



Baden-Württemberg

REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG

Abteilung Umwelt

Tiefenwässer im Oberen Muschelkalk Aquifer des Oberrheingrabens und des südwestdeutschen Molassebeckens

Ingrid Stober & Marco Jodocy

Kurzfassung

Aus dem links- und rechtsrheinischen Teil des Oberrheingrabens sowie des baden-württembergischen Teils des Molassebeckens wurden hydrochemische Daten aus Tiefbohrungen zusammengestellt und ausgewertet. Zielhorizont der Untersuchung war der Obere Muschelkalk Aquifer. Die Analysendaten gestatten eine hydrochemische Charakterisierung der im Untergrund zu erwartenden Fluide. Anhand der Untersuchung können Informationen über die Herkunft und Genese der Tiefenwässer gegeben werden. Zudem werden die Sättigungszustände der Wässer in Bezug auf verschiedene Minerale und die Einflüsse von Temperatur- und Druckänderungen sowie Änderungen im pH-Wert diesbezüglich diskutiert. Diese Angaben sind insbesondere für den späteren Anlagenbetrieb von zentraler Bedeutung, wenn es um die Beurteilung der technischen Handhabbarkeit der Tiefenwässer geht.

1 Einleitung

Der Obere Muschelkalk bildet mit seinen oolithischen und dolomitischen Kalken einen bedeutenden Grundwasserleiter und lässt sich in die Obere Hauptmuschelkalk-Formation und die Untere Hauptmuschelkalk-Formation gliedern. Die Mächtigkeit des Gesamtaquifers nimmt zu, wenn die überlagernden Schichten der Lettenkeuper-Formation kalkig-dolomitisch ausgebildet sind. Sollte der Mittlere Muschelkalk ausgelaugt sein, ist eine Verkarstung im Oberen Muschelkalk wahrscheinlich. Den Grundwasserstauer bildet die Salinarformation des Mittleren Muschelkalks. Werden nur die Formationen des Hauptmuschelkalks herangezogen, bewegt sich die im Oberrheingraben zu erwartende Mächtigkeit zwischen 60 und 85 m. Die größten Mächtigkeiten werden dabei in den Regionen um Offenburg und um Heidelberg erwartet. Lediglich im äußersten Norden des Oberrheingrabens wird der Obere Muschelkalk diskordant vom Tertiär überlagert, verliert zunehmend an Mächtigkeit und ist schließlich auf der Höhe Schriesheim komplett abgetragen. Die Ursache dieser Ausdünnung ist auf prätertiäre Hebungsvorgänge und damit verbundene Abtragungsprozesse zurückzuführen (CEC 1979, 1981).

Die klüftigen Dolomite und Kalksteine des Oberen Muschelkalks, vorzugsweise sein oberer Teil, der Trigonodusdolomit, bilden das tiefste bedeutende

Grundwasserstockwerk unter dem baden-württembergischen Teil des Molassebeckens. Seine Mächtigkeit nimmt von etwa 75 m im NW zunächst annähernd gleichmäßig nach SE ab, um ungefähr ab einer Linie Tett nang-Bad Waldsee-Laupheim rasch abzusinken. Im äußersten SE keilt der Obere Muschelkalk gänzlich aus (STOBER & VILLINGER 1997, STOBER 1986, JODOCY & STOBER 2009). Örtlich sind ihm wie im Oberrheingraben hydraulisch auch noch geringmächtige Dolomite des darüber liegenden Unteren Keupers und/oder des darunter liegenden Mittleren Muschelkalks hinzuzurechnen. Unter dem Aquifer des Oberen Muschelkalks wird daher im Folgenden der Gesamtkomplex verstanden.

Im SW-deutschen Teil des Molassebeckens kommt im tieferen Teil des Unteren Muschelkalks als Randfazies wahrscheinlich noch ein weiteres Thermalwasser führendes Grundwasserstockwerk von wenigen Metern Mächtigkeit hinzu, die Muschelsandstein-Formation, besser bekannt unter der Bezeichnung Basissandstein oder Melser Sandstein (GEYER & GWINNER 1991).

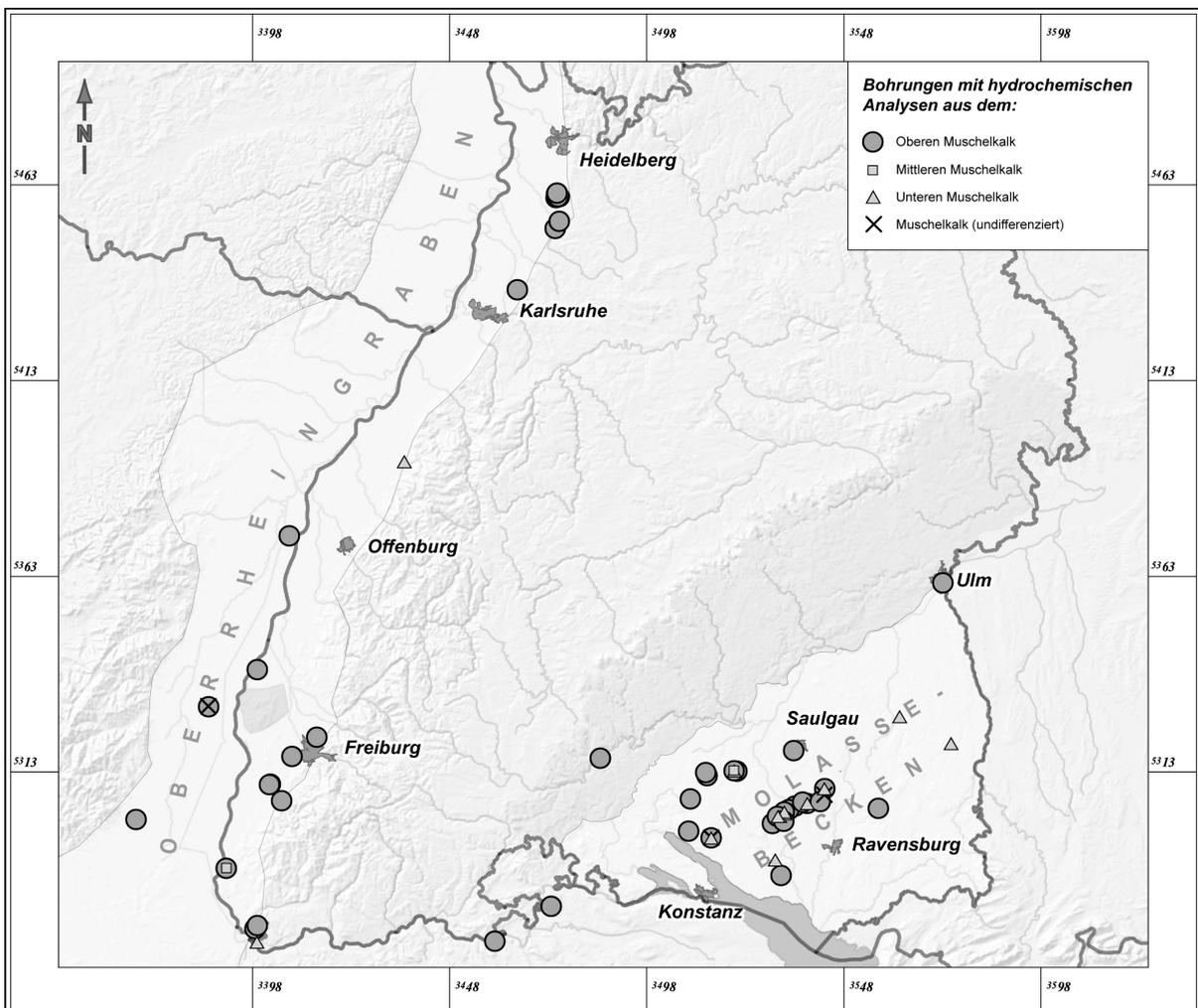


Abb. 1: Lage der Bohrungen mit Wasseranalysen aus dem Muschelkalk.

Daten von bereits vorhandenen Tiefbohrungen sind in der Tiefen Geothermie das entscheidende Werkzeug bei der Abschätzung potenzieller geothermischer

Nutzungsmöglichkeiten des tiefen Untergrunds. In der Regel wurden schon während des Abteufens der Bohrungen hydraulische Untersuchungen durchgeführt und damit auch Wasserproben für eine hydrochemische Analyse gewonnen. Schwerpunkt bildeten dabei über weite Regionen Bohrungen der Kohlenwasserstoff-Industrie, aber auch zahlreiche Forschungs- und Erkundungsbohrungen, Bohrungen der Thermal- und Mineralwassererschließung sowie Rohstoffbohrungen (CARLÉ 1975, HAUBER 1991, GRAF ET AL. 1994, NAGRA 1989, 2001, HE et al. 1999, SCHLOZ & STOBER 2006, PRESTEL & SCHLOZ 2009). Die meisten Bohrungen, aus denen die Proben entstammen, existieren nicht mehr. Details zur damaligen Probennahme, zur Art der hydrochemisch bestimmten Parameter sowie zur Auswahl und Validierung der Analysendaten sind in STOBER & JODOCY (2009, 2011a, 2011b) beschrieben. Abbildung 1 zeigt die Lage der Bohrungen mit Wasseranalysen aus dem Oberen Muschelkalk Aquifer im Oberrheingraben und westlichen Molassebecken, sowie aus dem Unteren Muschelkalk des Molassebeckens.

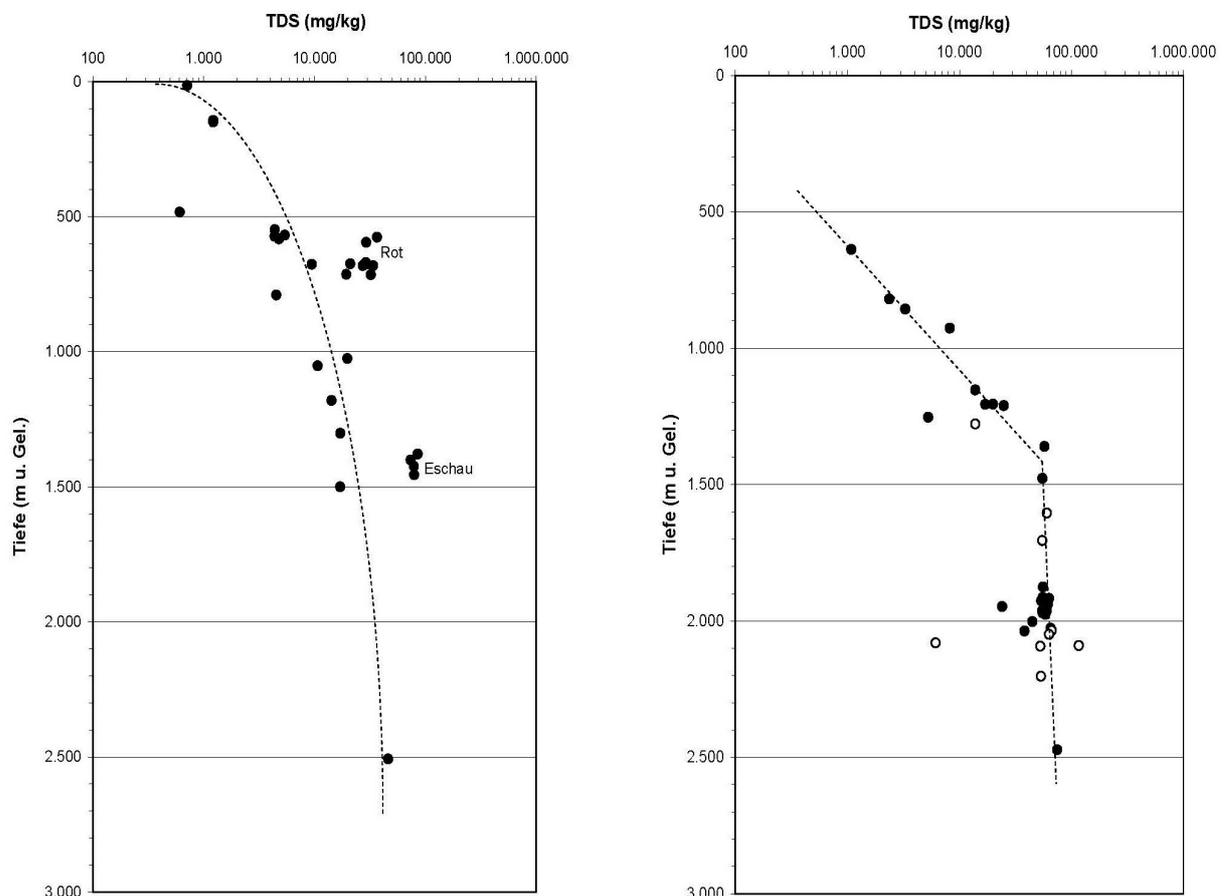


Abb. 2: Gesamtlösungsinhalte der Tiefenwässer im Oberen Muschelkalk Aquifer des Oberrheingrabens (links) und des Molassebeckens (rechts) sowie im Unteren Muschelkalk Aquifer des Molassebeckens (rechts, offene Kreise).

2 Hydrochemische Eigenschaften der Tiefenwässer

Die Tiefenwässer im Oberrheingraben und Molassebecken sind durchweg hochmineralisiert. Wässer, die aus einer Tiefe von über 500 m u. Gel. stammen,

weisen in der Regel einen Gesamtlösungsinhalt (TDS) von deutlich über 1000 mg/l auf. TDS ist somit an die Tiefenlage des Aquifers gekoppelt. Auf Abbildung 2 ist TDS im logarithmischen Maßstab gegen die Tiefe aufgetragen, aus der die jeweilige Wasserprobe stammt. Die Abbildung veranschaulicht, dass es in größeren Tiefen keine gering mineralisierten Wässer gibt. Bereits in 1000 m u.Gel. ist mit einem TDS von über 10 g/kg zu rechnen. Die höchsten Konzentrationen, die in Wasserproben aus Bohrungen im Oberen Muschelkalk Aquifer gemessen wurden, betragen 79,1 g/kg im Oberrheingraben und 74,8 g/kg im Molassebecken. Für den Unteren Muschelkalk Aquifer im Molassebecken wurden etwas höhere Gesamtlösungsinhalte von bis zu 116,5 g/kg beobachtet (Abb. 2). Die Tiefenabhängigkeit des Gesamtlösungsinhaltes lässt sich für den Oberrheingraben durch nachstehende Algorithmen (Gl. 1, 2) beschreiben und kann mit den ermittelten Durchlässigkeiten korreliert werden (Abb. 7a).

$$y = 0,48 \ln(x) + 1,04 \quad (R^2 = 0,54) \quad (\text{Gl. 1})$$

Darin sind x = Tiefe (m u.Gel.) und y = \log TDS (mg/kg). Für den Oberen Muschelkalk Aquifer im Molassebecken konnte mit Gleichung 2 ein plausibler Algorithmus gefunden werden (Abb. 7b).

$$y = 1,31 \ln(x) - 5,21 \quad (R^2 = 0,83) \quad (\text{Gl. 2})$$

Die Abbildungen 3a und 3b zeigen als Schoeller-Diagramme die Hauptinhaltsstoffe der Analysen aus dem Oberen Muschelkalk Aquifer im Oberrheingraben und SW-deutschen Molassebecken. Die Analysen aus dem Unteren Muschelkalk Aquifer des SW-deutschen Molassebeckens sind auf Abbildung 3c dargestellt. Auf der x-Achse sind jeweils die Hauptinhaltsstoffe abgetragen, die y-Achse zeigt die jeweiligen Konzentrationen (mmol(eq)/kg) in logarithmischem Maßstab.

Das Schoeller-Diagramm der Wässer aus dem Oberrheingraben (Abb. 3a) verdeutlicht, dass im Aquifer des Oberen Muschelkalks zwei verschiedene Wassertypen vorliegen können. Die niedriger mineralisierten Wässer in geringeren Tiefen (TB Zähringen, Bohrungen Bad Krozingen, Freiburg) sind reich an Calcium, Sulfat und Hydrogenkarbonat. Die hydrochemischen Eigenschaften der Wässer aus geringer Tiefe werden durch das karbonatische Gestein, dem sie entstammen, und durch das Vorkommen von Sulfaten (Anhydrit, Gips) im Mittleren Muschelkalk geprägt. Die tiefer liegenden Wässer in der inneren Grabenzone sind höher mineralisiert und reich an Natrium und Chlorid (z.B. Geothermiebohrungen Riehen GB1 u. GB2). Der Übergang der beiden Wassertypen ist relativ abrupt (STOBER & JODOCY 2011a). Ähnliche Beobachtungen gelten für den Oberen Muschelkalk Aquifer im SW-deutschen Molassebecken (Abb. 3b). Die Wässer aus geringeren Tiefen (< 900 m) sind dem Ca-SO₄-HCO₃-Typ zuzurechnen (Bohrungen Tuttlingen, Weiach, Benken), während sich tiefer liegende Wässer durch hohe Natrium- und Chlorid-Gehalte auszeichnen. Bei den Wässern aus dem Unteren Muschelkalk Aquifer des SW-deutschen Molassebeckens handelt es sich grundsätzlich um Wässer mit sehr hohen Natrium- und Chlorid-Gehalten (Abb. 3c, STOBER & JODOCY 2011b).

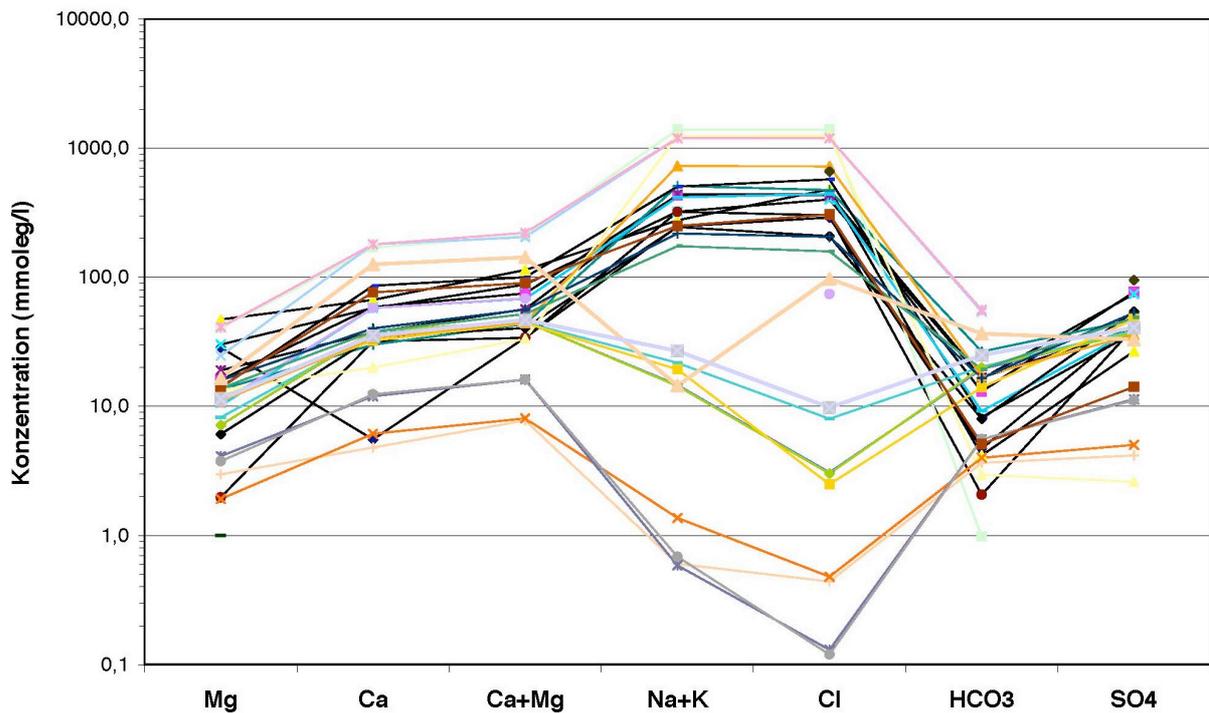


Abb. 3a: Schoeller-Diagramm der Wässer aus dem Oberen Muschelkalk Aquifer im Oberrheingraben.

Unterhalb von etwa 600 m u.Gel. ist im Oberrheingraben Chlorid das dominante Anion, oberhalb sind es Sulfat und Hydrogenkarbonat (Abb. 4a). Ab etwa 700-800 m u.Gel. nimmt der Sulfat-Anteil in den Wässern aus dem Oberen Muschelkalk im Oberrheingraben von z.T. über 60 auf etwa 20 Äqu% und weniger ab. In diesem Tiefenbereich reduziert sich auch der Anteil an Hydrogenkarbonat. Bei Tiefen unter 1100 m werden nur noch Werte von 10 Äqu% und weniger beobachtet, während in Tiefen oberhalb von 600 m u.Gel. der Hydrogenkarbonat-Anteil bei z.T. über 40 Äqu.% lag. Entsprechend verhalten sich die Kationen. Oberhalb von etwa 800-900 m u.Gel. können die Calcium-Anteile z.T. über 60 Äqu% und die Magnesium-Anteile über 30 Äqu% betragen. Unterhalb dieses Tiefenbereichs werden in den Tiefenwässern i.d.R. keine erhöhten Calcium- und Magnesium-Anteile beobachtet. In diesen Tiefen ist Natrium das dominierende Kation. In Abbildung 4a sind die entsprechenden Trendlinien eingetragen, die bei vorgegebener Tiefenlage eine grobe Abschätzung des Wassertyps im Oberrheingraben ermöglichen.

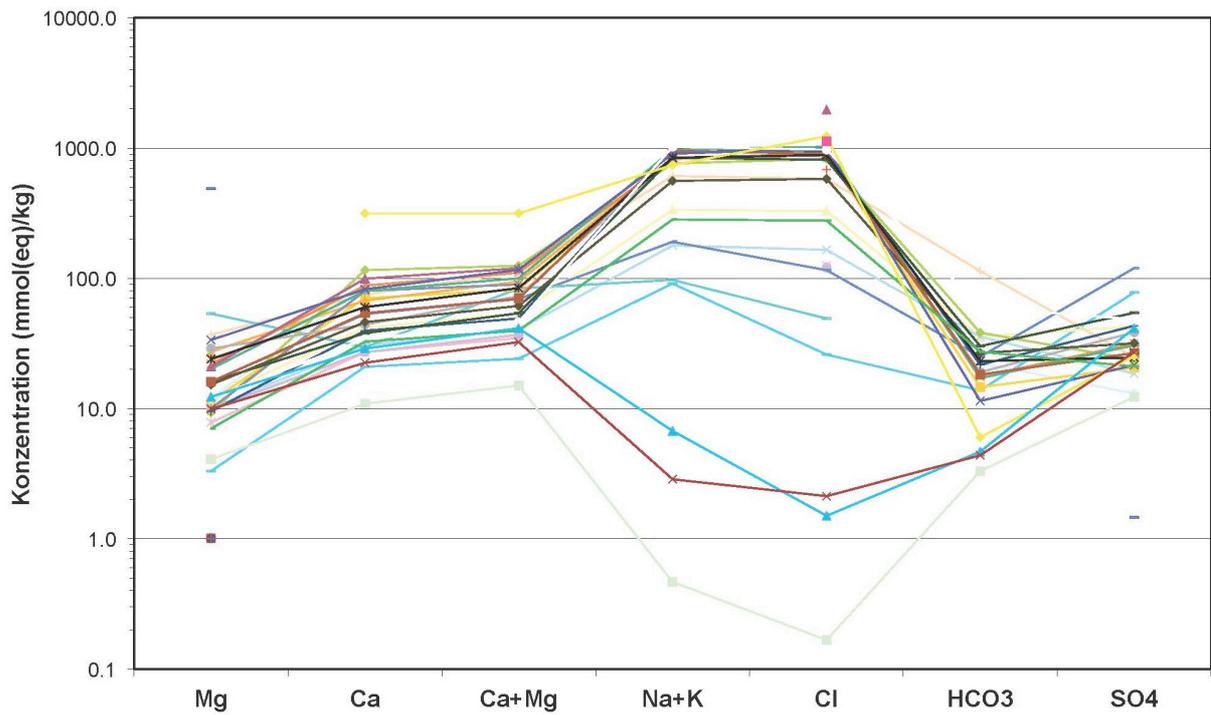


Abb. 3b: Schoeller-Diagramm der Wässer aus dem Oberen Muschelkalk Aquifer im SW-deutschen Molassebecken.

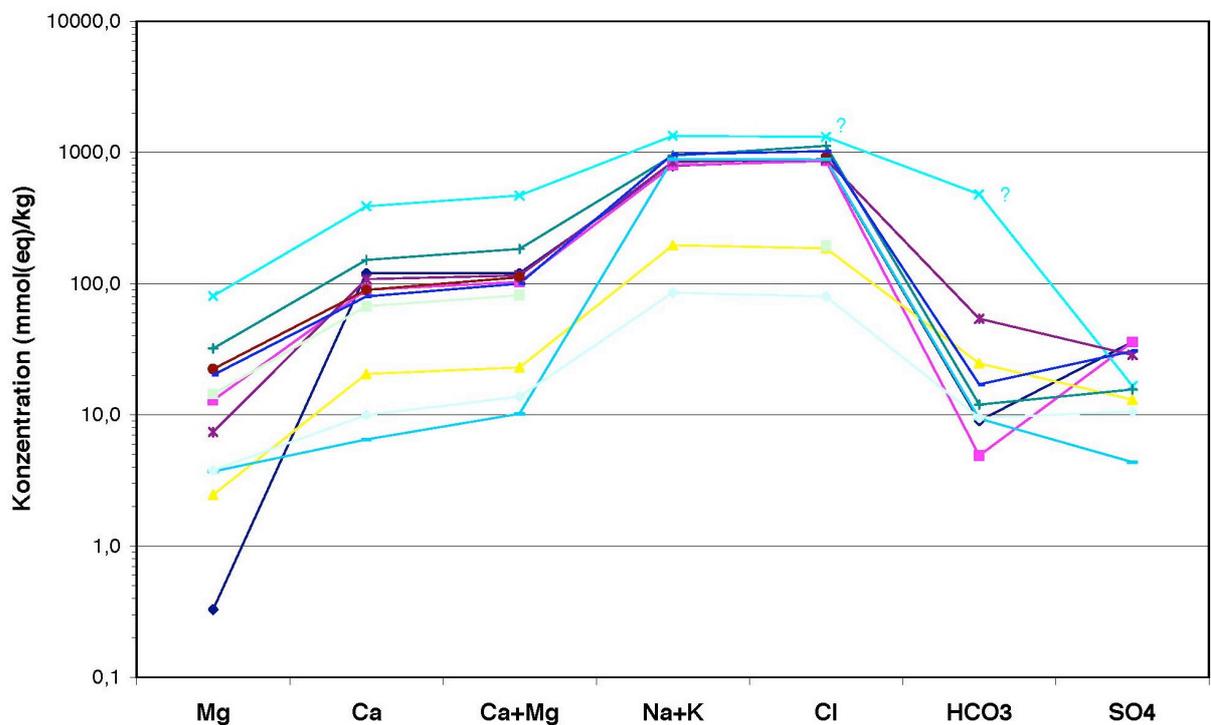


Abb. 3c: Schoeller-Diagramm der Wässer aus dem Unteren Muschelkalk Aquifer im SW-deutschen Molassebecken.

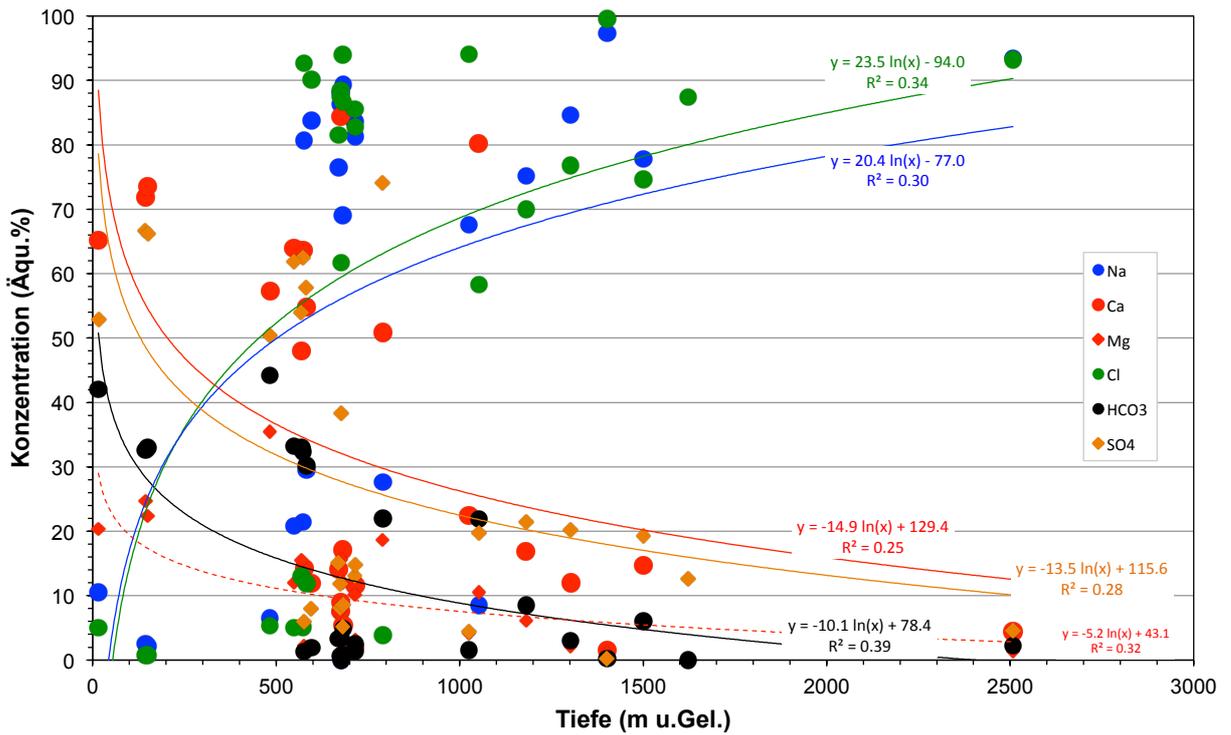


Abb. 4a: Änderung des Wassertyps mit zunehmender Tiefenlage im Oberen Muschelkalk Aquifer des Oberrheingrabens. Für die einzelnen Inhaltsstoffe sind entsprechende Trendlinien eingetragen.

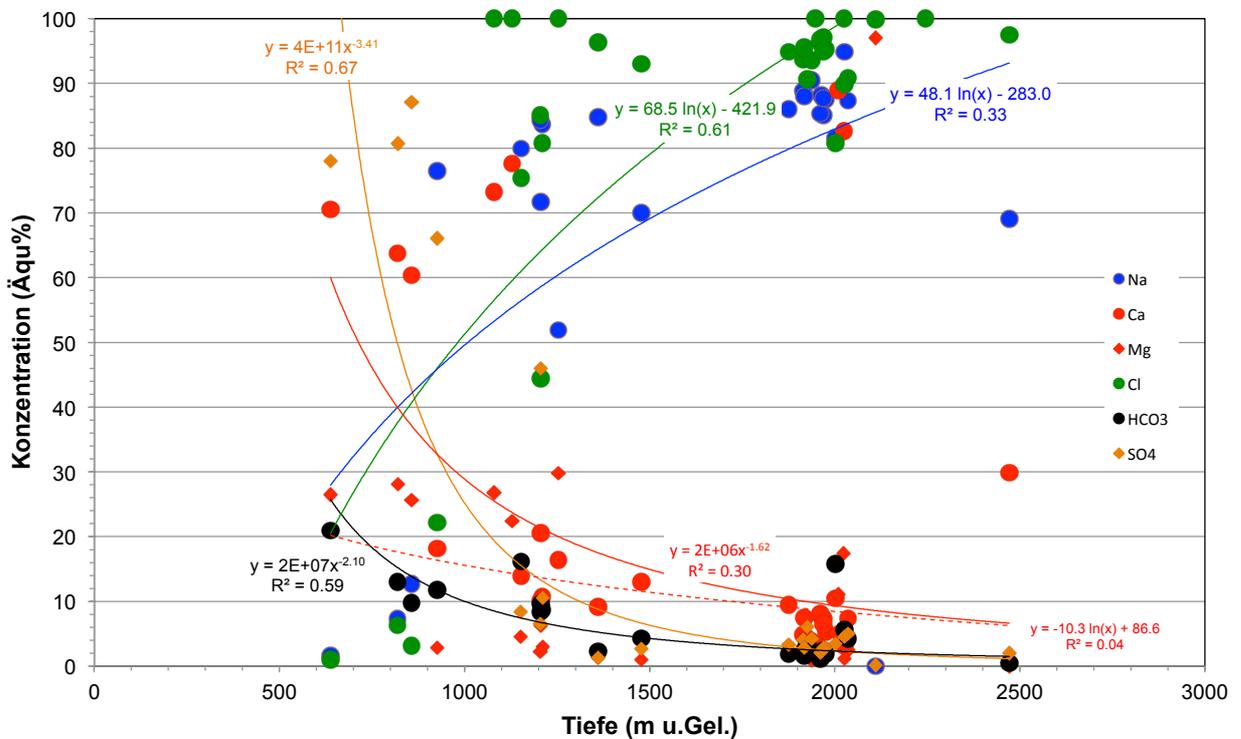


Abb. 4b: Änderung des Wassertyps mit zunehmender Tiefenlage im Oberen Muschelkalk Aquifer des Molassebeckes. Für die einzelnen Inhaltsstoffe sind entsprechende Trendlinien eingetragen.

Entsprechende Untersuchungen wurden im Oberen Muschelkalk Aquifer des Molassebeckens vorgenommen (Abb. 4b). Die Tendenz ist grundsätzlich vergleichbar mit derjenigen des Oberrheingrabens. Aufgrund der geologischen Situation existieren im Molassebecken keine Analysen aus geringen Tiefen, was eine mathematische Beschreibung erschwert (Abb. 4b). Die Trendwende zum Na-Cl-Wassertyp setzt im Molassebecken in Tiefen unterhalb von 1100-1200 m u.Gel. ein. Unterhalb dieser Tiefe weisen die Wässer nur noch Sulfat-Anteile von weniger als 10 Äqu% auf, während sie in flacheren Bereichen bei 70 Äqu% und sogar über 80 Äqu% liegen.

Da alle vorliegenden Analysen der Wässer aus dem Unteren Muschelkalk Aquifer im Molassebecken aus sehr großen Tiefen stammen war hier keine Untersuchung einer Tiefenabhängigkeit des Wassertyps möglich. Den zu erwartenden Wassertyp zeigt Abb. 3c, den zu erwartenden Gesamtlösungsinhalt Abb. 2.

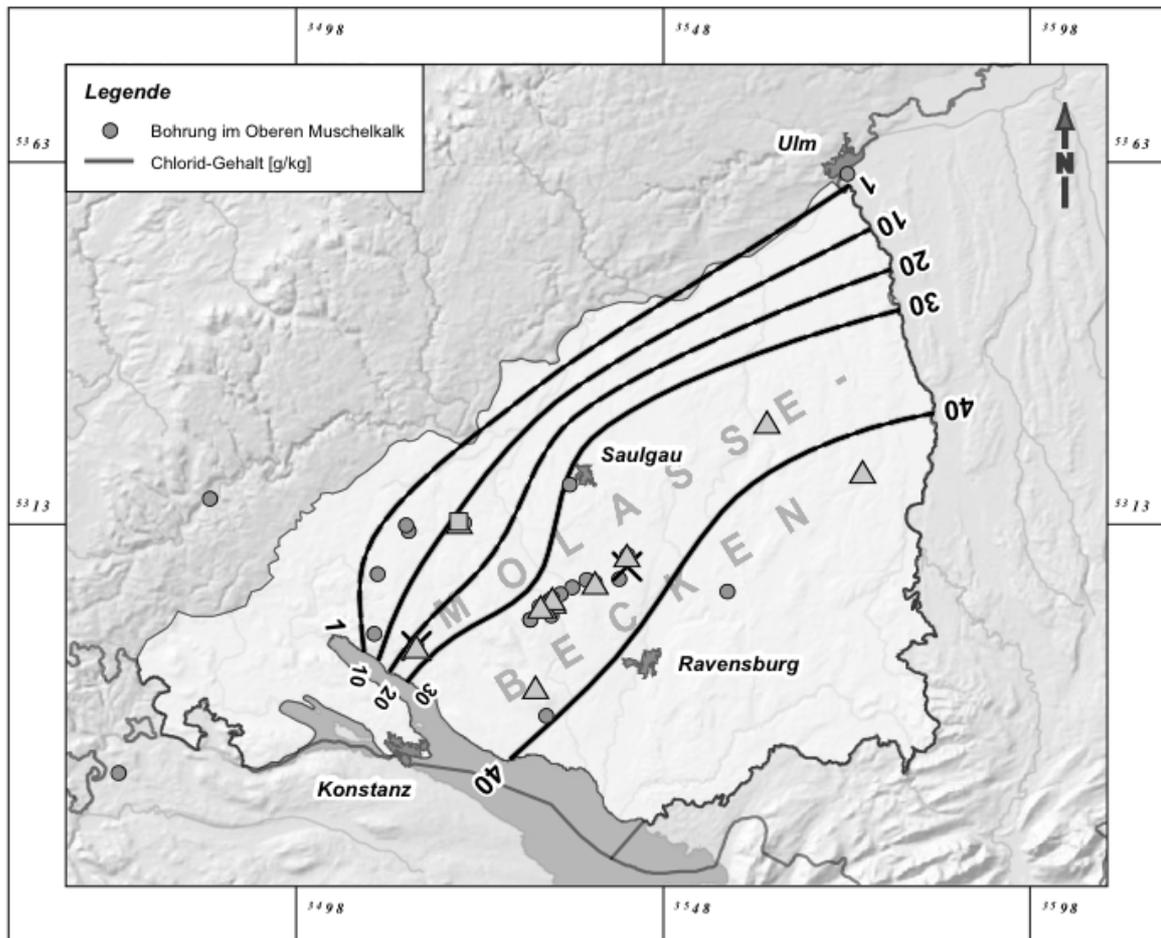


Abb. 5: Chlorid-Gehalte im Oberen Muschelkalk Aquifer des SW-deutschen Molassebeckens.

Für den Oberen Muschelkalk Aquifer im Oberrheingraben ergaben sich keine Hinweise auf regionale hydrochemische Trends. Dies gilt auch für den Unteren Muschelkalk Aquifer im SW-deutschen Molassebecken. Für den Oberen Muschelkalk

Aquifer im SW-deutschen Molassebecken konnte eine systematische Zunahme der Chlorid-Gehalte nach SE festgestellt werden (Abb. 5).

3 Gasgehalte

Leider gibt es nur sehr selten Untersuchungen auf Gasgehalte in den Tiefenwässern des Oberen Muschelkalk Aquifers. Die wenigen vorliegenden Analysen beschränken sich ausschließlich auf CO₂- und H₂S-Messungen von Wässern aus Thermalwasser- und Geothermiebohrungen. Von den Wässern der Kohlenwasserstoff-Bohrungen im Oberrheingraben liegen keine Messungen auf Gasgehalte vor, im Molassebecken nur einige wenige.

Im Oberrheingraben sind die CO₂-Gehalte der Wässer in flachen Bohrungen sehr niedrig. In den tieferen Thermalwasserbohrungen wurden in der Regel CO₂-Gehalte von bis zu einigen 100 mg/kg angetroffen. Deutlich höhere Werte von über 1000 mg/kg zeigen die Thermalwasserbohrungen Bad Krozingen und die Bohrung Bellingen III. In den beiden, deutlich tieferen Geothermiebohrungen Riehen betragen die CO₂-Gehalte der Wässer jedoch weniger als 20 mg/kg. Die wenigen gemessenen H₂S-Gehalte lassen auf sehr geringe Vorkommen von H₂S in den Tiefenwässern des Oberen Muschelkalk Aquifers im Oberrheingraben schließen.

Im Molassebecken ist die Datengrundlage noch spärlicher als im Oberrheingraben. Die wenigen vorliegenden Messwerte von Kohlenwasserstoffbohrungen aus dem tieferen zentralen Bereich des Molassebeckens lassen im Unteren und Oberen Muschelkalk Aquifer CO₂-Gehalte von einigen 100 mg/kg vermuten. In den Thermalwässern der Geothermiebohrung Tuttlingen wurden lediglich 25 mg/kg und in der Erkundungsbohrung Weiach 48 mg/kg gemessen. Die wenigen Messdaten von H₂S-Gehalten lassen auf äußerst geringe Gehalte im Molassebecken schließen.

4 Temperaturen der Tiefenwässer im Oberen Muschelkalkaquifer

Abbildung 6 zeigt die in den einzelnen Bohrungen anhand von geophysikalischen Bohrloch-Logs zusammengestellten Aquifertemperaturen in Abhängigkeit von der Tiefenlage. Die Abbildung veranschaulicht, dass sowohl im Oberrheingraben als auch im Molassebecken meistens erhöhte mittlere Temperaturgradienten ($\text{gradT} > 3^\circ\text{C}/100\text{m}$) vorliegen. Die durchschnittlichen Temperaturgradienten liegen zwischen $\text{gradT} = 3^\circ\text{C}/100\text{m}$ und $\text{gradT} = 6^\circ\text{C}/100\text{m}$. Erhöhte Temperaturgradienten können auf verschiedenen Ursachen beruhen. Sie können beispielsweise auf aufsteigende Tiefenwässer, auf günstige Wärmeleitfähigkeiten in der durchteuften Schichtenabfolge u.a. zurückgeführt werden.

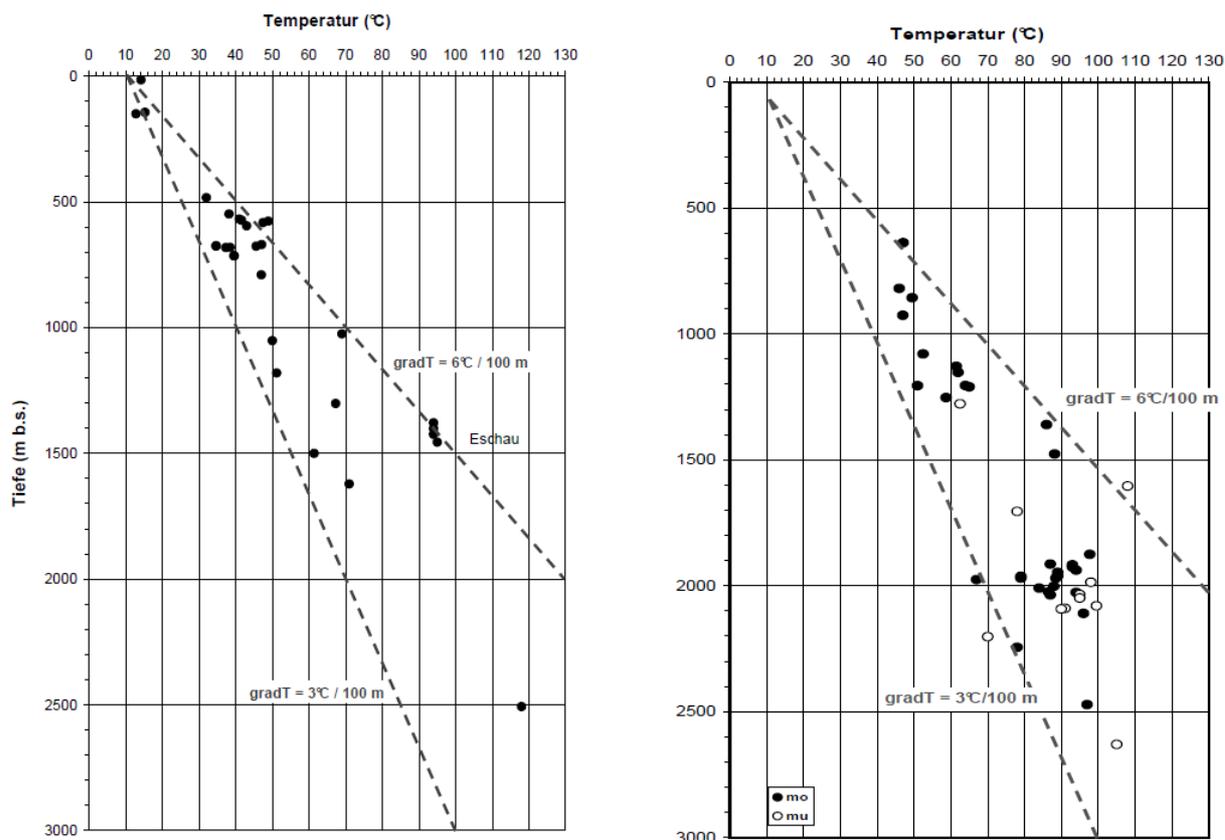


Abb. 6: In den Bohrungen des Oberen Muschelkalk Aquifers im Oberrheingraben (links) und im SW-deutschen Molassebecken (rechts) gemessene Temperaturen. Auf der rechten Abbildung sind zusätzlich die Temperaturen im Unteren Muschelkalk Aquifer des SW-deutschen Molassebeckens eingetragen.

Im Fall des Oberen Muschelkalkaquifers ist die saline Komponente in den Tiefenwässern höchst wahrscheinlich auf Halitlösung im Mittleren Muschelkalk durch aufsteigende Wässer zurückzuführen (STOBER 1995, HE et al. 1999, STOBER & BUCHER 2000, STOBER & JODOCY 2011a).

5 Sättigungszustände der Tiefenwässer

Mit Hilfe des Computerprogramms PHREEQC Interactive, Version 2.12.5, (PARKHURST et al. 1980) wurde auf der Basis der Datenbank der LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory, WOLERY 1979) der chemische Ist-Zustand der Tiefenwässer mit dem theoretischen Gleichgewichtszustand verglichen. Auf diese Weise wurde untersucht, inwieweit die Konzentration einzelner Inhaltsstoffe in den Wässern durch die Löslichkeit von Primär- und Sekundärmineralen kontrolliert wird.

Die Tiefenwässer aus dem Oberen Muschelkalk Aquifer scheinen demnach unter Aquiferbedingungen in Bezug auf Quarz und Chalzedon gesättigt bis leicht übersättigt zu sein. Aus kinetischen Gründen sind jedoch keine nennenswerten Ausfällungen von Quarz im relevanten Temperaturbereich zu erwarten. Werden die Wässer auf die

Karbonate untersucht, so ergibt sich folgendes Bild: Bezüglich Calcit sind die Wässer gesättigt bis leicht übersättigt, während sie in Bezug auf Aragonit nahezu gesättigt sind. Bezüglich Dolomit sind die Tiefenwässer leicht übersättigt und bezüglich Magnesit leicht untersättigt. Sämtliche Wässer sind bezüglich Gips und Anhydrit gesättigt bis leicht untersättigt. Bezüglich Fluorit sind die Wässer nahezu gesättigt, z.T. auch untersättigt. Auffallend ist die Sättigung bis hin zur leichten Übersättigung bezüglich Baryt. Bei Erniedrigung der Temperatur, z.B. durch Wärmeentzug, erhöht sich der Grad der Sättigung. Ausfällungen von Baryt in Geothermieanlagen könnten daher eventuell Probleme verursachen.

In über Tage geschlossenen Zirkulations-Systemen sind die Sättigungszustände bezüglich vieler Minerale von den physikalischen Eigenschaften abhängig, denen die Tiefenwässer unterliegen. Sie werden von den jeweils herrschenden Druck- und Temperaturbedingungen bestimmt. Bereits bei der Förderung von Tiefenwässern nehmen der Druck stark und geringfügig auch die Temperatur ab. Bei der Passage durch das oft verwinkelte Leitungssystem an der Erdoberfläche bilden sich immer wieder Druckschatten. Durch den Temperaturentzug beim Durchströmen des Wärmetauschers an der Erdoberfläche erfolgt die wesentliche Temperaturabnahme des Tiefenwassers. Bei Reduktion der Temperatur im relevanten Temperaturbereich von 160°C bis auf 70°C nehmen beispielsweise die Sättigungszustände von Anhydrit, Gips und Calcit ab, d.h. rein auf der Basis der Temperaturabnahme wären keine Ausfällungen dieser Minerale zu erwarten. Da sich jedoch auch der Druck auf das Fluid reduziert, und dieser Effekt z.B. bei Calcit dominiert, sind Calcit ausfällungen zu erwarten. Völlig anders verhält sich Quarz. Im Niedertemperaturbereich nimmt der Sättigungszustand bezüglich Quarz mit sinkender Temperatur zu. Ausfällungen sind hier jedoch aus kinetischen Gründen kaum zu erwarten.

6 Wechselwirkung von Hydrochemie und Hydraulik

Die Durchlässigkeiten im Oberen Muschelkalk Aquifer nehmen mit zunehmender Tiefe ab. Allerdings ist diese Abnahme im Oberrheingraben unterhalb von etwa 600 m im Vergleich zum Molassebecken sehr gering. Die Abbildungen 7a und 7b kombinieren die Ergebnisse von Hydraulik und Hydrochemie. Sowohl im Oberrheingraben als auch im Molassebecken ist der Gesamtlösungsinhalt an die Durchlässigkeit gekoppelt. Mit zunehmender Tiefe nehmen im Oberen Muschelkalk Aquifer die Durchlässigkeit ab und TDS entsprechend zu.

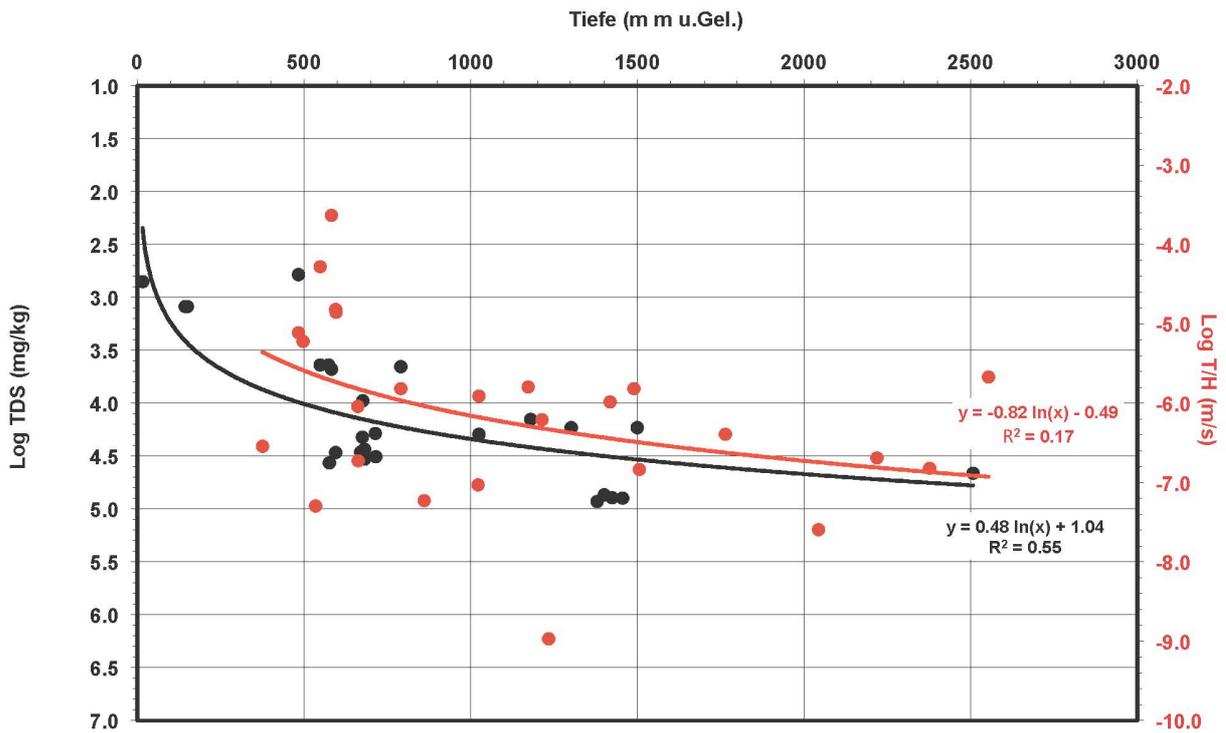


Abb. 7a: Durchlässigkeit (T/H) und Gesamtlösungsinhalt (TDS) in Abhängigkeit von der Tiefenlage des Oberen Muschelkalk Aquifers im Oberrheingraben.

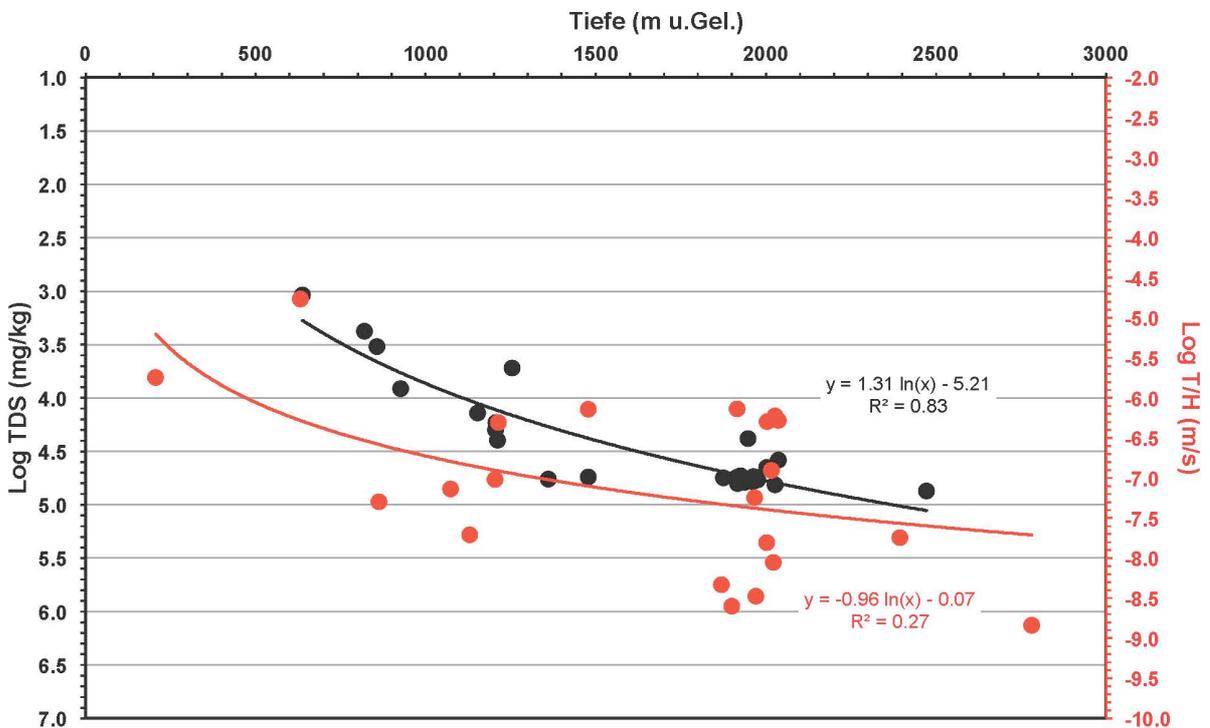


Abb. 7b: Durchlässigkeit (T/H) und Gesamtlösungsinhalt (TDS) in Abhängigkeit von der Tiefenlage des Oberen Muschelkalk Aquifers im Molassebecken.

7 Zusammenfassung

Die Tiefenwässer weisen einen hohen Gesamtlösungsinhalt von einigen 10er g/kg auf, wobei sich der Wassertyp mit zunehmender Tiefenlage des Aquifers durch hohe Natrium- und Chloridgehalte auszeichnet. Zur Abschätzung der Gesamtmineralisation (TDS) der Wässer im Oberrheingraben und SW-deutschen Molassebecken konnten Algorithmen (Gl. 1, 2) entwickelt werden, ebenso für die Hauptinhaltsstoffe der Wässer (Abb. 4a, 4b). Damit ist es möglich, in Abhängigkeit von der Tiefenlage überschlägig den Gesamtlösungsinhalt abzuschätzen sowie die Größe der Hauptinhaltsstoffe. Zur Höhe Durchlässigkeit des Aquifers konnte eine mathematische Beziehung aufgestellt werden

Die hydrochemischen Eigenschaften der Wässer im Aquifer des Oberen Muschelkalkes werden nicht nur durch die karbonatischen Gesteine vorgegeben, sondern sie werden teilweise auch durch das Vorkommen von Sulfaten (Anhydrit, Gips) geprägt. Weitgehend dürfte die erhöhte Salinität durch Halitlösung im Mittleren Muschelkalk durch aufsteigende Tiefenwässer verursacht sein. Eine zusätzliche saline Komponente fossilen Meerwassers kann nicht ausgeschlossen werden. Grundsätzlich ist mit dem Vorkommen von erhöhten CO₂-Gehalten zu rechnen.

7 Dank

Dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) recht herzlichen Dank für die Unterstützung des Projekts. Ebenfalls vielen Dank dem „Service Géologique Régional Alsace“ des „Bureau des Recherches Géologiques et Minières“ (BRGM) in Straßburg für die freundliche Unterstützung und die Freigabe der französischen Analysendaten. Recht herzlichen Dank den Kohlenwasserstofffirmen (ExxonMobil Production Deutschland GmbH, Gaz de France Suez Produktion Exploration Deutschland GmbH, RWE Dea AG, Wintershall Holding GmbH) für die Erlaubnis zur Dateneinsicht und Datennutzung sowie dem WEG (Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung e.V.) für die freundliche Unterstützung. Recht herzlichen Dank den studentischen Hilfskräften Ralf Person und Mathias Burisch.

Literatur

CARLÉ, W. (1975): Die Mineral- und Thermalwässer von Mitteleuropa. - Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, 643 S., Stuttgart.

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES (CEC) (1979): Geothermische Synthese des Oberrheingrabens. - BRGM Alsace & Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Strasbourg Freiburg.

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES (CEC) (1981): Geothermische Bestandsaufnahme des Oberrheingrabens. - Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg.

- GEYER, O.F., GWINNER, M.P. (1991): Geologie von Baden-Württemberg. - 4. Auflage, Springer Verlag, 482 S., Stuttgart.
- GRAF, W., TIMBORN, P. & UFRECHT, W. (1994): Isotopengeochemische Charakterisierung des Karstgrundwassers im Oberen Muschelkalk im Großraum Stuttgart unter besonderer Berücksichtigung von Sauerstoff-18 und Schwefel-34. - In: Ufrecht, W. & Einsele, G. (Hrsg.): Das Mineral- und Heilwasser von Stuttgart. - Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, H. 2/1994, S. 75-115. Stuttgart.
- HAUBER, L. (1991): Ergebnisse der Geothermiebohrungen Riehen 1 und 2 sowie Reinach im Südosten des Rheingrabens. - Geol. Jb., E 48, 167-184, Hannover.
- HE, K. & STOBER, I. & BUCHER, K. (1999): Chemical Evolution of Thermal Waters from Limestone Aquifers of the Southern Upper Rhine Valley. - Applied Geochemistry, 14, 223 – 235, Exeter/UK.
- Jodocy, M. & Stober, I. (2009): Geologisch-geothermische Tiefenprofile für den südwestlichen Teil des Süddeutschen Molassebeckens. - Z. dt. Ges. Geowiss., 160/4, S. 359-366, Stuttgart.
- NAGRA (1989): Sondierbohrung Weiach, Untersuchungsbericht. - Technischer Bericht NTB 88-08, 183 S., Baden/Schweiz.
- NAGRA (2001): Sondierbohrung Benken, Untersuchungsbericht. - Technischer Bericht NTB 00-01, 288 S., 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, 210 S., Boulder/USA.
- PRESTEL, R. & SCHLOZ, W. (2009): Die hydrogeologischen Ergebnisse der Thermalwasserbohrung in den Oberen Muschelkalk für das Merkel'sche Bad in Esslingen am Neckar. - Jh. Ges. Naturkde. Württemberg, 165/1, S. 13-39, Stuttgart.
- SCHLOZ, W. & STOBER, I. (2006): Mineral-, Heil- und Thermalwässer, Solen und Säuerlinge in Baden-Württemberg. - LGRB-Fachbericht 1 (überarbeitete Fassung), 20 S., Freiburg i. Br..
- STOBER, I. (1995): DIE Wasserführung des kristallinen Grundgebirges.- Enke Verlag, 191 S., Stuttgart.
- STOBER, I. & BUCHER, K. (2000): Herkunft der Salinität in Tiefenwässern des Grundgebirges – unter besonderer Berücksichtigung der Kristallinwässer des Schwarzwaldes. - Grundwasser, 3, 125 – 140, Berlin Heidelberg.

- Stober, I. (1986): Strömungsverhalten in Festgesteinsaquiferen mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen. - Geologisches Jahrbuch, Reihe C, Heft 42, 204 S., Hannover.
- 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, H. **37**: S. 77-96; Freiburg i. Br..
- STOBER, I. & JODOCY, M. (2009): Eigenschaften geothermischer Nutzhorizonte im baden-württembergischen und französischen Teil des Oberrheingrabens. – Grundwasser, 14, 127-137, Berlin Heidelberg.
- STOBER, I. & JODOCY, M. (2011a): Hydrochemie der Tiefenwässer im Oberrheingraben - eine Basisinformation für geothermische Nutzungssysteme. – Z. geol. Wiss., 39, 1, S. 39 - 57.
- STOBER, I. & JODOCY, M. (2011b): Geothermische Nutzhorizonte im westlichen Teil des Süddeutschen Molassebeckens.- Z. geol. Wiss., Bd. 39, H. 3/4, S. 161-172.
- WOLERY, T. J. (1979): Calculation of Chemical Equilibrium between Aqueous Solutions and Minerals: The EQ3/6 Software Package: UCRL-52658. - Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California.