verschieden, so daß davon auszugehen ist, daß es sich um ein mehr oder weniger zusammenhängendes Netzwerk handelt, auf dem der eigentliche Wassertransport im kristallinen Grundgebirge erfolgt. Dieses Netzwerk kann bereichsweise sehr engstündig sein (STOBER 1990, NAGRA 1985, 1989, 1991a, 1991b, 1992).

In den Mineralwasserprovinzen des Mittleren Schwarzwaldes wird von verschiedenen konkurrierenden Firmen und Institutionen Mineralwasser entnommen. Hinzu kommen noch einige Privat-Mineralwasserentnehmer. Bei Pumpversuchen aus Bohrungen in den einzelnen Mineralwasserprovinzen zeigte sich, daß sehr viele Bohrungen hydraulisch miteinander in Verbindung stehen und dass bestimmte Fassungen in ihrer Leistung und Mineralisation stark voneinander abhängen. Die jeweiligen Durchlässigkeiten in den einzelnen Mineralwasserregionen sind sehr unterschiedlich; sie liegen generell zwischen  $K = 4 \cdot 10^{-10}$  m/s und

$K = 6 \cdot 10^{-6}$  m/s. Die höchsten Durchlässigkeiten sind an das Renchtal bzw. an das Tal der Wolf oder Teinachtal gebunden und dort jeweils an den unmittelbaren Talgrund. Erhöhte Durchlässigkeiten treten auch im Mündungsbereich gewisser Seitentäler in das jeweilige Haupttal auf. Offensichtlich wurde die Anlage der Täler durch Störungszonen bzw. Mineralerzgänge vorgegeben, die Schwächezonen in Bezug auf erosive Kräfte darstellen. Bohrungen seitlich dieser "Hauptadern" weisen wesentlich geringere Durchlässigkeiten auf (STOBER 1995).

Anders als die Gebiete der Mineralwasseraustritte, die alle in Gneis-Gebirgen liegen, treten die Thermalwässer ausschliesslich in granitischen Gebirgen aus. Ihre Schüttung ist wesentlich grösser, was auf die höhere Durchlässigkeit des Gebirges zurückzuführen ist. Beispielsweise erreicht sie im Granit-Gebirge, aus dem das Thermalwasser in Bad Wildbad gefördert wird, Größenordnungen, wie sie für Kiesaquifere typisch sind ( $K = 1 \cdot 10^{-6}$  m/s bis  $K = 6 \cdot 10^{-5}$  m/s). Aber auch in den anderen Thermalwassergebieten werden ähnlich hohe Werte erreicht. Ebenso ist die Spannweite der Durchlässigkeit in den Thermalwassergebieten wesentlich geringer als in den Mineralwasserprovinzen. Aus Aufzeichnungen des Betriebs der alten Fassungen in Bad Wildbad beispielsweise ist ersichtlich, daß die Bohrungen hydraulisch so aufeinander reagierten, als läge ein einheitlicher Porenaquifer vor (STOBER 1995). Während in den Mineralwasserprovinzen die hohen Durchlässigkeiten linearen Strukturen im Talgrund folgen, sind die hohen Durchlässigkeit in den Thermalwassergebieten flächig verbreitet.

Es gibt somit einen gravierenden Unterschied zwischen der Art des Strömens in den Granit- und in Gneisgebirgen. Nur dadurch, dass die Durchlässigkeiten in den Graniten so gross sind und flächig, nicht linear auf einzelnen Strukturen, verteilt sind, nur dadurch können grosse und somit auch heisse Wassermengen aus der Tiefe aufsteigen und austreten und zwar in so grossen Mengen, wie sie für einen Badebetrieb benötigt werden. Nur die Möglichkeit des Aufstiegs grosser Wassermengen aus der Tiefe bringt die Gewähr, dass das oben an der Erdoberfläche austretende Wasser auch heiss ist. Somit sind also die hohen Durchlässigkeiten im Granitgebirge die Voraussetzung für das Vorhandensein der Thermalquellen. Bei den entsprechend geringeren Durchlässigkeiten in den Gneisgebirgen können daher auch nur geringere Wassermengen aufsteigen. Diese sind dann eben kühl, zumal die Austritte linearen Strukturen mit grösserer Abkühlfläche folgen.

Sowohl die gewonnenen Thermalwässer als auch die Mineralwässer sind einer Zirkulation unterworfen. Auf den Höhen sickert Niederschlag in das Gebirge ein und dringt in immer grössere Tiefen vor. Bei seinem Weg in die Tiefe reagiert dieses "Niederschlagswasser" mit der umgebenden Gesteinsmatrix, eine sog. Wasser-Gesteins-Wechselwirkung setzt ein, und das Wasser erhält hydrochemisch die Signatur des ihn umgebenden Milieus. Die Austritte der zirkulierenden Wässer liegen sowohl bei den Mineral- als auch bei den Thermalwässern im Talgrund. Der Motor, der in beiden Fällen die Zirkulation in Gang setzt, ist das Relief mit seiner hohen Energie, also die tief in das Gebirge eingeschnittenen Täler. Aufgrund der höheren Reliefunterschiede im Bereich der Granitgebirge reicht die Zirkulation dort wesentlich tiefer hinab als in den Mineralwasserprovinzen. In den Thermalgebieten muss nach Berechnungen anhand von Geothermometer mit Zirkulationstiefen von 2000 m bis 4000 m gerechnet werden (STOBER 1995), in den Mineralwasserprovinzen dürften nur einige 10er bis wenige 100 m vorliegen. Die Zirkulationsdauer für Thermalwässer im Nord-



Schwarzwald wird nach Isotopenanalysen mit 8000 bis 10000 Jahren angegeben (BENDER 1995). Hydraulische Überlegungen lassen eher auf längere Verweilzeiten schliessen.

## 4.2 Hydrochemische Eigenschaften der Mineral- und Thermalwässer

Sowohl die Mineralwassersäuerlinge als auch die Thermalwässer des Schwarzwaldes sind hochmineralisiert, doch handelt es sich um völlig verschiedene Wassertypen (Abb. 4). Die Thermalwässer sind generell reich Natrium und Chlorid, die Mineralwässer sind vorwiegend Calcium und Hydrogenkarbonat reich und Chlorid arm. Zum Teil enthalten sie auch bedeutende Anteile an Natrium; ihr  $\text{CO}_2$ -Gehalt kann einige 1000 mg/l betragen, während die Thermalwässer kein oder kaum  $\text{CO}_2$  enthalten. Auf Abbildung 4 wurden die beiden Wassertypen in einem Schöller-Diagramm einander gegenübergestellt.

Der hohe Natrium-Chlorid-Gehalt der Thermalwässer wurde noch vor wenigen Jahren generell auf die Auslaugung salinarer Ablagerungen - meist aus dem Tertiär des Oberrheingrabens - zurückgeführt. Bei den Säcker-Thermen am Fusse des Süd-Schwarzwaldes wurde eine Auslaugung von Salinar-Schichten der Trias (Mittlerer Muschelkalk) in der Nord-Schweiz bzw. dem Dinkelberg oder des Permo-Karbon (Rotliegendes), das südlich von Bad Säckingen im Untergrund vorhanden ist, postuliert (z.B. SAUER 1962, 1969, GEYER & GWINNER 1986, SCHMASSMANN u.a. 1984, WENDT 1996, mündl. Mitteilung). Die hohen Na-Cl-Gehalte in den Thermalwässern von Bad Wildbad oder Bad Liebenzell wurden ebenfalls auf salinare Ablagerungen im Tertiär des Oberrheingrabens zurückgeführt. Ihr Transport auf Kluftzonen quer durch den Schwarzwald bis hin zu den topographisch höher gelegenen Austrittsstellen bereitete auch unter hydraulischen Gesichtspunkten Schwierigkeiten. Andererseits ist aus Tiefbohrungen und tiefen Minen bekannt, dass in kristallinen Gebirgen in der Tiefe weltweit salinare Wässer auftreten (z. B. EDMUNDS u.a. 1985, SCHÄDEL & STÖBER 1987, KANZ 1987, NORDSTROM u.a. 1989, FRITZ & FRAPE 1987).

Für eine Anreicherung von Chlorid im Wasser gibt es auch andere Möglichkeiten als nur diejenige aus benachbarten salinaren Ablagerungen. So kann es beispielsweise auch aus einer Intrusion von (fossilem) Meerwasser stammen oder aber bei Verwitterung von Gestein aus beschädigten Flüssigkeitseinschlüssen, aus Korngrenzen einzelner Minerale oder es kann aus dem Mineralgitter bestimmter Minerale wie Biotit, Hornblende oder Apatit freigesetzt werden (ALTHAUS & BAUER 1987, KULLERUD 1996, STÖBER & BUCHER 1999a).

Anhand der Cl/Br-Systematik konnte für die Thermalwässer des Schwarzwaldes gezeigt werden, daß ihre Salinität im Gegensatz zu den Mineralwässern eine marine Signatur aufweist, d.h. dass derzeit genetisch hauptsächlich eine Intrusion von fossilem Meerwasser anzunehmen ist. Ein Eintrag aus den salinaren Ablagerungen des Tertiärs im Oberrhein-graben oder aus dem Muschelkalk kann auf Grund der Cl/Br-Systematik ausgeschlossen werden.

Das Cl/Br-Verhältnis von Meerwasser beträgt  $\text{Cl/Br} = 288$ . Bei der Verdünnung von Meerwasser mit meteorischem Wasser bleibt dieses Cl/Br-Verhältnis wegen der geringen Cl-, Br-Konzentration meteorischer Wässer erhalten. Wasser, das umgekehrt seine Salinität aus der Auflösung von Halit erhält, weist entsprechend grosse Cl/Br-Verhältnisse von i.d.R. einigen 1000en auf. Halit aus dem Oligozän von Buggingen aus den Kaliminen im Rheintalgraben wurde untersucht und  $\text{Cl/Br} = 2386$  gemessen; ebenso der Halit aus dem Muschelkalk der Salzlagerstätte Schweizerhalle in der Nord-Schweiz ( $\text{Cl/Br} = 9877$ ). Im Gegensatz

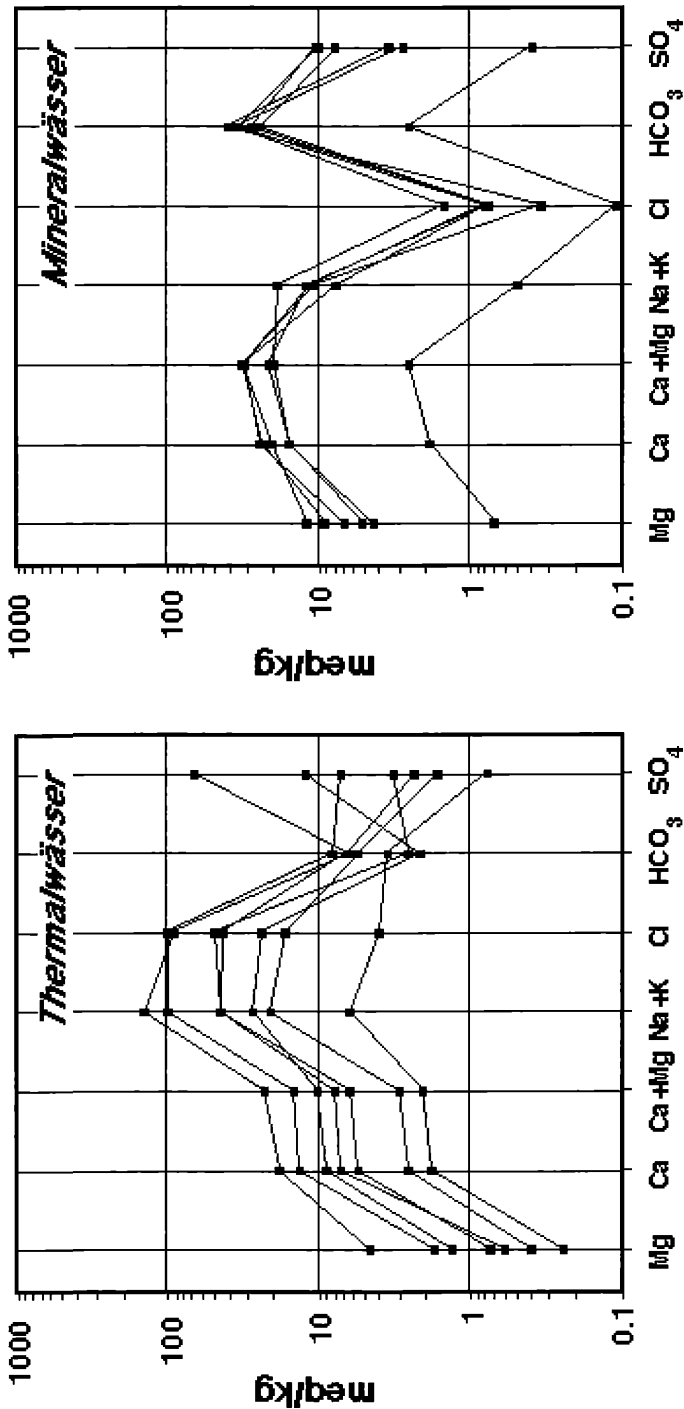


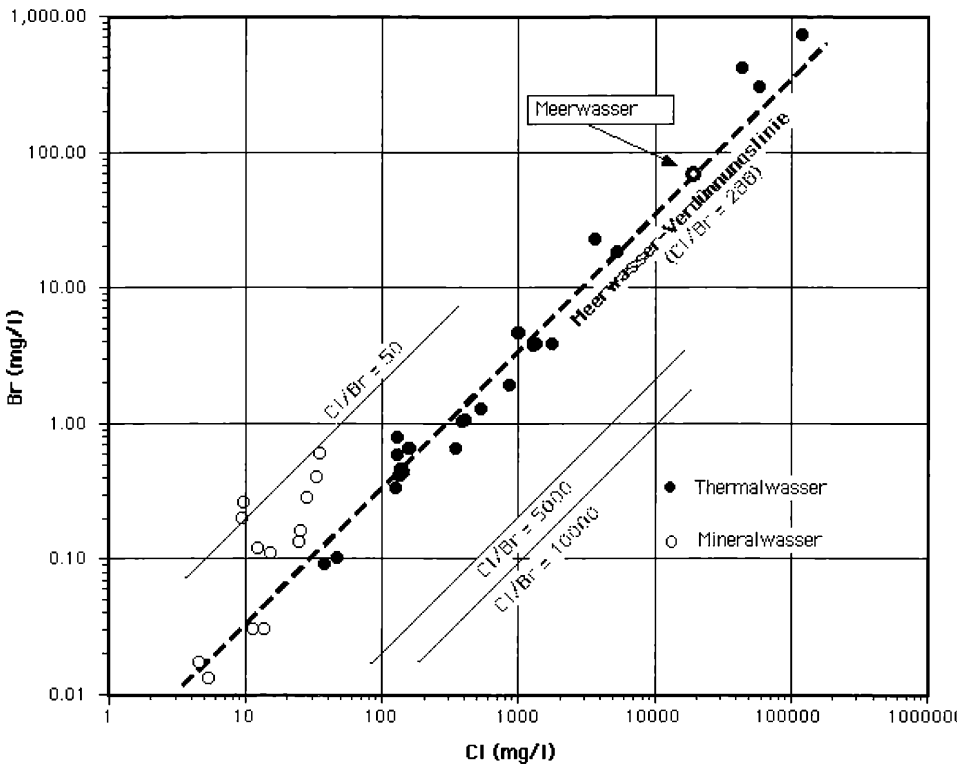
Abb. 4: Schöller-Diagramm von Thermal- und Mineralwässern im kristallinen Grundgebirge des Schwarzwaldes.

dazu liegen die Cl/Br-Verhältnisse in kristallinen Gesteinen weit unterhalb des Wertes für Meerwasser, so daß ein ausschliesslich durch Verwitterung kristalliner Gesteine in das Fluid eingebrachtes Cl/Br-Verhältnis bei ca.  $\text{Cl/Br} = 50\text{--}80$  liegt. Die Wässer des kristallinen Grundgebirges des Schwarzwaldes zeigen, daß die Cl- und Br-Daten der Thermalwässer, d.h. der Tiefenwässer, nahe der Meerwasserverdünnungslinie liegen (Abb. 5), somit also eine marine Signatur aufweisen. Eine marine Herkunft der Thermalwässer belegen auch ihre molaren Na-, Cl-Verhältnisse, die Beziehung zwischen Na bzw. Cl und TDS im Vergleich zur Meerwasserverdünnungslinie (STOBER & BUCHER 1999b). Bei einigen Thermalwässern ist das Cl/Br-Verhältnis etwas geringer als bei Meerwasser; hier spielen Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen auf Grund langer Verweilzeiten im kristallinen Milieu eine entscheidende Rolle.

Erste Laugungsversuche an Gneisen im Mittleren Schwarzwald (Grube Clara, Steinbruch Pauli Schänzle) und Graniten (Triberger Granit) aus dem Mittleren Schwarzwald (LIEGL 1998, ZHU 2000), zeigen, daß die Cl/Br-Verhältnisse der Laugungswässer wesentlich geringer sind als bei Meerwasser und auch geringer als in den Thermalwässern. Grundsätzlich fallen die Cl/Br-Verhältnisse bei den gelaugten Gneisen geringer aus als bei dem Triberger Granit. Das bei den Laugungsexperimenten aus den Gesteinen entfernte Chlorid und Bromid stammt i.w. aus Flüssigkeitseinschlüssen und aus Mineralen wie Biotit oder Amphibol. Aus diesem Grund verhalten sich die meisten Mineralwässer völlig anders als die Thermalwässer. Die Mineralwässer entstehen an Ort und Stelle durch die Verwitterung des Gebirges mit Freisetzung von Ionen in das Wasser, die durch die hohen  $\text{CO}_2$ -Gehalte des Wassers dramatisch beschleunigt und intensiviert wird. Das Cl/Br-Verhältnis in den Mineralwässern ist im Mittel wesentlich geringer als im Meerwasser und belegt eine petrographische Herkunft der Salinität, d.h. es lässt auf eine Wasser-Gesteins-Wechselwirkung schliessen (Abb. 5). Die auf Abbildung 5 eingetragenen Werte für Bromid  $< 0.03 \text{ mg/l}$  liegen im messtechnisch kaum mehr nachweisbaren Bereich und sind daher ungenau. Der entscheidende Mechanismus, der den Thermalwässern ihre hohe Salinität aufprägt, ist ihre grosse Zirkulationstiefe. Dadurch werden i.w. stagnierende, hoch-salinare Tiefenwässer mobilisiert und gelangen an die Erdoberfläche. Diese hoch-salinaren Tiefenwässer weisen eine marine Cl/Br-Signatur auf.

Einen entscheidenden Beitrag an der Wasserchemie aller Grundgebirgswässer liefert die Verwitterung von Plagioklas mit Freisetzung von Ca, Na,  $\text{HCO}_3$  und  $\text{SiO}_2$ , insbesondere seine vergleichsweise gut lösliche Anorthitkomponente. Zum Chemismus der Grundgebirgswässer tragen weiterhin die Verwitterung von Biotit mit Freisetzung von Li, F und K bei, sowie die Wechselwirkung des Wassers mit K-Feldspat (BUCHER & STOBER 2000).

Granite und Gneise bestehen zu ca. 50% aus Plagioklas und zu ca. 40% aus K-Feldspat und Quarz, wobei die Lösungsraten von Anorthit (Plagioklaskomponente) wesentlich höher sind als diejenigen von Quarz, K-Feldspat oder Albit, so daß die Anorthitverwitterung wesentlich den Chemismus der "kurzlebigen" Kristallinwässer bestimmt.  $\text{CO}_2$  beschleunigt die Verwitterung. Die Verwitterung von Plagioklas führt damit auch zu einem Anstieg von Hydrogenkarbonat und Silikat im Grundwasser. Bei Erreichen der Calcit-Sättigung wird dieser ausgefällt und findet sich als Kluftbelag in den Gebirgshohlräumen wieder. Die Aufnahme des Wassers an Ca und  $\text{HCO}_3$  ist daher in einem  $\text{CO}_2$ -reichen Milieu nach oben begrenzt.



**Abb. 5:** Chlorid- und Bromidgehalte von Thermal- und Mineralwässern im Schwarzwaldkristallin.

Die in mittleren Tiefen im kristallinen Grundgebirge beobachteten erhöhten  $\text{SO}_4$ -Gehalte dürften i.w. auf der Oxidation von Sulfid (Pyrit) beruhen. Die Sulfidverwitterung bewirkt eine Abnahme des pH-Wertes und intensiviert damit indirekt wieder eine Verwitterung der Silikatminerale.

Eingang des Manuskripts: 29.04.2001

## Angeführte Schriften

- ALBERTI VON, F. (1826): Die Gebirge des Königreichs Württemberg, in besonderer Beziehung auf Halurgie.- J.G. Gotta'sche Buchhandlung, Stuttgart und Tübingen.
- ALTHAUS, E., F. BAUER (1987): Bericht des Arbeitskreises Geochemie.- S. 176-212. In: ALTHAUS, E., F. BAUER, P. BLÜMLING, H.-G. DIETRICH, J. DRAXLER, R. HÄNEL, R. JUNG, CH. LEMPP, W. MICHEL, O. NATAU., G. NETH, K. SCHÄDEL, R. SCHELLSCHMIDT, I. STOBER, H. TENZER, G. ZOTH: Endbericht über "Erweiterte Zirkulation wässriger Fluide im Hot Dry Rock-System (Gneisgebirge) der Bohrung Urach 3", 480 S., Bad Urach (unveröffentlicht)
- BENDER, K. (1995): Herkunft und Entstehung der Mineral- und Thermalwässer im nrdlichen Schwarzwald.- Heidelberger Geowissenschaftliche Abhandlungen, Bd. 85, 145 S., Heidelberg.
- BLIEDTNER, M. & MARTIN, M., (1986): Erz- und Minerallagersstätten des Mittleren Schwarzwaldes. - Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, 782 p., Freiburg iBr.
- BUCHER, K. & STOBER, I. (2000): The composition of groundwater in the continental crystalline crust.- In: STOBER, I. & BUCHER, K. (eds.) (2000): Hydrogeology in crystalline rocks.- KLUWER academic Publishers, p.141-176.
- CARLÉ, W. (1975): Die Mineral- und Thermalwässer von Mitteleuropa.- Wiss. Verlagsges., S.419, Stuttgart.
- CARLÉ, W. (1982): Vorkommen und Genese der Mineral-Säuerlinge und des Thermalwassers von Bad Teinach, Stadt Bad Teinach-Zavelstein, Landkreis Calw, Baden-Württemberg.- Geol. Jb., C31, S.73-225, 8 Abb., 7 Taf., Hannover.
- EDMUNDS, W. M., R.L. KAY & R.A. MCCARTNEY (1985): Origin of Saline Groundwaters in the Carnmenellis Granite (Cornwall, England): Natural Processes and Reaction during Hot Dry Rock Reservoir Circulation.- Chemical Geology, no.49, p.287-301, Amsterdam (Elsevier).
- FRITZ, P., FRAPE, S.K. (1987): Saline water and gases in crystalline rocks.- Geological Association of Canada Special Paper 33, p.211-223
- GENSER, H. (1992): Geologischer Abriss über die Vorbergzone des südlichen Oberrheingrabens.- In: Schwarzwald und Oberrheintiefland (Mäkel, R. & Metz, B., eds.), Selbstverlag des Instituts für Physische Geographie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., S. 25-55, Freiburg.
- GEYER, O. & GWINNER, M. (1986): Geologie von Baden-Württemberg.- Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 3.Auflage, 472 S., Stuttgart.

- GROSCHOPF, R., G. KESSLER, J. LEIBER, H. MAUS, W. OHMERT, A. SCHREINER, W. WIMMENAUER (1996): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Baden-Württemberg Freiburg i.Br. und Umgebung.- Geologisches Landesamt B.-W., 3. Aufl., 364 S., 27 Abb., Freiburg.
- HASEMANN, W. (1928): Die Thermalquellen von Säckingen.- Mitt. bad. Landesver. f. Naturkd. u. Naturschutz, H.2, S.177-184, Freiburg i.Br.
- KANZ, W. (1987): Grundwasserfließwege und Hydrogeochemie in tiefen Graniten und Gneisen.- Geol. Rundschau, Nr.76/1, S.265-283, Stuttgart.
- KIDERLEN, H. (1953): Zur Entstehung der Schwarzwaldthermen.- Neues Jb. Geol. u. Paläontol., Abh., H.97, S.496-506, Stuttgart.
- KIDERLEN, H. (1977): Die Thermalquellen von Wildbad (Schwarzwald), ihre Mechanik und Genese.- Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, Bd.19, S.165-217, 17 Abb., 12 Tab., Freiburg i.Br.
- KIDERLEN, H. (1981): Die thermalen Mineralquellen von Bad Liebenzell (Schwarzwald).- Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, Bd.22, S.7-14, 12 Abb., 5 Tab., Freiburg i.Br.
- KIRCHHEIMER, F. (1959): ber radioaktive und uranhaltige Thermalsedimente, insbesondere von Baden-Baden.- Abh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, H.3, S.1-67, Freiburg i.Br.
- KULLERUD, K. (1996): Chlorine-rich amphiboles: interplay between amphibole composition and an evolving fluid.- Eur. J. Mineral., 8, 355-370, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- KURVERWALTUNG BAD PETERSTAL, Hrsg. (1966): Wegweiser durch Bad Peterstal, 3. Auflage, 87 S., Bad Peterstal/Schwarzw.
- LIEGL, R. (1998): Eluir- und Laugungsversuche an Kristallingesteinen des Schwarzwaldes.- Diplomarbeit, Universität wässert Freiburg, 70 S.
- MAUS, H. & K. SAUER (1972): Die Thermalwasserbohrungen im Gewinn Pflatterloch auf Gemarkung Baden-Baden -Balneo- und regionalgeologische Ergebnisse.- Mitt. bad. Landesver. Naturkunde u. Naturschutz, N.F.10, 3, S.469-480, 2 Abb., Freiburg i. Br.
- MAUS, H. (1971): Die Mineralisation der Thermalwasserspalten von Wildbad.- Jh. Geol. Landesamt B.-W.H. 13, S. 165-170, Freiburg.
- MAYASI, M. Y. (1976): Beiträge zur Geologie, Hydrogeologie und zur Bilanz der kohlen-säurehaltigen Mineralwässer des hinteren Renchtales (Ortenaukreis), Mittlerer Schwarzwald (Baden-Württemberg).- Dissertation an der Ruprecht-Karl-Universität Heidelberg, 78 S., Heidelberg (unveröffentlicht).

- METZ, R. & REIN, G. (1958): Erläuterungen zur geologisch-petrographischen Übersichtskarte des Südschwarzwaldes 1:50.000.- M. Schauenburg Verlag, Lahr.
- METZ, R. (1977): Mineralogisch-landeskundliche Wanderungen im Nordschwarzwald, insbesondere in dessen alten Bergbaurevieren.- Moritz Schauenburg Verlag, 632 S., Lahr/Schwarzwald.
- METZ, R. (1980): Geologische Landeskunde des Hotzenwaldes.- M. Schauenburg Verlag, Lahr.
- NAGRA (1985): Sondierbohrung Böttstein, Untersuchungsbericht.- Nagra Technischer Bericht 85-01, 190 S., Anlagen, Baden/Schweiz.
- NAGRA (1989): Sondierbohrung Weiach, Untersuchungsbericht.- Nagra Technischer Bericht 88-08, 183 S., Anlagen, Baden/Schweiz.
- NAGRA (1991a): Sondierbohrung Kaisten, Untersuchungsbericht.- Nagra Technischer Bericht 88-12, 157 S., Anlagen, Baden/Schweiz.
- NAGRA (1991b): Sondierbohrung Leuggern, Untersuchungsbericht.- Nagra Technischer Bericht 88-10, 168 S., Anlagen, Baden/Schweiz.
- NAGRA (1992): Sondierbohrung Schafisheim, Untersuchungsbericht.- Nagra Technischer Bericht 88-11, 193 S., Anlagen, Baden/Schweiz.
- NORDSTROM, D.K., S. LINDBLOM, R.J. DONAHOE, C.C. BARTON (1989): Fluid inclusion in the Stripa granite and their possible influence on the groundwater chemistry.- *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53, pp. 1741-1755.
- ORTLAM, D. (1974): Die Tektonik des nördlichen Schwarzwaldes und ihre Beziehung zum Oberrheingraben.- *Approches to Taphrogenesis, Sci. Rep.*, Bd.8, S.160-166, 4 Abb., Stuttgart.
- REES, J. (1958): Wirtschaftsgeschichte des fürstenbergischen Edel- und Buntmetallbergbaus im 18. Jahrhundert.- Dissertation Universität Freiburg, 159 S., Freiburg.
- SAUER, K. (1959): Ein neu erschlossener Mineralsäuerling in Bad Peterstal im Renchtal (Schwarzwald).- *Mitt. bad. Landesver. Naturkunde u. Naturschutz, N.F.7*, 5, S.315-320, Freiburg i. Br.
- SAUER, K. (1962): Thermal- und Mineralquellen am Hoch- und Oberrhein.-Heilbad und Kurort, Nr.4/5, 7 S., Gütersloh.
- SAUER, K. (1966): Geologisches Gutachten über die genutzten Mineralquellen des Mineral- und Moorbad Rippoldsau e.V.- Gutachten des Geologischen Landesamtes B.- W. AZ: IV/3-285/65 vom 25.1.1966, Freiburg.

- SAUER, K. (1969): Die Wiedergewinnung der durch Kraftwerksbaumaßnahmen versiegten Natrium-Chlorid-Therme von Säckingen (Hochrhein) Baden-Wttemberg.- Heilbad und Kurort, H.21/2, S.2-12, Bonn.
- SAUER, K. (Hrsg.) (1957): Zur Geologie der Badener Mulde und der herzynischen Vogesen.- Exkursionsfhrer 78. Tagung oberrhein. geol. Ver. Rotenfels 23.-27. April 1957, Freiburg i.Br.
- SCHÄDEL, K. & STOBBER, I. (1987): Zur Wasserführung des kristallinen Grundgebirges in Südwestdeutschland.- Geol. Jb., C50, 23 S., 14 Abb., 3 Tab., Hannover.
- SCHMASSMANN, H., W. BALDERER, W. KANZ & A. PEKDEGER (1984): Beschaffenheit der Tiefengrundwässer in der zentralen Nordschweiz und angrenzenden Gebieten.- Nagra Technischer Bericht, 84-21, 335 S., Baden/Schweiz.
- STOBER, I. & BUCHER, K. (1999a): Deep Groundwater in the crystalline basement of the Black Forest region.- Applied Geochemistry, 14, pp. 237-254.
- STOBER, I. & BUCHER, K. (1999b): Origin of salinity of deep groundwater in Crystalline rocks.- Terra Nova, vol. 11, 4, p. 181-185, Blackwell Science Ltd.
- STOBER, I. (1990): Wasserwegsamkeit im kristallinen Grundgebirge.- DGM, 34 Jg., H.5/6, S.179-185, Koblenz.
- STOBER, I. (1995): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges.-191 S., 81 Abb., 16 Tab., Enke-Verlag, Stuttgart.
- TABERNAEMONTANUS (Johann Jakob Theodor von Bergzabern) (1584): New Wasserschatz d.i. von den heylsamen Metallischen Mineralbädern und Wassern, sonderlich aber von den neverfundenen Sauerbrunnen zu Peterstal und Griebach.- Strasbourg.
- WALTER, R. (1992): Geologie von Mitteleuropa.- Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 5.Aufl., 561 S., Stuttgart.
- YAHYA, A.R. (1975): Beitrge zur Hydrogeologie und Wasserhaushalt des Renchtales, zwischen Bad Griesbach und Oberkirch.- Dissertation an der Ruprecht-Karl-Universität Heidelberg, 91 S., Heidelberg (unveröffentlicht).
- ZHU, Y. (2001): Hydrogeologie der Grube Clara.- Dissertation an der Universität Freiburg, 105 S.