

Die Thermalquellen von Baden und Ennetbaden, Aargau

The thermal springs of Baden and Ennetbaden, Aargau

Hans Burger¹

Keywords: Thermalwasser, Faltenjura, Thermen von Baden, Grundwassernutzung, Aquae Helveticae, Gewässerschutz, Subrosion, Gipskarst, Schwefeltherme, Juratektonik, unbeständiger Baugrund

Zusammenfassung

Das Bäderquartier von Baden und Ennetbaden beherbergt seit über 2000 Jahren rund zwanzig gefasste Thermalquellen sowie dazu gehörende Badeanlagen und Gasthäuser. Die Thermen steigen aus mindestens einem Kilometer Tiefe artesisch an die Oberfläche und treten aus karbonatischen Aquiferen (Kalke und Dolomite der Mittleren Trias) aus. Sie fördern pro Tag rund eine Million Liter hochmineralisiertes Wasser von 46-47 °C, welches auch grosse Mengen an Gas enthält. Das Thermalwasser besteht aus etwa vier bis fünf Komponenten, welche aus unterschiedlichen Tiefen stammen und unterschiedliche Fliesswege in unterschiedlichen Fliesszeiten zurückgelegt haben. Eine dieser Komponenten besteht aus regional ins Juragebirge eingesickertem Meteor- und Oberflächenwasser und beeinflusst die Ergiebigkeit der Thermen. Diese reagieren mit einer Verzögerung von einem bis maximal 10 Monaten auf das regionale Niederschlagsgeschehen. Einzelne Inhaltsstoffe des Thermalwassers und der Gase, insbesondere der hohe Steinsalz- und Sulfat- Gehalt sowie das CO₂ und das H₂S, haben medizinisch positive Wirkungen auf Krankheiten des Bewegungsapparats und des Kreislaufs.

Die Thermalquellen verdanken ihre Existenz der lokalen Tektonik (östlichster Faltenjura, über dem Südrand eines Permo-karbon-Troges gelegen) und der durch die Limmat erosiv eingeschnittenen Klus in diesen Faltenkern. Der Aquifer wird durch Schichten aus Anhydrit und Ton gegen oben abgedichtet. Diese dichten Keuper-Schichten sind im Bereich der Thermen-Austritte dünn und perforiert, wodurch ein für Störungen anfälliges Quellsystem entstand. Dem entsprechend heikel ist der Baugrund, denn die abdichtenden Schichten dürfen nicht weiter abgegraben oder durchbohrt werden. Auch müssen in diesem Gebiet grössere Erschütterungen vermieden werden und es ist mit negativen

Auswirkungen der Subrosion zu rechnen: Es bilden sich instabile Karst-Höhlen und Gips-Dolinen und bei Fundamenten können differenzielle Senkungs-bewegungen auftreten.

Abstract

The spa district of Baden and Ennetbaden has been home to around twenty captured thermal springs and associated bathing facilities and inns for over 2000 years. The thermal springs rise artesisically to the surface from a depth of at least one kilometer and emerge from carbonate aquifers (limestones and dolomites of the Middle Triassic). They haul about one million liters of highly mineralized water at 46-47 °C per day, which also contains large quantities of gas. The thermal water consists of about four to five components, which originate from different depths and have covered different flow paths in different flow times. One of these components consists of regional meteoric and surface water seeping into the Jura mountains and influences the yield of the thermal springs. These react with a delay of one to a maximum of 10 months to the regional precipitation event. Individual ingredients of the thermal water and gases, especially the high content of rock salt and sulfate, as well as CO₂ and H₂S, have medically beneficial effects on diseases of the musculoskeletal system and the circulatory system.

The thermal springs owe their existence to the local tectonics (easternmost Faltenjura, located above the southern edge of a Permo-Carboniferous trough) and the gorge erosively incised by the Limmat River in this fold core. The aquifer is sealed from above by layers of anhydrite and clay. These dense Keuper layers are thin and erosively perforated in the area of the thermal water outflows, creating a source system susceptible to disturbances. The foundation soil is correspondingly delicate, because the sealing layers may not be further excavated or drilled through. Also, major vibrations must be avoided in this area and negative effects of subrosion are to be expected: Unstable karst caves and gypsum dolines form, and differential subsidence movements can occur in foundations.

¹ Hans Burger, Rebbergstrasse 91, Ennetbaden, Switzerland [burger5408@gmx.ch]

1 Einleitung und Übersicht

Im Rahmen des 6. Schweizerischen Geologentages fand am 23. März 2022 für die Teilnehmenden im Bäderquartier von Baden und Ennetbaden eine Führung mit sechs Stationen statt. Vorgängig wurde den rund hundert Interessierten im Bäderhotel «Blume» eine mündliche Einführung zur Hydrogeologie, Tektonik, Balneologie und zur Baugrund-Problematik der Thermalquellen gegeben. Der folgende Beitrag fasst die wichtigsten Eckpunkte des Anlasses zusammen.

Das Bäderquartier liegt im östlichsten Teil des Faltenjuras, im überschobenen Kern der Lägern-Struktur. Es liegt in der Tal-Kluse der Limmat, welche sich in den Westrand der Lägern eingeschnitten hat und umfasst 21 Thermalquellen, davon sind 19 gefasst und

betriebsfähig. Diese liefern rund eine Million Liter hochmineralisiertes Thermalwasser pro Tag, welches artesisch gespannt ist und frei ausläuft. Weitere ungefasste Quellen ergiessen sich direkt in die Limmat und ins Grundwasser des Niederterassen-Schotter.

Das Bäderquartier liegt als eigenständige Siedlung rund einen Kilometer nördlich der mittelalterlichen Altstadt Baden. An dieser Stelle lag zur Römerzeit die Kleinstadt Aquae Helveticae mit einem halben Dutzend grossen Badebassins und kleineren Bädern in Häusern (Schaer 2015 & 2022). Seit dieser Zeit zieht das Bäderquartier Besucher an, welche hier Gesundheit, Heilung und Vergnügen suchen. Der Jahrhunderte alte Vorgang, zur Kur für einige Tage bis mehrere Wochen nach Baden zu fahren, wird «Badenfahrt» genannt (Hess 1818).

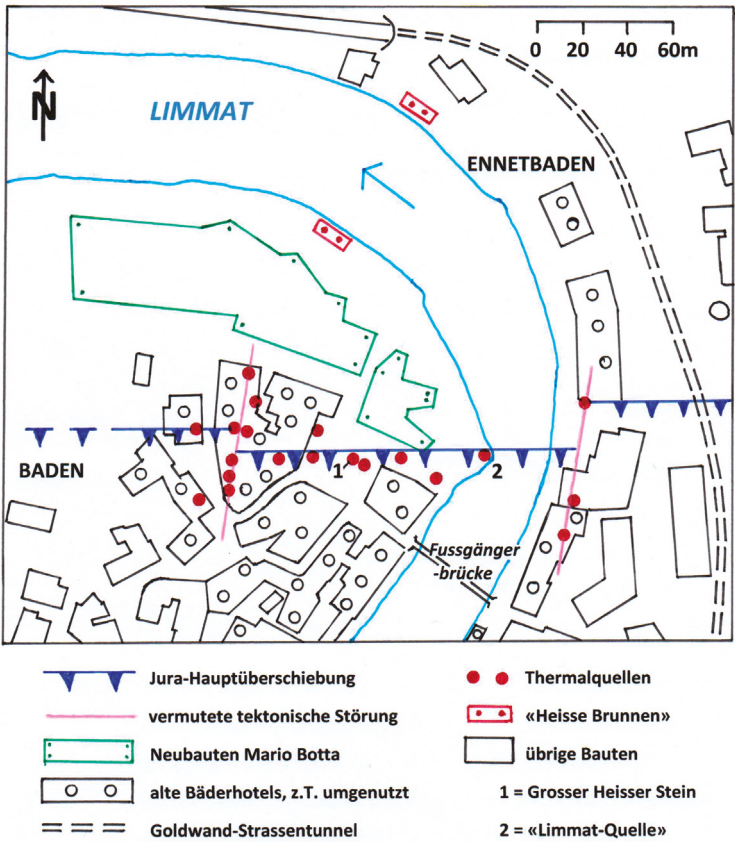


Fig. 1: Übersichts-Plan mit den Standorten der verschiedenen Quellen, der Bäderhotels und der tektonischen Störungen, Stand 2021.

Zur geologischen Übersicht sei auf das Blatt Baden des Geol. Atlas 1:25'000 und dessen Erläuterungen verwiesen (Graf et al. 2006; Bitterli et al. 2007). Eine erste geologische Beschreibung der Umgebung von Baden schuf Mousson (1840) mit einer geologischen Karte des östlichsten Faltenjuras im Massstab 1:45'000 [Taf. V] und drei geologischen Querprofilen im Massstab 1:15'000 [Taf. IV]), welche er 1848 mit einer hydrogeologischen Abhandlung ergänzte. Weitere geologische Detail-Untersuchungen und -Beschreibungen der Region erfolgten vor rund hundert Jahren durch Mühlberg (1898 bis 1904), Cadisch (1932) und Senftleben (1923, 1924).

Die aus grosser Tiefe entlang regionaler tektonischer Störungszonen aufsteigenden Quellen bilden hydraulisch ein System kommunizierender Gefässe und sind bezüglich Ergiebigkeit voneinander abhängig. Die Nutzungsrechte der Quellen sind im Grundbuch eingetragen, zum Teil sind einzelne Rechte anteilmässig auf mehrere Inhaber aufgeteilt. Der Untergrund des Bäderquartiers ist bautechnisch fragil und anspruchsvoll. Er bedarf spezieller Massnahmen zum langfristigen Schutz der Thermen und Bauwerke.

2 Tektonische Entwicklung im östlichsten Faltenjura

Der Faltenjura als sehr junge tektonische Entwicklung im Rahmen der alpinen Gebirgsbildung ist ausführlich beschrieben in Laubacher 1961 – 1987 und in Jordan 1994. Sein östlichster Ausläufer besteht nur noch aus einer einzigen, rampenartig intern überschobenen Falte (Lägern-Struktur) sowie einer nördlich vorgelagerten, kompressiv tektonisierten Zone des Tafeljuras («Vorfallen-Zone»). Figur 2 zeigt die Situation in drei Profilschnitten durch die westliche Lägernstruktur. Eine ältere tektonische Beschreibung lieferte Albert Heim 1919, mit Kulissenprofilen durch den östlichsten Faltenjura (Taf. 25).

2.1 Überschiebungs-Tektonik ermöglicht und formt den Thermalwasser-Aquifer

Die vom quartären Limmattdurchbruch gebildete Klus von Baden liegt im östlichen Ausläufer des Faltenjuras (von E nach W: Lägern / Steinbuck – Geissberg – Badener Klus – Martinsberg / Petersberg). Tektonisch liegt eine asymmetrische, überschobene Falte mit Scheitelbruch vor, welche von Süden her auf den gut verformbaren Evaporiten (Anhydrit, Salz) und Tonen des Mittleren Muschelkalks (Zeglingen-Fm.) nach Norden hin zusammengeschoben wurde. Der etwas flacher einfallende Südschenkel ist über den etwas tiefer liegenden, steiler einfallenden Nordschenkel überschoben, mit Verkürzung der mesozoischen und tertiären Krustenabschnitte um ca. 1-2 km. Scheitel und Nordteil dieser Falte sind weitgehend erodiert. Im stratigraphischen Abschnitt der kompetenten Muschelkalk-Karbonatplatte (Kalke und Dolomite des Oberen Muschelkalks = Schinznach-Fm.) wurden beide Schenkel spröde zerbrochen und teilweise übereinander oder ineinander geschoben. Der darunter liegende, evaporitreiche Mittlere Muschelkalk ist nicht abgeschlossen.

Die Quellaustritte des Thermalwassers erfolgen an jenen Stellen, wo der Obere Muschelkalk des Südschenkels im Faltenkern vom Limmattal erosiv angeschnitten wird, das heisst wo die verkarsteten Karbonatgesteine stellenweise von ihrer abdichtenden Keuper-Überdeckung entblösst sind. Dies ist im Bäderquartier auf einem Ost-West über die Limmat verlaufenden Streifen von 180 m Länge und 60 m Breite der Fall (Fig. 1). Weiter nördlich und südlich davon ist der Muschelkalk-Aquifer flächendeckend von mächtigen, undurchlässigen Keuperschichten überdeckt (Gipskeuper der Bänkerjoch-Fm. und Mergel der Klettgau-Fm.). Weiter östlich und westlich der Thermalwasser-Austritte steigt der Aquifer topographisch auf ein hydraulisches Druckniveau an, welches über dem

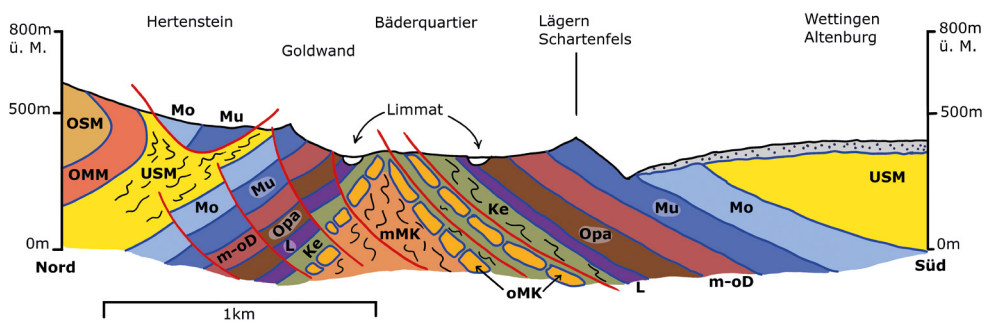
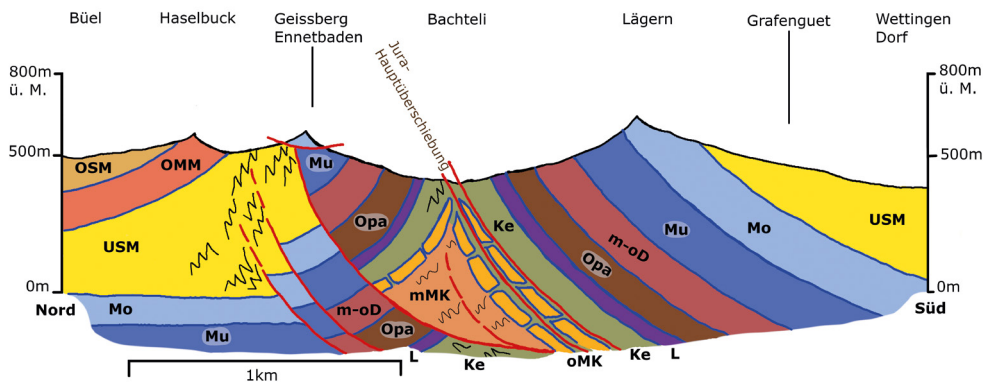
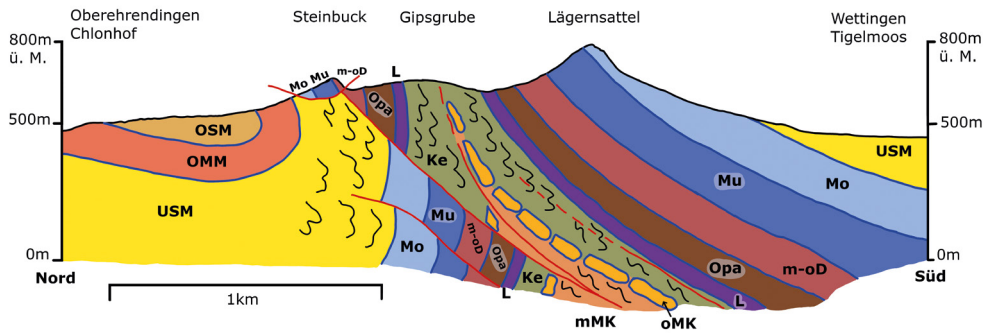


Fig. 2: Drei Nord-Süd-Profile entlang der Ordinaten 2'665'850, 2'666'700 und 2'669'100. Legende zur Ge-
steinsabfolge: **OSM**: Obere Süsswasser-Molasse (tonig-sandig); **OMM**: Obere Meeres-Molasse (Sandstei-
ne, z.T. grobkörnig), **USM**: Untere Süsswasser-Molasse (tonig-feinsandig), **Mo**: oberer Malm (Kalk); **Mu**:
unterer Malm (Mergel, Mergelkalk); **m-oD**: mittlerer und oberer Dogger (mergelig-sandig); **Opa**: Opali-
nus-Ton (feinsandige Tonmergel); **L**: Lias-Schichten (meist tonig-siltig); **Ke**: Keuper-Schichten (Ton, Gips,
Anhydrit, Sandstein, Mergel); **oMK**: oberer Muschelkalk (Kalk, Dolomit); **mMK**: mittlerer Muschelkalk; An-
hydrit-Gruppe (Evaporite, Karbonate). Überschiebungsflächen: rot.

Quelldruckniveau im Bäderquartier liegt. Die Thermen bleiben also lokalisiert auf Stellen, wo der Obere Muschelkalk Kontakt zur Limmat oder zum Niederterrassenschotter hat. In dieser geologisch heiklen Umgebung kann der Aquifer auch baulich (Abgrabung) oder durch Bohrungen freigelegt werden.

Der Gipskeuper ist in einem topographisch 200 m höher gelegenen Faltenkern der Lägern-Struktur gut aufgeschlossen: in Ehrendingen, 3 km östlich des Bäderquartiers, Lokalität «Gipsgrube».

Der Nordschenkel der Struktur steht an mehreren Orten senkrecht oder überkippt und ist zudem klippenartig auf die nordvergent gebliebene Nordschenkelbasis oder auf die Molasse überschoben (vgl. Fig. 2). Zudem ziehen Verwerfungen durch beide Schenkel der Faltenstruktur; diese sind meist NW-SE oder NE-SW gerichtet und weisen dadurch auf den stark kompressiven Charakter im östlichsten Faltenjura hin (vgl. geol. Karte Graf et al. 2006). Dieser überschobene Faltenkern liegt zudem grosstektonisch über dem Südrand des Nordschweizer Permokarbon-Trogs (Diebold et al. 1992, Nagra 2008). Diese unterliegende tektonische Grossstruktur dürfte die Auframpung und Faltenbildung der Lägern genau an dieser Stelle begünstigt haben.

2.2 Erosive Freilegung des Aquifers

Die Jurafaltung, hier konkret die Auffaltung der Lägernstruktur, erfolgte generell deutlich «post OMM», mit einer Hauptphase etwa zwischen 9 und 4 Millionen Jahren. Die Klusbildung erfolgte aber erst im jüngeren Quartär: Zur Ablagerungszeit der Tieferen Deckenschotter floss die Limmat noch dem Lägern- Baldeggen- Petersberg- Südfuss entlang nach Westen ins Reusstal. Erst in den jüngsten Eiszeiten erfolgte dann der Durchbruch der Limmat durch die Lägern-Struktur. Eine erste Eintiefung durch den Malmkalk erfolgte 480m weiter westlich von der

heutigen Klus. Zur detaillierten Entwicklung des Entwässerungsnetzes und zur Klusbildung vgl. Hofmann 1996, Liniger 1966 & 1967 sowie Kuhlemann & Rahn 2013, Hantke 1965 und Schindler 1977/1978.

Die Erosion in der Klus legte nicht nur den Thermalwasser-Aquifer frei, sondern beförderte auch eine massive Subrosion in den Muschelkalk-Schichten (primär Salzlösung, Gipskarst und Karbonatlösung), was sich noch heute in der hohen Mineralisation der Thermen niederschlägt.

Die bauliche Fassung der meisten Thermen ermöglichte die exzessive Nutzung zu Badezwecken und führte zur Stabilisierung des lokalen Erosionsgeschehens. Dieses schreitet aber weiterhin fort, erfordert regelmässige Erneuerungs- und Unterhaltsarbeiten und kann die Fassungen, zusammen mit der ebenfalls fortschreitenden Subrosion, langfristig sogar gefährden (vgl. Kapitel 5). Die meist mehrere Meter tief hinabreichenden, gemauerten Quelfassungen liegen an ihrer Basis jeweils im Niederterrassen-Schotter, im Gipskeuper (Bänkerjoch-Fm.) oder im darunterliegenden Trigonodus-Dolomit (= Stamberg-Mb. der Schinznach-Fm.).

3 Zur Geologie des Bäderquartiers

Früheste Beschreibungen des geologischen Aufbaus der Region Baden und der Lägern-Struktur finden sich in Moesch 1867 & 1874, weiterführende Informationen finden sich in Bitterli et al. 2007, Jordan 2016; Pietsch et al. 2016; Jordan et al. 2016 und Burger 2012.

Zentral für das Verständnis des Bäderquartiers sind die folgenden stratigraphischen Gegebenheiten: Die Trias enthält zwei für die Jurafaltung wichtige Evaporitvorkommen: Die «Anhydritgruppe» des Mittleren Muschelkalks (eine submarine Eindampfungsserie mit teilweise beträchtlichen Salzvorkommen) und den «Gipskeuper» des mittleren



Fig. 3: Keuper-Aufschluss in Ennetbaden, 25 m nordöstlich des Limmatufers, zwischen Promenade und Umfahrungstunnel. Steilstehende «Obere Bunte Mergel» (heute: Gruhalde-Mb. der Klettgau-Fm.) im hochgedrückten Nordschenkel des Faltenkerns. Einfallen 330°/75°, Koord. 2°66'068/1°25'345.

Keupers (submarine bis terrestrische Eindampfungsserie mit primärer Anhydritablagerung). Dazwischen liegt die tektonisch kompetente, starre Karbonatserie des Oberen Muschelkalks, welche durch die Jura-faltung zerbrochen wurde. Im östlichen Faltenjura liegt der Hauptabscherungshorizont in der Anhydritgruppe, während der Gipskeuper primär durch die Faltenbildung (Antiklinalkerne) deformiert wurde. Gleichzeitig bildet der Gipskeuper einen wasserdichten Deckel über dem zerbrochenen, verkarsteten und wasserführenden Oberen Muschelkalk. In Oberflächennähe wurden die Anhydrite posttektonisch vergipst.

Die stratigraphische Abfolge der hier anstehenden Schichten vom Muschelkalk bis zum Malm wurde in den letzten Jahren neu gegliedert und beschrieben; eine aktuelle und

übersichtliche Darstellung dazu findet sich in Pfirter et al. 2019, welche in einer Tabelle (S. 24) auch eine Gegenüberstellung der alten und neuen stratigraphischen Einheiten der Trias aufweist (neu 7 Formationen mit insgesamt 20 Members).

4 Hydrogeologie der Thermalquellen

4.1 Das hydraulische Quellsystem

Die Thermalwässer steigen zumindest in den obersten paar hundert Metern in spröde zerbrochenen und verkarsteten Kalk- und Dolomit-Gesteinen der mittleren Trias (Muschelkalk) bis zur Oberfläche auf. Wie die Fliesswege in grösserer Tiefe verlaufen, ist weniger klar (vgl. dazu Kapitel 4.4).

Die artesischen Thermalquellen sind insgesamt sehr ergiebig (der Erguss schwankt meistens zwischen 650 und 850 l/min) und haben eine von Quelle zu Quelle und auch zeitlich leicht schwankende Auslauftemperatur zwischen 46°C und 48°C. Der pH liegt im schwach sauren Bereich. Die Mineralisation stammt weitgehend von Lösungen aus den Gesteinen der mittleren und jüngeren Trias (Steinsalz, Gips-Anhydrit, Rauhwacke, Kalk, Dolomit). Mit rund 4,5 bis 4,6 g/l Mineralisation sind sie die mineralreichsten der natürlich auslaufenden und gefassten Thermalquellen der Schweiz. Die Mineralisation besteht hauptsächlich aus 1.8 bis 1.9 g/l Steinsalz und 1.4 g/l Sulfat. Dies deutet bereits darauf hin, dass beim Aufstieg des Wassers in den Schichten der mittleren und späten Trias viel Gesteinsvolumen herausgelöst wird. Bei einer durchschnittlichen Gesamtergiebigkeit von 700–750 l/min ergibt das eine Menge von rund 800 m³ Gestein, welches jährlich subrosiv herausgelöst wird. Das ergibt, allein seit der Römerzeit, mindestens 1,5 Millionen m³ weggelöstes Gestein: Diese über Jahrtausende anhaltende Subrosion durch Thermalwasser verändert die Untergrundstruktur sowie die Landschaftstopographie auch ohne Tektonik schleichend und führt heute zu Baugrund-Problemen (Kapitel 5). Zudem führt diese Subrosion zur kontinuierlichen Änderung der Fliesswege aus der Tiefe, was wiederum das hydraulische System beeinflusst.

Aufgrund von Vergleichsmessungen wurde festgestellt, dass die Inhaltsstoffe und Begleitgase der einzelnen Quellen sehr ähnlich sind, und dass die Schüttmenge einzelner Quellen unmittelbar von der Ergiebigkeit anderer Quellen abhängt (Mühlberg 1906). Daraus kann geschlossen werden, dass die Quellen ein bis in grosse Tiefen reichendes hydraulisches Gesamtsystem bilden, welches weitgehend nach den Regeln kommunizierender Gefässe funktioniert.

Es war schon vor dem 19. Jahrhundert allgemein bekannt, dass im Limmatabschnitt



Fig. 4: Fassung der Limmatquelle; mit 150 l/min gehört sie zu den ertragreichen Thermen. Der Quellaufstieg wird mit einem transparenten Aufstiegsrohr sichtbar gemacht. Darin sieht man auch deutlich die aufsteigenden Gasblasen. Zuoberst ist kränzförmig ein Quellwasserteiler, im Hintergrund die Limmat (vgl. auch Mühlberg 1909).

zwischen den Quellen auf der Badener und jenen auf der Ennetbadener Seite weitere Thermalquellen direkt in die Limmat ausfliessen. Die ufernächste von ihnen (die ertragreiche Limmatquelle) wurde 1828/1829 bei extremem Limmatwasser-Tiefstand in einem tiefen Schacht gefasst und vor Flusswasser geschützt. 1858 erkundeten Escher [von der Linth] & Culmann, bei sehr niederem Limmatwasserstand, diesen Flussabschnitt und konnten vier weitere Quellaufstösse in die Limmat lokalisieren. In ihrem Gutachten von 1858 rieten sie aber von einer Fassung dieser Quellen ab.

Die hydraulische Ausflusshöhe schwankt von Quelle zu Quelle um bis zu rund 5-6 Meter, sie liegt bei der Schwanen-Quelle mit rund 359,66 m ü. M. am höchsten, und damit rund 10 m höher als der Limmatspiegel. Die Auslaufkoten der einzelnen Quellen sind

rechtlich festgelegt in einem «Verbal» (Rothpletz 1858); Einzelheiten dazu finden sich in Münzel 1947 (s. 48, Tab.1), der auch die einzelnen Quellen und deren Historie detailliert beschreibt.

Die Kantonsregierung verfügte 1844 regelmässige Schüttungsmessungen an allen gefassten Thermalquellen. Die Quellen werden seither vierteljährlich und bei Bautätigkeit häufiger amtlich gemessen. Wird eine Quellauffassung so ausgebaut, dass sie mehr Wasser liefern würde, so beeinträchtigt das automatisch die Ergiebigkeit von anderen Quellen und muss korrigiert werden.

4.2 Ergiebigkeit und Niederschlagsgeschehen

Der Gesamterguss der 20 zurzeit in Betrieb stehenden Thermalquellen liegt im hundertjährigen Mittel bei rund 750 l/min. Er schwankt meist zwischen 600 und 900 l/min und liegt nur in Ausnahmefällen leicht ausserhalb dieses Bereichs. Die drei grössten Quellen, Grosser Heisser Stein, Schwanen und Allgemeine-Ennetbaden, liefern zusammen rund 40% der Ergussmenge, während die drei kleinsten je weniger als 1% des Ertrags bringen.

Bis in die 1830er Jahre glaubte man, das ganze Thermalwasser komme aus dem tieferen Erdinnern, ohne Nachschub durch Niederschlagswasser. Danach vermutete man einen geringfügigen Zusammenhang zwischen Ergussmenge und Niederschlägen. Die Abhängigkeit der Quellerträge vom Niederschlagsgeschehen wurde von Mühlberg (1905 b, 1906) im Detail beschrieben, er konnte dabei auf relativ engmaschige Messdaten ab 1844 zurückgreifen. Er stellte eine zeitliche Verschiebung zwischen den Niederschlägen in der Region Baden und den Quellschüttungen von etwa 8 bis 10 Monaten fest. Er hat sich dabei auch zur möglichen Herkunft des Wassers geäussert. Auch Heim (1919) kommentierte die Schüttmengen und seine

(etwas andere) Herkunftstheorie (vgl. dazu nachfolgendes Kapitel 4.4). Zudem erläuterte Heim den Zusammenhang zwischen der Auslaufhöhe einer Quelle und dem zeitlichen Schwankungsumfang: Während die Schwanen-Quelle mit dem höchst gelegenen Auslauf eine Ertragsschwankung im Bereich von rund 40% aufweisen kann, sinkt diese Schwankung mit abnehmender Auslaufkote und weist bei der Quelle mit tiefstem Auslauf (rund 6 m tiefer als die Schwanen-Quelle) nur noch eine Ergiebigkeitsschwankung von rund 8% auf. Je tiefer der Auslauf einer Therme liegt, umso weniger anfällig ist sie auf niederschlagsbedingte Ertragsschwankungen.

Der Zusammenhang zwischen den Quellerträgen und dem Niederschlagsgeschehen wurde auch in jüngster Zeit weiter untersucht und dokumentiert, z.B. von Zorn & Jaffé 1983, welche die beiden Parameter für den Zeitraum von 1900 bis 1980 graphisch darstellten (S. 460, Fig. 6). Aktuellere Auswertungen des Zusammenhangs zwischen den Quellerträgen und dem Niederschlagsgeschehen sind in Greber 1998 dokumentiert und stellten eine geringere zeitliche Verschiebung fest als früher interpretiert. Sie beträgt nur einen bis wenige, maximal zehn Monate, je nach Intensität und Dauer der vorangegangenen Niederschlags- und Trockenperioden. Dies zeigt auf, dass ein (geringer) Teil des Thermalwassers aus eingesickertem Niederschlagswasser mit geringer Verweilzeit bestehen muss, gemäss Isotopenmessungen war es etwa 30 Jahre unterwegs (Kanz 2005, Dubois et al. 1988).

Wenn man die beiden korrelierenden Parameter "lokaler Niederschlag" und "Quellerergiebigkeit" über eine Zeitreihe von 1900 bis 2020 analysiert, stellt man fest, dass in den letzten 20 Jahren sowohl die regionalen Niederschläge als auch die Quellerträge etwas rückläufig waren, verglichen mit dem Durchschnitt des 20. Jahrhunderts. Dies deutet darauf hin, dass die Quellerträge bei einem klimabedingten Rückgang der regionalen

Niederschläge generell zurückgehen dürften!

Ein weiterer, wenn auch relativ geringer Einflussfaktor auf die Quellergiebigkeit stellt der Wasserspiegel der Limmat dar, wie man durch Messvergleiche festgestellt hat. Zwischen der Austrittsmenge von Thermalwasser direkt in den Fluss und dem Limmatspiegel besteht nämlich eine reziproke Beziehung: je höher der Flusspegel, umso grösser ist der hydraulische Austrittswiderstand für die Quelle, umso geringer also auch die Austrittsmenge. Dies bewirkt, dass das vom Fluss bei Hochwasserstand zurückgedrängte Thermalwasser vermehrt in den umliegenden, gefassten Quellen austreten kann. Umgekehrt kann bei Niederwasser mehr ungefasstes Thermalwasser direkt in die Limmat fliessen.

Zur Energieleistung der Badener Thermalwässer: Die im Jahr 2008 genutzten Quellen

im Bäderquartier hatten eine Energieleistung (verglichen mit lokalem Grundwasser) von 1,62 Megawatt und eine Wärmeproduktion (Heizenergie) von 13,2 GWh (Signorelli et al. 2009). Ein grosser Teil dieses Thermalwassers wird heute rein energetisch genutzt.

4.3 Inhaltsstoffe

Die Thermalquellen des Bäderquartiers von Baden und Ennetbaden weisen alle einen sehr ähnlichen Chemismus auf. Dieser schwankt jedoch leicht sowohl von Quelle zu Quelle als auch im zeitlichen Verlauf. Insgesamt liegt ein sehr hoch mineralisiertes Thermalwasser mit Auslauf-Temperaturen von meist 46,5 bis 47°C vor, eine CO₂-reiche Na – Ca – Cl – SO₄ – Schwefeltherme mit erheblichen Mengen an Lithium, Fluor und Borsäure (vgl. dazu Tab. 1). Im Thermalwasser von Baden befinden sich natürlicherweise

Quellwasseranalyse Therme «Grosser Heisser Stein» Baden, vom 29. Okt. 1981 (Institut Fresenius)	
Temperatur (diverse Messungen): 46,5-47,0°C	pH (in situ): 6,16 el. Leitfähigk. (µS/cm): 3820
Im Wasser gelöst [mg/l]:	
Li ⁺ 3,8	F ⁻ 2,8
Na ⁺ 712	Cl ⁻ 1076
K ⁺ 60	Br ⁻ 2,5
NH ₄ ⁺ 0,9	I ⁻ 0,05
Mg ⁺⁺ 106	SO ₄ ⁻⁻ 1430
Ca ⁺⁺ 527	HCO ₃ ⁻ 496
Sr ⁺⁺ 6,9	H ₂ SiO ₃ 50,6
Ba ⁺⁺ 0,06	H ₃ BO ₄ 16,5
Fe ⁺⁺ 0,04	Fe tot 0,045
Al ⁺⁺⁺ 0,005	Mn tot 0,013
DOC 0,05	TDS 4493
Im Wasser gelöste Gase [mg/l]:	
CO ₂ 237	N ₂ 15
He 0,03	Ar 0,41
H ₂ S 0,85	CH ₄ 0,07
Hinzu kommen grosse Mengen von beim Wasseraufstieg durch Druckentlastung freigesetzten Gasen (Blasenbildung), insbesondere N ₂ und CO ₂ , in Spuren auch Argon, andere Edelgase und H ₂ S. Die Quellwässer und -Gase sind frei von Sauerstoff.	
Isotopen-Bestimmungen:	
Tritium ³ H: 3,7 TU	δ ¹⁸ O: -8,9 ‰ VSMOW δ ² H: -70 ‰ VSMOW
Andere Analysen zeigten zudem:	
Blei, Arsen, Rubidium, Caesium und Phosphat kommen in Spuren vor; Nitrat, Kupfer und Zink wurden nicht nachgewiesen. Das im Wasser gelöste H ₂ S schwankt stark, Werte bis zu 5 mg/l.	
Insgesamt liegt ein sehr hoch mineralisiertes Thermalwasser vor, eine CO ₂ -reiche Na – Ca – Cl – SO₄ – Schwefeltherme mit erheblichen Mengen an Lithium, Fluor und Borsäure sowie mit weiteren Komponenten (K, Mg, Sr, Br) in bemerkenswerter Menge.	
Zusammengestellt von Dr. H. Burger, Ennetbaden, burger5408@gmx.ch , 28.3.2022.	

Tab. 1: Thermalwasser-Chemismus mit hydrochemischer Klassifikation.

auch Mikroorganismen, primär Sulfat-reduzierende Bakterien (Münzel 1947).

Im 19. Jahrhundert wurden viele chemische Analysen und physikalische Messungen der Thermalwässer im Bäderquartier gemacht, oft noch mit aus heutiger Sicht unzulänglichen Methoden und ungenauen Ergebnissen. Die ersten modernen und umfassenden Analysen erfolgten durch Müller 1870 und durch Treadwell 1896, 1897. Im 20. Jahrhundert folgten weitere ausgedehnte Analysen und Überwachungsarbeiten, die wichtigsten Ergebnisse finden sich in Hartmann 1925 & 1937, Nussberger et al. 1937, Carlé 1975, Högl 1980, Vuataz 1982, Schmassmann et al. 1984, Nagra 1986, Mazor et al. 1986 & 1988, Dubois et al. 1988, Schmassmann 1990, Pearson et al. 1991, Schmassmann et al. 1992, Biehler et al. 1993, Thury et al. 1994, Rick 1999 und Waber et al. 2014. Ab 1981 wurden durch die oder im Auftrag der Nagra, Wettingen, ausgedehnte Quellmessungen und Analysen durchgeführt, sie bilden heute einen wesentlichen Teil der hydrochemischen Dokumentation der Thermen.

Eine repräsentative Analyse und Wassercharakterisierung der grössten Quelle (Grosser Heisser Stein) wird in Tabelle 1 dargestellt. Eine detaillierte Wasseranalyse der mittleren Zusammensetzung der diversen Thermalwässer findet sich in Högl 1980 bzw. in Bitterli et al. 2007 (S. 132).

Quellgase: Die frei mit dem Thermalwasser aufsteigenden Quellgase nehmen während des Aufstiegs aus grosser Tiefe infolge der Druckentlastung laufend zu und sind beim Quellaustritt als Blasen gut sichtbar (Fig. 4). Sie bestehen, gestützt auf viele Messungen (ohne Wasserdampf), volumenmässig zu rund 68,5-70 % aus Stickstoff, zu rund 30-31 % aus CO₂, zu rund 1 % aus Argon und zu je weniger als 0,1 % aus diversen anderen Edelgasen, H₂S und Methan. Die Quellgase werden olfaktorisch dominiert durch den Schwefelwasserstoff und sind frei von Sauerstoff.

Erste Analysen der freien Quellgase wurden schon 1828 durch Pfluger durchgeführt, in denen die Zusammensetzung an der St. Verenaquelle recht genau wie folgt bestimmt wurde: zwei Drittel Stickstoff, ein Drittel CO₂, Spuren von H₂S und das Fehlen von Sauerstoff. Die Quellgas-Analyse von Müller 1870 an zwei Badener Thermen war schon sehr genau. In jener Zeit wurde auch die wichtige physiologische Wirkung des Schwefelwasserstoffs erkannt, sowohl gelöst im Wasser als auch in der Gasphase.

Die Quellgase der einzelnen Thermen unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung nur geringfügig, die im Thermalwasser gelösten Stoffe hingegen unterscheiden sich von Quelle zu Quelle deutlicher. Dies lässt den Rückschluss zu, dass zwar alle Thermen aus denselben Tiefengrundwasser-Reservoirs stammen, dass ihre Aufstiegswege jedoch mindestens in den obersten 200 bis 400 Metern teilweise voneinander getrennt verlaufen müssen, denn dort wird noch viel Salz und Anhydrit aus dem Gestein gelöst. Die grössten Abweichungen treten dabei im Gehalt des gelösten Schwefelwasserstoffs auf; dieser schwankt zwischen rund 2-3 mg/l (Schwanen-Quelle) und knapp 0,5 mg/l bei mehreren kleinen Quellen. Messungen in tiefen Quellschächten zeigten, dass der Gehalt an gelöstem H₂S mit zunehmender Tiefe rasch zunimmt. Der Schwefelwasserstoff entsteht durch bakterielle Sulfatreduktion im obersten Teil des aufsteigenden Wassers, ausführlich dargestellt in Münzel 1947. Im Bereich des Quellauslaufs wird der Schwefelwasserstoff durch andere Bakterien wieder verbraucht.

Radioaktivität: Die Thermalquellen des Bäderquartiers transportieren mengenmässig in Spuren auch radioaktive Stoffe aus der Tiefe an die Erdoberfläche. Relevant sind dabei Uran, Thorium, Radium und deren relativ kurzlebige Zerfallsprodukte Radon und Polonium. Erste umfassende Radioaktivitäts-Messungen in Schweizer Thermal- und

Mineralwässern wurden von der Universität Fribourg durchgeführt (Sury 1906, 1907). Schweitzer hat die Messungen von Sury 1910 überprüft und kam auf ähnliche Werte.

Die Radioaktivität der Badener Verena-hof-Quelle wurde im Oktober 1948 mit neuer Methodik gemessen (Kolb 1951), und somit noch vor der grossen globalen Kontamination von Atmosphäre und Hydrosphäre durch Kernwaffen-Versuche. Dabei wurde eine Aktivität von 0,34 ME im Wasser und 1,5 ME in den freien Gasen gemessen. Eine Mache-Einheit (ME), die damals übliche Messgrösse bei Thermalquellen, entspricht $3,64 \times 10^{-10} \text{ Ci/l} = 13,5 \text{ Bq/l}$. Damit wurde primär die Aktivität von Radium und Radon bestimmt, was bei der Verena-hof-Quelle etwa einer Aktivität von 4,5 Bq/l im Wasser und 20 Bq/l in den freien Gasen entspricht. Diese von Kolb durchgeführten Messungen zeigten etwas andere Werte an als die von Sury vier Jahrzehnte früher ebenfalls bei der Verena-hof-Quelle durchgeführten Messungen (Gas-Aktivität 2,12 ME, Wasser-Aktivität 0,27 ME). Sury untersuchte übrigens im Januar 1906 in Baden insgesamt 14 Thermal-Quellwässer und 2 Gasphasen auf ihre Radioaktivität. Bei den Wassermessungen zeigten sich grössere Aktivitäts-Unterschiede zwischen den einzelnen Quellen (Faktor 2 bis 2,4). Die relativ hohe Radioaktivität in den Quellgasen ist grösstenteils auf das Edelgas Radon zurückzuführen, wie sich schon aus den von Sury gemessenen Halbwertszeiten ergibt.

Aktivitäts-Messungen von Quellgasen bei der gleichen Quelle im Abstand von einigen Jahren durch dasselbe Labor und mit gleicher Methode zeigten zudem Schwankungen von 20-30%. Die Radioaktivität der Thermalwässer und Quellgase des Bäderquartiers ist nicht nur schwierig zu messen, die Werte schwanken auch erheblich von Quelle zu Quelle und im zeitlichen Verlauf.

Regionaler hydrogeologischer Thermalwasser-Vergleich: Noch mineralreicher als

die Badener Thermen sind die am Rhein gelegene Fridolinsquelle von Bad Säckingen [D] mit 6,7 g/l (davon 5,3 g/l Steinsalz, vgl. Pfirter et al. 2019, S. 150) sowie, auf der gegenüberliegenden Schweizer Seite des Rheins, ungenutzte und diffus in den Niederterrassenschotter austretende Thermalquellen in der Gemeinde Mumpf (mehr als 10 g/l Mineralisation, überwiegend Steinsalz), vgl. dazu Pietsch 2015.

Das 12 km nördlich von Baden erbohrte Zurzacher Thermalwasser ist mit weniger als einem g/l nur schwach mineralisiert, es eignet sich auch als Trinkwasser. Das 9 km westlich von Baden liegende Schinznacher Thermalwasser liegt auf einer tektonisch ähnlichen Struktur wie Baden, ist wegen Verdünnung durch oberflächennahes Grundwasser jedoch etwas kühler und nur rund halb so stark mineralisiert wie das Badener Thermalwasser, enthält aber etwa 30-mal mehr H_2S (Detaillierte Angaben hierzu in Burger 2011). Die unterschiedlich starke bakterielle H_2S -Produktion zwischen Baden und Schinznach wird auf das in Baden limitierte Angebot von organischen Substanzen und Stickstoff im Thermalwasser zurückgeführt (Münzel 1947).

4.4 Herkunft und Fließwege der Thermen und ihrer Wasserkomponenten

Zur Herkunft, Mineralisation und Erwärmung der Thermen von Baden und Ennetbaden war lange nichts bekannt, was mit dem Aufkommen der Naturwissenschaften Anlass zu Spekulationen gab. In den letzten 170 Jahren entstanden verschiedene Hypothesen und Theorien darüber, blieben aber zunächst spekulativ. Sie konnten erst mit der Entwicklung von tektonischen Modellen zur Juraufaltung (Laubscher 1961-1987, Jordan 1994, Philippe et al. 1996), mit Isotopenmessungen, mit der Anwendung von detaillierten hydrochemischen und physikalischen Wasseranalysen

sowie Edelgasmessungen und thermohydraulischen Modellierungen, mit der gezielten Wasseranalyse aus Tiefbohrungen und mit engmaschigen seismischen Erkundungen zu konkreteren Ergebnissen verdichtet werden. Heute ist klar, dass die Thermen ein Mischwasser aus mehreren Komponenten fördern, welche sehr unterschiedliche Einzugsgebiete, Fliesswege und Fliesszeiten aufweisen. Es besteht weiterhin Forschungsbedarf über die Einzugsgebiete und die verschiedenen Aquifere dieser Tiefengrundwässer sowie die Art und Weise, wie diese sich gegenseitig hydraulisch, thermisch, chemisch und physikalisch beeinflussen.

Arnold Escher [von der Linth] befasste sich oft mit den Thermen von Baden und Ennetbaden, doch hat er keine detaillierte Darstellung darüber veröffentlicht. Er hinterliess eine handskizzierte, detaillierte geologische Karte des Gebietes Baden – Westlägern sowie ein Gutachten zu den Thermalbädern (vgl. Literaturverzeichnis). In diesem Gutachten von 1858, welches er zusammen mit dem Bauingenieur-Professor Culmann verfasste, ging es primär um den hydraulischen Zusammenhang und damit um die gegenseitige Beeinflussbarkeit aller Thermen im Bäderquartier. Deshalb nahm Escher keine Stellung zur Herkunft des Thermalwassers. Er äusserte seine Meinung dazu aber seinem Schüler Albert Heim gegenüber: Die Thermen hätten ihr Einzugsgebiet in den Alpen. Der Durchfluss in Trias-Kalken unter dem Mittelland hindurch zum Faltenjura würde in so grosser Tiefe erfolgen, dass sich das Wasser auf die festgestellte Temperatur erwärmen könne.

Prof. Albert Heim hat diese Hypothese in den 1880er Jahren weiterentwickelt und Einsickerungsgebiete im südlichen Glarnerland, bei Engelberg und im Kanton Uri postuliert. Parallel dazu entwickelte F. Mühlberg (Aarau) eine andere Hypothese: Er verglich die zeitlichen Variationen der Gesamt-Schüttmenge der Thermen mit Schwankungen

der Limmatwasserstände bei Baden und mit grossräumigen Niederschlagsaufzeichnungen. Gestützt darauf vertrat er insbesondere ab 1902 die Hypothese, dass das Thermalwasser aus regional im Juragebirge einsickerndem Niederschlagswasser generiert werde und nicht aus den Alpen kommen könne, weil zwischen den Schüttmengen und dem Niederschlagsgeschehen der Nordschweiz eine Korrelation bestehe (mit einer Zeitverzögerung von etwa 8 bis 10 Monaten), aber keine gute Korrelation mit den alpinen Niederschlägen. Die hohe Temperatur der Thermalwässer, welche gestützt auf plausible Temperaturgradienten aus etwa 1,5 bis 2 km Tiefe aufsteigen müssen, konnte Mühlberg aber nicht erklären. Beide Hypothesen hatten ihre Anhänger und Gegner, sowohl Argumente als auch Schwächen, an konkreten Beweisen fehlte es jedoch.

Heim hat 1919 diese beiden Herkunfts-Hypothesen einander gegenübergestellt und vertrat weiterhin seine Version. Hartmann wies 1943 auf Widersprüche in beiden Herkunfts-Hypothesen hin, schloss sich grundsätzlich aber der Hypothese von Mühlberg an (Einsickern von Meteorwasser in Trias-Kalke des Faltenjuras). Hartmann erkannte, dass der Muschelkalk-Aquifer in der Grossregion Lägern – Baden – Brugg höchstens bis in eine Tiefe von 300-600 Metern unter die Oberfläche absinkt, was bei einer lokalen bis regionalen Herkunft der Thermen durch Einsickerung von Meteorwasser bei weitem nicht genügt, um die hohen Temperaturen des Thermalwassers zu erklären. Er blieb aber trotzdem beim regionalen Ansatz von Mühlberg, und um diese Hypothese zu begründen, suchte er nach einer noch nicht bekannten Wärmequelle im Untergrund. Dazu postulierte er eine untiefe, junge vulkanische Zone unter der Region Zurzach / Lägern – Baden – Bözberg, gleichsam ein unterirdischer, nach Südwesten ausgreifender Arm des bekannten Hegau-Vulkanismus, welcher aber nicht bis zur Oberfläche durchgebrochen sei. Er vermutete diese vulkanische Wärme-

quelle in einer Tiefe von ca. 2-5 km, welche genügend Wärme nach oben abgeben könnte, um das Wasser des Muschelkalk-Aquifers auf eine Auslauftemperatur von 47°C zu erhitzen. Hartmann wies auf weitere ergiebige Muschelkalk-Quellen hin, welche in der Region Jurasüdfuss vorkommen, insbesondere in Schinznach, Asp, Küttigen und Lostorf. Alle diese Quellen weisen relativ konstante Schüttungen auf wie die Badener Thermen und haben erhöhte Auslauf-Temperaturen (Details dazu in Burger 2011).

Da alle Erklärungsversuche zu den Thermalwasserflüssen Ungereimtheiten aufwiesen oder es ihnen an Beweisen mangelte, verblieben sie im spekulativen Bereich. Die Geologen schlossen sich entweder einer der beiden Hypothesen an oder blieben unschlüssig; Lüscher (1945) nahm weiterhin eine Herkunft aus den Alpen an, diesmal durch Einsickern von Meteorwasser in helvetische Malm-Kalke. Münzel verglich 1947 nochmals die verschiedenen Herkunfts-Hypothesen und wies auf deren Mängel und Widersprüche hin. Er stellte fest, was klar sei: Dass alle Thermen im Bäderquartier hydraulisch zusammenhängen, dass sie eine einheitliche chemische Zusammensetzung haben, dass die Mineralisierung mindestens teilweise auf die Gesteinslösung in den Muschelkalk- und Keuperschichten zurückzuführen sei und dass die Schüttmenge mit einer Verzögerung von meist ca. 8-10 Monaten mit dem lokalen Niederschlagsgeschehen korrelieren würde. Deshalb müsse mindestens ein Teil des Thermalwassers von regional versickertem Meteorwasser stammen.

Mehr Licht in die Frage der Herkunft, der Fliesswege und der Fliesszeiten brachten erst die Isotopenuntersuchungen ab den 1970er Jahren, die Entdeckung des nordschweizerischen Permokarbon-Trogs 1983 (dessen Südrand direkt unterhalb der Thermen des Bäderquartiers liegt), diverse nahe gelegene Tiefbohrungen mit Beprobung von Formationswässern sowie eine engmaschige Seismik

ab 2012 in der Nordschweiz. Viele dieser neuen Untersuchungen befinden sich noch in der Auswertungs- und Interpretationsphase oder sind noch nicht veröffentlicht. Es ist zu hoffen, dass bis in etwa zehn Jahren weitgehend geklärt ist, aus wie vielen Wasserkomponenten die Thermen des Bäderquartiers bestehen, wo deren Nährgebiete liegen und welche Fliesswege sie in welchen Aquiferen und Zeiträumen durchlaufen. Schon jetzt ist bekannt, dass die Thermalwasseraquifere von diversen gering durchlässigen und undurchlässigen Gesteinen umgeben sind, und dass sowohl die Aquifere als auch die Aquiclude und Aquitarde im Raum Lägern – Baden – Bözberg deutlich tektonisiert und von grösseren tektonischen Störungszonen durchzogen sind.

Der gegenwärtige Stand der Forschung geht davon aus, dass die Oberflächenwasser-Komponente etwa 5-10% ausmacht, welche mit einer Mischung von mindestens drei bis vier unterschiedlichen Tiefengrundwässern aufsteigt. Von letzterem stammen einzelne Komponenten aus dem Kristallin sowie aus dem Permokarbon-Trog und/oder dessen Randbereich. Neuere Literatur dazu findet sich in Pearson et al. 1991, Schmassmann 1990, Waber et al. 2014, Mazor et al. 1986 & 1988, Schmassmann et al. 1992 & 1984, NEFF 1984, Diebold 1986, Griesser 1985, Dubois et al. 1984 & 1988, Griesser & Rybach 1989, Löw 1987 sowie Kanz 2005. Die Fliesswege des Thermalwassers sind aber heute noch weitgehend eine «blackbox». Es ist zu hoffen, dass die laufenden hydrogeologischen Untersuchungen der Nagra etwas mehr Licht ins Dunkel bringen werden.

Belegt durch viele Messungen ist zudem eine geothermische Anomalie im Gebiet zwischen den Juraketten Chestenberg und Lägern im Süden und dem Aargauer Rheintal im Norden (vgl. Rybach et al. 1987, Gorhan & Griesser 1988, Schärli & Rybach 1991 sowie Karte in Burger 2009).

4.5 Qualitativer und quantitativer Schutz der Thermalquellen

Die Thermalwässer des Bäderquartiers können sowohl quantitativ als auch qualitativ beeinträchtigt werden. Während letzteres primär auf menschliche Aktivitäten zurückgeführt werden kann (Einsickern von Verunreinigungen aus Oberflächenaktivitäten oder aus Untertagebauten), stehen bei ersterem mehrere Ursachen im Vordergrund: Dazu gehören neben natürlichen Ertragsschwankungen und deren Verschärfung durch den Klimawandel insbesondere das Zerstören der abdichtenden Keuperschicht durch Bauten, Abgrabungen und Bohrungen, das Blockieren, Ableiten oder Umleiten von Aquiferen durch Bauwerke oder durch Einlagerung von Feststoffen, Flüssigkeiten oder Gasen (CO₂-Entsorgung). Auch die natürliche Subrosion kann die Quellerträge längerfristig beeinträchtigen (durch Verbruch von Aquifer-Abschnitten oder durch Änderung der Fliessrichtungen).

Die Gefährdung der Thermalquellen durch Abgrabungen und Bohrungen ist schon seit 1844 bekannt, weshalb damals für das Gebiet des Bäderquartiers ein kantonales Grabungs- und Bohrungs-Verbot erlassen wurde (siehe Anhang zur Referenzliste). Heute sind die Thermalquellen zusätzlich durch den kantonalen Nutzungsplan für den Schutz der Thermalquellen in Baden und Ennetbaden von 2016 geschützt. Damit wird beispielsweise untersagt, bei Aushub, Erkundungsbohrungen oder Fundationsbohrungen tiefer als einen Meter in den abdichtenden Keuper vorzudringen. Und bei der Erneuerung von Thermen-Fassungen muss das alte Schüttungsverhältnis der einzelnen Quellen zueinander beibehalten bzw. wieder hergestellt werden. Künftige technologische Anwendungen im Baubereich, in der Tiefengrundwasser-Nutzung und generell in der Untergrundnutzung bergen die Gefahr für neue Risiken und Gefährdungen, vgl. dazu Burger 2016.

5 Baugrund-Stabilität, -Sicherheit und -Problematik

5.1 Natürliche Subrosion und deren Auswirkungen

Subrosion bedeutet die unterirdische Lösung, Auslaugung und Verfrachtung von meist leicht wasserlöslichen Gesteinen, insbesondere von Steinsalz, Anhydrit und Gips. Stellenweise kann Subrosion auch an der Oberfläche in Form von großflächigen Wannen (Subrosions-Senken) oder Dolinen beobachtet werden, die durch das Nachbrechen und/oder durch das allmähliche Nachsacken der darüberliegenden Gesteinsschichten in die Hohlräume entstanden sind (Rick 1991). Im vorliegenden Fall wird auch benachbartes Karbonatgestein aufgelöst, was zu zusätzlichen Karsthohlräumen führt. Das Bäderquartier und seine nähere Umgebung bilden eine Subrosions-Senke.

Hauptsächliche Mechanismen bei Subrosionsvorgängen sind:

1. Anhydrit-Hydratisierung zu Gips (mit Quelldrücken durch Volumenzunahme) mit dünner Gipsschicht im Meterbereich und anschliessendem Gipskarst mit Auswaschung, Höhlen- und Dolinenbildung sowie Geländeverformungen. Das Vorhandensein von Salzen ein- und zweiwertiger Metalle im Thermalwasser beschleunigt die Hydratisierung des Anhydrits im Untergrund stark.

2. Steinsalz-Lösung: eine rasche Lösung und Hohlraumbildung durch Thermalwasser ist möglich, was ebenfalls zu Absenk- und zu seitlichen Bewegungen im Untergrund führt.

3. Karbonat-Lösung und stellenweise auch -Fällung im Untergrund infolge der laufenden Änderung des pH-Wertes, des Drucks, der Temperatur und der Anteile an gelöstem und freiem Kohlendioxid / Hydrogenkarbonat im aufsteigenden Thermalwasser.

Anschauliches Beispiel für solche Prozesse ist die Gipskarst-Landschaft im Südkarst



Fig. 5: Subrosions-Schaden: Absenkung eines römischen Bassinbodens in Baden durch Trichterbildung infolge von Gipskarst. Lokalität: früheres Badehotel "Staadhof". Unter den Platten war römischer Beton, darunter Keuperfels. Das Bassin wurde im 3. Jahrhundert aufgegeben.

(Deutschland), mit grossräumigen Dolinen- und Höhlenbildungen in Gips und Dolomit.

Subrosion hat einen kurzfristigen Einfluss auf die Baugrundstabilität, langfristig auch auf die lokale bis regionale Geländeform.

Das Bäderquartier gründet geologisch auf Gipskeuper, welcher oberflächennah verwittert ist und stellenweise mit Dolinenbildungen und Gipskarst überzogen ist. Auf diesen tonig-siltigen Sulfatschichten liegt im nördlichen Teil eine geringmächtige, unverfestigte Schicht von verschwemmter Moräne, im südlichen Teil folgen über dem Keuper direkt die ausgedehnten Niederterrassenschotter. Diese Ausgangslage führt zu diversen baugrundtechnischen Problemen bei der Gebäude-Fundierung: Einerseits darf die den artesischen Thermalwasserausfluss regulie-

rende und schützende Keuperschicht nicht entfernt oder durchbohrt werden, anderseits eignet sich die weiche, verschwemmte Moräne nicht als Tragschicht. Zudem wird durch das hochfliessende Thermalwasser selber der Untergrund destabilisiert durch Auswaschungen, Subrosion und Dolinenbildung. Daraus ergeben sich Herausforderungen für die Konstruktion von langzeitstabilen Fassungen der Thermalquellen und von grossen Hochbauten. Mit solchen Baugrundproblemen hatten schon die Römer zu kämpfen, wie von ihnen reparierte und nachträglich wieder abgedichtete Fassungen sowie der Ausgleich von eingesunkenen Fussböden zeigen. Spektakulär war die Entdeckung eines durch Gipskarst und Dolinenbildung eingesunkenen Terracotta-Plattenbodens der Römer bei der Errichtung der Botta-Bauten (Fig. 5). Direkt daneben wurden von den

Römern Bodensenkungen durch Erdauffüllungen ausgeglichen und mit dicken Eichenbrettern überdeckt. Dolinenbildungen unter römischen Bauten fand man auch auf der Ennetbadener Seite (Schaer 2024).

Optisch eindrücklich erlebbar war der «mobile» Untergrund auch beim Gasthaus «Brunner» im Bäderquartier von Ennetbaden, erbaut 1819. Nach einigen Jahrzehnten begannen sich die Fundamente des drei Stockwerke hohen Hauses unterschiedlich stark in den Keuper-Untergrund einzusenken, wodurch die Fussböden aus der Horizontalen gerieten. Im Lauf des 20. Jahrhunderts nahm die Schiefelage des Hauses laufend zu, und der Boden der Gaststube erreichte ein Gefälle von 22 cm. 1979 wurde das Haus «aufgegeben» und der Gemeinde als Abbruchobjekt verkauft. Diese vermietete das Haus «temporär» weiter, es wurde als Gasthaus «Schief» wiedereröffnet und blieb bis zum Abbruch 2010 in Betrieb (Rufer 2017).

5.2 Schutz des Aquifers und des Baugrunds vor Tiefbauten, Erschütterungen und Überlasten sowie der Bauwerke vor Subrosion

Die quantitative Schutz-Strategie für die bestehenden Thermalwasserfassungen seit 1844 wurde in Kapitel 4.5 vorgestellt. Sie beinhaltet den Schutz der natürlichen Keuper-Abdeckung über dem Aquifer vor Abtrag und Durchbohrung. Sie schützt aber nicht vor natürlicher Subrosion und vor Schäden durch zu schwere Bauwerke, falsche Foundationen und unsachgemässe Bauausführungen, wie z.B. starke Erschütterungen. Auch schützt sie nicht vor Hochwasserschäden durch die Limmat.

Deshalb ist heute eine erweiterte Schutz-Strategie erforderlich, welche auch vor den unter 5.1 aufgeführten Gefahren schützt. Sie ist jeweils spezifisch für neue Bauvorhaben und für bauliche Unterhaltsarbeiten zu planen und umzusetzen: qualitativer, quantitativer

und präventiver Schutz sowohl der Thermen und der Fassungsbauten als auch der Fundamente und der Hochbauten. Ein umfassender Schutz vor natürlicher Subrosion ist langfristig nicht möglich, aber durch sachgerechte Foundationen (Flachfoundationen über fester Unterlage, Kurzpfaulfoundationen über nicht tragfähigem oberstem Baugrund), einem nutzungstechnisch «geopferten», flexiblen untersten Geschoss und dem Verzicht auf schwere Hochbauten (Überlast-Schutz) kann schon viel erreicht werden. Auch sind grössere Erschütterungen durch Bauvorhaben im Bäderquartier zu unterlassen, denn sie können Bodensenkungen, Bodenverflüssigungen, Fundamentverschiebungen und den Einsturz von Karsthöhlen auslösen.

Begleitend kann ein umfassendes Monitoring der Quellaustritte (Nagra 2021) und der Oberfläche (Lidar, Präzisions-Höhennivellement) rechtzeitig vor den oben beschriebenen Problemen warnen. Forschungsbedarf besteht noch bei der Abklärung negativer Langfrist-Einwirkungen durch in der weiteren Nachbarschaft liegende Tunnelbau- Materialabbau- Leitungsbau- und sonstigen grösseren Tiefbauvorhaben. Auch bei der Materialwahl für die Quelfassungen, die unterirdischen Leitungsbauwerke und die Fundamente ist darauf zu achten, dass langzeitbeständige Materialien zum Einsatz kommen (beständig mindestens gegen Sulfatwässer, Chloridwässer und saure Wässer).

6 Übersicht zur historischen Entwicklung des Bäderquartiers

6.1 Römische Zeit (Aquae Helveticae) und Mittelalter

Das Bäderquartier hat eine über 2000-jährige, wendungsreiche Geschichte, beginnend in prähistorischer Zeit. Man geht davon aus, dass bereits eine vorrömische Thermalwassernutzung durch die damals ansässigen Kelten (Helvetier) existierte.



Fig. 6: Die Ruinen des «Chesselbads» unter dem neuen Botta-Bad als archäologisches Schaustück.

Frühe Römerzeit (bis ca. 260): Die römische Besetzung der Region erfolgte von Westen her im Jahr 15 v.u.Z. Im Folgejahr war Baubeginn der Stadt Vindonissa (mit Legionslager) und, in einer Stunde Gehdistanz, auch des Vicus Aquae Helveticae (18-20 ha Siedlungsfläche, davon ca. 5 ha Bäderquartier, vgl. Doppler 1976 sowie Hartmann & Weber 1985). Diese Siedlung in Baden und Ennetbaden wird von Brödner (2011) in ihrer Entstehung als «Militärbad», also als logistisches Anhängsel des Legionslagers Vindonissa eingestuft. Vom 2. Jahrhundert an verselbständigte sich die Bädersiedlung von der Stadt Vindonissa, welche ab 102 keine Legion mehr beherbergte (Pfyffer 1929 & 1930).

Bereits im frühen 1. Jahrhundert entstanden grosse Bäderbauten beidseits der Limmat, mit einer Brücke über den Fluss (Mittler 1968,

Schaer 2010 a & b, Wyss & Wälchli 2010, Wyss 2010, Drack & Fellmann 1988). Zwischen 260 und 270 erfolgten grosse Zerstörungen durch alemannische Einfälle, die Schäden wurden wieder behoben. Grosse Thermalbäder waren bei den Römern ein Mittelpunkt des öffentlichen und sozialen Lebens.

2020 wurden bei der Platz- und Quelfassungsenerneuerung auf dem Kurplatz bedeutende Überreste des Verenabads vorgefunden (Schaer 2021a, & 2023/2024): ein römischer Bassinboden aus Beton und römische Mauern sowie mittelalterliche Bäderruinen.

Spätromische Zeit (270-450): Weiterführung des Bäderbetriebs, aber keine neuen Grossbauten. Von der Bedeutung her kann man Aquae Helveticae jener Zeit vergleichen mit den bedeutendsten antiken Bä-

dern ausserhalb Italiens: Bath = Aquae Sulis (Südwest-England), Baden bei Wien (Österreich), Baden-Baden (Südwest-Deutschland), Aachen = Aquae Granni (Nordwest-Deutschland), die Thermopylen (Zentral-Griechenland), Aquincum (Budapest) und Baile Herculane (Südkarpaten). Näheres dazu in Loveless et al. 2016 und in Heinz 1996).

Früh- und Hochmittelalter (ca. 450-1100): Im «dunklen Zeitalter» mit sehr wenig Überlieferungen wurden die Bäder zwar weiterbetrieben, die Infrastruktur (z.B. Limmatübergang und Strassen) aber verfiel zunehmend. Das Bäderquartier war weiterhin Siedlungsgebiet, das frei auslaufende Thermalwasser wurde balneologisch in alten, überwiegend noch römischen Becken genutzt. Die Thermalquellen gehörten zum merowingischen und karolingischen Königsgut (Mittler 1962).

Hoch- und Spätmittelalter (1100-1415): Neufassung der Quellen und Ausbau der Bäder unter den Lenzburgern, Kyburgern und Habsburgern. Stadtgründung Baden 1297, reger Badebetrieb im Bäderquartier, welches einen Kilometer nördlich von der städtischen Siedlung lag. Rund um die Quellen entstanden Gasthöfe, die Gäste benutzen überwiegend die offenen Freibäder, welche auch als «Armenbäder» dienten (Place 1997). Um 1300 wurde das «Chesselbad» auf dem Areal des «Hinterhof» gebaut, welches mit abgeleitetem Thermalwasser von unten her gespeist wurde (Fig. 6). Es war für die Besucher eine «Fake»-Konstruktion, da sie den Anschein erweckte, als ob direkt unter dem Bad eine Quelfassung läge (Schaer 2013 & 2023/2024).

6.2 Übergang zur Neuzeit

In dieser Zeit wurde häufig die Steinplatten-Abdeckung der ergiebigsten Thermalquelle beschrieben und auf Bildern gezeigt: der Grosse Heisse Stein (vgl. Fig.1). Darunter liegt ein ca. 5 m tiefer Quellschacht mit zwei nebeneinander liegenden Quell-Aufstössen

(Haberbosch 1945, Doppler 2007). Er ist bedeckt mit einer fünfeckigen, heute noch über 4 Tonnen schweren Steinplatte aus einem Eratiker, welcher dem Erstfeld-Gneiskomplex (ein Element der Erstfeld-Zone) zugeordnet werden kann. Dieser Gneis wird überwiegend als Paragneis interpretiert, ein polymetamorphes, prävariszisches Altkristallin in Amphibolitfazies, gehört grosstektonisch zum nördlichen Aarmassiv. Der früher sechseckige Stein war etwa einen halben Meter über dem Platz erhöht, erwärmte sich permanent von unten und diente als Sitzgelegenheit neben den Badebecken auf dem Kurplatz. 1844 wurde der Kurplatz eingeebnet und die offenen Bäder wurden geschlossen. Dabei wurde auch der Grosse Heisse Stein auf Platzniveau gelegt, wahrscheinlich durch Abmeisselung. Im November 2021 wurde der Stein wieder als Sitzbank gestaltet, aufwändig unterfüttert mit einer zweiten Kristallplatte.

Frühe Eidgenössische Zeit (1415 bis 1650): Weiterbetrieb und Erneuerung der Bäder, welche damals die bedeutendsten nördlich der Alpen waren. Thermalbäder als Attraktion für den Tagsatzungs-Standort Baden (ab 1416 Beratungs- & «Regierungs»-Sitz der Eidgenossen). Die Thermen von Baden wurden bevorzugtes Ziel für ausgedehnte Gesundheitskuren: eine klassische Badekur dauerte damals 6 bis 8 Wochen, wobei man täglich etwa 6-8 Stunden im Thermalwasser sass und im Bad auch ass und trank. Oft wurde dabei auch Aderlass praktiziert, was das Thermalwasser rot verfärbte. Detaillierte Schilderung des Badegeschehens durch P. Bracciolini (1416, italienischer Renaissance-Humanist) und Gessner (1553). Die Stadt Baden übernahm die Aufsicht über das Bäderquartier; dieses wurde von Badeknechten kontrolliert, welche für Ordnung sorgten und Polizeifunktionen hatten. Badegäste durften nur unbewaffnet ins Quartier, genossen hier aber Schutz vor auswärtiger Rechtsverfolgung, das Bäderquartier hatte dadurch auch Asylcharakter. Erlaubt, aber streng reguliert, waren Glücksspiel, Tanz und



Fig. 7: Ansicht der neuen Botta-Bauten (Bildmitte). Blickrichtung nach SW. Mitte rechts: Limmat.

Prostitution, wobei das Bäderquartier dafür eine eigene Gerichtsbarkeit besass (Fricker 1880, Gessler 2005).

Späte Eidgenössische Zeit (1650 bis 1840): Nach dem 30-jährigen Krieg schwand die Bedeutung der Thermalbäder, auch hatte man zunehmend Angst vor einer Ansteckung mit Syphilis. Auf dem zentralen Kurplatz waren schon seit dem Mittelalter bis 1844 zwei grosse, öffentliche Freibäder im Dauerbetrieb: das Verenabad (rund 60 m² Wasserfläche) und das Freibad mit 52 m² Wasserfläche, vgl. Meyer-Ahrens 1860 & 1867, Mittler 1965, Diebold 1861. Die Umrisse dieser historischen Badebecken wurden 2021 mit Steinmarkierungen auf dem Platz gekennzeichnet.

6.3 Umbruch Mitte 19. Jahrhundert

1836-1839 wurde auf der Ennetbadener Seite eine Promenaden-Strasse entlang der Limmat angelegt, was einen Bauboom für Bäderhotels auslöste (Bolt & Münzel 1986).

1844 wurde beidseits der Limmat intensiv aber heimlich nach Thermalwasser gegraben,

dabei wurde illegalerweise die Schwanenquelle erbohrt, welche auf 20 m Tiefe auf Muschelkalk und etwas tiefer auf viel Thermalwasser stiess (Hartmann 1937). Dies löste das kantonale Grabungs- und Bohrverbot für das ganze Bäderquartier aus.

6.4 Blütezeit 1870-1914

Goldene Jahre mit anhaltendem Aufschwung der Bäderkultur. 1847 brachte die Eröffnung der Eisenbahn Zürich – Baden neuen Schwung in den Bädertourismus, was zum Bau neuer und grösserer Bäderhotels führte (Hoegger 1976). Internationales Tourismus-Zentrum.

Inhalatorium: 1836 errichteter klassizistischer Bau entlang der Limmat. Ursprünglich für Trinkkuren benutzt, 1906-1910 umgebaut zur Behandlung von chronisch-entzündlichen Atemwegs- und Lungenerkrankungen mittels Inhalation aufsteigender Quellgase und Thermalwasser-Dämpfe (zerstäubtes und vernebeltes Thermalwasser). Seit 1992 Neunutzung als Bäderarchiv, Informationszentrum und Arztpraxis.

6.5 Niedergang im 20. Jahrhundert

Der Erste Weltkrieg brachte einen massiven Einbruch des Bädertourismus wegen fehlender Gäste. Die nachfolgende Wirtschaftskrise verlängerte den Niedergang und den Investitionsstopp. Der 2. Weltkrieg verlängerte die Krise nochmals, danach führte die Umwandlung der Limmat-Promenade in eine Kantonsstrasse zu unhaltbaren Lärmbelastungen im ganzen Bäderquartier. Immer häufiger wurden Bäderhotels geschlossen, zu Bürozwecken und Altersheimen umgenutzt oder abgerissen.

6.6 Wiederbelebung seit 2002

Raumplanerische Vorarbeiten und die Verlegung der Hauptstrasse durchs Bäderquartier in einen Tunnel in Ennetbaden brachten die Wende (Rick 2006). Dank der Lärmsanierung wurde wieder investiert. Ein Studienwettbewerb ergab 2009 die Zustimmung zum Konzept von Architekt Mario Botta für ein neues, grosses Thermalbad. Parallel dazu wurden alte Bäderhotels unter Berücksichtigung der Denkmalpflege renoviert.

Herbst 2017: Gründung des Vereins Bagni Popolari, welcher die alte Tradition öffentlicher Gratis-Thermalbäder unter freiem Himmel wieder beleben möchte, genannt «Heisse Brunnen» (www.bagnopopulare.ch).

2020 – 2021: Bau von zwei definitiven, öffentlichen Gratis-Thermalbädern (mit insgesamt 5 kleinen Badebecken), genannt «Bagni Popolari» oder «Heisse Brunnen», Standorte beidseitig der Limmat, im Freien und direkt am Fluss (Burgherr 2021). Im November 2021 konnten die beiden «Heissen Brunnen» und das Botta-Bad (Fig. 7) in Betrieb genommen werden.



Fig. 8: Heisser Brunnen Ennetbaden, aus Muschel-sandstein (Obere Meeres-Molasse).

7 Wichtigste medizinische Wirkungen des Thermalwassers

7.1 Generelle Wirkung der Wärme und einzelner Inhaltsstoffe

Die Badekultur entspricht einem menschlichen Grundbedürfnis, erfüllt sowohl hygienische als auch medizinische Zwecke und fördert die körperliche und psychische Entspannung (Minnich 1871). Badetemperaturen zwischen 35 und 40°C bewirken auch nach stundenlangem Aufenthalt kein Kältegefühl. Medizinisch wirksam bei allen Bädern ist der Wasserauftrieb (Schwerelosigkeit der Körpermasse), er ermöglicht schnellere Heilungsprozesse von Muskel- und Gelenkschäden (Glogowski & Ganter 1981). Besonders wirksam ist dies bei aktiver Bewegung im Wasser. Medizinische Wirkungen von Bädern beschrieben schon Scheuchzer 1732 und Minnich 1844. Münzel beschrieb in einer Monographie (Diss. 1947) konkret die Wirkungen des Badener Thermalwassers, vgl. auch Robins & Smedley 2013.

Je nach Temperatur und Inhaltsstoffen haben Thermalbäder unterschiedliche therapeutische Heilwirkungen. Die wichtigsten sind:

Starke Mineralisation (ab 1 g/l, besser sind 2-5 g/l): Stressminderung (Senkung des Cor-

tisolspiegels). Bei sehr starker Mineralisation (Solbäder): zusätzliche Heilwirkung bei Rheuma und Gelenkbeschwerden. Hoher Salzgehalt (Chlorid): desinfizierende Wirkung auf der Haut. Wärmewirkung (ideale Badetemperatur 35-38°C): Muskel-entspannend, krampflösend. Warmes Wasser fördert auch die Dehnfähigkeit des Bindegewebes.

Zusatzeffekte von gelösten und freien Gasen im Thermalwasser:

a) CO₂: steigert die Durchblutung, erweitert die Bronchien und kann dadurch den Kreislauf (Herz) entlasten und das kardiopulmonale System stärken (Tiedt & Jordan 1986).
b) H₂S: wirkt entzündungshemmend, dadurch Heilwirkung bei entzündlichen rheumatischen Erkrankungen (insbes. Polyarthritis), degenerativen Gelenkerkrankungen (insbes. Arthrose), Knorpelschäden sowie bei allergischen und entzündlichen Hautkrankheiten wie Akne oder Schuppenflechte. H₂S wirkt zudem im ganzen Körper gut gegen freie Radikale, indem diese gebunden und so unschädlich gemacht werden. Dadurch wird oxidativer Stress abgebaut. Eine weitere Wirkung ist die Verringerung des Homocystein-Spiegels (körpereigenes Stoffwechselprodukt) im Blutplasma, wodurch die Blutgefässe besser geschützt sind. Die Haut wird zudem unter H₂S-Kontakt stärker durchblutet, was sich in Rötungen zeigen kann. Höhere H₂S-Konzentrationen sind allerdings kreislaufbelastend und daher kontraindiziert bei Herzkrankheiten, Bluthochdruck, Venenentzündung und Bronchialasthma.

Thermalwasserbäder mit hohen H₂S-Konzentrationen erfordern wegen der Kreislaufbelastung Ruhepausen nach einer 20- bis 40-minütigen Badedauer.

Früher wurden Thermalwässer mit hohen Konzentrationen des radioaktiven Edelgases Radon häufig auch zur Therapie von Atemwegs- und Lungenkrankheiten inhalatorisch angewandt (z.B. chronische Bronchitis, Asthma bronchiale, Tuberkulose und COPD).

7.2 Anwendung von unbehandeltem Thermalwasser in Baden und Ennetbaden

Die neuen «Heissen Brunnen» beiderseits der Limmat werden mit unbehandeltem Thermalwasser betrieben (keine vorgängige Entgasung, Temperatursenkung oder Demineralisierung). Dadurch wirkt das volle Spektrum der Inhaltsstoffe: Starke Mineralisation, hoher Salzgehalt, hohe Konzentration von CO₂ und H₂S im Badewasser und in den Entgasungsblasen. Mit Rücksicht auf diese volle Wirkungsweise empfiehlt es sich, das Baden in unbehandeltem Thermalwasser entgegen früherer Gepflogenheiten nach 20-40 Minuten jeweils mit grösseren Pausen zu unterbrechen.

Zusammenfassend möchte ich, an Stelle eines Fazits, in der Sprache der Römer sagen:

Aqua calida et sana
quae ostendit sursum
ab petra profundis
pro sano et relaxato corpore.

Verdankungen

Herrn Marc Angst (Architekt, Baden und Zürich sowie gemeinnütziger Verein Bagni Popolari) danke ich für die Detailinformationen zu den neu gebauten «Heissen Brunnen» beidseits der Limmat. Herrn Heinz Vetter (Jäckli Geologie AG, Baden) danke ich für die baugrundtechnischen Informationen zum Neubau «Botta-Bad» im Norden des Bäderquartiers und für das Bild Fig. 5. Frau Andrea Schaer (Oberwangen BE) danke ich für die Informationen zu den neuen archäologischen Grabungen im Bäderquartier.

Literatur

- Albrecht, F. 1915: Rechtsgeschichte der Bäder zu Baden im Aargau. – Diss. Univ. Bern; Druckerei J. Wirz, Wetzikon.
- Stadt Baden, Gemeinde Ennetbaden und Planungsteam Bäderquartier 2001: Entwicklungsleitbild Bäderquartier Baden/Ennetbaden. – Stadt Baden und Gemeinde Ennetbaden.
- Baujard, C., Signorelli, S. & Kohl, T. 2007: Evaluation du potentiel géothermique Suisse, rapport 2006. – Schweiz. Geophys. Komm. SGPK, 18 S.
- Biehler, D., Schmassmann, H., Schneemann, K. & Sillanpää, J. 1993: Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Dogger-, Lias-, Keuper- und Muschelkalk-Aquifere. – NAGRA, Wettingen, Techn. Bericht NTB 92-08, 410 S.
- Bitterli-Dreher, P., Graf, H.R., Naef, H., Diebold, P., Matousek, F., Burger, H. & Pauli-Gabi, T. 2007: Geologischer Atlas der Schweiz 1: 25'000, Blatt Baden; Erläuterungen 120. – B.-A. Landestopogr.-swisstopo, Landesgeologie, Wabern.
- Bracciolini, P. 1416/2016: Brief vom 18. Mai 1416 an Niccolò Niccoli in Florenz «Über die Bäder zu Baden», übersetzt ins Deutsche von Hans Jörg Schweizer. – Literarische Gesellschaft Baden & Vereinigung für Heimatkunde des Bezirks Baden [Ed.]: Badener Neujahrsbl. 91 (2016), S. 118-131; Verlag «hier und jetzt», Baden/Zürich. Ebenso nachgedruckt in: Hess, David (1818): Die Badenfahrt, S. 121-134.
- Brödner, E. 2011: Römische Thermen und antikes Badewesen [3.Aufl.]. – Wissenschaftl. Buchges., Darmstadt, 304 S.
- Bolt, T. & Münzel, U. 1986: Der Bäderbezirk von Baden und Ennetbaden. In: Serie Schweizerische Kunstführer. – Ges. Schweiz. Kunstgeschichte, Bern; sowie als Separatum der Gemeinden Baden und Ennetbaden [Ed.]: 35 S.
- Burger, H. 2009: Vorkommen, Nutzung und Schutz von Thermalwässern und Mineralwässern im Kanton Aargau: eine Übersicht. – Swiss Bull. angew. Geol. 14/1, S. 13-27.
- Burger, H. 2011: Die Thermalwässer und Mineralwässer im Kanton Aargau und seiner näheren Umgebung. – Mitt. Aarg. Natf. Ges. 37, S. 91-111.
- Burger, H. 2012: Der Untergrund von Ennetbaden. Thermalwasser und Geologie zwischen Limmat und Hölthal. – Neujahrsbl. Ennetbaden 2013, 6 S.; Gemeinde Ennetbaden [Ed.].
- Burger, H. 2016: Nutzung und Schutz von Tiefengrundwasser im Spannungsfeld von Chancen, Risiken, Konflikten und regulatorischen Anforderungen. – Swiss Bull. angew. Geol. 21/1, S. 69-90.
- Burgherr, U. 2021: Bagne Popolare. Baden wie vor 2000 Jahren. – Badener Njbl. 96, S. 25-32. – Verl. «hier und jetzt», Baden/Zürich.
- Cadisch, J. 1932: Zur Geologie der Schweizer Mineral- und Thermalquellen. – Verh. Natf. Ges. Basel 42, S. 138-176.
- Carlé, W. 1975: Die Mineral- und Thermalwässer von Mitteleuropa: Geologie, Chemismus, Gene-
se. – Wissensch. Verlagsges., Stuttgart, 643 S.
- Diebold, C. [Amts- und Badearzt von Baden] (1861): Der Kurort Baden in der Schweiz. – G. Lücke Verl. Winterthur, 241 S.
- Diebold, P. 1986: Erdwissenschaftliche Untersuchungen der Nagra in der Nordschweiz. Strömungsverhältnisse und Beschaffenheit der Tiefengrundwässer. – Mitt. Aarg. Natf. Ges. 31, S. 11-51.
- Diebold, P., Naef, H. & Ammann, M. 1992: Zur Tektonik der zentralen Nordschweiz. Interpretation aufgrund regionaler Seismik, Oberflächengeologie und Tiefbohrungen. – Geol. Berichte Landeshydrol. u. -geol. 14 (Text- und Beilagenband); sowie: Nagra, Wettingen, Techn. Bericht NTB 90-04.
- Doppler, H. W. 1976: Der römische Vicus Aquae Helveticae Baden. – Archäol. Führer Schweiz 8; Ges. Schweiz. Ur- und Frühgeschichte, Basel.
- Doppler, H. W. 2007: Die Münzfunde aus der Quelle «Grosser Heisser Stein» in Baden AG. – Schweiz. Numismat. Rundsch. 86, S. 91-116.
- Drack, W. & Fellmann, R. 1988: Die Römer in der Schweiz. [Baden: S. 348-353]. – Verl. K. Theiss, Stuttgart und Raggi, Jona, 446 S.
- Dubois, J.-D. & Flück, J. (1984): Fonds national pour la recherche énergétique (Suisse) NEFF 165, final report of project No. 165. Geochemistry: Nutzbarmachung der Geothermie im Raume Baden. – University of Geneva, Dept. mineralogy.
- Dubois, J.-D., Flück, J. & Jaffé, F. C. 1988: Geo- und Isotopenchemische Charakterisierung der tiefen Thermalwässer. – In: Gorhan, H. L. & Griesser, J.-C.: Geothermische Prospektion im Raume Schinznach Bad - Baden. – Beitr. Geol. Schweiz, geotechn. Serie 76.
- Escher [von der Linth], A. & Culmann, C. 1858: Gutachten über die Thermalquellen-Verhältnisse zu Baden und Ennetbaden und über die Fassung der im Limmatbette ausfließenden Thermen. – unpubl. Bericht vom 23. Juni 1858, 18 S.; Hochschularchiv der ETH Zürich.
- Fricker, B. 1880: Geschichte der Stadt und Bäder zu Baden. – Sauerländer, Aarau, 697 S.
- Gessler, M. 2005: Die Bäder von Baden. Rechtliche Freiräume (1415-1714). In: Gilomen, H.J., Schumacher, B. & Tissot, L. [Ed.]: Freizeit und Vergnügen vom 14. bis 20. Jahrhundert; S. 69-85. – Schweiz. Jb. Wirtschafts- und Sozialgeschichte 20; Chronos-Verlag, Zürich.
- Gessner, C. [Gesneri C., Stadtarzt in Zürich] 1553: De thermis Helveticis et primum de Badenijs. In: Gessner, C. (1553): De Germaniae et Helvetiae thermis. – Thomas Junta, Venedig (Venetiis apud iuntas), S. 289-299. – neu aufgeführt in: Fricker, B. (1883): Anthologia ex thermis badensibus (Eine Blumenlese aus den Aufzeichnungen alter Schriftsteller über die Bäder zu Baden), S. 33-38. – Sauerländer, Aarau.
- Glogowski, G. & Gantner, U. 1981: Grundbegriffe der Badeheilkunde, Grundlagen und Ausführ-

- rung medizinischer Bäder, sämtlicher Baden-
 anwendungen einschließlich der Kneipp'schen
 Verfahren. In: Lehrbuch für Masseure und me-
 dizinische Bademeister. – Springer, Berlin, Hei-
 delberg, S. 199-252.
- Gorhan, H. L. & Griesser J.-C. [Ed.] 1988: Geother-
 mische Prospektion im Raume Bad Schinznach
 – Baden. – Beitr. Geol. Schweiz, geotechn. Serie
 76, 73 S. & 20 Taf.
- Greber, E. 1998: Einfluss der Niederschläge auf die
 Quellschüttungen der Badener Thermalquellen.
 Interpretation von hydrogeologischen Mes-
 sungen. – Bericht der Firma magma AG, Zürich,
 vom 2. Dezember 1998 im Auftrag Kant. Dept.
 Bau, Verkehr und Umwelt, Abt. für Umwelt, Aa-
 rau (unpubl.).
- Griesser, J.-C. 1985: Geothermische Prospektion
 zwischen Baden und Schinznach – Geophy-
 sikalische Untersuchungen und thermohydrau-
 lische Modellrechnungen. – Diss. ETH Nr.
 7845.
- Griesser, J.-C. & Rybach, L. 1989: Numerical ther-
 mohydraulic modeling of deep groundwater cir-
 culation in crystalline basement: An example of
 calibration. – In: Beck, A.E., Grant, G. & Layos,
 S.: Hydrogeological Regimes and Their Subsur-
 face Thermal Effects 47, S. 65-74. – Amer. Geo-
 phys. Union, Geophysical Monograph Series;
 Wiley.
- Haberbosch, P. 1943: Baden und Umgebung, ein
 geologisches Skizzenbuch. – Badener Kalender
 291.Jg., S. 79-98; auch als Sonderdruck; Boner
 & Co., Baden.
- Haberbosch, P. 1945: Altes und Neues von der Ba-
 dener Therme. – Badener Njbl. 20, S. 33-50.
- Haberbosch, P. 1967: Das Modell der Bäder von Ba-
 den und des Dorfes Ennetbaden. In: Badener
 Njbl. 42, S. 31-54. – Lit. Ges. Baden.
- Hantke, R. 1965: Zur Chronologie der präwürm-
 eiszeitlichen Vergletscherungen in der Nord-
 schweiz. – Eclogae geol. Helv. 58/2, S. 877–
 899.
- Hartmann, A. 1925: Die Mineral- und Heil-Quellen
 des Kantons Aargau: ihre geologischen und
 chemischen Verhältnisse. – Mitt. Aarg. Naturf.
 Ges. 17, S. 255-320; Sauerländer, Aarau.
- Hartmann, A. 1937: Zur Kenntnis der Therme von
 Baden. – Mitt. Aarg. Natf. Ges. 20, S. 112-136.
- Hartmann, A. 1943: Natur und Herkunft der Therme
 von Baden. – Badener Njbl. 18, S. 3-27; sowie
 gleicher Artikel in: Mitt. Aarg. Natf. Ges. 21, S.
 1-24.
- Hartmann, M. & Weber, H. 1985: Die Römer im Aar-
 gau. – Sauerländer, Aarau, 224 S.
- Heim, A. 1919: Geologie der Schweiz, in zwei Bän-
 den. Bd.1: Molasseland und Juragebirge. – C.
 Tauchnitz, Leipzig, 704 S., 29 Abb., Anhänge.
 [Thermen von Baden: S. 700-702 & Tafel 25].
- Heinz, W. 1996: Antike Balneologie in späthellenis-
 tischer und römischer Zeit. Zur medizinischen
 Wirkung römischer Bäder. – ANRW [Aufstieg
 und Niedergang der römischen Welt], Teil II,
 Band 37/3, S. 2411- 2432; De Gruyter [Ed.].
- Hess, D. 1818: Die Badenfahrt. – a) Manuskript und
 kolorierte Abbildungen: Zentralbibliothek Zürich,
 586 S. b) Erstdruck 1818 bei Orell, Füssli & Co.,
 Zürich, mit Plan von 1816 des Bäderquartiers
 von L. Schulthess. c) Zweitausgabe 1969 (leicht
 gekürzt) bei Orell, Füssli & Co., Zürich. d) Nach-
 druck 2017 (dem Manuskript nachempfunden),
 450 S., mit koloriertem Plan des Bäderquartiers
 von L. Schulthess (1816), bei Verlag «hier und
 jetzt», Baden/ Zürich.
- Hoegger, P. 1976: Die Kunstdenkmäler der Schweiz:
 Kanton Aargau, Bd. VI: Der Bezirk Baden 1.
 Baden, Ennetbaden und die oberen Reusstal-
 gemeinden. – Schweiz. Ges. für Erhaltung his-
 torischer Kunstdenkmäler; Ges. für Schweiz.
 Kunstgeschichte & Société de l'histoire de l'art
 en Suisse [Ed.]; Birkhäuser, Basel, 511 S. (Bä-
 derquartier: S. 302-327 & S. 357-359).
- Högl, O. 1980: Die Mineral- und Heilquellen der
 Schweiz. – Bundesamt für Gesundheit, Bern
 [Ed.]; P. Haupt, Bern.
- Hofmann, F. 1996: Zur plio-pleistozänen Landschafts-
 geschichte im Gebiet Hochrhein-Wutach-Ran-
 den-Donau: Geomorphologische Überlegungen
 und sedimentpetrographische Befunde. – Eclo-
 gae geol. Helv. 89/3, S. 1023-1041.
- Jordan, P. 1994: Evaporite als Abscherhorizonte.
 Eine gefügekundlich-strukturgeologische Un-
 tersuchung am Beispiel der Nordschweizer Tri-
 as. – Beitr. Geol. Karte Schweiz [N. F.] 164.
- Jordan, P. 2016: Reorganisation of the Triassic
 stratigraphic nomenclature of northern Swit-
 zerland: overview and the new Dinkelberg, Kai-
 seraugst und Zeglingen formations. – Swiss J.
 Geosci. 109/2, S. 241-255.
- Jordan, P., Pietsch, J.S., Bläsi, H., Furrer, H.,
 Kündig, N., Looser, N., Wetzel, A. & Deplazes,
 G. 2016: The middle to late Triassic Bänkerjoch
 and Klettgau formations of northern Switzer-
 land. – Swiss J. Geosci. 109/2, S. 257-284.
- Kantonsarchäologie Aargau [Ed.] 2021: Baden in
 der Römerzeit – Das antike Aquae Helveticae
 und seine Thermen. – Kantonsarchäologie Aar-
 gau, Brugg; mit Web-Aufschaltung, 4 S.
- Kanz, W. 2005: Die Badener Thermalquellen – neue
 Erkenntnisse zur Frage ihres Ursprungs. – Ba-
 dener Njbl. 80, S. 122-129.
- Kolb, W. 1951: Über die Radioaktivitätsmessung als
 analytische Untersuchungsmethode für Mine-
 ralwasser. – Diss. ETH Zürich Nr. 1875, 51 S.
- Kottmann, J. K. 1826 [Amtsarzt Solothurn]: Ueber
 die warmen Quellen zu Baden im Aargau. Die
 Trink- und Badkuren daselbst. – Joh. J. Chris-
 ten, Aarau, 269 S.
- Kuhlemann, J. & Rahn, M. 2013: Plio-Pleistocene
 landscape evolution in Northern Switzerland. –
 Swiss J. Geosci. 106/3, S. 451-467.
- Laubscher, H. P. 1961: Die Fernschub-Hypothese
 der Jurafaltung. – Eclogae geol. Helv. 54/1, S.
 221-281.
- Laubscher, H. P. 1962: Die Zweiphasen-Hypothese
 der Jurafaltung. – Eclogae geol. Helv. 55/1, S.
 1-22.

- Laubscher, H. P. 1965: Ein kinematisches Modell der Juraufaltung. – *Eclogae geol. Helv.* 58/1, S.231-316.
- Laubscher, H. P. 1986: The eastern Jura: relations between thin-skinned and basement tectonics, local and regional. – *Geol. Rdsch.* 75/3, S. 535-553; sowie: Nagra, Wettingen: Techn. Bericht NTB 85-53.
- Laubscher, H. P. 1987: Die tektonische Entwicklung der Nordschweiz. – *Eclogae geol. Helv.* 80/2, S. 287-303.
- Liniger, H. 1966: Das plio-altpleistozäne Flussnetz der Nordschweiz. – *Regio basil.* 7/2, S. 158-177.
- Liniger, H. 1967: Pliozän und Tektonik des Juragebirges. – *Eclogae geol. Helv.* 60/2, S. 407-490.
- Loveless, S., Farr, G., Ward, R., & Smedley, P. 2016: Introduction to "Wonder Water: the value of water (Groundwater for Wellness)". – *EuroGeoSurveys (The Geological Surveys of Europe)*, Brüssel [Ed.].
- Löw, S. 1987: Die Thermalquellen von Baden: eine geologisch-hydrogeologische Einführung. – *Bull. Ver. schweiz. Petrol.-Geol. und -Ing.* 53/125, S. 15-18.
- Lüderitz, B. & Noder, W. 2013: Über die Wirkung von Bädern mit verschiedenem Kochsalz- und CO₂-Gehalt auf Gesunde und Kranke mit Funktionsstörungen des kardio-pulmonalen Systems; I. Mitteilung: Das Verhalten der Funktionsgrößen des kardio-pulmonalen Systems im CO₂-haltigen Solbad bei gleicher Temperatur, gleicher Wasserhöhe und gleicher Badedauer. – Springer-Verlag.
- Lüscher, G. 1943: Expertenbericht betreffend die Ausräumungs- und Bohrungsarbeiten an der Schwanenquelle in Ennetbaden. – Aarau (unpubl., Kommunalarchive Baden und Ennetbaden).
- Lüscher, G. 1945: Über die Herkunft und den Weg des Wassers der Thermen in Baden und dessen Erwärmungsursachen auf seiner Reise von den Alpen nach Baden. – Aarau, (unpubl. Kommunalarchiv Baden).
- Matousek, F., Wahl, F., Fehlmann, H. & Spada, M. 2001: Sanierungsmöglichkeiten des Thermalquellensystems in Baden und Ennetbaden, Phase 1: Zustandserfassung Quellen und Leitungsnetz, Beurteilung Sanierungsbedarf. – unpubl. Bericht Nr. T1047B/0105 vom 12. Januar 2001 [Ingenieurgemeinschaft Matousek, Baumann & Niggli / Bänziger + Bacchetta + Fehlmann; beide in Baden].
- Mazor, E. 2004: Chemical and isotopic groundwater hydrology (3. Ed.). – Marcel Dekker Inc., New York & Basel, 453 S. (PDF in researchgate.net).
- Mazor, E., Jaffé, F. C., Flück, J., & Dubois, J.-D. 1986: Tritium corrected ¹⁴C and atmospheric noble gas corrected ⁴He applied to deduce ages of mixed groundwaters: Examples from the Baden region, Switzerland. – *Geochim. Cosmochim. Acta* 50/8, S. 1611-1618.
- Mazor, E., Dubois, J. -D., Flück, J., & Jaffé, F. C. 1988: Noble gases as tracers identifying geothermal components in regions devoid of surface geothermal manifestations: A case study in the Baden springs area, Switzerland. – *Chemical Geology (Isotope Geosci. sect.)* 72/1, S. 47-61.
- Medici, F. & Rybach, L. 1995: Geothermal map of Switzerland [heat flow density]. 36 S., 1 Karte «Geothermische Karte der Schweiz 1:500'000» – Schweiz. Geophysikal. Komm. [Ed.]; Beitr. Geol. Schweiz, Ser. Geophysik Nr. 30.
- Merkli, P. J. 1961: Der Obere Muschelkalk im östlichen Schweizer Jura. – Diss. ETH Zürich Nr. 3104; sowie: *Eclogae geol. Helv.* 54/1, S. 137-219.
- Meyer-Ahrens, C. 1860/1867: Die Heilquellen und Kurorte der Schweiz: in historischer, topographischer, chemischer und therapeutischer Beziehung geschildert. Bd. 1 & Bd. 2. – Orell Füssli, Zürich, total 936 S.; zweite, ergänzte Auflage einbändig von 1867, 812 S.; unveränderter Nachdruck Ausg. 1860 durch Hansebooks Reprints, Norderstedt, von 2021.
- Minnich, J. A. 1844: Baden in der Schweiz und seine warmen Heilquellen in medizinischer, naturhistorischer u. geschichtlicher Hinsicht. – Höhr u. Langbein, Zürich; 322 S, mit Kupferstichen und einer Karte.
- Minnich, J. A. 1871: Baden in der Schweiz und seine warmen Heilquellen in medizinischer, naturhistorischer u. geschichtlicher Hinsicht. 2., aktual. und ergänzte Aufl. – Zehnder, Baden; 258 S.
- Mittler, O. 1962: Geschichte der Stadt Baden. Bd. I: Von der frühesten Zeit bis um 1650. – Einwohner- & Ortsbürgergemeinde Baden [Ed.]; Verl. Sauerländer, Aarau, 415 S.
- Mittler, O. 1965: Geschichte der Stadt Baden. Bd. II: Von 1650 bis zur Gegenwart. – Einwohner- & Ortsbürgergemeinde Baden [Ed.]; Verl. Sauerländer, Aarau, 427 S.
- Mittler, O. 1968: Die Aufdeckung der römischen Bäder in Aquae Helveticae. In: Schmid, E., Berger, L. Bürgin, P. [Red.]: *Provincialia, Festschrift für Rudolf Laur-Belart*. – Stiftung Pro Augusta Raurica [Ed.]; Schwabe & Cie., Basel/Stuttgart.
- Moesch, C. 1867: Geologische Beschreibung des Aargauer Jura und der nördlichen Gebiete des Kantons Zürich. – Beitr. Geol. Karte Schweiz 4, 319 S., Taf. & Profile in Farbe.
- Moesch, C. 1874: Der südliche Aargauer Jura und seine Umgebungen: geologisch aufgenommen und beschrieben. – Beitr. Geol. Karte Schweiz 10, 54 S.
- Mousson, A. 1840: Geologische Skizze der Umgebungen von Baden im Canton Aargau. – Orell, Füssli & Cie., Zürich, 112 S., mit 6 Tafeln.
- Mousson, A. 1848: Über die Wasserverhältnisse der Thermen von Baden im Aargau. – Mitt. Natf. Ges. Zürich 21 & 22, S. 110-134.
- Mühlberg, F. 1898: Überschiebungen und Überschiebungsklippen im Jura und speziell am Lägern. – *Eclogae geol. Helv.* 5/7, S. 477-479.
- Mühlberg, F. 1902: Bericht über die Exkursionen der Schweizerischen Geologischen Gesellschaft in das Grenzgebiet zwischen dem Ketten- und

- dem Tafeljura, in das aargauischen Quartär und an die Lägern, mit geol. Profiltafeln 1:25'000. – *Eclogae geol. Helv.* 7/3, S. 152-196.
- Mühlberg, F. 1903: Erläuterungen zu den geologischen Karten des Grenzgebietes zwischen dem Ketten- und Tafeljura; Teil 1: Geologische Karte der Lägernkette und ihrer Umgebung 1:25'000. – *Eclogae geol. Helv.* 7/4, S. 246-270.
- Mühlberg, F. 1904: Geologische Karte des unteren Aare-, Reuss- und Limmat-Tales 1: 25'000. – Geol. Spezialkarte Nr. 31; Schweiz. Geol. Komm., Bern.
- Mühlberg, F. 1905a: Erläuterungen zu den geologischen Karten des Grenzgebietes zwischen dem Ketten- und Tafeljura; Teil 2: Geologische Karte des unteren Aare-, Reuss- und Limmat-Tales 1: 25'000. – *Eclogae geol. Helv.* 8/5, S. 487-538.
- Mühlberg, F. 1905 b: Die geologischen Verhältnisse der Thermen von Baden. – *Mitt. Aarg. Natf. Ges.* 10, S. XXVIII-XXX; Sauerländer, Aarau.
- Mühlberg, F. 1906: Beobachtungen bei der Neufassung der Limmatquelle zu Baden und über die dortigen Thermen im Allgemeinen. – *Eclogae geol. Helv.* 9/1, S. 56-58.
- Mühlberg, F. 1909: Beobachtungen bei der Neufassung der Limmatquelle zu Baden. – *Mitt. Aarg. Naturf. Ges.* 11, S. XX-XXII; Sauerländer, Aarau.
- Müller, C. L. 1870: Chemische-physikalische Beschreibung der Thermen von Baden in der Schweiz. – Zehnder'sche Buchdruckerei, Baden, 38 S.
- Münzel, U. 1947: Die Thermen von Baden: eine balneologische Monographie. – Diss. ETH Zürich Nr. 1546, 299 S.
- Nagra 1986: Überwachung bedeutender Mineralquellen und Thermen der Nordschweiz und angrenzender Gebiete. Resultate der Messstationen mit permanenter Aufzeichnung. – Nagra, Wettingen, interner Bericht NIB (unpubl.).
- Nagra 2008: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager: Geologische Grundlagen (Text- und Beilagenband). – Nagra, Wettingen, Techn. Bericht NTB 08-04.
- Nagra 2021: Konzeptbericht Überwachung Umwelt und geologisches Umfeld. – Nagra, Wettingen [Ed.], Arbeitsbericht vom Juli 2021 NAB 20-28 [Ed.]. Autoren: Fanger, L., Müller, H.R. & Vogt, T., 41 S.
- Neff, Nationaler Energieforschungs-Fonds 1984: Erschliessung geothermischer Vorkommen, Teilprojekt I: Nutzbarmachung der Geothermie im Raume Baden und Umgebung, Projekt Nr. 165 (Schlussbericht). – Forschungsprojekt geothermische Energie und unterirdische Wärmespeicherung, NEFF, Basel, 186 S.
- Notz, R. 1924: Geologische Untersuchungen an der östlichen Lägern. – Diss. Univ. Zürich; Gebr. Leemann & Co. AG.
- Nussberger, G., Cadisch, J., Keller, A., Nussberger, A. & Werder, J. 1937: Die Mineral- und Heilquellen der Schweiz. – Schweiz. Ges. f. Balneol. u. Klimatol.; Zimmermann, Bern, 201 S. & Karte.
- Oppler, D. 2010: Die Thermen Helvetiens am Beispiel der Bäder von AVENTICVM und AQUAE HELVETICAE. – GRIN, Verlag für akademisches Self-Publishing, München.
- Pearson, F. J., Balderer, W., Loosli, H. H., Lehmann, B. E., Matter, A., Peters, T., Schmassmann, H. & Gautschi, A. (Eds.). 1991: Applied isotope hydrogeology: a case study in northern Switzerland. – Elsevier, *Studies in Environmental Science* 43, 460 S.; Nagra, Techn. Bericht NTB 88-01.
- Peter, H. 1922: Expertenbericht von Ing. H. Peter an die Baudirektion des Kantons Aargau über die Thermalquellen von Baden, vom 14. Januar 1922. – Kant. Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Aarau (unpubl.).
- Pfirter, U., Jordan, P., Graf, H. R., Burger, H., Pietsch, J., Huber, M., Kiefer, S., Grezet, S., Maise, C. & Burkhalter, R. 2019: Geologischer Atlas der Schweiz 1: 25'000, Blatt Sissach - Rheinfelden; Erläuterungen 161. – Bundesamt für Landestopogr.- swisstopo, Landesgeologie, Wabern.
- Pfluger, J. A. 1828: Über die Mineralquellen zu Baden in der Schweiz. In: Kastner. K. W. [Ed.]: *Archiv für die gesammte Naturlehre* 14, S. 384. – Joh. Schrag Verl., Nürnberg.
- Pfluger, J. A. 1834: Über die Mineralquellen zu Baden in der Schweiz. In: Kastner. K. W. [Ed.]: *Archiv für die gesammte Naturlehre* 20, S. 332. – Joh. Schrag Verl., Nürnberg.
- Pfyffer, Y. 1929: *Aquae Helveticae I.* – Badener Njbl. 5, S. 3-19; Buchdruckerei Baden AG.
- Pfyffer, Y. 1930: *Aquae Helveticae II.* – Badener Njbl. 6, S. 3-23; Buchdruckerei Baden AG.
- Philippe, Y., Colleta, B., Deville, E., & Mascle, A. 1996: The Jura fold-and-thrust belt: a kinematic model based on map-balancing. In: Ziegler, P. A. & Horvath, F. [Ed]: *Peri-Tethys Memoir 2: Structure and prospects of Alpine basins and forelands*, S. 235-261. – *Mém. du Muséum nat. d'hist. nat.* 170 (1993), Paris.
- Pietsch, J. 2015: Abschätzung möglicher Nachfolgeschäden untiefer Geothermienutzung in Mumpf. Lokalisierung eines permeablen Störungssystems. – *Regio basil.* 56/2, S. 89-97.
- Pietsch, J. S., Wetzel, A. & Jordan, P. 2016: A new lithostratigraphic scheme for the Schinznach Formation (upper part of the Muschelkalk Group of northern Switzerland). – *Swiss J. Geosci.* 109/2, S. 285-307.
- Place, T. J. 1997: Das Badewesen für Minderbemittelte in Baden im Kanton Aargau bis 1815. – Diss. Univ. Zürich, med. Fak.
- Rick, B. 1990: Geotechnische und hydrochemische Folgen der Verwitterung sulfathaltiger Gesteine (Gipskeuper des Schweizer Jura). – Diss. ETH Zürich Nr. 9257.
- Rick, B. 1991: Geotechnische und hydrochemische Folgen der Verwitterung sulfathaltiger Gesteine (Gipskeuper des Schweizer Jura). – *Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Serie* 80, 120 S.; 15 Tab.
- Rick, B. 1996: Ingenieurgeologische Beobachtungen beim Vortrieb des Habsburgtunnels. – *Bull. angew. Geol.* 1/2, S. 99-112.

- Rick, B. 1999: Thermalquellen Baden/Ennetbaden: Erhebungen über chemische Analysen und deren statistische Auswertung (Hydrogeologischer Bericht). – Dr. von Moos AG, Zürich, Bericht Nr. 6436 vom 29. Oktober 1999; Kant. Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Aarau (unpubl.).
- Rick, B. 2006: Von heissen Quellen und Baugruben. In: Einwohnergemeinde Ennetbaden, Gemeinderat [Ed.]: Die Kern- und Bäderumfahrung. Ennetbaden auf der Suche nach seiner Zukunft; S. 9-24. – Verl. «hier und jetzt», Baden/Zürich. Erschienen 2007 im Periodikum UMWELT AARAU 30, S. 23-30, vom selben Autor unter dem gleichen Titel in gekürzter Form.
- Rick, B. 2007: Überwachungskonzept bei Thermalquellen; Qualitätskontrollen während Bauvorhaben in Ennetbaden. – Gas Wasser Abwasser 12/2007, S. 969-977.
- Rick, B. & Henzen, M. 2006: Kern- & Bäderumfahrung Ennetbaden, Überwachung der Thermen Baden / Ennetbaden: Messperiode November 2005 bis Mai 2006 mit Quellschüttungsdaten 1993-2006; zHv. Kant. Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Aarau – Dr. von Moos AG, Zürich, Bericht Nr. 7200-6 vom 6. Juni 2006 (unpubl.).
- Rufer, F. A. 2017: Das Gasthaus «Schief». 190 S. – Gemeinde Ennetbaden [Ed.].
- Rybach, L., Eugster, W. & Griesser, J.-C. 1987: Die geothermischen Verhältnisse in der Nordschweiz. – Eclogae geol. Helv. 80/2, S. 521-534.
- Robins, N. S. & Smedley, P. L. 2013: Groundwater – Medicine by the Glassful? In: Duffin, C.J., Moody, R.T. & Gardner-Thrope, C. [Ed.]: A History of Geology and Medicine, S. 261-267. – Geol. Soc. London, Spec. Publ. 375(1).
- Schaer, A. 2010 a: Mit der Vergangenheit in die Zukunft – 2000 Jahre Bäderkultur in Baden. – Archäologie Schweiz 33/1, S. 24-31.
- Schaer, A. 2010 b: Das Dornröschen. Eine archäologische Bestandsaufnahme im Badener Bäderquartier. In: Ebnöther, C., & Schatzmann, R. [Ed.]: "Oleum non perdidit". Festschrift für Stefanie Martin-Kilcher zu ihrem 65. Geburtstag, S. 45-57. – Antiqua 47 (Archäologie Schweiz), Basel.
- Schaer, A. 2011: Die aktuellen Ausgrabungen im Badener Bäderquartier. – Badener Njbl. 86, S. 169-177.
- Schaer, A. 2013: Neue Betrachtungsmöglichkeiten zur Baugeschichte des Badener Bäderquartiers in Mittelalter und Neuzeit. – Argovia 125, S. 191-210, Verl. «hier und jetzt», Baden/Zürich.
- Schaer, A. 2015: Die Bäder: 2000 Jahre europäische Badekultur. In: Furter, F., Meier, B., Schaer, A. & Wiederkehr, R.: Stadtgeschichte Baden, S. 8-91. – Verl. «hier und jetzt», Baden/Zürich, 344 S.
- Schaer, A. 2021a: Und plötzlich lag es vor uns! Das legendäre Verenabad wiederentdeckt. – Badener Njbl. 96, S. 83-90. – Verl. «hier und jetzt», Baden/Zürich.
- Schaer, A. 2021b: Von medizinischer Notwendigkeit und sozialem Ausbruch. Heilbäder als Reiseziele allein reisender Frauen. – Wege und Ge-
schichte 02/2021, S. 9-13; Via Storia, Stiftung für Verkehrsgeschichte, Bern [Ed.].
- Schaer, A. 2022: Willkommen im Garten Eden. Die Bäder von Baden. – Verl. «hier und jetzt», Baden/Zürich (im Druck), ca. 200 S.
- Schaer, A. 2023 & 2024: Ubi aqua - ibi bene. Die Bäder von Baden im Aargau im Licht der archäologischen Untersuchungen 2009-2018. 2 Bände in Vorbereitung. – Gesellschaft Pro Vindonissa, Brugg.
- Schaer, A., Stapfer, R. B. & Fuchs, R. 2014: Zum Stand der Forschungen in den Badener Bädern. Ein Werkstattbericht. – as. Archäologie Schweiz/Archéologie Suisse/Archeologia Svizzera 37/3, S. 16-25.
- Schärli, U. & Rybach, L. 1991: Geothermische Detailkartierung der zentralen Nordschweiz 1:100'000. – Beitr. Geol. Schweiz, Serie Geophysik 24, 51 S., 3 Tab. und 2 Karten.
- Scheuchzer, J. J. 1732: Vernunftmäßige Untersuchung des Bads zu Baden: Dessen Eigenschafften und Würckungen. 68 S., 1 Taf., 6 Kupferstich-Bilder. – Druck: Marx Rordorf, Zürich.
- Schindler, C. M. 1977: Zur Geologie von Baden und seiner Umgebung. – Beitr. Geol. Schweiz, Kleine Mitt. 67, S. 109-160 und 2 Karten; Kümmerly & Frey, Bern.
- Schindler, C. M. 1978: Zur Geologie von Baden und seiner Umgebung. – Badener Njbl. 53, S.109-160; ohne Karte.
- Schindler, C. M. & Rick, B. 1991: Ennetbaden - Konflikte zwischen Bauvorhaben, Hangwasser und Thermalwasser. – Geotechnik 14/2, S. 59-63.
- Schmassmann, HJ. 1990: Hydrochemical and isotopic investigations on groundwater origin and flow paths in Switzerland. In: Parriaux, A. [Ed.]: Water resources in Mountain regions. – Mem. 22nd Congr. Int. Assoc. Hydrogeologists Vol. XXII/1, S. 230-243.
- Schmassmann, HJ., Balderer, W., Kanz, W. & Pekteter, A. 1984: Beschaffenheit der Tiefengrundwässer in der zentralen Nordschweiz und angrenzenden Gebieten. – Nagra, Wettingen, Techn. Bericht NTB 84-21.
- Schmassmann, HJ., Kullin, M. & Schneemann, K. 1992: Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Buntsandstein-, Perm- und Kristallin-Aquifere. – NAGRA, Wettingen, Techn. Bericht NTB 92-30, 493 S.
- Schuhmacher, E. 1966: Experimente zur Hydrologie der Badener Thermen. – Badener Njbl. 41, S. 48-55.
- Schweitzer, A. 1910: Sur la radioactivité des sources minérales de la Suisse. – Arch. sc. phys. nat. de Genève 30, S. 46-67.
- Senftleben, G. 1923: Beiträge zur geologischen Erkenntnis der West-Lägern und ihrer Umgebung. Mit geologischer Karte 1:10'000. – Diss. Univ. Zürich; Buchdr. A. Peter.
- Senftleben, G. 1924: Erläuterungen zur geologischen Karte der West-Lägern und ihrer Umgebung in 1: 10'000. – Kartogr. Anst. J. Flach, Männedorf; Verkehrsverein Baden [Ed.].

- Signorelli, S. & Kohl, T. 2006: Geothermischer Ressourcenatlas der Nordschweiz, Gebiet des nördlichen Schweizer Mittellandes. – Beitr. Geol. Schweiz, Ser. Geophysik Nr. 39, 94 S.; Schweiz. Geophys. Komm., Zürich [Ed.].
- Signorelli, S., Sonnenfroh, F., Imhasly, S., Rybach, L. & Kohl, T. 2009: Statistik der geothermischen Nutzung in der Schweiz. – Geowatt A.G., Zürich, 45 S.
- Sury, von, J. 1906: Über die Radioaktivität einiger schweizerischer Mineralquellen. – Diss. Univ. Fribourg.
- Sury, von, J. 1907: Über die Radioaktivität einiger schweizerischer Mineralquellen. – Mitt. natf. Ges. Freiburg [Schweiz], CHEMIE 2/4, S. 169-241.
- Thury, M., Gautschi, A., Mazurek, M., Müller, W. H., Naef, H., Pearson, F.J., Vomvoris, S. & Wilson, W. 1994: Geology and hydrogeology of the crystalline basement of Northern Switzerland. Synthesis of regional investigations 1981-1993 within the Nagra radioactive waste disposal programme. – Nagra, Wettingen, techn. Bericht NTB 93-01.
- Tiedt, N. & Jordan, H. 1986: Analyse der vasodilatatorischen Wirkung der CO₂-Bäder-Therapie. – Zeitschrift für Physiotherapie 38/05, S. 329-338.
- Treadwell, F. P. 1896: Chemical analysis of the thermal sulphur Springs of Baden, Ct. Aargau. – Sauerländer, Aarau, 47 S.
- Treadwell, F. P. 1897: Chemische Untersuchung der Schwefeltherme von Baden, Kt. Aargau. Übersetzung von W. Sutherst. – Sauerländer, Aarau, 48 S.
- Verbal [ohne Autor] vom 2. August 1858 über den Zustand und die Beschaffenheit der Heilquellen bei Baden: Bestandsaufnahme der Quellen unter Aufsicht der kant. Baudirektion und des Bezirksamtes Baden. – Staatsarchiv des Kantons Aargau, Entfelderstrasse 22, Aarau.
- Verein Bagni Popolari 2021: Jahresbericht 2020 – Verein Bagni Popolari, Kronengasse 4, 5400 Baden, www.bagnopopolare.ch; 11 S.
- Vuataz, F.D. 1982: Hydrogéologie, géochimie et géothermie des eaux thermales de Suisse et des régions Alpines limitrophes. – Matér. géol. Suisse, Sér. Hydrologie 29; Kümmerly & Frey, Bern.
- Waber, H.N., Heidinger, M., Lorenz, G. & Traber, D. 2014: Hydrochemie und Isotopenhydrogeologie von Tiefengrundwässern in der Nordschweiz und im angrenzenden Süddeutschland. – Nagra, Wettingen, Arb.-Bericht 13-63 (unpubl.).
- Welter Thaler, B. 2011: An der Quelle. Die Thermalbäder von Baden. In: Velhagen, R., Haefeli, Z. & Welter Thaler, B.: Baden, S. 37-49. – Museum Langmatt, Baden/Schweiz.
- Wiederkehr, K. & Sydler, P.-A. 1987: Die Thermalquellen von Baden. Kriterien für die Überwachungsinstallationen und Betriebserfahrungen. – Bull. Ver. Schweiz. Petrol. Geol. und -Ing., Bd. 53, S. 19-20.
- Wiedmer, H R. 1969: Die römischen Heilthermen von Baden - Aquae Helveticae. – Badener Njbl. 44, S. 45-56.
- Wyss, S. 2010: Von römischen Ruinen. – Neujahrsbl. Ennetbaden 2010; Gemeinde Ennetbaden.
- Wyss, S. & Wälchli, D. 2010: Neues aus Aquae Helveticae; Das rechte Limmatufer. – Badener Njbl. 85, S. 138-151.
- Zorn, A. H. & Jaffé, F. C. 1983 : Les variations du débit des sources thermales de Baden (Canton d'Argovie, Suisse). – Eclogae geol. Helv. 76/2, S. 451-463.

Geologische Karten

- Escher [von der Linth], A. [ohne Dat., ca. 1850-1865]: handkolorierte geologische Kartierung im Bereich der Lägernkette in Baden-Ennetbaden-Wettingen-Ehrendingen, auf detaillierter topographischer Schwarz-Weiss-Karte (Höhenlinien, Strassennetz, Vorläufer zum Siegfried-Atlas 1:25'000). – Archiv ETH-Bibl. Zürich, Hs4c:770; <https://doi.org/10.7891/e-manuscripta-4662>.
- Graf, H. R., Bitterli-Dreher, P., Burger, H., Bitterli, T., Diebold, P. & Naef, H. 2006: Geologischer Atlas der Schweiz 1: 25 000, Karte 120, Blatt 1070 Baden. – Bundesamt für Landestopogr. – swisstopo, Landesgeologie, Wabern.
- Isler, A., Pasquier, F. & Huber, M. 1984: Geologische Karte der zentralen Nordschweiz 1:100 000, mit angrenzenden Gebieten von Baden-Württemberg. – Geol. Spezialkarte Nr. 121; Schweiz. Geol. Komm., Bern.
- Mousson, A. 1840: Geologische Karte der Umgebung von Baden (Jura-Kette von Schinznach-Bad bis Regensberg, M. 1:45'000. – Tafel 5 in Mousson, A. 1840.
- Mühlberg, F. 1901: Geologische Karte der Lägernkette 1: 25'000. – Geol. Spezialkarte Nr. 25; Schweiz. Geol. Komm., Bern.
- Schindler, C. M. 1977: Baugrunderkarte von Baden, 1:10'000, 2 Bl. – Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Serie, Kl. Mitt. 67.
- Senftleben, G. 1923: Geologische Karte der West-Lägern 1:10'000. – Beilage zur Diss. Univ. Zürich; sowie Verkehrsverein Baden [Ed.], kartogr. Anst. J. Flach, Männedorf.

Historische Pläne Bäderquartier

- Leemann, F. 1844/1845: Plan von den Thermalquellen, Wasserleitungen und Bädern zu Baden im Aargau; 1:500. – Original verschollen, Kopie 1920 erstellt durch das Techn. Bureau E. Schärer-Keller (Geometer). – vgl. nachfolgend.
- Schärer-Keller, E. 1919/1920: Plan von den Thermalquellen, Wasserleitungen und Bädern zu Baden im Aargau; 1:500. – Planarchiv der Stadt Baden Nr. P.92.2.1, Digital object CH-000249-X: 332. Abgebildet in Schaer 2013.
- Schulthess, L. 1816/1817: Grundriss sämtlicher Quellen, Leitungen, Bäder und Gasthöfe zu Baden [Bäderquartier Baden und Ennetbaden].

– ausgeführt auch als Kupferstich von F. Hegi, in: Hess, D.: Die Badenfahrt (1818, Planbeilage). Heute ist das Original von Schulthess nicht mehr greifbar, sondern nur noch der Kupferstich von Hegi.

Witzig, R.: Quellenpläne 20. Jh. (Stadtarchiv Baden, unpubl.)

Rechtserlasse zum Thermalwasserschutz

A) Kanton Aargau

Verfassung des Kantons Aargau vom 25. Juni 1980 (Stand am 1. Januar 2022): § 43 (Heilquellen): Kanton und Gemeinden schützen die Heilquellen und Heilbäder sowie deren Ruhe- und Erholungslandschaft. – Samml. Aarg. Recht (SAR) 110.000; Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 131.227.

Grosser Rat des Kantons Aargau, 1869: Dekret über die Sicherung der öffentlichen Heilquellen und das Graben nach solchen in Baden und Ennetbaden, vom 12. Januar 1869, Fassung vom 1. Januar 2013: § 1 Das Suchen, Graben und Bohren nach Heilwasser auf demjenigen Quellengebiet von Baden und Ennetbaden, welches in den Jahren 1844 bis 1846 geometrisch aufgenommen und festgestellt worden ist, ist untersagt. – Aarg. Gesetzessamml., 1. Bd.: 1803-1911, S. 258-261, Nr. 42. Samml. Aarg. Recht (SAR) 671.830.

Grosser Rat des Kantons Aargau, 2007: Einführungsgesetz zur Bundesgesetzgebung über den Schutz von Umwelt und Gewässern (EG Umweltrecht, EG UWR) vom 04. September 2007, Fassung vom 30. Dezember 2019: § 13 Grundwasserschutzareale werden nach den Vorschriften der Bau- und Raumplanungsgesetzgebung über kantonale Nutzungspläne festgelegt. – Samml. Aarg. Recht (SAR) 781.200

Grosser Rat des Kantons Aargau, 2016: Kantonaler Nutzungsplan für den Schutz der Thermalquellen in Baden und Ennetbaden (Gemeinden Baden, Ennetbaden und Obersiggenthal) vom 25. Oktober 2016, Stand 27. Februar 2017. Für das ganze Bäderquartier gilt unter anderem: § 5 Bohrungen müssen bei Erreichen der geologisch identifizierten Felsschicht abgebrochen werden und dürfen in jedem Fall nicht tiefer gehen als bis 1 m unter die Felsoberkante. – Samml. Aarg. Recht (SAR) 713.160; nur Karte: Thermenschutzbereiche bei den Thermalquellen (Onlinekarten des Kantons Aargau, via AGIS).

Regierungsrat des Kantons Aargau, 1844: Erlass zur Anordnung von periodischen, amtlich beaufsichtigten Messungen der Ergiebigkeit der Thermalquellen in Baden und Ennetbaden: – Staatsarchiv Kt. Aargau, Aarau.

Rothpletz, F. K. [Kantonsbaumeister]: Verbal vom 8.8.1858 über die technischen Anlagen (Fassungen), Stauhöhen und Fassungstiefen der Thermalquellen in Baden und Ennetbaden. – Staatsarchiv Kt. Aargau, Aarau.

Obsolet: Grosser Rat des Kantons Aargau: Dekret von 1844 «betreffend das Suchen, Graben usw. nach Heilwasser in den grossen Bädern zu Baden und Ennetbaden». Abgelöst durch das Dekret gemäss Samml. Aarg. Recht (SAR) 671.830.

B) Gemeinden

Gemeinden Baden und Ennetbaden 2011: Entwicklungsrichtplan Bäderquartier, Gesamtrevision 2011. – www.baden.ch/de/stadtbehoerde/stadtentwicklung/richtplaene/entwicklungsrichtplan-baederquartier.html/951

C) Bund

Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (SR 814.20, abgekürzt; GSchG) vom 24. Januar 1991, Stand am 1. Januar 2020: Art. 1: Dieses Gesetz bezweckt, die Gewässer vor nachteiligen Einwirkungen zu schützen. Art. 2: Dieses Gesetz gilt für alle ober- und unterirdischen Gewässer. – Systematische Sammlung des Bundesrechts. Gewässerschutzverordnung (SR 814.201, abgekürzt; GSchV) vom 28. Oktober 1998 (Stand am 1. Januar 2021): Art. 1: Diese Verordnung soll ober- und unterirdische Gewässer vor nachteiligen Einwirkungen schützen und deren nachhaltige Nutzung ermöglichen. – Systematische Sammlung des Bundesrechts.

Bildnachweise

Fotos Fig. 3, 4, 6, 7 & 8: H. Burger, Ennetbaden

Foto Fig. 5: Jäckli Geologie AG, Baden