

## Aufstiege von tiefem Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) durch die Opalinuston-Formation in Baden-Württemberg

Von RUPERT PRESTEL, Stuttgart, und WILHELM SCHLOZ, Esslingen

Mit 4 Tabellen und 7 Abbildungen

### ZUSAMMENFASSUNG

Die Tonsteine in der Opalinuston-Formation des Braunen Juras sind in tiefer Lage, unterhalb der Auflockerungs- und Verwitterungszone, nach umfangreichen Untersuchungen sehr gering durchlässig bis nahezu undurchlässig und verbreitet über 100 m mächtig. Darauf beruht die Diskussion einer potenziellen Eignung des Opalinustons als Wirtgestein für eine Endlagerung radioaktiver Abfälle.

In Baden-Württemberg bestehen drei, seit Jahrhunderten bekannte und als Säuerlinge genutzte Austritte von Kohlendioxid in stratigrafischer Position oberhalb des Opalinustons: Im Bereich tektonischer Strukturen im oberen Filstal bei Bad Ditzgenbach und bei Bad Überkingen sowie im Bereich eines miozänen Vulkanschlotes in Kleinengstingen auf der Albhochfläche. Nach isotoyphenphysikalischem Befund ist das CO<sub>2</sub> tiefer, magmatischer Herkunft. Aufgrund der niedrigen Druckhöhen des Grundwassers in den Aquiferen unter dem Opalinuston ist ein Gastransport mit aufsteigendem Grundwasser auszuschließen. Ein CO<sub>2</sub>-Aufstieg durch oder entlang einer Vulkanröhre (Kleinengstingen) ist generell erklärbar, bemerkenswert ist aber seine Einmaligkeit in Baden-Württemberg. An den beiden Standorten im Filstal sind tektonische Dehnungsstrukturen nachgewiesen, der Verlauf und die Ausbildung der Störungen jedoch nicht hinreichend geklärt. Der vertikale Versatzbetrag bleibt hier unter 20% der Mächtigkeit der einheitlichen Tonsteinserie. Eine gasdichte „Verheilung“ durch Quellen oder Plastifizierung an den Störungsflächen hat offensichtlich nicht stattgefunden. Die Ausbildung der gasdurchlässigen Strukturen im Tonstein ist bisher nicht bekannt. Entsprechendes gilt für deren sichere Identifizierung im Untergrund.

**Schlüsselwörter:** Opalinuston-Formation, hydrogeologische Stockwerksgliederung, CO<sub>2</sub>-Aufstieg, CO<sub>2</sub>-Herkunft, Endlager-Standortsuche

### ABSTRACT

The claystone sequence of the Opalinuston-Formation of Brown Jurassic in Southwest Germany has in a wide area a thickness of more than 100 m. In deep position, below the zone of weathering, this claystone sequence is apparently only low permeable to impermeable, as extensive investigations show. Therefore the possible suitability of the Opalinuston claystone sequence as a permanent repository for nuclear waste is in discussion.

In Baden-Württemberg there exist well known for hundreds of years three naturally carbonated springs, situated in higher stratigraphic positions above the Opalinuston: in Bad Überkingen and Bad Ditzgenbach in the Fils valley in connection with tectonic structures and in Kleinengstingen in the region of a miocene volcanic pipe on the high plateau of the Swabian Alb. Isotopic results show, that

CO<sub>2</sub> of these carbonated waters is of deep magmatic origin. The water pressures of the groundwaters in the aquifers in deeper positions as the Opalinuston are considerably below ground level. An artesian ascent of these deep groundwaters together with CO<sub>2</sub> gas is therefore not possible. A CO<sub>2</sub> ascent through or along a volcanic pipe (Kleinengstingen) is principally explainable, the uniqueness in Baden-Württemberg is however remarkable. On both locations in the Fils valley tectonic extension structures are proven, the direction and the form of the faults are not yet sufficiently cleared. The displacement of the fault is less than 20% of the thickness of the uniform claystone sequence of the Opalinuston. A gas-proof sealing as a result of swelling or plasticization along the fault planes has obviously not happened. The form of the gas-permeable structures in the regarded claystone and their verified identification in the subsurface are until now not known.

**Key words:** Opalinuston formation, structure of groundwater storey, CO<sub>2</sub>-ascent, CO<sub>2</sub>-origin, location search for permanent repository

## 1. EINFÜHRUNG

In Baden-Württemberg treten verbreitet CO<sub>2</sub>-führende Grund- und Mineralwässer (ab 1000 mg/l CO<sub>2</sub>: Sauerlinge, auch als Sauerwasser bezeichnet), vereinzelt auch Mofetten, gasförmige CO<sub>2</sub>-Austritte, auf. Dazu liegen zahlreiche verstreute Hinweise, Daten und Veröffentlichungen vor, eine systematische und umfassende Bearbeitung dieser CO<sub>2</sub>-Vorkommen ist bisher jedoch nicht erschienen. Zahlreiche Einzelbefunde finden sich in CARLÉ 1975 (lediglich in Tabellenform z. T. auch in SCHLOZ & STÖBER 2006).

Abgesehen von der chemischen Gesteinslösung wird CO<sub>2</sub> im Untergrund bekanntlich gasförmig oder, druck- und temperaturabhängig, im Grundwasser gelöst transportiert.

Die bekannten CO<sub>2</sub>-Vorkommen in Baden-Württemberg verteilen sich auf sehr unterschiedliche geologische und hydrogeologische Verhältnisse, stratigraphische Einheiten und Teufen. Bezüglich des CO<sub>2</sub>-Transportes können in Baden-Württemberg insbesondere folgende Situationen (ohne scharfe Abgrenzung) unterschieden werden:

- Aufstiegsgebiete mit unterschiedlich tiefer Einspeisung von CO<sub>2</sub> in mineralisierte bis hochkonzentrierte tiefe Grundwässer; je nach geologischem Bau des überlagernden Gebirges z. T. mit örtlichen Aufstiegen bis in Quellen und Mofetten an der Geländeoberfläche (z. B. Vorkommen im Kristallinen Grundgebirge des Schwarzwaldes oder im Buntsandstein und Muschelkalk des Neckar-Eyach-Gebiets).
- CO<sub>2</sub>-Einspeisung in tiefliegende, großflächig dicht überdeckte, eventuell thermale Mineralwasser-Aquifere, mit anschließend lateralem Transport über erhebliche Strecken zu Quellen oder sonstigen Grundwasser-Austritten oder -Übertritten (z. B. Oberer Muschelkalk im Bereich mittlere Schwäbische Alb und Albvorland bis Stuttgart-Bad Cannstatt unter Keuper als Deckschicht, oder

Schwarzer Jura, Angulatensandstein, juAS, unter Obtususton, juOT, als Deck-schicht im Bereich Göppingen und Filstal).

- Gasförmige CO<sub>2</sub>-Aufstiege in oberflächennahe, örtlich begrenzte, z.T. hydraulisch schwebende Grundwasservorkommen, z.T. mit Quellaustritten (z.B. mittlerer Brauner Jura in Bad Ditzgenbach und Bad Überkingen oder miozäne Basalt-tuffröhre im Weißen Jura der Schwäbischen Alb bei Kleinengstingen).

Bekannt ist ferner, dass bis in Tiefen von tausend und möglicherweise bis mehreren tausend Metern, d.h. bis in das Kristalline Grundgebirge hinein, deutliche Unterschiede im regionalen Auftreten von CO<sub>2</sub> bestehen (CARLÉ 1975). Dabei ist zu erkennen, dass die Bereiche hoher CO<sub>2</sub>-Führung in Baden-Württemberg – außer bei nachweislich erheblichem lateralem Transport in tiefen Aquiferen – sich alle am Rand oder innerhalb der tektonisch angelegten Beckenstrukturen des Permokarbons befinden. In diesen bestehen allerdings auch tief reichende thermale Zirkulationssysteme ohne bedeutsamen CO<sub>2</sub>-Austrag, wie jene im Granit unter Bad Wildbad oder Baden-Baden.

Die gelegentlich diskutierte, häufiger aber unkritisch postulierte Deutung der CO<sub>2</sub>-Austritte im Bereich der mittleren Schwäbischen Alb als postvulkanisches Ereignis wird im Rahmen dieser Darstellung nicht weiter vertieft. Alleine in Baden-Württemberg kann für eine Reihe bedeutsamer Vorkommen aber kein Zusammenhang mit vulkanischen Ereignissen hergestellt werden. Die auffallend ähnliche Verteilung des miozänen Vulkanismus und der bisher bekannten CO<sub>2</sub>-Verteilung im Oberen Muschelkalk im Bereich der mittleren Alb könnte auch auf lediglich einer gemeinsamen Nutzung tief reichender alter Strukturen im Kristallinen Grundgebirge durch ursächlich eigenständige Vorgänge – miozäner Vulkanismus und neogener/aktueller CO<sub>2</sub>-Aufstieg – beruhen.

Für sowohl topografisch als auch in Bezug auf die Schichtenfolge des Deckgebirges hoch gelegene, oberflächennahe CO<sub>2</sub>-Austritte und -Vorkommen sind insbesondere die Fließwege, deren Struktur und weitere Transportbedingungen von Interesse. Dies gilt insbesondere dann, wenn nennenswerte CO<sub>2</sub>-Volumenströme bei ihrem Aufstieg unausgelaugtes Salinargestein und sehr bis extrem gering wasserdurchlässige, mächtige Tonsteinserien durchqueren.

Das (alleinige) Ziel der nachfolgenden Darstellung ist es, eingehend auf die in Baden-Württemberg bekannten Aufstiege von tiefem CO<sub>2</sub> durch die über 100 m mächtige Tonsteinserie der Opalinuston-Formation hinzuweisen. Derartige Verhältnisse bestehen einmal im engeren Bereich einer Durchbruchröhre des miozänen Vulkanismus der mittleren Schwäbischen Alb (Kleinengstingen) und zweimal im weiteren Bereich – bisher allerdings erst unzureichend bekannter – tektonischer Strukturen (Bad Ditzgenbach und Bad Überkingen im oberen Filstal; zur Lage dieser Standorte s. Abb. 7).

Die Diskussion erfolgt vor dem Hintergrund einer generellen Untersuchungswürdigkeit der tief liegenden Opalinuston-Formation in Bereichen Baden-Württembergs als Wirtgestein für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (BGR/НотН et al. 2007).

## 2. HINWEISE ZUR GEOLOGIE UND HYDROGEOLOGIE DES OPALINUSTONS

Die Opalinuston-Formation des Braunen Juras, a<sub>11</sub>, erreicht in Baden-Württemberg bis etwa 150 m Mächtigkeit. Davon enthält der obere Teil sandige Lagen und Sandsteinbänke. Die unteren 70 bis 80% bestehen aus sehr einheitlichen schluffigen Tonsteinen mit unregelmäßigem Auftreten sogenannter Toneisenstein-Konkretionen.

An Probenserien von 4 Opalinuston-Profilen aus Baden-Württemberg hat KOB-  
LER (1972) für die „feinkörnigen Tonsteine“ Gehalte an Kalk von 4 bis 8% und an organisch gebundenem Kohlenstoff C<sub>org</sub> von 0,7 bis 1,7% bestimmt. Die in jüngster Zeit bei Bohrungen im unteren Opalinuston festgestellten Austritte von Methan werden, vorbehaltlich weiterer Befunde, eher den Ölschiefen im liegenden Schwarzen Jura zugeordnet. Mineralogisch detaillierte Werte für den Opalinuston der Nordschweiz nennt GAUTSCHI (2001).

Aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung, der daraus resultierenden sehr geringen Durchlässigkeit und ihrer Mächtigkeit weist die reine Tonsteinserie des Opalinustons eine hohe Barrierewirkung auf. Diese hat im Verbreitungsgebiet weitgehende Auswirkungen auf die hydrogeologischen Verhältnisse und wird häufig bei geotechnischen Problemlösungen genutzt. Für Baden-Württemberg wurde dazu das „Forschungsprojekt Gebirgseigenschaften mächtiger Tonsteinserien“ (HEKEL 1994) durchgeführt. Entscheidende Ergebnisse sind eine Reichweite der Verwitterungs- und Auflockerungszone bis zu 30 m unter Gelände und darunter abnehmende, geringe Durchlässigkeiten des Opalinustons von  $k_f = 10^{-11}$  bis  $10^{-8}$  m/s. In einem Versuchsfeld wurden durchlässige, aber nur schwach durchströmte tektonische Klüfte bis in 50 m Tiefe angetroffen.

Sehr aufwändige und umfangreiche Untersuchungen wurden durch die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA 2002) in Tiefbohrungen, in Tunnelvortrieben und in einem untertägigen Forschungslabor in der Nordschweiz durchgeführt. Dabei wurden sehr geringe bis extrem niedrige Durchlässigkeiten und in mehreren Tiefbohrungen im Opalinuston weitestgehend immobiles, lediglich durch diffusive Transportvorgänge verändertes, partiell primäres Porenwasser festgestellt. Die Fragen eines Gastransports durch den Opalinuston wurden auch im Bereich tektonischer Störungen mit Ruschelzonen im Forschungslabor Mont Terri untersucht und in NAGRA 2002:336–356 eingehend diskutiert. Die Ergebnisse belegen im Untersuchungsmaßstab eine Gasdichtigkeit sowohl des Gesteins als auch darin tektonisch beanspruchter Strukturen. Die Möglichkeit oder Existenz von aufsteigenden CO<sub>2</sub>-Gasflüssen durch den Opalinuston wird nicht angesprochen.

## 3. DIE CO<sub>2</sub>-VORKOMMEN VON BAD DITZENBACH UND BAD ÜBERKINGEN

### 3.1 Vorbemerkung

In Bad Ditzenbach und Bad Überkingen im oberen Filstal bestehen nachweislich seit Jahrhunderten bekannte, jedoch wahrscheinlich seit Jahrtausenden genutzte Quellen CO<sub>2</sub>-reicher Mineralwässer, die inzwischen wiederholt neu gefasst oder

durch Schacht- und Bohrbrunnen weitergehend erschlossen wurden. Ihre Geschichte wurde vielfach publiziert. Geologisch befinden sich die etwa 7 km voneinander entfernten Quellen in Schichten des mittleren Braunen Juras, über dem Opalinuston. Zur Erweiterung des Angebots in den dort entstandenen Kur- und Mineralwasserbetrieben wurden im vorigen Jahrhundert umfangreiche, bis in etwa tausend Meter Tiefe reichende Erschließungen durchgeführt.

Im Folgenden werden, entsprechend der regionalen Fachliteratur, die traditionellen örtlichen, bereits stockwerksbezogenen Eigennamen der Fassungen und Tiefbrunnen weiter verwandt. Ihre hydrogeologische Zuordnung ist aus Abb. 2 bis 5 ersichtlich.

### 3.2 Schichtenfolge und Ausbildung des Opalinustons

Die Mächtigkeit der Opalinuston-Formation, al<sub>1</sub>, von der Basis des Unteren Donzdorfer Sandsteins in der Eisensandstein-Formation, al<sub>2E</sub>, bis zur Obergrenze der Jurensismergel, ju<sub>J</sub>, wurde in den Bohrungen bei Bad Ditzenbach relativ einheitlich mit 144 bis 150 m (im Mittel aus 5 Profilen 147 m) angetroffen. Auch in der letzten, 1999/2000, durchgeführten Bohrung für die Canisiusquelle II (LGRB-Nr. BO 7424/140) beträgt die Gesamtmächtigkeit 147 m, die etwa in 23 m Zillhausen-Subformation (teilweise sandige Ton- bis Tonmergelsteine mit Sandsteinlagen, Zopfplatten und Wasserfallschichten) und in 124 m Teufelsloch-Subformation (einheitlich schluffige Tonsteine) gemäß dem Vorschlag von FRANZ & NITSCH 2009 gegliedert werden kann. Im Gamma-Ray-Log für diese Bohrung fällt auf, dass die Impulsrate bei 35 bis 39 m unter der Grenze al<sub>2E</sub>/al<sub>1</sub> deutlich zunimmt und darunter relativ schwach variierend bis zur Grenze al<sub>1</sub>/tc<sub>2</sub> über 108 m auf hohem Niveau bleibt. Dieser Abschnitt kann folglich als einheitliche, dominant tonige Lithofazies des Opalinustons (innerhalb der Opalinuston-Formation) charakterisiert werden.

Dagegen zeigen die Bohrprofile von Bad Überkingen (CARLÉ 1971, 1972, 1982) auch nach stratigraphischer Anpassung und rechnerischer Berichtigung für die Mächtigkeit der Opalinuston-Formation eine deutlich höhere Variabilität von 141 bis 163 m (durchschnittlich 152,8 m aus 6 Profilen), die möglicherweise auf uneinheitliche Grenzziehung, Unsicherheiten bei der Entnahme und Ansprache der Bohrproben sowie möglicherweise auch auf tektonische Reduktion zurückgeführt werden kann.

Die Obergrenze der Opalinuston-Formation befindet sich in Bad Ditzenbach 58 bis 70 m unter Gelände bzw. auf 437 bis 446 m NN. Im Ortsbereich Bad Überkingen liegt diese Grenze im Umfeld der „Urquelle“ Helfensteinquelle 1, etwa 50 m unter Gelände bzw. auf 390 m NN.

Die bisher erreichte größte Bohrtiefe beträgt in Bad Ditzenbach 645 m in der Canisiusquelle II, Mittlerer Muschelkalk, und in Bad Überkingen in der Bohrung 71, Joseftherme, 1004 m, Rotliegend (CARLÉ 1982). Die Profile an den beiden Standorten sind – für Bad Ditzenbach nach der Bohrung Canisiusquelle II, für Bad Überkingen als kombiniertes Standardprofil – aus Abb. 2 bis 5 ersichtlich.

### 3.3 Tektonische Verhältnisse und Vulkanismus

Die Filstalmulde verläuft als Dehnungs- und Bruchstruktur mit etwa N 60 ° O, d. h. in generell schwäbischer Richtung im Bereich der Schwäbischen Alb, etwa parallel zum Verlauf des Albtraufs. Sie steht im WSW mit der stärker ausgeprägten Uracher Mulde und im ONO mit Strukturen im Eybtal östlich Geislingen a. d. Steige in Verbindung. Die Position und Streichrichtung über der oberkarbonisch-permischen Schrammberg-Urach-Ries-Senke (GEYER & GWINNER 1985) bzw. dem Schrammberg-Becken (RUPF & NITSCH 2008) mit mächtigem Rotliegend, erlaubt den Rückschluss auf eine Anlage der Filstalmulde durch tektonische Strukturelemente im Kristallinen Sockel.

Trotz der umfangreichen Einzelbefunde aus geologischen Kartierungen, der detaillierten tektonischen Bergwerks-Aufnahme des benachbarten Eisenerzabbaus von Geislingen a. d. Steige (CARLÉ & GROSCOPF 1967) und sehr zahlreicher Bohraufschlüsse, liegt eine neue tektonische Strukturanalyse für dieses Gebiet nicht vor. Einen guten Überblick vermitteln die Darstellungen in CARLÉ (1982). Daraus wurde die Übersichtsskizze, unter Verwendung von Luftbild- und Satellitenbild-Auswertungen durch BAYER hier als Abb. 1 übernommen.

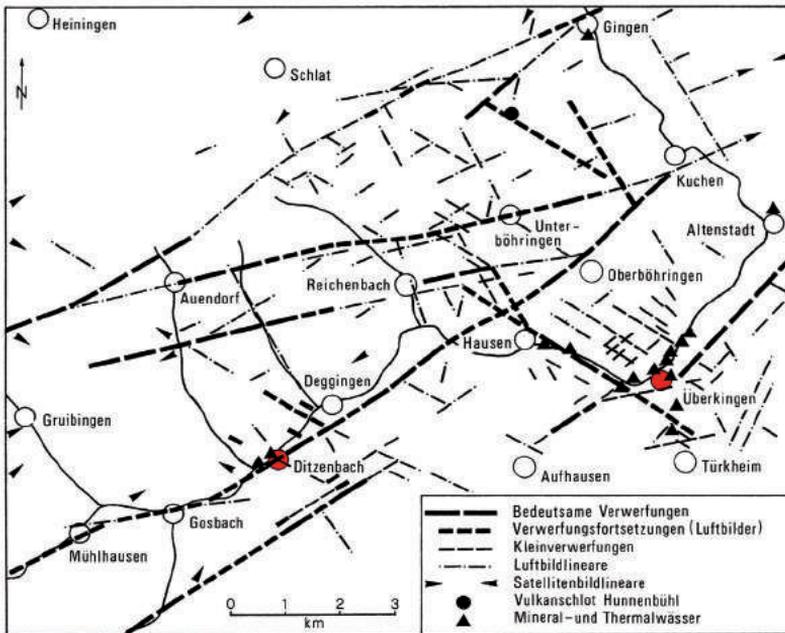


Abb. 1. Tektonische Übersichtsskizze für das obere Filstal mit Bad Ditzgenbach und Bad Überkingen. Dargestellt sind bekannte Verwerfungen, Luftbild- und Satellitenbild-Lineare (aus CARLÉ 1982: Abb. 11, bearbeitet von BAYER & CARLÉ).

Für das Filstal von Wiesensteig bis Bad Überkingen-Hausen, wird seit VEIT (1936) in allen regionaltektonischen Arbeiten eine Filstal-Störung dargestellt (SCHALL 1964 und weitere Autoren). Sie ergibt sich insbesondere aus der Kartierung der Grenze Brauner Jura/Weißer Jura und den darüber folgenden stratigrafischen Einheiten beiderseits des Tales als antithetische Abschiebung mit bis zu 25 m vertikalem Versatz. Inzwischen wurde die Störung in Bohrungen im oberen Filstal mit etwa 10 m und mit etwa 20 m Vertikalversatz sowie einem Einfallen von 60 ° N nachgewiesen. Dagegen ist im engeren Bereich von Bad Ditzenbach bisher aber weder ein direkter Nachweis noch eine sichere Lokalisierung der Störung aus Aufschlüssen oder Bohrungen gelungen. VEIT (1936) vermutet ihren Ausstrich am unteren nördlichen Talhang unter Bergsturzmassen und damit im Bereich der Vinzenz- und der Ludowikaquelle. CARLÉ (1982) hat sie insbesondere aus dem totalen Spülungsverlust und einem vermuteten hohen Schichtversatz in der Tiefbohrung Canisiusquelle I in 548 m Tiefe an der Grenze Keuper/Muschelkalk angenommen und mit 60 ° Neigung bis unter das Quartär des südlichen Talrandes projiziert. Eine erneute Profilgliederung mit Hilfe aller regional verfügbarer Bohrdaten und Gamma-Ray-Logs hat jedoch an der genannten Grenze keine bedeutsame Schichtlücke (allenfalls <10 m) und in einer Gesamtschau für die tiefen Bad Ditzenbacher Mineralwasserbohrungen eine nahezu ebene Schichtlagerung ergeben. Zu möglichen Horizontal-Verschiebungen liegen keine Erkenntnisse vor.

Auch in den vom Büro GeoExpert ag (Schwerzenbach, Schweiz) 1997 aufgenommenen reflexionsseismischen Querprofilen durch das Filstal bei Bad Ditzenbach waren keine bedeutsamen Vertikalstrukturen, jedoch, insbesondere für die sicher zu bestimmende Grenze Keuper/Muschelkalk, ebenfalls eine nahezu ebene Schichtlagerung erkennbar. In diesen Befund fügt sich auch das Profil der 3. Ditzenbacher Tiefbohrung bis in den Muschelkalk, der 1999/2000 abgeteufte Canisiusquelle II, 0,6 km SW der Canisiusquelle I, mit 6 bis 8 m höherer Schichtlagerung bei gleichen Schichtmächtigkeiten, ohne Störung ein.

Die tektonischen Verhältnisse im Bereich Bad Überkingen sind aufgrund der genannten Bergwerkskartierung und der sehr zahlreichen Bohraufschlüsse besser bekannt, infolge einer Vergitterung NW-SO (herzynisch) und WSW-ONO (schwäbisch) streichender Elemente aber wesentlich komplexer. Darauf bezieht sich die Bezeichnung „Überkinger Bruchfeld“ (CARLÉ 1982). Soweit in diesem Bruchfeld tektonische Störungen direkt erfasst oder sicher konstruiert werden konnten, ergeben sich vertikale Versatzbeträge von höchstens 20 m, gelegentlich auch hier mit etwa 60 ° N geneigten Störungsflächen.

Aus einigen Tiefbohrungen wurden von CARLÉ (1972, 1982) Störungen mit deutlich höheren Versatzbeträgen bzw. Schichtlücken beschrieben, die nach neuer Bearbeitung, auch unter Verwendung von Gamma-Ray-Logs, allerdings ausnahmslos zu revidieren sind:

– In B 35, Ottotherme 1, wurde im Bereich km<sub>1</sub>/mo eine Verwerfung mit 33 m Sprungbetrag angenommen, es fehlen jedoch etwa 8 m ku und maximal 13 m mo (max. 21 m Vertikalversatz).

– Für B 52, Ottotherme 2, kann aus den Angaben 25 m km<sub>1</sub> und 40 m mo auf eine Schichtlücke >50 m geschlossen werden, es fehlen jedoch wenige Meter ku und bis zu 6 m mo.

– In B 71, Joseftherme, wurden in Bohrkernen im obersten km<sub>1</sub> in 444 und 447 m Teufe Verwerfungen erkannt („Tonsteinbrekzie, bunt zusammengesetzt, Anteile ineinander verwürgt“). Nach der Gesamtmächtigkeit des Keupers von 219 m muss allerdings auf ein Schichtdefizit von <10 m geschlossen werden.

Die Bohrergebnisse aus der eingehenden Erkundung des Renata-Mineralwassers im Stubensandstein-Stockwerk (km<sub>4</sub>) in rund 300 bis 400 m Tiefe ergaben eine tektonische Gliederung des Aquifers mit vertikalen Versatzbeträgen von unter 20 m. Bei mehreren Pumpversuchen waren markante geohydraulische Auswirkungen der Schollengrenzen zu erkennen, teilweise in Verbindung mit anhaltenden hydrochemischen Differenzen.

Der Filstal-Abschnitt Bad Ditzenbach – Bad Überkingen befindet sich generell am Ostrand des miozänen Uracher Vulkangebiets mit über 350 Basalttuff-Röhren und geomagnetischen Anomalien (MÄUSSNEST 1974, 1978). Für die beiden Standorte und ihre Umgebung sind jedoch keine Hinweise auf Eruptionspunkte oder subvulkanische Strukturen bekannt. Das am nächsten gelegene, kleine vulkanische Vorkommen am Burren bei Gingen a. d. Fils (MÄUSSNEST 1974, Nr. 7324.01, Maierhalde) befindet sich 5 km NNW Bad Überkingen bzw. 7 km NO Bad Ditzenbach. Weitere und größere Schlotte sind erst in über 10 km Entfernung bekannt (Abb. 7).

### 3.4 Hydrogeologische Stockwerksgliederung

Aufgrund der systematisch angelegten Erkundungs- und Aufschlussarbeiten durch CARLÉ (1971, 1972, 1982) und CARLÉ & GROSCHOFF (1972) gilt das hydrogeologische Profil vom mittleren Braunen Jura bis in den Buntsandstein unter Bad Ditzenbach und Bad Überkingen im Filstal heute geradezu als Musterbeispiel der Stockwerksgliederung. In den Abb. 2 bis 5 sind die Ergebnisse der genannten Arbeiten, wesentlich ergänzt durch weitere Befunde aus späteren Erschließungen, Untersuchungen, Analysen und Auswertungen, für beide Standorte zusammenfassend dargestellt. Auf Folgendes ist besonders hinzuweisen:

- Die Profile zeigen einen markanten Wechsel von Grundwassergeringleitern (oder -nichtleitern) und Grundwasser führenden Einheiten (Aquiferen). Die Grundwasser leitenden Schichten im Braunen Jura über dem Opalinuston (im al2E und bj1) sind geohydraulisch allerdings nur unvollständig getrennt.
- Die Grundwasserdruckhöhen nehmen in den Stockwerken mit zunehmender Tiefe, in Bad Ditzenbach bis in den Muschelkalk, in Bad Überkingen bis in den Buntsandstein, ab. Die hypopiezometrischen Druckverhältnisse (nach JÄCKLI 1970) sind generell mit der Position der Vorflut für das jeweilige Stockwerk zu erklären (oberes, mittleres und unterstes Filstal, mittlerer Neckarraum).
- Die höchste Druckdifferenz von über 100 m befindet sich jeweils zwischen den Aquiferen über und unter dem Opalinuston. Die Druckhöhe der tieferen Stockwerke verläuft im Niveau des unteren bis untersten Opalinustons.

# Bad Ditzenbach

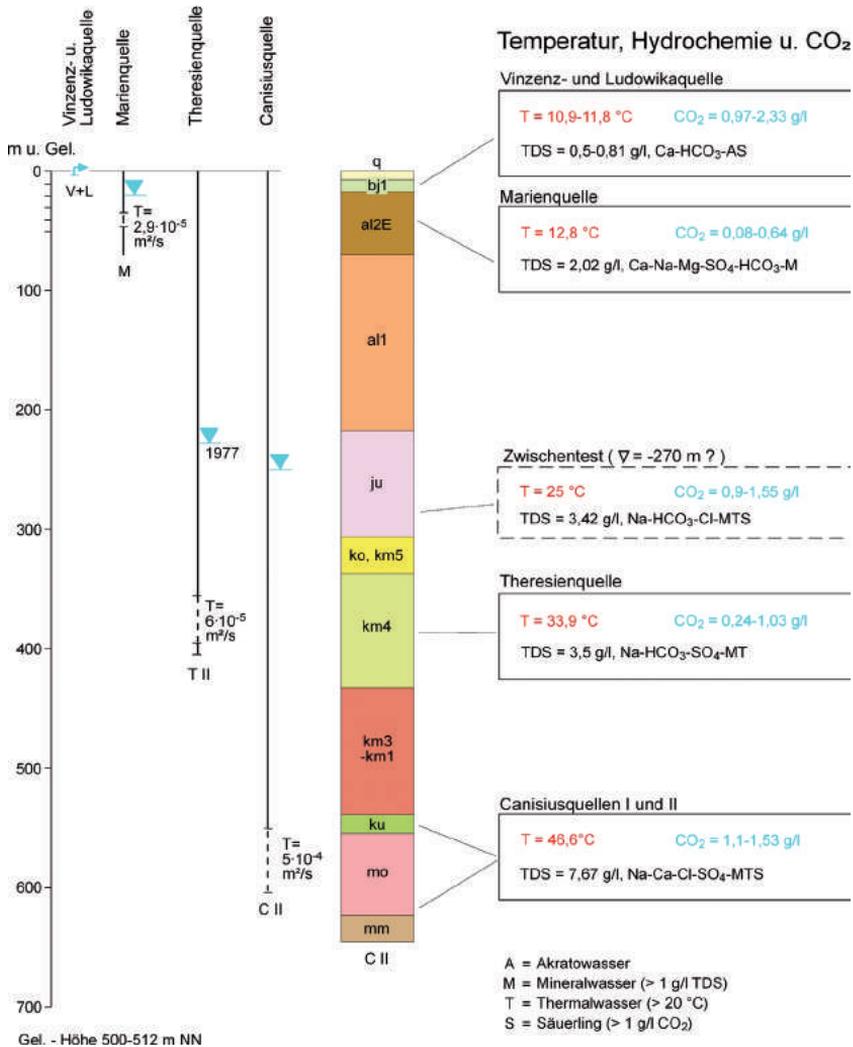


Abb. 2. Geologisches Säulenprofil für den Standort Bad Ditzenbach, mit hydrogeologischer Stockwerksgliederung, Temperatur, Hydrochemie und CO<sub>2</sub>-Führung in den Stockwerken.

# Bad Ditzenbach

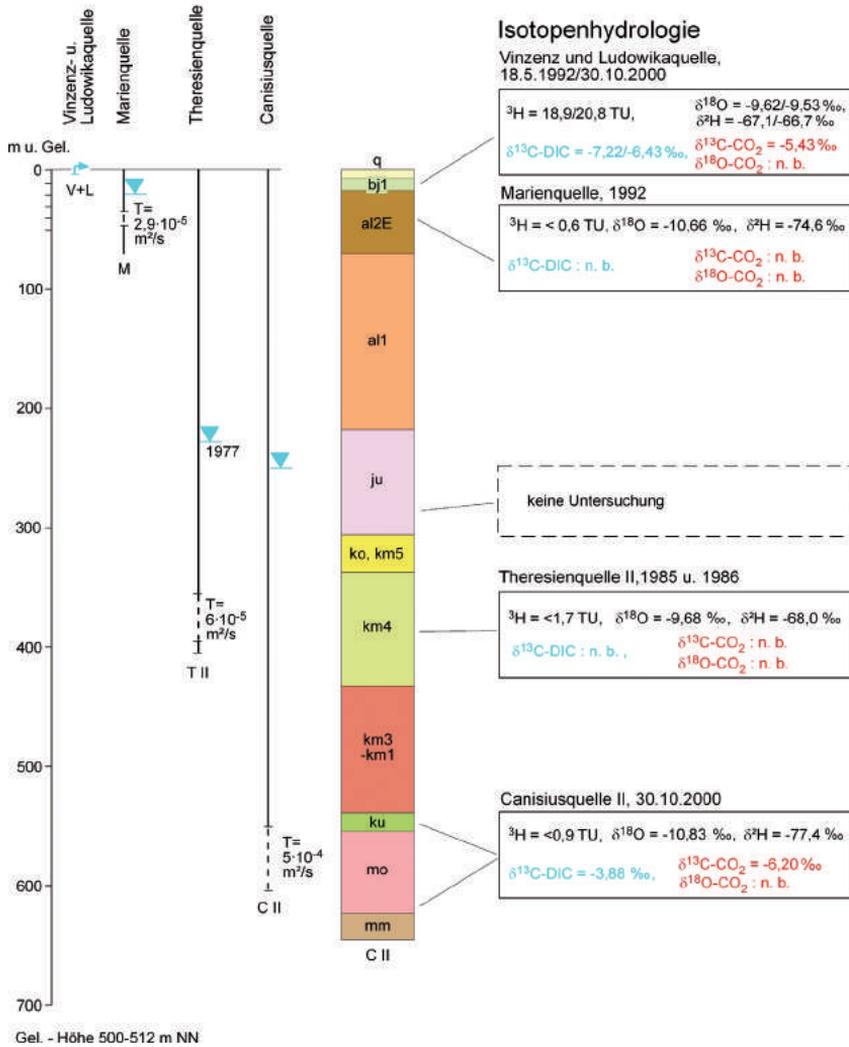


Abb. 3. Hydrogeologisches Säulenprofil für den Standort Bad Ditzenbach (wie Abb. 2), mit isopenhydrologischen Daten für die Stockwerke (nach Untersuchungsberichten NLFB und HYDROISOTOP).

# Bad Überkingen

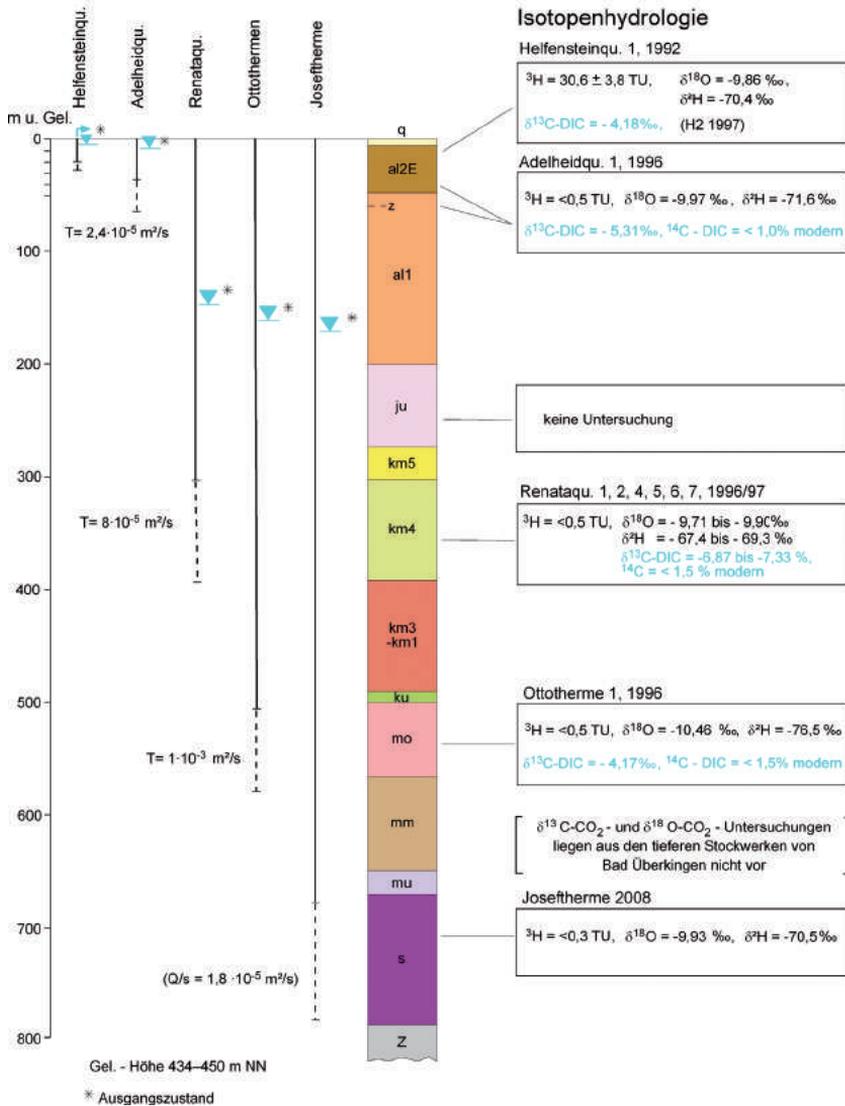


Abb. 4. Geologisches Säulenprofil für den Standort Bad Überkingen, mit hydrogeologischer Stockwerksgliederung, Temperatur, Hydrochemie und CO<sub>2</sub>-Führung in den Stockwerken.

# Bad Überkingen

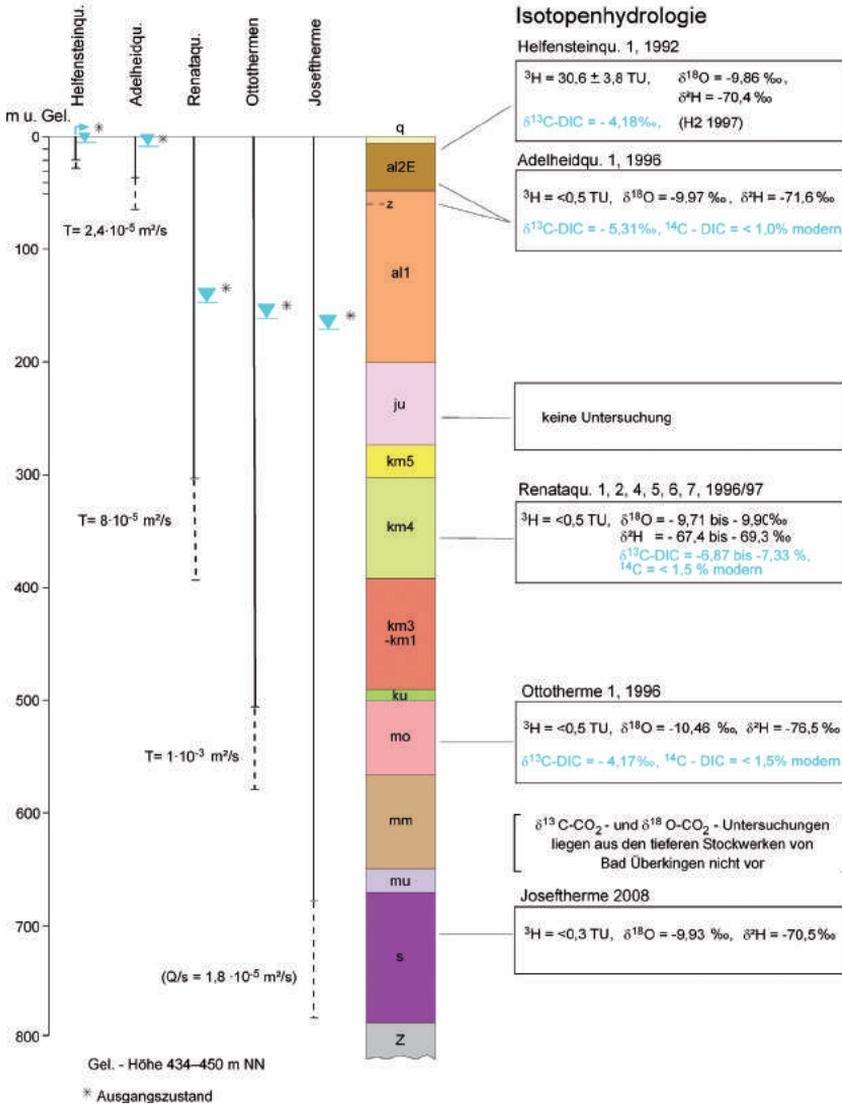


Abb. 5. Hydrogeologisches Säulenprofil für den Standort Bad Überkingen (wie Abb. 4), mit isotopenhydrologischen Daten für die Stockwerke (nach Untersuchungsberichten NLFb und HYDROISOTOP).

Tab. 1: Hydrochemische Analysen CO<sub>2</sub>-führender Quellen und oberflächennaher Grundwässer von Bad Ditzzenbach, Bad Überkingen und Kleinengstingen.

Bezeichnung, Ort	Vinzenzquelle, Bad Ditzzenbach	Helfensteinquelle 1, Bad Überkingen	Säuerling Kleinengstingen	Säuerling Kleinengstingen
Datum	14. 11. 1991	15. 08. 1985	10. 6. 1953	17. 05. 2011
Labor	Inst. angew. Ch.	Inst. angew. Ch.	LGRB (GLA)	LGRB
Analysen-Nr.	–	–	–	0000073510
el. Lf. ( S/cm)	910	1278	n. b.	1820
T (°C)	10,9	13,0	7,4 (15. 5. 1953)	9,6
pH-Wert	n. b.	5,8	n. b.	6,33 (im Gel.)
Ca (mg/l)	172,0	296,6	430	391
Mg (mg/l)	12,1	29,2	21	9,84
Na (mg/l)	16,6	45,0	81	44,1
K (mg/l)	2,8	29,5	1,6	13,7
NH <sub>4</sub> (mg/l)	<0,01	3,3	0	<0,01
Fe (mg/l)	<0,01	2,13	0,3	0,037
Mn (mg/l)	0,1	n. b.	0,1	0,00341
Li (mg/l)	0,07	0,1	n. b.	0,004131
Sr (mg/l)	0,42	n. b.	n. b.	0,312
Ba (mg/l)	n. n.	0,002	n. b.	0,146
Al (mg/l)	0,028	n. b.	8,3	0,004288
As (mg/l)	0,001	0,008	0,157	0,002836
Cl (mg/l)	21,3	33,6	37	87,9
HCO <sub>3</sub> (mg/l)	540,0	1071	1313	1170
SO <sub>4</sub> (mg/l)	22,9	57,6	107	35,6
NO <sub>3</sub> (mg/l)	15,4	<0,1	40	7,66
PO <sub>4</sub> (mg/l)	0,04	0,01	1,15	3,76
F (mg/l)	0,67	0,8	n. b.	0,235
U (mg/l)	0,013	n. b.	n. b.	0,000721
B (mg/l)	0,24	2,1 (BO <sub>3</sub> )	n. b.	0,0412
H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (mg/l)	7,3	8,8	47	23,6 (SiO <sub>2</sub> )
S. gel. Mineralstoffe (mg/l)	811,84	1554,64	2089,1	1787,95
fr. CO <sub>2</sub> (mg/l)	1900,0	1470	1838	1100
o <sub>2</sub> gel. (mg/l)	1,2	n. b.	n. b.	3,9

- Die in den Stockwerken angetroffenen, im tieferen Bereich thermalen Mineralwässer, sind mit stockwerkspezifischer Charakteristik hydrochemisch sehr verschieden. Etwas weniger markant gilt dies auch für die isotopehydrologische Signatur der Wässer (Abb. 3 und 5). Abgesehen von den Mineralwässern in der Eisensandstein-Formation bei Bad Überkingen (Helfenstein- und Adelheidquellen) sind hydrochemisch und isotopehydrologisch keine – gegebenenfalls absteigende – Stockwerksübertritte erkennbar. Möglicherweise besteht aber zwischen Muschelkalk und Buntsandstein eine eingeschränkte Stockwerksverbindung. Eine ausgeprägte Trennschicht ist hier nicht vorhanden.

Anzumerken ist, dass die Wässer, die inzwischen über mehrere Jahrzehnte genutzt und überwacht wurden, in ihrer chemischen Beschaffenheit weitgehend konstant geblieben sind. Deutliche Änderungen zeigen jedoch in Bad Ditzenbach die Vinzenz- und die Ludowikaquelle (Rückgang der anthropogenen Stoffeinträge), die Marienquelle (al2E, Schwankung des gelösten freien CO<sub>2</sub>) und die nicht mehr genutzten Theresienquellen (km4, jeweils mit nur anfangs sehr hoher Gasführung von 1,12 bzw. 1,55 g/l gelöstem freiem CO<sub>2</sub>, die später nicht mehr erreicht wurden).

Innerhalb des Aquifers im Oberen Muschelkalk hat sich bisher auch der hydrochemische Gradient mit abnehmendem Salz- und CO<sub>2</sub>-Gehalt nach Osten, von der Canisiusquelle II zur Canisiusquelle I in Bad Ditzenbach und weiter zu den Ottothermen in Bad Überkingen, nicht verändert.

Aus Tab.1 sind hydrochemische Analysen für das jeweils oberste Stockwerk ersichtlich: Von der frei ausfließenden Vinzenzquelle in Bad Ditzenbach, einem Akrato-Säuerling, und von der früher aus der Urquelle frei auslaufenden, heute aus einem auf 20 m vertieften Brunnen geförderten Mineralwasser-Säuerling Helfensteinquelle 1. Beide Wässer sind oberflächennah, nach isotopehydrologischem Befund (Gehalt an Tritium, <sup>3</sup>H, s. Abb. 3 und 5) zumindest anteilig jung und im Falle der Vinzenz- und der Ludowikaquellen auch mikrobiologisch beeinträchtigt sowie deutlich anthropogen beeinflusst.

### 3.5 Gas- und CO<sub>2</sub>-Führung in den Stockwerken

In Bad Ditzenbach besteht eine hohe CO<sub>2</sub>-Führung in allen erschlossenen und genutzten oder durch Zwischentests untersuchten Grundwasserstockwerken bis in den Oberen Muschelkalk (Abb. 2). Auf Besonderheiten in der extrem gering ergebnigen Marienquelle (al2E) und in den Theresienquellen (km4) wurde bereits hingewiesen. Im Blaukalk-Aquifer (jmBL) der Vinzenz- und Ludowikaquellen zeigt die CO<sub>2</sub>-Verbreitung eine eng begrenzte Reichweite von allenfalls wenigen zehner Metern um die Quellen. Dazu passt, dass eine hydrochemische Gleichgewichtsberechnung mit dem Programm PHREEQE (PARKHURST et al. 1980) für das Vinzenz-Quellwasser eine starke Untersättigung für Kalzit und Dolomit ergab. Dies besagt, dass die Kontaktzeit zwischen CO<sub>2</sub>-Gas, Grundwasser und Karbonatgestein des Grundwasserleiters für eine Gleichgewichtseinstellung zu kurz ist.

**Tab. 2:** Quellschüttung und Nutzungsrate, CO<sub>2</sub>-Konzentration und CO<sub>2</sub>-Fracht von Quellen und oberflächennahem Grundwasser in Bad Ditzgenbach und Bad Überkingen.

Ort, Quelle, Brunnen	Q [(l/min)]	fr. gel. CO <sub>2</sub> [g/l]	fr. gel. CO <sub>2</sub> [kg/d]
<b>Bad Ditzgenbach</b>			
– Vinzenzquelle	6,52	2,09	19,62
– Ludowikaquelle	13,04	1,74	32,67
– Qu. Regulierung III	37,50	1,09	58,86
– Qu. Regulierung IV	4,11	0,846	5,01
– Süßwasserquelle	120,0	0,144	24,88
Summen	181,17 (3,02 l/s)		141,04 (51,48 t/a)
<b>Bad Überkingen</b>			
– Helfensteinquelle 1	40	1,58	91,01
– Helfensteinquelle 2	30	1,35	51,32
– Helfensteinquelle 3	20	1,38	39,74
– Helfensteinquelle 5	20	0,64	18,43
– Helfensteinquelle 8	30	0,36	15,55
– Helfensteinquelle 10	10	0,45	6,48
Summen	150 (2,5 l/s)		229,53 (83,78 t/a)
– Adelheidquelle 1	49,8	1,81	129,8
– Adelheidquelle 3	25,2	1,81	65,7
– Adelheidquelle 4	19,8	1,30	37,1
– Adelheidquelle 5	25,2	1,81	65,7
Summen	120 (2,0 l/s)		298,3 (108,88 t/a)

Q- und CO<sub>2</sub>-Daten Bad Ditzgenbach: Stichtagsmessung 3. 5. 2005, Ingenieurbüro Fritz, Bad Urach.

Q-Daten Bad Überkingen: Wasserrecht und durchschnittl. Nutzung (1990); CO<sub>2</sub>-Daten: Mittel aus 5 bis 10 Bestimmungen, von der früheren Mineralbrunnen Überkingen-Teinach AG zur Verfügung gestellt. Weitere Helfensteinquellen haben <0,3 g/l freies gelöstes CO<sub>2</sub>.

Im Bereich Bad Überkingen ist dagegen eine erhöhte bis hohe CO<sub>2</sub>-Führung in den einzelnen Aquiferhorizonten der Eisensandstein-Formation unter dem Filstal über mehr als 1,5 km nachgewiesen. Auch das Stockwerksprofil (Abb. 4) zeigt grundsätzlich andere Verhältnisse. Eine hohe CO<sub>2</sub>-Führung bis in den Sättigungsbereich besteht nur in den Eisensandstein-Horizonten (Helfenstein- und Adelheidquellen). In den thermalen Mineralwässern der Renataquellen (Stubensandstein) und der beiden Ottothermen (Muschelkalk) ist der Gehalt auch bei

**Tab. 3:** Gas- und Edelgas-Analysen von CO<sub>2</sub>-reichen Mineralwässern von Bad Ditzenbach und Bad Überkingen (alle Bestimmungen durch HYDROISOTOP 1998 und 2000).

Gas / Edelgas	Vinzenz- quelle, Bad Ditzenbach	Canisius- quelle II, Bad Ditzenbach	Helfenstein- quelle 2, Bad Überkingen	Adelheid- quelle 1, Bad Überkingen
CO <sub>2</sub> (vol%) – (Nml/kg)	95,4 n. b.	88,1 734,41	99 618	91,20 1785
N <sub>2</sub> (vol%) – (kor.*) (Nml/kg)	4 n. b.	11,3 2,91	0,90 6,4	9,60 4,7
CH <sub>4</sub> (vpm) – (Nml/kg)	660 n. b.	66 0,0049	369 0,03	330 0,04
Ar (vol%) – (kor.*) (Nml/kg)	0,06 n. b.	0,17 0,17	0,10 0,12	0,08 0,117
He (vol%) – (Nml/kg)	0,1 n. b.	0,33 0,076	0,30 0,06	0,16 <0,2
<sup>4</sup> He (Nml/g)	n. b.	4,64 × 10 <sup>-4</sup>	n. b.	n. b.
<sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He	n. b.	3,59 × 10 <sup>-7</sup>	1,23 × 10 <sup>-6</sup>	1,24 × 10 <sup>-6</sup>

\* = Entgasungseffekt durch HYDROISOTOP z. T. korrigiert; vpm = 10<sup>-4</sup> vol%.

langfristig hohen Förderraten mit 0,07 bis 0,15 bzw. 0,2 bis 0,35 g/l freies gelöstes CO<sub>2</sub> relativ niedrig geblieben. Für das CO<sub>2</sub>-Vorkommen von Bad Überkingen müssen deshalb auch erhebliche laterale Transportwege angenommen werden.

Nach den in Tab. 2 zusammengestellten Messwerten beträgt der Austrag von CO<sub>2</sub> aus der gefassten Quellengruppe Vinzenz- und Ludowikaquelle in Bad Ditzenbach ständig etwa 50 t/a und aus den Helfenstein- und den Adelheidquellen in Bad Überkingen, hier zwar von der Nutzung abhängig aber generell ebenfalls anhaltend, etwa 190 t/a. Daraus ist auf einen hohen permanenten CO<sub>2</sub>-Aufstieg aus dem Untergrund und durch die liegende Schichtenfolge zu schließen, der in junges, oberflächennahes Grundwasser, im Eisensandstein auch in begrenzt tiefes, älteres und mineralisiertes Grundwasser, einspeist. Der in Bad Ditzenbach noch deutlich höhere Austrag von CO<sub>2</sub> mit der Förderung von thermalem Mineralwasser aus dem tiefen Stockwerk des Oberen Muschelkalks wird hier nicht weiter diskutiert, passt jedoch zur Vorstellung eines hier generell vertikalen Aufstiegs des Gases.

In Tab. 3 sind einige Gas- und Edelgas-Analysen zusammengestellt. Der CO<sub>2</sub>-Anteil beträgt zwischen 88 und 99 Volumenprozent. Auffällig ist ein niedriger, in den Gasproben aus den höheren, oberflächennahen Wässern aber 5- bis 10-fach höherer Gehalt und Anteil an Methan, CH<sub>4</sub>, gegenüber der Probe aus dem Oberen Muschelkalk (Canisiusquelle II). Die Helium-Werte werden in Kap. 5 interpretiert.

#### 4 DER SÄUERLING VON KLEINENGSTINGEN

Der Sauerling von Kleinengstingen befindet sich über einem geomagnetisch (MÄUSSNEST 1974, Struktur-Nr. 7621.2.02) und durch mehrere vorübergehende Aufschlüsse sicher nachgewiesenen Tuffschlot des miozänen Alb-Vulkanismus. Sein Durchmesser beträgt über 100 m (ist in GK25, Bl. 7621, Trochtelfingen, LGRB 1999 aber großzügig vereinfacht dargestellt). Im Jahr 1580 wurde bei der Suche nach dringend benötigtem Trinkwasser mitten im Ort durch etwa 8 m tiefe Grabung ein reichlich gasführendes und mineralisiertes Grundwasser freigelegt. Dieses ist heute in einem 4,8 m tiefen Schacht gefasst. Zahlreiche hydrogeologische und historische Daten und Informationen wurden von CARLÉ (1954) zusammengestellt, weitere sind im Rathaus Engstingen einsehbar. Darauf wird verwiesen. Einzelmessungen im Schachtbrunnen ergaben schwankende Wasserstände bis zu 0,5 m unter Gelände (etwa 705 m NN).

Nach Einbau einer Ultrafiltrationsanlage und einer elektrischen Pumpe kann das Sauerwasser seit 2004 an dem hübschen Brunnenhäuschen wieder abgefüllt und getrunken werden.

Wasseranalysen aus 1952 und 2011 sind aus Tab. 1 ersichtlich. Aktuell handelt es sich um einen Ca-HCO<sub>3</sub>-Mineralwasser-Sauerling mit 1,79 g/l gelösten Feststoffen, 1,10 g/l freiem gelöstem CO<sub>2</sub> und einer Temperatur von 9,6 °C (am 17. 05. 2011). Der Vergleich beider Analysen zeigt eine beträchtliche Variabilität einzelner Parameter, wahrscheinlich auch durch den Rückgang anthropogener Einflüsse auf das oberflächennahe Grundwasser.

Für die Darstellung der regionalen geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse in Abb. 6 wurde LGRB 1999 (GK25, Bl. 7621, Trochtelfingen, mit Erläuterungen), insbesondere das Profil der 1101 m tiefen Erdölaufschlussbohrung Trochtelfingen 1, die 1976 rund 6 km WSW des Kleinengstinger Schachtbrunnens abgeteuft wurde, herangezogen. Demnach liegt die Obergrenze der bei Trochtelfingen 149 m mächtigen Opalinuston-Formation im Bereich Kleinengstingen etwa 330 m unter Gelände bzw. auf 375 m NN. Der Wasserstand im umgebenden Karstaquifer liegt nach der genannten GK25-Erläuterung unter Kleinengstingen etwa 45 m unter Gelände bzw. auf 660 m NN. Aus STOBER & JODOCY 2011, näherungsweise auch STOBER & VILLINGER 1997 sowie UFRICHT 2006, kann für den tiefen Aquifer des Oberen Muschelkalks eine Grundwasser-Druckhöhe von etwa 350 m NN, entsprechend 355 m unter Gelände, abgelesen werden. Nach diesen Daten bestehen auch im Standortbereich Kleinengstingen extrem hypopiezometrische Verhältnisse, die einen Aufstieg von tiefem Grundwasser als Transportmedium für das im Sauerling auftretende CO<sub>2</sub> ausschließen.

Isotopenhydrologische Daten des Sauerwassers sind nicht bekannt. Mikrobiologische und anthropogene Verunreinigungen belegen jedoch ein sehr junges Wasser, das als hydraulisch schwebendes Schichtgrundwasser auf Basalttuff (diamikter Brekzientuff) charakterisiert wird. Die stark schwankende Ergiebigkeit des Vorkommens kann, auch nach CARLÉ (1954), auf etwa 0,02 l/s und die CO<sub>2</sub>-Fracht folglich auf 0,7 t/a, aufgrund zusätzlicher umgebender Gasaustritte jedoch auf wahrscheinlich >1 t/a CO<sub>2</sub> geschätzt werden.

Tab. 4: Isotopenphysikalische Daten des gelösten anorganischen Kohlenstoffs (DIC) und des Kohlendioxids (CO<sub>2</sub>) sowie <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He-Verhältnisse stark CO<sub>2</sub>-führender Mineralwässer von Bad Ditzgenbach, Bad Überkingen und Kleinengstingen. Zum Vergleich sind Bestimmungen aus dem Oberen Muschelkalk von Bad Urach und Stuttgart-Bad Cannstatt mit aufgeführt.

Beprobungsstelle Ort Fassung	Geolog. Kürzel	Datum	δ <sup>13</sup> C <sub>DIC</sub> ‰ PDB	δ <sup>13</sup> C <sub>CO<sub>2</sub></sub> ‰ PDB	δ <sup>18</sup> O <sub>CO<sub>2</sub></sub> ‰ PDB	<sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He	Labor, Literatur, Bemerkung
Bad Ditzgenbach Vinzenzquelle	bj1 (BL)	10.06.2010	-3,7	-	-	-	HYDROISOTOP
Bad Ditzgenbach Vinzenz- u. Ludowikaquelle	bj1 (BL)	30.10.2000	-7,22 / -6,43	-5,34	-	-	HYDROISOTOP Einzel- u. Misch- probe
Bad Ditzgenbach Canisiusquelle II	(ku) mo	30.10.2000 10.06.2010	-3,88 -2,9	-6,20 -5,5	-	0,359 · 10 <sup>-6</sup> -	HYDROISOTOP
Bad Überkingen Adelheiqueille 1	al2E	17.07.1996 10.06.2010	-5,3 -3,0	-7,5	-	1,24 · 10 <sup>-6</sup> -	HYDROISOTOP
Bad Überkingen Renataquelle 1	km4	17.07.1996	-6,87	-	-	0,526 · 10 <sup>-6</sup>	HYDROISOTOP
Bad Überkingen Ottotherme 1	mo	22.02.1988 17.07.1996	-3,77 -4,17	-	-	0,275 · 10 <sup>-6</sup>	HYDROISOTOP
Kleinengstingen Sauerbrunnen	tMa	(vor) 1990 10.06.2010	-2,5 -0,1	-4,28 -2,4	-	1,6 · 10 <sup>-6</sup> -	GRIESHABER- SCHMAHL 1990 HYDROISOTOP
Bad Urach TB 2	mo	1976 – 1979	-	-5,2 (n=20)	25,495 (n= 21)	-	KOLLER 1980; K. & FRIEDRICHSEN 1982
Stuttgart-Berg Inselquelle	mo	03.04.1985	-4,6	6,5	31,8	-	HYDROISOTOP (UFRECHT 2006b)
Stuttgart-Berg Leuzequelle	mo	03.04.1985	-5,2	-7,2	32,2	-	HYDROISOTOP (UFRECHT 2006b)

# Hydrogeologischer Schnitt Trocheltfingen - Kirchheim /Teck

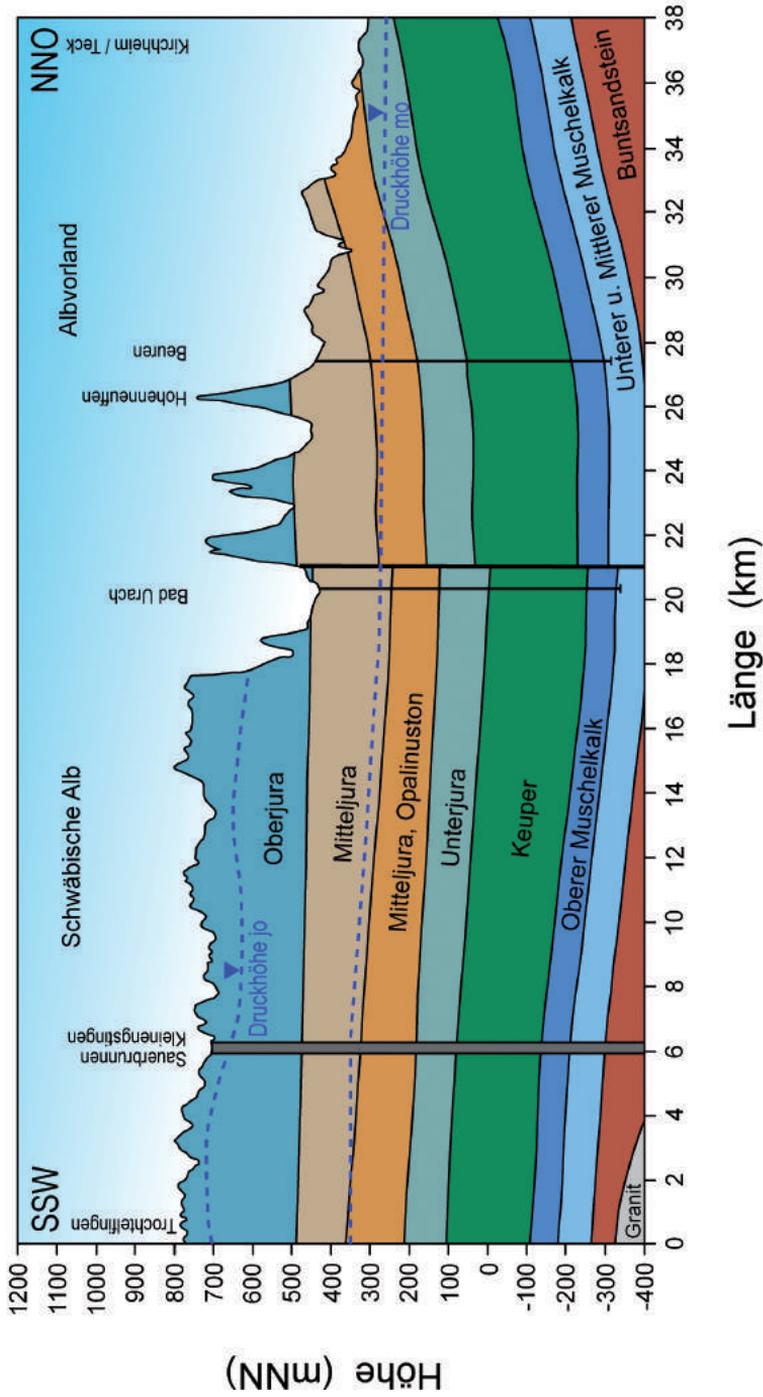


Abb. 6. Hydrogeologischer Übersichtsschnitt zur Position des Sauerwasserbrunnens Kleinengstingen, von der Schwäbischen Alb bei Trocheltfingen bis in das Altvorland bei Kirchheim/Teck, mit Grundwasserdruckhöhen des Karstaquifers im Weißen Jura (jo) und des Thermalaquifers im Oberen Muschelkalk (mo); zu den verwandten Daten s. Text.

Derartige gering aber anhaltend ergiebige Schichtgrundwässer sind von den Basalttuffen auf der Hochfläche der Schwäbischen Alb vielfach bekannt (z. B. FRANK 1951). Sie belegen eine erhöhte Leit- und Speichereigenschaft des oberflächennah verwitterten und einen Stau effekt des tieferen unverwitterten Gesteins. Durchlässigkeits- und Porositätsbestimmungen von unverwittertem diamiktem Brekzientuff (und eventuell tieferen Gesteinen) aus Durchschlagsröhren des Uracher Vulkangebiets mit 351 von MÄUSSNEST (1974) geomagnetisch erfassten Schloten liegen nicht vor. Eine hinreichende Gasdurchlässigkeit der Gesteine und Strukturen – Brekzientuffe, tiefere Magmatite und durch die Eruption veränderte umgebende Sedimente des Deckgebirges – sind jedoch unschwer denkbar und generell anzunehmen.

### 5 BEWEGUNG UND HERKUNFT DES CO<sub>2</sub>

Im Betrachtungsgebiet steigt das CO<sub>2</sub>-Gas aus dem Grundgebirge nach dem Übergang aus dem überkritischen Zustand in den gasförmigen Zustand ( $T_{\text{krit}} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p_{\text{krit}} = 73,8 \text{ bar}$ ) zunächst in die hauptsächlich silikatischen Sedimentgesteine des Rotliegend (Perm) und des Buntsandsteins auf. Die Druckhöhe des gespannten Grundwassers im Buntsandstein wurde in Bad Überkingen (Joseftherme) mit etwa 255 m NN bestimmt. Der Wasserdruck an der Basis des Buntsandsteins beträgt hier ca. 60 bar, an der Grenze Buntsandstein/Muschelkalk ca. 50 bar. Im Grundwasser erfolgt zunächst eine Lösung des CO<sub>2</sub> bis zur Sättigung unter den bestehenden Druck- und Temperaturbedingungen ( $p = 50\text{--}60 \text{ bar}$ ,  $T = 46 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Aufgrund der nur geringen Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers in diesen tief liegenden Grundwasserleitern ist die CO<sub>2</sub>-Sättigung – vor allem im Bereich der Aufstiegswege – schnell erreicht. Das aus der Tiefe weiter zuströmende CO<sub>2</sub>-Gas wird im Grundwasserleiter eine unter dem Umgebungsdruck stehende Gasphase bilden und dort, wo gasdurchlässige Strukturen vorhanden sind, in die hangenden Schichten aufsteigen.

Der Druck des gespannten Grundwassers im Oberen Muschelkalk befindet sich im Bereich von Bad Überkingen (Ottothermen) auf 265 bis 270 m NN (1983) nur wenig über demjenigen des Buntsandstein-/Perm-Grundwasserstockwerks. Wahrscheinlich findet zwischen den beiden Stockwerken nur eine geringe Grundwasserströmung statt, während das CO<sub>2</sub>-Gas aufgrund der geringeren Dichte weiter aufsteigen kann.

An der Grenze Muschelkalk/Keuper steht das Grundwasser lediglich noch unter einem Druck von ca. 24 bar (Bad Überkingen, Ottothermen) bzw. ca. 30 bar (Bad Ditzenbach, Canisiusquellen). Die Druckhöhe reicht in Bad Überkingen und in Bad Ditzenbach bis in den unteren Abschnitt der Schichtenfolge des Opalinustons. Im Bereich Kleinengstingen liegt die Druckhöhe des Grundwassers im Oberen Muschelkalk wenig über der Obergrenze des Opalinustons. Nach dem Aufstieg des CO<sub>2</sub>-Gases in den Karbonatgesteins-Grundwasserleiter des Muschelkalks erfolgt dort eine Lösung von Karbonatmineralen bis zum Erreichen des jeweiligen Sättigungs-Gleichgewichts. Eine hohe Intensität dieses Prozesses führt zu einer starken Verkarstung dieses Grundwasserleiters auch in groß-

er Tiefe. Die damit fortschreitende Zunahme der horizontalen Durchlässigkeit kann zu einem verstärkten Grundwasserabstrom, zu einem verstärkten lateralen Transport des aufgestiegenen  $\text{CO}_2$  und auch zu einem verstärkten Abbau der tiefen Grundwasservorräte führen. Bei Überschreitung der  $\text{CO}_2$ -Löslichkeit bildet sich im Grundwasserleiter eine mobile Gasphase, die an geologischen und tektonischen Strukturen weiter aufsteigen oder sich örtlich ansammeln kann. Als Beispiel für das Antreffen einer solchen Gasfalle im Bereich der Schwäbischen Alb kann die Erdölbohrung Buttenhausen angeführt werden. Hier ereigneten sich während des Durchteufens des Oberen Muschelkalks starke  $\text{CO}_2$ -Gasausbrüche, die einen Abbruch der Bohrung zur Folge hatten (WIRTH 1958). Auch im Angulatensandstein wurden bei Bohrungen in Salach und Süßen im Filstal in Tiefen von 40 m und 51,5 m unter Gelände  $\text{CO}_2$ -Gasausbrüche mit 2 bar Druck beschrieben (GROSCHOFF 1951).

Aufgrund der Existenz der oberflächennahen Sauerlinge muss der  $\text{CO}_2$ -Gasdruck im betrachteten Gebiet so hoch sein, dass an geeigneten, gasdurchlässigen Strukturen alle über dem Muschelkalk folgenden Schichten und Grundwasserstockwerke bis zur Erdoberfläche von  $\text{CO}_2$ -Gas durchströmt werden. Dabei können im Bereich von höheren karbonatischen Grundwasserstockwerken, wie z. B. dem Weißen Jura, die gleichen verkarstungsfördernden Prozesse stattfinden wie im Muschelkalk. Obwohl schwerer als Luft, steigt im Untergrund von Kleinengstingen das  $\text{CO}_2$ -Gas durch den Karstgrundwasserleiter und den luftefüllten oberen Abschnitt des Weißen Juras auf. Voraussetzung hierfür ist die Existenz eines weitgehend isolierten Transportweges, der in der Basaltuffröhre angenommen wird.

Für die Klärung der Herkunft aufsteigender  $\text{CO}_2$ -Gase werden weltweit seit Jahrzehnten isotopenphysikalische Methoden herangezogen. Zahlreiche Messungen haben gezeigt, dass aus der Tiefe aufsteigendes, magmatisches  $\text{CO}_2$  durch schwere  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte charakterisiert ist. Auch das im Wasser gelöste  $\text{CO}_2$  magmatischer Herkunft ist durch schwere  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte gekennzeichnet. GRIESSHABER-SCHMAHL (1990) und GRIESSHABER et al. (1992) beschreiben aus dem Rheinischen Schiefergebirge den hauptsächlichen Bereich der  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ -Werte (DIC = gelöster anorganischer Kohlenstoff) von  $\text{CO}_2$ -reichen Wässern mit -4 bis -7 ‰ PDB und aus der Oberpfalz einen sehr ähnlichen  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ -Wertebereich mit -3 bis -8 ‰ PDB.

Die  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ -Werte in den Grundwässern von Bad Überkingen, Bad Ditzgenbach und Kleinengstingen (Tab. 4) variieren im Bereich von -0,1 bis -7,22 ‰ PDB und fügen sich in den genannten Wertebereich ein. Die kleineren Werte weisen auf Mischungsvorgänge mit Grundwässern mit leichten  $\delta^{13}\text{C}$ -Werten und/oder auf die Lösung von isotopisch leichten Karbonaten hin.

Die  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte im  $\text{CO}_2$  der untersuchten Grundwässer im Betrachtungsgebiet variieren zwischen -2,4 und -7,5 ‰ PDB. Das  $\text{CO}_2$  in der Gasphase steht in der Regel mit den im Wasser gelösten  $\text{CO}_2$ -Spezies im isotopischen Gleichgewicht. Die gemessenen schweren  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ -Werte stehen im Einklang mit den gemessenen  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ -Werten. Auch in anderen, vulkanisch geprägten Gebieten werden übereinstimmende  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ -Werte in Thermalwässern festgestellt. So ist z. B. das

in Thermalwässern des Yellowstone Parks gelöste CO<sub>2</sub> gekennzeichnet durch  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ -Werte von -3 bis -5 ‰ PDB (HOEFS 1980).

Zusätzliche Hinweise auf die Herkunft des CO<sub>2</sub> in den genannten Sauerlingen können Spurengase, wie z. B. Helium, liefern. Entscheidend für die Beurteilung der Herkunft ist das Verhältnis der Isotope <sup>3</sup>He und <sup>4</sup>He. Das typische <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He Verhältnis in der Erdkruste liegt bei ca. 2 bis 4 · 10<sup>-8</sup>. Helium aus dem Erdmantel hat ein deutlich größeres <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He-Verhältnis, das in einem Schwankungsbereich von ca. 7 bis 40 · 10<sup>-6</sup> variieren kann. Die bestimmten <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He-Verhältnisse (Tab. 3) von 0,257 bis 1,24 · 10<sup>-6</sup> (Bad Überkingen), 0,359 · 10<sup>-6</sup> (Bad Ditzenbach) und 1,6 · 10<sup>-6</sup> (Kleinengstingen) sind relativ hoch. Das vorgefundene Helium stellt demnach eine Mischung von Helium aus der Erdkruste und dem Erdmantel dar. Der gegenüber dem Mantelhelium erhöhte <sup>4</sup>He-Anteil lässt sich zwanglos erklären durch eine Zumischung von Krustenhelium während der Grundgebirgspassage. In einzelnen Grundwasserleitern (z. B. Stubensandstein) kann durch den radioaktiven Zerfall von natürlich vorkommenden Uran- und Thorium-Mineralen zusätzliches <sup>4</sup>He entstehen und das ursprüngliche <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He Verhältnis ändern.

Die  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ - und  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ -Werte der untersuchten Sauerlinge und CO<sub>2</sub>-führenden Mineralwässer aller drei Standorte weisen auf eine tiefe, magmatische Herkunft des darin enthaltenen CO<sub>2</sub> hin. Die <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He-Verhältnisse unterstützen diese Interpretation. Die Isotopensignatur des CO<sub>2</sub> unterhalb und oberhalb des Opalinustons lässt am Standort Bad Ditzenbach keine Unterschiede erkennen.

## 6 DEUTUNG UND BEWERTUNG DER ERGEBNISSE

Das Auftreten und der Transport von Kohlendioxid im Untergrund Baden-Württembergs, insbesondere in der Schichtenfolge des sedimentären Deckgebirges mit ausgeprägter hydrogeologischer Stockwerksgliederung, sind bisher keineswegs vollständig geklärt.

Für die hier untersuchten oberflächennahen CO<sub>2</sub>-Vorkommen in Form von Sauerlingen in Bad Ditzenbach, Bad Überkingen und Kleinengstingen werden folgende Befunde zusammengefasst:

- An den Standorten bestehen langfristige, aktive und bezüglich ihres Volumensstroms bedeutsame CO<sub>2</sub>-Austritte (jeweils zumindest 50, 190 und 0,7 t/a).
- Nach geologischer Plausibilität und isotonenphysikalischem Befund ist das austretende CO<sub>2</sub> tiefer, magmatischer Herkunft.
- Um in die oberflächennahen Grundwässer und die Austritts-Orte an der Erdoberfläche zu gelangen, muss das CO<sub>2</sub> die gesamte Schichtenfolge des sedimentären Deckgebirges (mit etwa oder über 1000 m Mächtigkeit), einschließlich der Tonsteinserie des Opalinustons passieren.
- Für die Aufstiegswege durch den Opalinuston können an den Standorten im Filstal tektonische Dehnungs- und Bruchstrukturen angenommen werden. Aus allen verfügbaren Daten ergibt sich, dass vertikale Versatzbeträge der Schichtenfolge (Brauner Jura bis Oberer Muschelkalk) rund 25 m oder 20% der Gesamtmächtigkeit der reinen Tonsteinserie der Opalinuston-Formation nicht

übersteigen. Weitgehende oder vollständige vertikale Versätze des Opalinuston sind auszuschließen.

- Die „vermuteten“ Strukturen durch den Opalinuston sind bezüglich ihrer Ausbildung und ihres Verlaufs nicht bekannt. Sie müssen gasdurchlässig, jedoch nicht zwingend auch wasserdurchlässig sein. Stockwerksverbindende Grundwasserbewegungen durch den Opalinuston sind im Bereich der beiden Standorte bisher nicht zu erkennen.
- Hinweise auf vulkanische oder subvulkanische Strukturen sind von Bad Ditzgenbach und Bad Überkingen nicht bekannt.
- Unter Kleinengstingen besteht ein Basalttuff-Vorkommen, das einer Durchschlagsröhre des miozänen Vulkangebiets der mittleren Schwäbischen Alb zuzuordnen ist. Die Vulkanröhre und ihre unmittelbare Kontaktzone zum sedimentären Deckgebirge kann hier mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit als Transportstruktur für das aufsteigende CO<sub>2</sub> postuliert werden.
- Es ist bedeutsam, dass einerseits nur ein einziger, aktuell aktiver CO<sub>2</sub>-Austritt im gesamten Vulkangebiet der Albhochfläche und des Albvorlands bekannt ist und dass andererseits damit die potenzielle Gasdurchlässigkeit dieser Strukturen als erwiesen anzusehen ist.
- Auf miozäne CO<sub>2</sub>-führende Thermalquellen im Bereich des Alb- und des Hegau- bzw. Randen-Vulkanismus mit entsprechenden Kalksinter- oder Travertin-Bildungen (Böttingen, Laichingen, Riedöschingen, BLEICH 1998, ROSENDAHL et al. 2003, UFRICHT et al. 1990, SCHWEIGERT 1998, u. a.) wird hier nicht weiter eingegangen. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass unter den relativ frühen postvulkanischen Verhältnissen Strukturen entstanden sein müssen, die möglicherweise heute noch wirksam sein könnten.
- An allen drei Standorten kann heute ein CO<sub>2</sub>-Transport mit aufsteigendem Grundwasser aufgrund der geohydraulischen Verhältnisse mit sehr tiefliegenden, hypopiezometrischen Druckhöhen der tieferen Grundwasserstockwerke, insbesondere des Oberen Muschelkalks, sicher ausgeschlossen werden.
- Die beschriebenen Sauerlinge bestehen in Bad Ditzgenbach und Kleinengstingen aus sehr jungem, zeitweise erheblich anthropogen belastetem, relativ kleinräumigem, hydraulisch schwebendem Schichtgrundwasser und dominant oder vollständig einer CO<sub>2</sub>-Führung tiefer Herkunft. In Bad Überkingen sind die Verhältnisse im Eisensandstein bzw. im Helfenstein-Stockwerk durch die Mischung von jungem, oberflächennahem Grundwasser mit älterem, höher mineralisiertem Grundwasser aus dem unterlagernden, geohydraulisch nur unvollständig getrennten Adelheid-Stockwerk, etwas differenziert, durch die auch hier extrem hypopiezometrischen Verhältnisse in den tieferen Grundwasserstockwerken aber nicht grundsätzlich verschieden. Insgesamt muss für alle drei Standorte auf einen gasförmigen CO<sub>2</sub>-Aufstieg durch den Opalinuston geschlossen werden.
- Soweit die vertikale Abfolge der CO<sub>2</sub>-Führung in den Stockwerken bekannt ist, müssen zumindest für den Bereich Bad Überkingen auch beträchtliche laterale Gas-Transportwege angenommen werden.

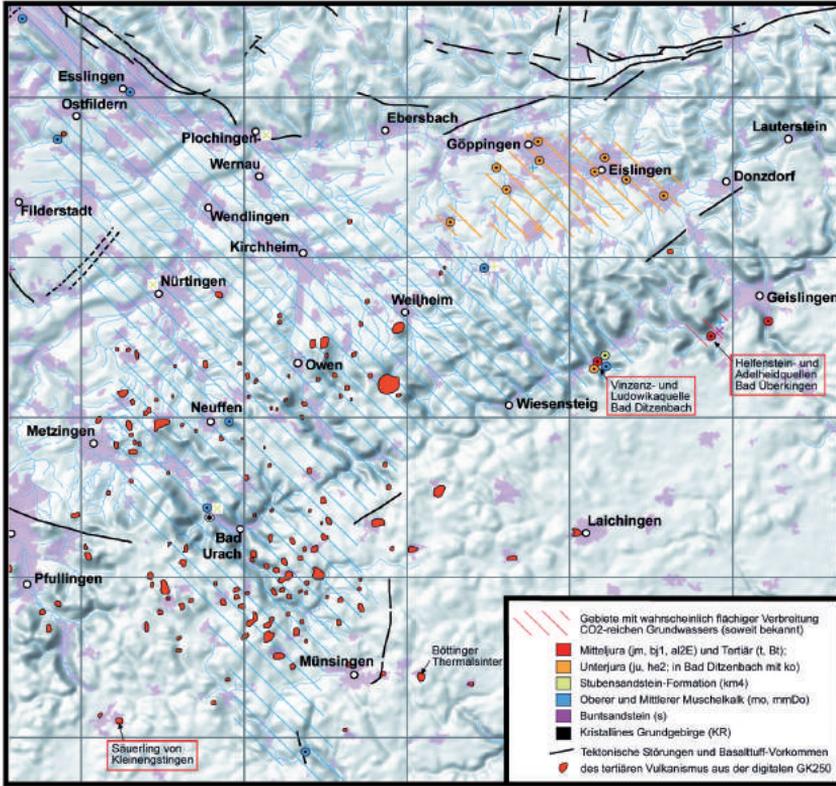


Abb. 7. Übersichtsplan mit Eruptionspunkten des miozänen Vulkanismus der Schwäbischen Alb und der Verbreitung CO<sub>2</sub>-führender Grundwässer im Bereich der Säuerlinge von Bad Ditzingen, Bad Überkingen und Kleinengstingen; die verwandte Literatur ist großenteils im Text genannt und im Literaturverzeichnis enthalten (Gitterlinien-Abstand 10 km).

In der Karte Abb. 7 sind die bekannte Nachweise von CO<sub>2</sub> aus dem Umfeld der hier behandelten Vorkommen dargestellt. Großflächig über mehrere Quadratkilometer (größer als im al2E bei Bad Überkingen) ausgedehnte Vorkommen von CO<sub>2</sub> sind nach derzeitiger Kenntnis auf Aquifere stratigrafisch älter/tiefer als der Opalinuston bzw. auf den Oberen Muschelkalk und auf den Schwarzen Jura (Angulatensandstein) beschränkt. Dabei sind die Flächenschraffuren in Abb. 7 als „Mindestflächen“ für ausschließlich positive Nachweise hoher CO<sub>2</sub>-Gehalte zu verstehen. Der Säuerling von Kleinengstingen liegt außerhalb der Schraffur für den Oberen Muschelkalk, wahrscheinlich aber im Randbereich dieser CO<sub>2</sub>-Verbreitung (Erdölb. Trochtelfingen 1, 6 km WSW: Im mo ohne Gasführung, Erdölb. Buttenhausen, 11,6 km OSO: Im mo CO<sub>2</sub>-Ausbläser, WIRTH 1958). Für Bad Ditzen-

bach und Bad Überkingen sind die Stockwerksverhältnisse oben erläutert und in Abb. 2 und 4 dargestellt. Bemerkenswert ist jedoch, dass für die CO<sub>2</sub>-Führung im Angulatensandstein des Schwarzen Juras im Filstal oberhalb Göppingen (SCHNIEPP 1992) bisher keine sichere Beziehung zum Auftreten von CO<sub>2</sub> im Oberen Muschelkalk hergestellt werden kann.

Abschließend wird angeregt, bei Tiefbohrungen in oder durch tief liegenden Opalinuston in Baden-Württemberg, den geotechnischen und hydrogeologischen Eigenschaften dieses Gesteins besondere Beachtung zu widmen. Im Fall einer zukünftigen bundesweiten Standortsuche für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle wird voraussichtlich auch die Tonsteinserie des Opalinustons in Südwestdeutschland als potenzielles Wirtgestein in den Suchlauf einbezogen werden (BGR/HOTH et al. 2007). Gegebenenfalls wären die Befunde zum örtlichen Aufstieg von tiefem CO<sub>2</sub> und der damit verbundenen Existenz von Wegsamkeiten für Gas durch den Opalinuston bei der Sicherheitsbeurteilung von Standorten eingehend und kritisch zu berücksichtigen.

#### DANK

Dr. L. Eichinger, Hydroisotop GmbH, Schweitenkirchen, hat freundlicherweise auf die Erstattung der Unkosten für die chemischen und isotopephysikalischen Untersuchungen vom 9./10. 06. 2010 von Bad Ditzgenbach (Vinzenz- und Canisiusquelle II), Bad Überkingen (Adelheidquelle 1) und Kleinengstingen (Sauerbrunnen) verzichtet. Für das Entgegenkommen bedanken wir uns sehr. Die Amtsleitung des Landesamt für Geologie Rohstoffe und Bergbau (LGRB), Abt. 9 im Regierungspräsidium Freiburg, Prof. Dr. R. Watzel, hat die Veröffentlichung von Analysendaten aus dem LGRB-Labor, Leitung Dr. G. Dietze, sowie die Verwendung von Unterlagen des Amtes, die ganz überwiegend durch die Autoren erstellt oder veranlasst wurden, gestattet. Die Grafiken wurden von Herrn Crocoll und Frau Weikert, beide ebenfalls LGRB, gefertigt. Herr Skorzak, Bad Ditzgenbach, hat der Verwendung von Daten der Vinzenz Klinik zugestimmt. Von Herrn Dipl.-Geol. S. Rau haben wir Messwerte der Mineralbrunnen Überkingen-Teinach AG erhalten. Herr Bürgermeister K.-P. Kleiner, Engstingen, hat uns Einsicht in seine gesammelten Unterlagen gewährt. Allen Genannten danken wir sehr für das hilfreiche Entgegenkommen.

#### 7 LITERATUR

BGR (BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE)/HOTH, P., WIRTH, H., REINHOLD, K., BRÄUER, V., KRULL, P. & FELDRAPPE, H. (Bearb.) (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. – Veröffentlichte Studie; 118 S., zahlr. Abb.; Berlin/Hannover.

BLEICH, K. E. (1998): Bodenumlagerungen in Beziehung zur Kalkabscheidung und Fossilführung beim „Böttinger Marmor“ (Schwäbische Alb, SW-Deutschland). – Jh. Ges. Naturkde. Württemberg, 154. Jahrg.: 43–50, 1 Abb.; Stuttgart.

- CARLÉ, W. (1954): Der Säuerling von Kleinengstingen – die einzige Mineralquelle der Albhochfläche. – Z. deutsch. geol. Ges., 105/2 (Jahrg.: 1953): 252–267, 2Abb.; Hannover.
- CARLÉ, W. (1971): Die Tiefbohrungen auf mineralisiertes Thermalwasser in Bad Überkingen, Landkreis Göppingen, Baden-Württemberg. – Jh. Ges. Naturkde. Württemberg, 126: 36–87, 8 Abb.; Stuttgart.
- CARLÉ, W. (1972): Geologie und Hydrogeologie der Mineral- und Thermalwässer von Bad Überkingen, Landkreis Göppingen, Baden-Württemberg. – Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, 14: 69–143, 14 Abb., 3 Taf.; Freiburg i. Br.
- CARLÉ, W. (1975): Die Mineral- und Thermalwässer von Mitteleuropa; Geologie Chemismus, Genese. – 643 S., 14 Abb., 1 402 Analysentabellen, 15 Karten im Schuber; Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH; Stuttgart.
- CARLÉ, W., mit Beiträgen von H.-J. BAYER & G. BLOOS (1982): Geologie und Hydrogeologie der Mineral- und Thermalwässer von Bad Überkingen, Landkreis Göppingen, Baden-Württemberg (II). – Geol. Jb., C 31: 3–72, 13 Abb., 3 Taf., 10 Anal.; Hannover.
- CARLÉ, W. & GROSCHOFF, P. (1967): Zur Stratigraphie, Genese und Tektonik des Dogger-Eisenerz-Vorkommens von Geislingen an der Steige. – Jh. Ver. vaterl. Naturkd. Württ., 122: 67–91, 5 Abb., 1 Taf.; Stuttgart.
- CARLÉ, W. & GROSCHOFF, P. (1972): Geologie und Hydrogeologie der Säuerlinge, Mineralwässer und Thermalwässer von Bad Ditzgenbach, Landkreis Göppingen, Baden-Württemberg. – Oberrhein. geol. Abh., 21: 1–42, 3 Abb., 1 Taf.; Stuttgart.
- FRANK, M. (1951): Der Wasserschatz im Gesteinskörper Württembergs. – 252 S., zahlr. Tab., 31 Abb., 2 Beil.; Schweizerbart; Stuttgart.
- FRANZ, M. & NITSCH, E. (2009): Zur lithostratigraphischen Gliederung des Aalenium in Baden-Württemberg. – LGRB-Informationen, 22: 123–146, 10 Abb., 2 Tab.; Freiburg i. Br.
- GAUTSCHI, A. (2001): Hydrogeology of a fractured shale (Opalinus-Clay): Implications for deep geological disposal of radioactive wastes. – Hydrogeology Journal, 9: 97–107, 6 Abb., 1 Tab.; (Springer).
- GRIESSHABER-SCHMAHL, E. (1990): Helium and Carbon Isotope Systematics in Groundwaters from W.Germany and E.Africa. – Unveröffentl. Dissert. Univ. Cambridge, 211 S., zahlr. Tab. u. Abb.; Cambridge/GB.
- GRIESSHABER, E., O'NIONS, R. K. & OXBURGH, E. R. (1992): Helium and carbon isotop systematics in crustal fluids from the Eifel, the Rhine Graben and Black Forest, F.R.G. – Chemical Geology, 99: 213–235, 6 Abb., 4 +1 Tab.; Amsterdam.
- GROSCHOFF, P. (1951): Neue Mineralwasserbohrungen im Filstal. – Jh. geol. Abt. württ. statist. L.-A., 1: 59–64, 2 Abb., 2 Tab.; Stuttgart.
- HEKEL, U. (1994): Hydrogeologische Erkundung toniger Festgesteine am Beispiel des Opalinustons (Unteres Aalenium). – Tüb. Geowiss. Arb. Reihe C, Nr.18, 170 S., 131 Abb., 12 Tab.; Tübingen.
- HOEFS, J. (1980): Stable Isotope Geochemistry. – 2. Aufl.; 208 S., 52 Abb.; Springer; Berlin, Heidelberg, New York.
- JÄCKLI, H. (1970): Kriterien zur Klassifikation von Grundwasservorkommen. – Eclogae geol. Helv., 63(2): 389–434, 13 Abb., 4 Tab.; Basel.
- KOBLER, H.-U. (1972): Geochemische, sedimentologische und ökologische Untersu-

chungen im Braunen Jura alpha (Opalinuston) der Schwäbischen Alb. – Arb. Geol.-Paläont. Ins. Univ. Stuttgart, N.F. 66, 134 S., 31 Abb., 14 Tab., 11 Taf.; Stuttgart.

**KOLLER, B.** (1980): Geochemische und isotopengeochemische Untersuchungen an Thermalwässern aus der Urach-Kirchheimer Wärmeanomalie. – Unveröffentl. Dissert. Univ. Tübingen, 98 S., Tab. 19 u. Literaturverz.; Tübingen.

**KOLLER, B. & FRIEDRICHSEN, H.** (1982): The Thermal Water of the Urach-Kirchheimer Heat Anomaly, Germany: An Isotopic and Geochemical Study. – In R. Haenel (Hrsg.): The Urach Geothermal Project, p. 187–196, 6 fig.; Schweizerbart; Stuttgart.

**MÄUSSNEST, O.** (1974): Die Eruptionenpunkte des Schwäbischen Vulkans. Teil I u. II. – Z. dt. geol. Ges., 125: 23–54 u. 277–352, 1 Abb.; Hannover.

**MÄUSSNEST, O.** (1978): Die Karte der vulkanischen Vorkommen der Mittleren Schwäbischen Alb und ihres Vorlandes (Schwäbischer Vulkan) 1:100 000. – Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, 1 Karte; Stuttgart.

**NAGRA (NATIONALE GENOSSENSCHAFT FÜR DIE LAGERUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE; Hrsg.)** (2002): Technischer Bericht 02–03; Projekt Opalinuston, Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. – 659 S., zahlr. Fig., Tab. u. Beil.; Wettingen/Schweiz.

**PARKHURST, D.L., THORSTENSON, D.C. & PLUMMER, L.N.** (1980): PHREEQE – a computer program for geochemical calculations. – U.S. Geological Survey, Water Resources Investigations 80–96, revised and reprinted May 1982, 210 S.; Denver/Colorado.

**ROSENDAHL, W., LÓPEZ CORREA, M., GRUNER, C. & MÜLLER, T.** (Hrsg.) (2003): Der Böttinger Marmor; Bunter Fels aus heißen Quellen. – Grabenstetter höhlenkundliche Hefte Nr. 6; zahlr. Abb.; Staatsanzeiger-Verlag; Stuttgart.

**RUPF, I. & NITSCH, E.** (2008): Das Geologische Landesmodell von Baden-Württemberg: Datengrundlage, technische Umsetzung und erste geologische Ergebnisse. – LGRB-Informationen 21, 82 S., 36 Abb., 3 Tab. 10 Beil.; Freiburg i. Br.

**SCHALL, W.** (1964): Die Geologie der Blätter Deggingen, Geislingen a. d. Steige und Weidenstetten (Nr. 7424, 7325 und 7425) 1:25000 (Schwäbische Alb). – Arb. geol. Inst. T.H. Stuttgart, Nr. 46, 260 S., 2 Abb., 3 Tab. u. 10 Taf.; Stuttgart.

**SCHLOZ, W. & STOBER, I.** (2006): Mineral-, Heil- und Thermalwässer, Solen und Säuerlinge in Baden-Württemberg. – LGRB-Fachbericht 1 (2. Aufl.), 20 S. 1 Abb., 1 Tab., 1 Kt.; Freiburg i. Br.

**SCHNIEPP, A.** (1992): Herkunft und Genese der mineralisierten Wässer des Lias alpha 2 im Raum Göppingen. – Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, 21: I-XX, 1–215, 52 Abb., 17 Tab., 3 Taf.; Karlsruhe.

**SCHWEIGERT, G.** (1998): Der Riedöschinger Travertin – eine fossile Geysir-Ablagerung im Randengebiet. – Jh. Ges. Naturkde. Württemberg, 154. Jahrg.: 107–120, 5 Abb.; Stuttgart.

**STOBER, I. & VILLINGER, E.** (1997): Hydraulisches Potential und Durchlässigkeit des höheren Oberjuras und des Oberen Muschelkalks unter dem baden-württembergischen Molassebecken. – Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, 37: 77–96, 5 Abb., 2 Tab.; Freiburg i. Br.

**STOBER, I. & JODOCY M.** (2011): Geothermische Nutzhorizonte im westlichen Teil des Süddeutschen Molassebeckens. – Z. geol. Wiss., 39 (3/4): 161–172, 7 Abb.; Berlin.

- UFRECHT, W. (2006a): Zur Hydrogeologie der Aquifersysteme Buntsandstein und Muschelkalk zwischen Neckar und Donau. – Schriftenreihe des Amts für Umweltschutz, Heft 3/2006: 19–48, 12 Abb.; Stuttgart.
- UFRECHT, W. (2006b): Zusammensetzung und Herkunft der Gase in den Sauerlingen von Stuttgart-Bad Cannstatt und -Berg. – Schriftenreihe des Amts für Umweltschutz, Heft 3/2006: 103–114, 4 Abb., 2 Tab.; Stuttgart.
- UFRECHT, W., SACHS, P.M. & TIMMERMANN, G. (1990): Zur Geologie der mittelmiozänen Diatreme von Laichingen (Uracher Vulkanfeld). – Jber. Mitt. Oberrhein. geol. Ver., N.F. 72: 359–390, 9 Abb., 2 Tab.; Stuttgart.
- VEIT, E. (1936): Geologische Untersuchungen im Gebiet des oberen Filstales. – Jh. vaterl. Naturkd. Württ., 92: 74–138, 6 Abb., 3 Tab., Kt.; Stuttgart.
- VILLINGER, E. (1982): Hydrogeologische Aspekte zur geothermischen Anomalie im Gebiet Urach-Boll am Nordrand der Schwäbischen Alb (SW-Deutschland). – Geol. Jb. C 32: 3–41, 9 Abb., 9 Tab; Hannover.
- WIRTH, E. (1958): Die Schichtenfolge der Erdölaufschlussbohrung Buttenhausen 1, Schwäbische Alb. – Jber. u. Mitt. oberrhein. geol. Ver., 40: 107–128, 3 Abb.; Stuttgart.

**Unveröffentlichte Berichte und Gutachten** sind im Landesamt für Geologie Rohstoffe und Bergbau (LGRB), Abt. 9 des Regierungspräsidiums Freiburg archiviert. Zu nennen sind insbesondere:

FRITZ Planung GmbH, Bad Urach (Quellmessungen Bad Ditzenbach); GeoExpert ag, Schwerzenbach/Schweiz (Reflexionsseismische Untersuchungen Bad Ditzenbach 1997); HYDROISOTOP, Schweitenkirchen (gasanalytische sowie isoto-penhydrologische und isoto-penphysikalische Untersuchungen); LGRB, Freiburg (Gutachten und Berichte der Autoren); Niedersächsisches Landesamt für Boden-forschung, NLFb, Hannover (Isotopenhydrologische Untersuchungen).

Anschriften der Autoren:

Dr. RUPERT PRESTEL  
Regierungspräsidium Freiburg  
Dienststelle Stuttgart  
Ruppmannstr. 21  
70565 Stuttgart  
E-mail: rupert.prestel@rpf.bwl.de

Dr. WILHELM SCHLOZ  
Flandernstr. 9  
73732 Esslingen  
E-mail: schloz.esslingen@web.de