



GtV
Bundesverband
Geothermie

Hintergrundpapier

Geothermale Tiefenwässer
in Deutschland

Dieses **Hintergrundpapier** ist ein Papier des GtV-Bundesverbandes Geothermie. Die letzte inhaltliche Verantwortung trägt das Präsidium des Bundesverbandes Geothermie. Es wurde in einer Arbeitsgruppe erarbeitet, mit Beiträgen von Ingrid Stober, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Markus Wolfgramm und Johannes Birner, Geothermie Neubrandenburg (GTN).

Stand: März 2014

Herausgeber:

GtV-Bundesverband Geothermie e.V.
Albrechtstraße 22
10117 Berlin

Tel.: 030/ 200 95 495 - 0

Fax: 030/ 200 95 495 - 9

info@geothermie.de

www.geothermie.de

Autoren:

Ingrid Stober, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), AGW, Adenauerring 20b, D-76131 Karlsruhe, ingrid.stober@kit.edu

Markus Wolfgramm, Johannes Birner, Geothermie Neubrandenburg (GTN), Seestraße 7a, D-17033 Neubrandenburg, gtn@gtn-online.de

Inhalt

1	Einleitung.....	4
2	Oberrhein graben.....	5
3	Süddeutsches Molassebecken	8
4	Norddeutsches Becken.....	12
5	Literatur.....	17

Die meisten Tiefenwässer in Deutschland mit Ausnahme des Wassers im Oberjura des Süddeutschen Molassebeckens sind hochmineralisiert, wobei mit erhöhten Gasgehalten zu rechnen ist. Dies hat neben der erhöhten Temperatur und Druck einen Einfluss auf die thermische Leistung und ist auch relevant für die Betriebsführung. Schon aus diesem Grund ist die Betrachtung der Wasserchemie von herausragendem Interesse.

Das vorliegende Papier beschreibt die hydrochemischen Eigenschaften der Tiefenwässer, die in den geothermisch relevanten Regionen in Deutschland vorliegen. Dazu gehören der Oberrheingraben, das Süddeutsche Molassebecken und das Norddeutsche Becken (Abb. 1).

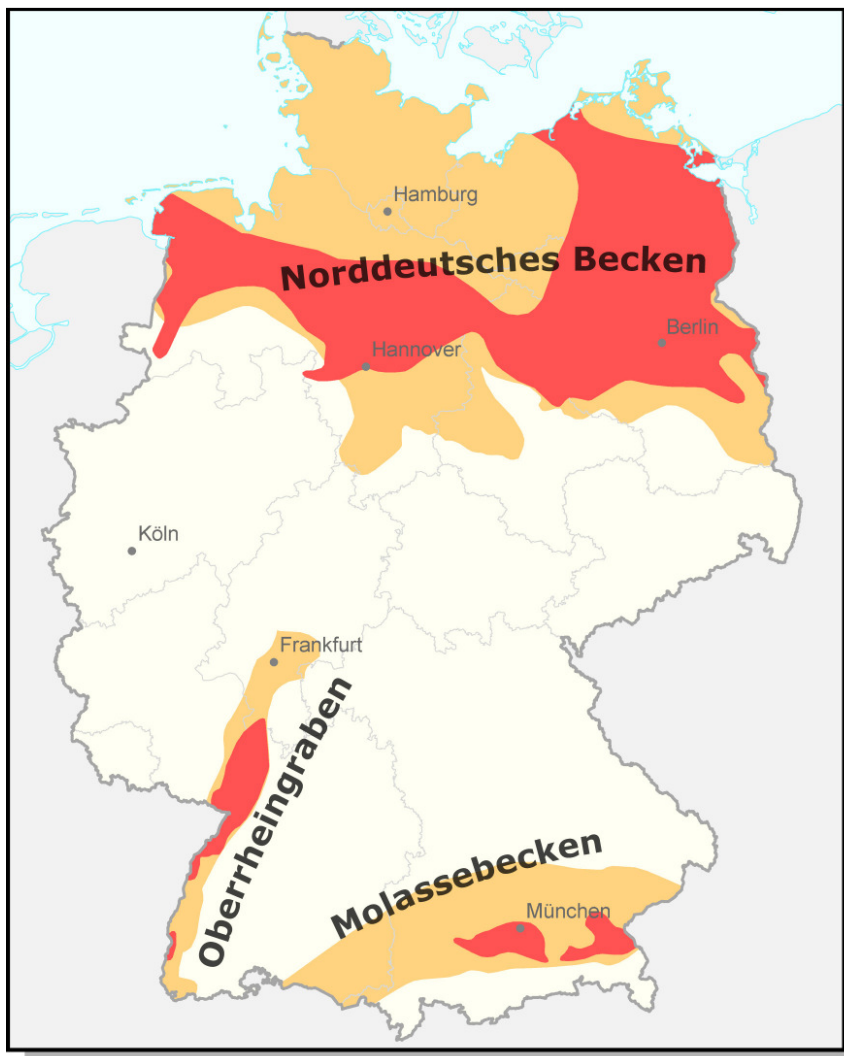


Abb. 1: Bedeutende tiefengeothermische Regionen in Deutschland (Schulz et al. 2007)

1 Einleitung

Der Anteil erneuerbarer Energien an der Gesamtenergieversorgung der Bundesrepublik Deutschland soll in den nächsten Jahren ausgebaut werden. Die Bundesregierung unterstützt daher im Bereich der Tiefen Geothermie verschiedene Projekte im Sinne eines Beitrags zur Qualitätsverbesserung bei der Planung und Vorbereitung von Geothermieprojekten.

Für den späteren Anlagenbetrieb sind insbesondere auch die hydrochemischen Eigenschaften der thermalen Tiefenwässer von zentraler Bedeutung, da für die geothermische Energiegewinnung als Wärmeträger das jeweils in den Grundwasserleitern vorhandene Tiefenwasser genutzt wird. In diesem Papier wollen wir einen Überblick über die wesentlichen hydrochemischen Parameter der Tiefenwässer geben.

Zu den wichtigsten Regionen Deutschlands für hydrogeothermische Nutzungen gehören das Norddeutsche Becken, das Süddeutsche Molassebecken und der Oberrheingraben ([Abb. 1](#)). Das vorliegende Hintergrundpapier beschränkt sich auf diese Regionen.

Die Zusammensetzung der Tiefenwässer in Deutschland ist sehr unterschiedlich. Bei den meisten Tiefenwässern, mit Ausnahme der Oberjura-Wässer (ältere Bezeichnung: Malm) im süddeutschen Molassebecken, handelt es sich um hochmineralisierte saline, oft auch gasreiche Thermalwässer. Für die Planung und Installation der ober- und untertägigen technischen Anlagenteile müssen die Eigenschaften der Wässer berücksichtigt werden, da sie entscheidenden Einfluss auf die Auswahl der einzusetzenden Materialien und die Dimensionierung bestimmter funktionaler Gruppen besitzen.

Tiefenwässer sind **Grundwässer**, also unterirdische Wässer, die die Hohlräume im Untergrund zusammenhängend erfüllen und aus größerer Tiefe stammen. Eine präzise Mindesttiefe ist dabei jedoch nicht vorgegeben, allerdings wird von Tiefenlagen von einigen 100 m ausgegangen. Zumeist handelt es sich bei Tiefenwässern um **Thermalwässer**, also um Wässer, die unabhängig von ihrem Gesamtlösungsinhalt an der Austrittsstelle Temperaturen von mindestens 20°C aufweisen. Davis & de Wiest (1969) typisieren die Wässer anhand des Gesamtlösungsinhaltes:

- Süßwasser < 1 g/kg
- Brackwasser 1 - 10 g/kg
- Salzwasser 10 - 100 g/kg
- Sole > 100 g/kg

Vielfach wird die Grenze zwischen Süß- und Salzwasser jedoch auch bei der Geschmacksgrenze von 250 mg/l gezogen. **Trinkwasser** ist Wasser für den menschlichen Bedarf, d.h. es ist Süßwasser mit einem hohen Reinheitsgebot. Tiefenwässer erfüllen in der Regel diese Anforderungen nicht; nur das Wasser des Oberjura-Aquifers in weiten Bereichen des Süddeutschen Molassebeckens könnte nach Aufbereitung und Abkühlung als Trinkwasser genutzt werden. **Mineralwässer** sind Grundwässer mit besonderen Eigenschaften. Dazu gehören bspw. das ursprüngliche Reinheitsgebot sowie die gleichbleibende Wasserchemie. Der Gesamtlösungsinhalt der Mineralwässer liegt häufig über demjenigen von Süßwasser.

In tief liegenden **Grundwasserleitern** kann der Begriff **Aquifer** synonym mit Grundwasserleiter verwendet werden.

2 Oberrheingraben

Im Oberrheingraben beherbergt der tiefe Untergrund verschiedene Reservoirs mit heißen Wässern, die mit Temperaturen über 60°C zur direkten Wärmenutzung, darüber hinaus bei Temperaturen von über 120°C auch zur grundlastfähigen Stromerzeugung genutzt werden können, wenn entsprechend hohe Ergiebigkeit vorliegen. Zielhorizonte sind primär der Obere Muschelkalk und der Buntsandstein, darüber hinaus im südlichen Grabenbereich der Hauptrogenstein sowie im nördlichen Grabenabschnitt bereichsweise sandige Lagen in der mächtigen tertiären Schichtenfolge.

Die Gesteine des Buntsandsteins (s) lassen sich als Kluft-Grundwasserleiter charakterisieren. Die Mächtigkeit des Buntsandsteins steigt von Süden mit 60 m auf bis zu über 500 m nördlich von Karlsruhe an. Nach Norden wurde der Buntsandstein erodiert, d.h. es findet eine allmähliche Ausdünnung statt (CEC 1979, 1981). Die jüngeren tertiären Schichten überlagern den Buntsandstein diskordant.

Der Obere Muschelkalk (mo) 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. Den Grundwasserstauer bildet die Salinarformation des Mittleren Muschelkalks. Werden nur die Formationen des Hauptmuschelkalks herangezogen, bewegt sich die zu erwartende Mächtigkeit zwischen 60 und 85 m. Lediglich im äußersten Norden wird der Obere Muschelkalk diskordant vom Tertiär überlagert, verliert zunehmend an Mächtigkeit und fehlt vollständig.

Im südlichen Grabenabschnitt zwischen Basel und Straßburg ist zusätzlich der Hauptrogenstein (bjHR) des Dogger von hydrogeothermischer Bedeutung, ein meist porenreicher, klüftiger und in der Nähe von Verwerfungen häufig stark verkarsteter Grundwasserleiter (Geyer & Gwinner 1991). Die Mächtigkeit des Hauptrogensteins nimmt von Süden von bis zu 120 m nach Norden ab. Nördlich von Straßburg hat der Hauptrogenstein aufgrund seiner tonigen Ausbildung keine hydrogeothermische Bedeutung mehr.

Innerhalb der tertiären Schichtenabfolge (t) im Oberrheingraben kommen nördlich von Straßburg als potentielle hydrothermale Nutzhorizonte insbesondere die Niederröden-Formation (tN), die Cyrenenmergel und Melettaschichten innerhalb der Froidefontaine-Formation (tFR) sowie die Oberen und Unteren Pechelbronn-Schichten innerhalb der Pechelbronn-Formation (tPE) in Frage (Doebel, 1970, Geyer & Gwinner 1991, Pflug 1982, Schad 1962, Weber 1935, Wirth 1962, Wittmann 1965, Grimm et al. 2011, CEC 1981).

Die hydrochemischen Daten stammen aus dem links- und rechtsrheinischen Teil und damit auch aus dem französischen Teil des Oberrheingrabens. Schwerpunkt der Datengrundlage stellen Bohrungen der Kohlenwasserstoff-Industrie dar, aber auch zahlreiche Forschungs- und Erkundungsbohrungen, Bohrungen der Thermal- und Mineralwassererschließung sowie Rohstoffbohrungen (Carlé 1975, Hauber 1991, He et al. 1999, Schloz & Stober 2006, Prestel & Schloz 2009, CEC 1979, 1981). Aussagen zur Hydrochemie von Aquiferen in größeren Tiefenlagen wurden erst in den letzten Jahren im Zuge neuer Forschungsprojekte möglich (Schulz et al 2007, Stober & Jodocy 2009).

Im Oberrheingraben liegen erhöhte Temperaturgradienten vor. Die Tiefenwässer im Oberrheingraben sind durchweg hochmineralisiert, unabhängig vom jeweiligen Grundwasserleiter, dem sie entstammen. 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. In größeren Tiefen gibt es keine gering mineralisierten Wässer. Die höchsten Konzentrationen, die in Wasserproben aus Bohrungen im Oberen Muschelkalk gemessen wurden, betragen 85,2 g/kg, im Buntsandstein waren es 128,4 g/kg, im geologisch jüngeren und damit stratigraphisch höher liegenden Hauptrogenstein 312,1 g/kg und in der jüngsten, der tertiären Schichtenfolge 239,4 g/kg.

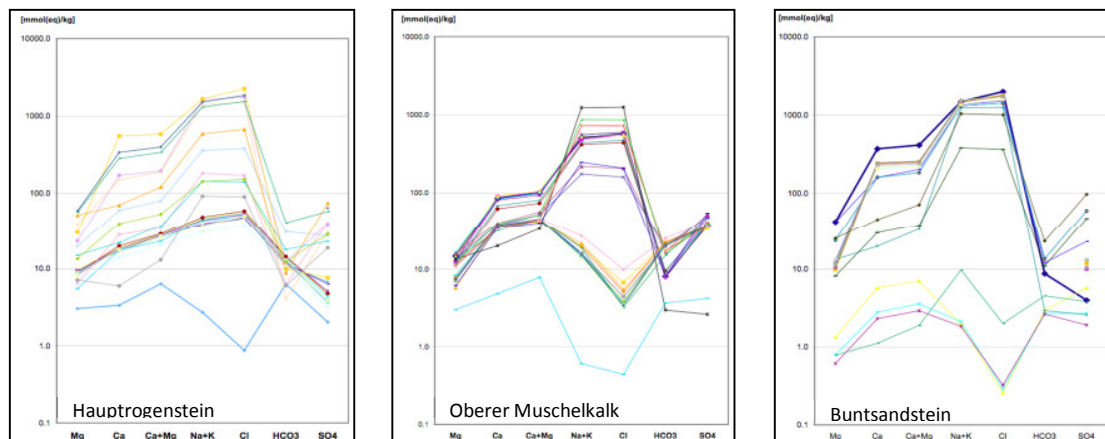


Abb. 2: Schoeller-Diagramme der Tiefenwässer des Hauptrogenstein-, Oberen Muschelkalk- und Buntsandstein-Grundwasserleiters

Die **Abb. 2** zeigt als Schoeller-Diagramme die Hauptinhaltsstoffe der Analysen beispielhaft aus dem Hauptrogenstein-, dem Oberen Muschelkalk- und dem Buntsandstein-Grundwasserleiter im Oberrheingraben. 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 verdeutlicht, dass in den dargestellten Diagrammen in allen Aquiferen zwei verschiedene Wassertypen vorliegen können. Die niedriger mineralisierten Wässer stammen aus geringeren Tiefen und sind reich an Calcium und Hydrogenkarbonat, gelegentlich auch an Sulfat. Die tiefer liegenden Wässer sind höher mineralisiert und unabhängig vom jeweiligen Reservoir reich an Natrium und Chlorid z.T. mit erhöhten Sulfatgehalten. Der Übergang der beiden Wassertypen ist nicht abrupt. Die gering mineralisierten Wässer sind von den Reaktionen mit dem umgebenden Gestein geprägt. Für die Wässer aus der tertiären Schichtenabfolge gilt entsprechendes.

Die z.T. sehr hohen TDS-Gehalte lassen einerseits eine Herkunft aus salinaren Ablagerungen als wahrscheinlich erachten. Andererseits gehören zur Grabenstruktur des Oberrheingrabens, wie die Temperaturverläufe zeigen, auch Tiefenwasseraufstiege (Stober et al. 1999) und Tiefenwasserzirkulationssysteme (z.B. Pearson & Garven 1992), die z.T. bis in das kristalline Grundgebirge hinabreichen können. Tiefenwässer im kristallinen Grundgebirge sind grundsätzlich hoch-salinar (Stober & Bucher 2000a, Bucher & Stober 2010), so dass sie im Aufstiegsbereich die Tiefenwässer in der sedimentären Abfolge des Hangenden markant prägen.

Leider gibt es nur sehr selten Untersuchungen auf Gasgehalte in den Tiefenwässern der verschiedenen geothermischen Nutzhorizonte. Die wenigen gemessenen CO_2 - und H_2S -Gehalte lassen für alle Nutzhorizonte auf ein sehr geringes Vorkommen von H_2S im Oberrheingraben schließen. Mit erhöhten CO_2 -Gehalten ist allerdings zu rechnen.

3 Süddeutsches Molassebecken

Das süddeutsche Molassebecken erstreckt sich als langgezogene Hochebene im Norden der Alpen von der Schweiz im Westen über etwa 300 km bis an die Grenze nach Oberösterreich. Im Norden und Nordosten wird es in weiten Teilen von der Donau begrenzt. Seine größte Breite von 140 km erreicht es südlich von Regensburg. Seine Entstehung steht in direktem Zusammenhang mit der Alpenorogenese, welche ab dem Obereozän zu einem flexurartigen Abbiegen des variszischen Grundgebirges und der darauf abgelagerten mesozoischen Sedimente führte (Lemcke 1988). Diese Subsidenz wird durch die Ablagerung von Molassesedimenten weitgehend ausgeglichen und führt dazu, dass die mesozoischen Sedimente am heutigen Nordrand der Alpen von ca. 5 km mächtigen tertiären Einheiten bedeckt werden.

Der bedeutendste geothermische Nutzhorizont des süddeutschen Molassebeckens sind die Karbonate des Oberjura, welcher derzeit das Ziel zahlreicher geothermischer Erschließungsmaßnahmen zur Gewinnung von Strom und Wärme ist. Potenzielle weitere geothermische Nutzhorizonte im süddeutschen Molassebecken sind nach Bayerischem Geothermieatlas (Bay. StWiVT (2010)) das kristalline Grundgebirge, die Sedimente des oberen Muschelkalk, Keuper und Dogger sowie Aquifere aus dem tieferen Tertiär. Diese Horizonte sind allerdings aufgrund ihrer geringen Ergiebigkeit und/oder Grundwassertemperatur nur lokal von Bedeutung und werden, wenn überhaupt, bislang nur balneologisch genutzt. Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich deshalb auf die Karbonate des Oberjura und des Purbeck, welche den sogenannten Oberjura-Aquifer aufbauen.

Informationen zur Hydrochemie des Oberjuraaquifers liegen vor allem aus dem Forschungsprojekt „Hydrogeothermische Energiebilanz und Grundwasserhaushalt des Malmkarsts im Süddeutschen Molassebecken“ vor (Bertleff 1986, Prestel 1991). Aussagen zur Hydrochemie des Oberjura-Aquifers in größeren Tiefenlagen wurden erst in den letzten Jahren im Zuge der geothermischen Exploration des Oberjuras vor allem im Großraum München sowie durch neue Forschungsprojekte möglich (Schulz et al 2007, Stober & Jodocy 2011a, 2011b, Schneider & Thomas 2012). Im Moment stehen nahezu 200 Bohrungen mit hydrochemischen Analysen zur Verfügung.

Der Grundwasserleiterkomplex des Oberjura erstreckt sich über das gesamte Molassebecken und findet in Karstgrundwasserleitern der Schwäbischen und Fränkischen Alb nördlich der Donau seine Fortsetzung. Die überwiegend mergeligen, gering durchlässigen Sedimente des tieferen Oberjuras bilden die Sohle des Grundwasserleiters, der von der Donau bis zum Alpenrand auf über

5 km abtaucht (Birner 2013). Stellenweise wird die Basis des Aquifers auch von den Sedimenten des Doggers oder des kristallinen Grundgebirges aufgebaut (Lemcke 1974). Aufgrund seiner hohen Ergiebigkeit und der nach Süden zunehmenden Grundwassertemperatur zählt er zu den bedeutendsten hydrothermalen Nutzhorizonten in Europa.

Hydrochemisch stellt der Oberjura-Aquifer im süddeutschen Molassebecken eine Besonderheit unter den geothermischen Nutzhorizonten dar, da auch in großen Tiefen (> 1000 m) Süßwässer angetroffen werden. Gesamtlösungsinhalte bis 1 g/l sind charakteristisch für den Oberjura-Aquifer vom nördlichen Beckenrand bis in den Großraum von München (Birner et al. 2011). Während im westlichen Oberjura-Aquifer der Chloridgehalt mit zunehmender Tiefenlage zunimmt, können im bayerischen Teil Chlorid-Gehalte < 100 mg/l auch im tieferen Becken bis in die Region von München beobachtet werden. Höhere Lösungsinhalte von über 2 g/l werden im Südwesten des Beckens im Bereich des von Birner (2013) beschriebenen Grundwassergeringleiters angetroffen.

Anhand der Ionenverhältnisse können im Oberjura-Aquifer verschiedene Provinzen unterschieden werden, welche sich regional zuordnen lassen. Im nördlichen Teil des Beckens finden sich, wie auch in der Schwäbischen und Fränkischen Alb, vor allem gering mineralisierte Ca-(Mg)-HCO₃-Wässer (Abb. 3). Südlich davon werden Ionenaustauschwässer des Na-Ca-Mg-HCO₃-Typs angetroffen, deren Chemismus sich durch Zusickerung von NaCl-Wässern aus den tertiären Einheiten oder tiefer liegender Einheiten im Beckentiefen zum Na-Ca-HCO₃-Cl-Typ ändert (Abb. 3). Im Süden von München werden in den neuen Geothermiebohrungen auch Wässer des Na-HCO₃-Cl-Typs erschlossen, welche bei Birner et al. (2011) noch nicht berücksichtigt wurden. Diese Wässer unterscheiden sich von den restlichen Wässern des tieferen Oberjuras nicht nur durch höhere Chloridgehalte, sondern auch durch ein geringeres Mg/Ca-Verhältnis von etwa 0,15 im Vergleich zu 0,3 nördlich von München. Möglicherweise deutet dies auf eine geringere Dolomitisierung hin, was auch mit den vergleichsweise geringen Durchlässigkeiten (Birner et al. 2012) in Einklang stehen würde. Generell handelt es sich bei allen bisher beschriebenen Wassertypen um Süßwässer mit einer Gesamtmineralisation von unter 1 g/l. Höhere Gesamtlösungsinhalte bis zu 35 g/l werden nur im Südwesten des Molassebeckens im Übergangsbereich zur Helvetischen Fazies mit sehr geringer Gebirgsdurchlässigkeit angetroffen (Stober & Jodocy 2011b; Birner et al. 2011). Es handelt sich um NaCl dominierte Formationswässer vom Na-Cl-(HCO₃)-Typ (Abb. 3). Charakteristisch für das Niederbayerische Becken sind Na-HCO₃-Cl-Wässer mit Gesamtlösungsinhalten von 1-1,5 g/l, mit sehr geringen Erdalkali-/Alkali-Verhältnissen und hohen HCO₃-Gehalten (Abb. 3). Im nordöstlichen Becken lässt sich eine weitere Gruppe von Wässern (Na-Cl-HCO₃) ausweisen, die durch einen Zustrom von Tiefenwässern aus dem Kristallin des Bayerischen Waldes geprägt werden. Im äußersten Südwesten treten Ca-SO₄-HCO₃-Cl-Wässer auf.

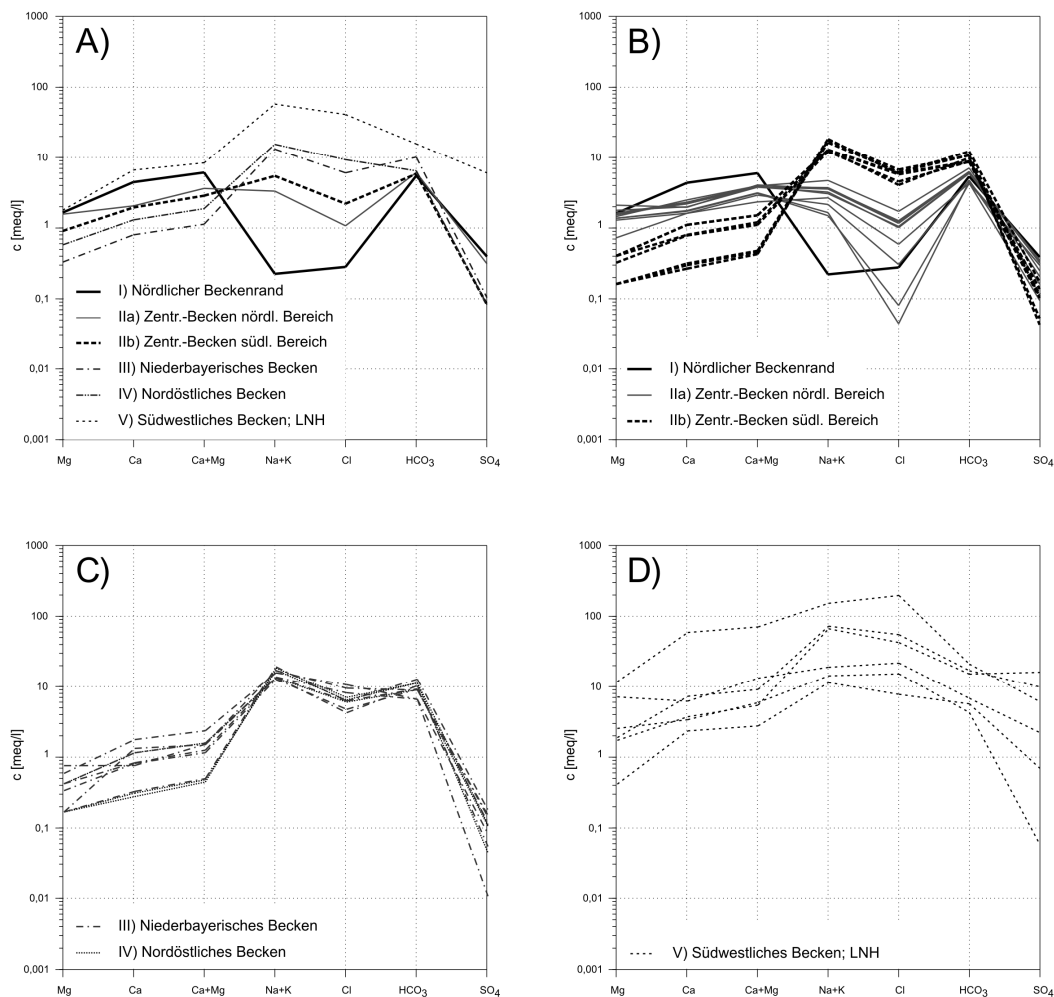


Abb. 3: Schoeller-Diagramme A) Mittlere Äquivalentkonzentrationen der einzelnen hydrochemischen Faziesbereiche des Oberjura-Aquifers; B) Äquivalentkonzentrationen des zentralen Beckens. Die fett gedruckte, durchgezogene Linie entspricht einer Probe aus dem nördlichen Beckenrand, welche in etwa die mittleren Äquivalentkonzentrationen der Wasseranalysen aus 98 Bohrungen repräsentiert; C) Äquivalentkonzentrationsverteilung im Niederbayerischen und nordöstlichen Becken; D) Äquivalentkonzentrationen der Wässer aus dem südwestlichen Becken [aus: Birner et al. 2011].

Gasanalysen liegen vor allem aus dem Großraum München vor. Nach den Langzeituntersuchungen von Mayerhofer et al. (2012) an 11 Bohrungen aus dem Raum München betragen die durchschnittlichen Gaskonzentrationen 73 Nml/l. (Schwankungsbreite: 0 - 218 Nml/l). Bei den Mehrfachuntersuchungen wurde festgestellt, dass die Gasführung in den einzelnen Bohrungen nicht kontinuierlich ist, sondern das Gas schubweise austritt und die Messungen daher erheblichen

Schwankungen unterliegen. Auch die Gaszusammensetzung ist sehr variabel: CO₂ (40-60 vol%), CH₄ (25-40 vol%) und N₂ (10-20 vol%). Die H₂S-Konzentrationen lagen in der Gasphase bei durchschnittlich 10,4 µmol/l (Schwankungsbereich: 0 - 59,2 µmol/l).

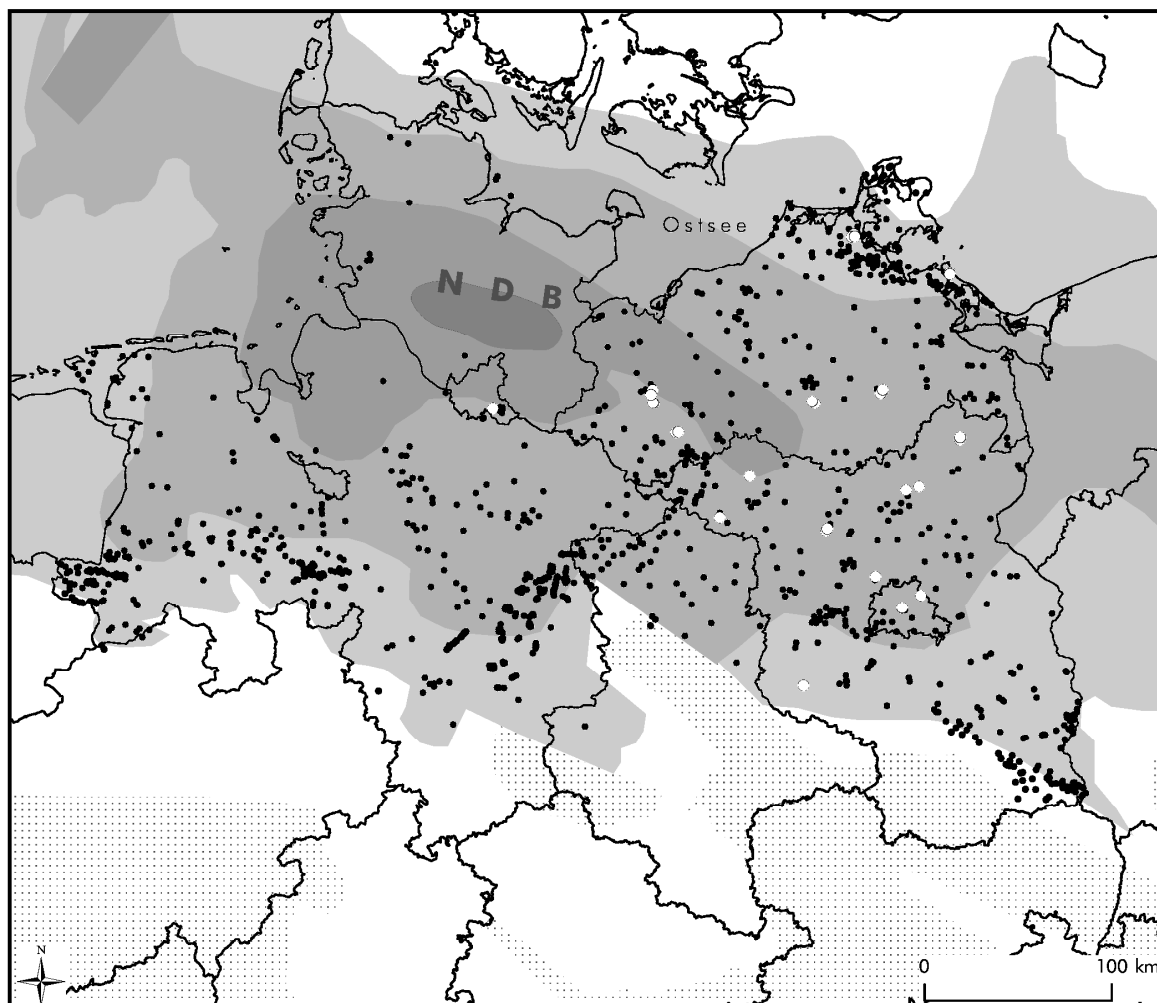
In den Tiefenwässern des Oberjura-Aquifers im nordwestlichen Teil des Molassebeckens wurden in der Regel CO₂-Gehalte von einigen 10er mg/kg gemessen. Während die CO₂-Gehalte der Wässer bis etwa 300 m u. Gel. Werte bis zu 60 mg/kg erreichen können, weisen die Wässer in größeren Tiefen nur noch bis zu 30 mg/kg auf. Die wenigen gemessenen H₂S-Gehalte lassen hier auf sehr geringe Vorkommen von H₂S schließen (< 3 mg/kg).

Bei der Herkunft und Genese der Wässer des Oberjura-Aquifers im Süddeutschen Molassebecken muss zwischen den weit verbreitenden Süßwässern und den höher mineralisierten Wässern des südwestlichen Grundwassergeringleiters unterscheiden werden. Letztere unterscheiden nicht nur durch höherer Chlorid- und Gasgehalte sondern auch anhand ihrer Istopensignaturen signifikant von den Süßwässern des restlichen Beckens. Ihr Vorkommen ist an die gering durchlässige Schichtenfolge des südwestlichen Beckens gekoppelt. Die Isotopensignaturen zeigen eine relative Anreicherung von ¹⁸O, wie sie auch in den Ölfeldwässern des hangenden Tertiärs beobachtet wird (Birner et al. 2011, 2013). Ob diese Wässer aus dem Hangenden in den Oberjura infiltrieren, oder die Aussüßung des Oberjuras bis heute noch nicht abgeschlossen ist, kann nicht geklärt werden.

Die Entwicklung der Süßwässer im Oberjura-Aquifer von sauerstoffreichen Ca-(Mg)-HCO₃-Wässern am nördlichen Beckenrand bis hin zu den Na-HCO₃-Cl-Wässern südlich von München ist in Birner et al (2011) beschrieben. Den sauerstoffreichen Grundwässern aus den Grundwasserneubildungsgebieten am nördlichen Beckenrand strömen entsprechend dem von Lemcke & Tunn (1956) gezeigten, abwärtsgerichteten Strömungsregime, aus den hangenden tertiären Einheiten Ionenaustauschwässer entlang einer von Frisch & Huber (2000) postulierten, nördlich von Augsburg verlaufenden SW-NE-gerichteten Grundwasserscheide, zu. Durch ihre Zusickerung ändert sich der Wassertyp im Oberjura-Aquifer zum Na-Ca-HCO₃-Cl-Typ. Weiter nach Süden steigt vor allem der Natriumchloridgehalt im Oberjura-Aquifer aufgrund einer sehr geringen Zusickerung von fossilem Meerwasser aus dem hangenden Tertiär. Südlich von München finden sich entsprechend nur noch Wässer des Na-HCO₃-Cl-Typs, welcher auch charakteristisch für die Wässer im niederbayerischen Becken ist.

4 Norddeutsches Becken

1856 wurden in Hemmingstedt (Schleswig-Holstein) ölhaltige Sande entdeckt. Mit der aufkommenden Erschließung vieler Erdöl-Lagerstätten, welche ihren Höhepunkt in den 50er - 60er Jahren hatte, und der Erdgas-Exploration besonders in den 60er bis 90er Jahren wurden zahlreiche Bohrungen im Norddeutschen Becken (NDB) abgeteuft und u.a. auch die Erdöl-/Erdgas-Begleitwässer untersucht. Seit 1984 wurden zudem ca. 50 Geothermiebohrungen errichtet. Die in all diesen Bohrungen (Abb. 4) ermittelten qualitativ sehr inhomogenen Daten sind die Grundlage der Charakterisierung hydrothermalen Tiefenwässers im NDB. Dazu sind eine Reihe von Arbeiten bekannt (Naumann 2000, Klinge 1991, Lehmann 1974a, b), welche umfassend bei Wolfgramm et al. (2011a) zusammengefasst wurden. Weitere Arbeiten (Tesmer et al. 2007, Möller et al. 2008) erweitern den Datensatz um Analysen stabiler Isotope und seltener Erden und stellen Genesemodelle zur Diskussion. Insgesamt sind so mehr als 2700 Wasseranalysen von mehr als 1450 Bohrungen verfügbar (Wolfgramm et al. 2011a).



Legende

○ Geothermiebohrungen • Tiefbohrungen, nicht differenziert
Sedimentmächtigkeiten nach Ziegler (1990) in km: 0 < 2 2 - 4 4 - 6 6 - 8 > 8

Abb. 4: Verbreitung des Norddeutschen Beckens (NDB) mit Lage der Bohrungen, welche hinsichtlich wasserchemischer Daten bewertet wurden (aus Wolfgramm et al. 2011a)

Die geothermischen Nutzhorizonte im NDB sind zum einen die mesozoischen Sandsteine (Feldrappe et al. 2008, Wolfgramm et al. 2008, Rauppach et al. 2008), zum anderen auch die Rotliegend-Sandsteine und die Rotliegend-Vulkanite (Wolfgramm et al. 2003, Wolfgramm & Seibt 2003, Wolfgramm 2005, Wolfgramm et al. 2011a, Plein et al. 1995). Insgesamt sind zu betrachten:

- Unterkreide-Sandsteine (Unteralb - Hauterive, Wealden)
- Dogger-Sandsteine (Callov, Bajoc, Bathon, Aalen)

- Lias-Sandsteine (Toarc, Domer, Hettang, Untersinemur)
- Keuper-Sandsteine (Rhät: Postera, Contorta, Schilfsandstein)
- Buntsandstein-Sandsteine (Pelitröt, Solling, Hardegsen, Detfurth, Volpriehausen, Quickborn)
- Rotliegend-Sandsteine
- Permokarbone Vulkanite

Außer bei den permokarbonen Vulkaniten (Basaltoid bis Rhyolitoid), welche als klüftiger Grundwasserleiter in Frage kommen, sind die sonstigen geothermischen Aquifere Sandsteine. Bei diesen handelt es sich entweder um fluviatil gebildete, unreife, schlecht sortierte Lithoklast-Sandsteine (Rotliegend, Buntsandstein, Schilfsandstein) oder um eher gut sortierte, reife Quarzsandsteine eines meist deltaischen Ablagerungsmilieus (Rhät, Lias, Dogger). Die Porositäten und Permeabilitäten der Sandsteine sind häufig sehr hoch (Porosität > 20 %, Permeabilität > 250 mD; vgl. Wolfgramm et al. 2008). Die Temperaturen der Fluide orientieren sich an einem durchschnittlichen Gradienten von ca. 30 - 35 K/km. Bei einer durchschnittlichen Oberflächentemperatur von ca. 9 °C werden in 2 km Tiefe Temperaturen zwischen 70 - 80 °C erreicht. Lokale Abweichungen von diesem Gradienten werden vor allem durch die im Untergrund befindlichen Salinarstrukturen (Salzstöcke, Salzkissen) hervorgerufen.

Hervorzuheben sind weiterhin die in den Ablagerungen des NDB immer wieder in unterschiedlicher Mächtigkeit vorkommenden Salinarfolgen. Am prominentesten sind die ca. 1000 m mächtigen Zechsteinsalze, gefolgt vom Salinarröt des Buntsandsteins, den mächtigen Rotliegend-Salinaren im Westteil des Beckens als auch Salinaren im Mittleren Muschelkalk, Keuper und Oberjura (vgl. Ziegler 1990). Diese haben einen entscheidenden Einfluss auf die Zusammensetzung der Tiefenwässer.

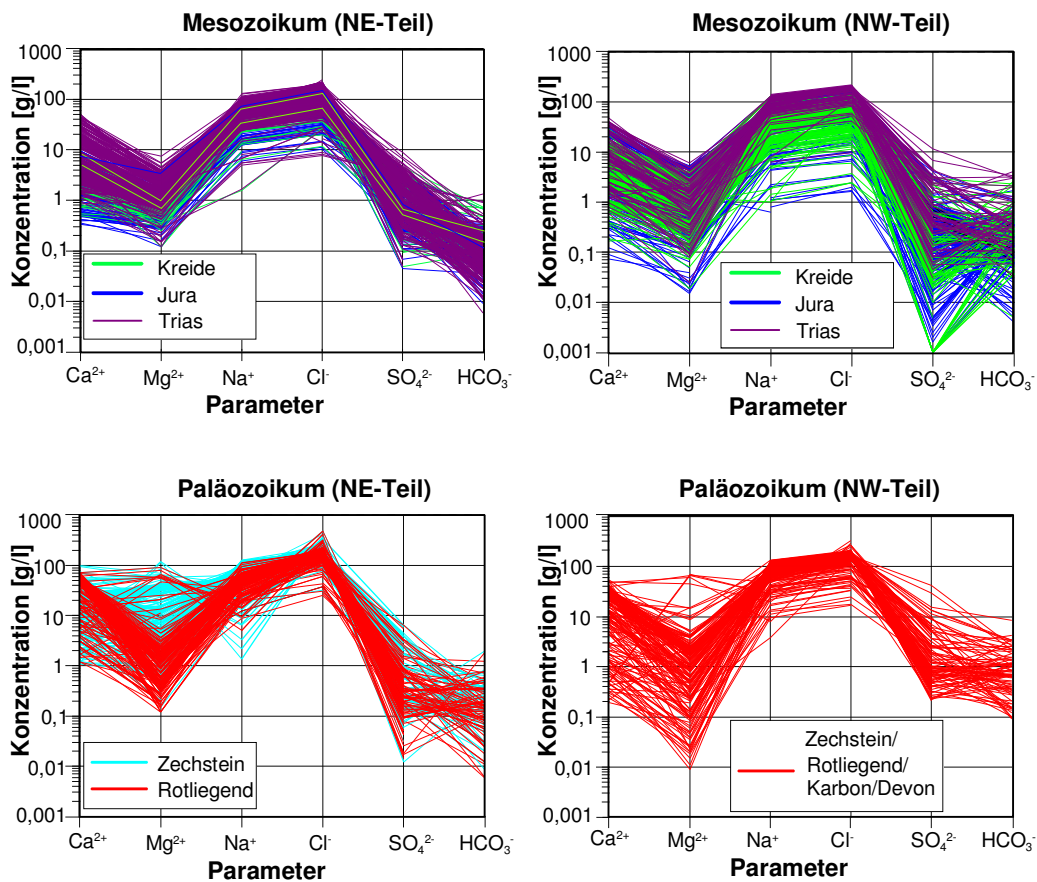


Abb. 5: Zusammensetzung der Tiefenwässer des Norddeutschen Beckens im Schoeller-Diagramm

In **Abb. 5** sind die Hauptbestandteile aller Wasseranalysen meso- und paläozoischer Wässer des NDB in Schoeller-Diagrammen zusammengefasst. Dabei wurde ein Tiefenbereich von 20 - 4100 m abgedeckt. In den Schoeller-Diagrammen wird sichtbar, dass die Fluide generell eine ähnliche Ionenverteilung besitzen, wobei Chlorid gefolgt von Natrium die höchste Konzentration aufweist. Die Konzentrationen steigen dabei entsprechend der Tiefenlage des jeweiligen Aquifers. Für Aquifere mit Tiefenlagen > 2000 m nimmt der Calciumanteil auf Kosten des Natriumgehaltes zu. Die Konzentrationen innerhalb der paläozoischen Wässer sind überwiegend höher, als die mesozoischer Wässer, dabei unterscheiden sich die Wässer des NW- und NE-Teils kaum voneinander. Bei den Fluiden handelt es sich überwiegend um hochsalinare Fluide mit Salinitäten von meist > 200 g/l. Die Fluide sind überwiegend Chlorid-, Natrium- und Calciumdominiert, wobei sich die Zechsteinwässer chemisch durch einen höheren Anteil an Magnesium auszeichnen (Wolfgramm 2011a, Wolfgramm et al. 2003).

Bei Betrachtung der Korrelation von Salinität und Teufe ist auffällig, dass für die Post-Zechsteinwässer eine Korrelation besteht (Unterkreide-Rhät, Buntsandstein) wobei die Salinität des Buntsandstein einheitlich höher ist. Ab einer Teufe von etwa 2000 - 3000 m oder ab Salinitäten von 250 g/l nimmt der Lösungsinhalt der Wässer kaum noch zu. Aus diesem Grund übersteigen die Salinitäten der Rotliegendwässer Konzentrationen von 330 mg/l kaum noch. Eine Korrelation mit der Teufe ist ab dieser Tiefe kaum möglich. Die salinaren Wässer des Zechstein weisen je nach dem Umgebungsgestein die höchsten Konzentrationen auf. Eine Differenzierung der Wässer aufgrund der Gesamtmineralisation und Stratigraphie ist für die meisten Wässer nicht möglich, (hier sind nur Trends ableitbar).

Die Ionenverhältnisse der Hauptbestandteile sind trotz des Anstieges der Konzentration für die Wässer des Mesozoikums relativ gleich bleibend (Abb. 5). Während die Fluide des Zechstein überwiegend Gesamtlösungsinhalte von > 280 g/l aufweisen, liegt der Gesamtlösungsinhalt der Wässer der permokarbonen Siliziklastika bei überwiegend > 200 g/l und weist starke Schwankungen auf.

Neben den Hauptbestandteilen sind in den Wässern Nebenbestandteile mit Konzentrationen der einzelnen Ionen von überwiegend << 1000 mg/l, selten im Grammbereich enthalten. Die wichtigsten sind K, NH₄, Fe, Mn, Ba, Sr, Li, Br, F, J und SiO₂. Die Fluorgehalte, welche nur selten bestimmt wurden, sind überwiegend < 1 mg/l. Die SiO₂- und K-Gehalte nehmen innerhalb der verschiedenen Sandsteinaquifere grundsätzlich mit zunehmender Tiefe zu. Die mit Abstand höchsten NH₄-Gehalte sind für das Zechstein zu verzeichnen (Median: 173 mg/l), während die übrigen stratigraphischen Einheiten im Mittel nur Gehalte << 100 mg/l aufweisen. Die Eisen- und auch Mangangehalte sind für die Sandsteine des Rotliegend am höchsten, während die Fluide des Zechstein und des Karbon/Devon die niedrigsten Werte zeigen. Br, J und Sr zeigen vergleichbare Muster, die Werte sind für das Zechstein am höchsten (z.B. Jodid, Median: 19,6 mg/l), gefolgt von Karbon/Devon (Jodid, Median: 15,2 mg/l) und vom Rotliegend (Jodid, Median: 13,3 mg/l). Die Aquifere des Dogger - Rhät (Jodid, Median: 4,4 - 5,3 mg/l) weisen jeweils sehr niedrige Konzentrationen auf, während die der Unterkreide - Dogger (Jodid, Median: 8,0 - 9,3 mg/l) wiederum erhöhte Werte zeigen (vgl. Wolfgramm et al. 2011b). Lithium hat die höchsten Konzentrationen in den Wässern des Rotliegend (Median: 100 mg/l), gefolgt vom Zechstein (Median: 58 mg/l) und Buntsandstein (Median: 30 mg/l). Die Gehalte der weiteren Schichtenfolgen sind < 10 mg/l.

In den Tiefenwässern des NDB sind unterschiedliche Gase gelöst. Gasgehalte liegen nur von wenigen Tiefbohrungen vor. Die Gasgehalte der genutzten Schichtwässer von geothermischen Anlagen, welche aus einer Tiefe von ca. 1.500 m fördern, sind mit max. 7% sehr niedrig (Seibt & Thorwart 2011). Die Gasphase des Schichtwassers am Standort in Neubrandenburg besteht hauptsächlich aus CO₂ (87 Vol.-%), der Rest ist überwiegend Stickstoff. Methan ist nur zu 0,02 Vol.-%

% vertreten. In Neuruppin enthält die Sole gelöstes Gas bestehend aus 88,6 Vol.-% CO₂, 10,9 Vol.-% N₂ und 0,2 Vol.-% CH₄. Das Gas-Wasser-Verhältnis beträgt 0,1:1 unter Normbedingungen. Die Bohrung in Neustadt-Glewe fördert saline Wässer mit einem Lösungsinhalt von 220 g/l aus einer Tiefe von 2.200 m. Die dominierende Gasphase ist hier mit 91,9 Vol.-% CO₂, während CH₄ mit 4,7 Vol.% und N₂ mit 3,4 Vol.-% eine untergeordnete Rolle spielen. Schwefelwasserstoff ist primär im Thermalwasser nicht gelöst. Lokal sind die CH₄-Gehalte gegenüber N₂ und CO₂ stark erhöht.

Für die tiefsten Rotliegendeaquifere sind Gas-Wasser-Verhältnisse von 1-2 bekannt, wobei diese Wässer überwiegend N₂-dominiert sind. CH₄ sowie CO₂ spielen zumeist mit weniger als 20 vol.-% eine untergeordnete Rolle (Wolfgramm & Seibt 2008). Lokale Abweichungen existieren besonders im zentralen und westlichen Teil des Beckens, wo hohe Methangehalte für die Ausweisung von Gaslagerstätten verantwortlich sind.

5 Literatur

- Bay. StWiVT (Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie) (Hrsg.) (2010): Bayerischer Geothermieatlas.- 87 S., München.
- Bertleff, B. (1986): Das Strömungssystem der Grundwässer im Malm-Karst des West-Teils des Süddeutschen Molassebeckens.- Abhandlungen Geol. L.- Amt Baden- Württemberg, **12**: 1-271.
- Birner, J. (2013): Hydrogeologisches Modell des Malmaquifers im Süddeutschen Molassebecken.- Diss. FU Berlin, 86 S., Berlin.
- Birner, J., Jodocy, M., Fritzer, T., Schneider, M., Stober, I. (2009): Projektgebiet - Molassebecken.- In: Schulz, R. (Hrsg.): Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland (Endbericht - BMU Forschungsvorhaben 0327542), LIAG Archiv-Nr. 0128452, S. 44-60, Hannover.
- Birner, J., Mayr, C., Thomas, L., Schneider, M., Baumann, T., Winkler, A. (2011): Hydrochemie und Genese der tiefen Grundwässer im bayerischen Teil des Süddeutschen Molassebeckens.- Z. geol. Wiss., **39**/3-4, 291-308.
- Bucher, K. & Stober, I. (2010): Fluids in the upper continental crust.- Geofluids, 10, p. 241-253 [DOI 10.1111/j.1468-8123.2010.00279.x].
- 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.
- Davis, S.N. & de Wiest, R.J.M. (1969): Hydrogeology.- John Wiley & Sons, 463 p., New York.
- Doehl, F. (1970): Die tertiären und quartären Sedimente des südlichen Rheingrabens. - In: Illies J. H. & Mueller, St. (Hrsg.): Graben Problems. - Proceedings of an International Rift Symposium held in Karlsruhe October, 10 - 12, 1968; International Upper Mantle Project, Scientific Report No. 27, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Feldrappe, H., Obst, K., Wolfgramm, M. (2008): Die mesozoischen Aquifere des Norddeutschen Beckens und ihr Potential für die geothermische Nutzung.- Z. geol. Wiss, **36**/4-5, 199-222.
- Frisch, H. & Huber, B. (2000): Ein hydrogeologisches Modell und der Versuch einer Bilanzierung des Thermalwasservorkommens für den Malmkarst im Süddeutschen und im angrenzenden Oberösterreichischen Molassebecken.- Hydrogeologie und Umwelt, **20**, 25-43.
- Geyer, O.F. & Gwinner, M.P. (1991): Geologie von Baden-Württemberg. - 4. Auflage, Springer Verlag, 482 S., Stuttgart.
- Grimm, M. C., Wielandt-Schuster, U., Hottenrott, M., Grimm, K. I. & Radtke, G. (2011): Oberrheingraben. - In: Lange, J.-M. & Röhling, H.-G. [Hrsg.]: Stratigraphie von Deutschland IX Tertiär, Teil 1: Oberrheingraben und benachbarte Tertiärgebiete. - Schriftenr. dt. Ges. Geowiss., **75**, 57 - 132, Hannover.
- 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**, p. 223-235.
- Klinge, H. (1991): Zur Salinität der Tiefengrundwässer Norddeutschlands, Band 2 - Anlagen. Archiv.-Nr. 108-262.
- Lehmann, H.-W. (1974a): Geochemie der Tiefenwässer der Nordostdeutschen Senke, Teil 1.- Zeitschrift für angewandte Geologie, **20**, 502-509.
- Lehmann, H.-W. (1974b): Geochemie der Tiefenwässer der Nordostdeutschen Senke, Teil 2.- Zeitschrift für angewandte Geologie, **20**, 551-557.

- Lemcke, K. (1974): Vertikalbewegungen des vormesozoischen Sockels im nördlichen Alpenvorland vom Perm bis zur Gegenwart.- *Eclogae Geol. Helv.*, **67**, 121-133.
- Lemcke, K. (1988): *Geologie von Bayern I - Das bayerische Alpenvorland vor der Eiszeit.*- 175 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- Lemcke, K. & Tunn, W. (1956): Tiefenwasser in der süddeutschen Molasse und in ihrer verkarsteten Malmunterlage.- *Bulletin Vereinter Schweizer Petroleum Geologen und Ingenieure*, **23**, 35-56.
- Mayerhofer, C., Niessner, R., Baumann, T. (2012): Hydrochemie.- In: Schneider, M. & Thomas, L. (Hrsg.): *Wissenschaftliche und technische Grundlagen zur strukturgeologischen und hydrogeologischen Charakterisierung tiefer geothermisch genutzter Grundwasserleiter am Beispiel des Süddeutschen Molassebeckens (Endbericht - BMU Forschungsvorhaben 0327671)*, 237 S., Berlin.
- Möller, P., Weise, S.M., Tesmer, M., Dulski, P., Pekdeger, A., Bayer, U., Magri, F. (2008): Salinization of groundwater in the North German Basin: results from conjoint investigation of major, trace element and multiisotop dositribution.- *Int. J. Earth Sci.*, **97**, 1057-1073.
- Naumann, D. (2000): *Salinare Tiefenwässer in Norddeutschland - Gas- und isotopengeochemische Untersuchungen zur Herkunft und geothermischen Nutzung.*- GFZ Potsdam Scient. Techn. Rep., STR00/2, 1-116.
- 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 p., Boulder/USA.
- Person, M., & Garven, G. (1992) Hydrologic constraints on petroleum generation within continental rift basins: theory and application to the Rhine graben.- *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **76**, 468-488.
- Pflug, R. (1982): *Bau und Entwicklung des Oberrheingrabens.* - Erträge der Forschung, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 145 S., Darmstadt.
- Plein [Hrsg.] (1995): *Stratigraphie von Deutschland I: Norddeutsches Rotliegendbecken.*- *Courier Forsch.-Inst. Senckenberg*, **183**, 1-193.
- Prestel, R. (1991): *Hydrochemische Untersuchungen im Süddeutschen Molassebecken.*- In: Bay. L.-Amt Wasserwirtschaft & Geol. L.-Amt Baden-Württemberg [Hrsg.] - *Hydrogeothermische Energiebilanz und Grundwasserhaushalt des Malmkarstes im Süddeutschen Molassebecken (Schlussbericht - Forschungsvorhaben 03 E 6240 A/B)*, 140 S., München, Freiburg.
- 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**, 13-39, Stuttgart.
- Rauppach, R., Wolfgramm, M., Thorwart, K., Seibt, P. (2008): Hydraulic features of Geothermal aquifers in the North German Basin- Z. geol. Wiss, **36/4-5**, 267-280.
- Schad, A. (1962): Voraussetzungen für die Bildung von Erdöllagerstätten im Rheingraben. - Abh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, **4**, 29 - 40.
- Schloz, W., & Stober, I. (2006): Mineral-, Heil- und Thermalwässer, Solen und Säuerlinge in Baden-Württemberg. LGRB-Fachbericht **1**, 20 S., Freiburg i. Br.
- Schneider, M., & Thomas, L. (Hrsg.) (2012): Wissenschaftliche und technische Grundlagen zur strukturgeologischen und hydrogeologischen Charakterisierung tiefer geothermisch genutzter Grundwasserleiter am Beispiel des süddeutschen Molassebeckens.- Endbericht - BMU Forschungsvorhaben 0327671, 237 S., Berlin.
- Schulz, R., Agemar, T., Alten, A.-J., Kühne, K., Maul, A.- A., Pester, S., Wirth, W. (2007): Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland.- Erdöl Erdgas Kohle, **123/2**, 76-81, Hamburg.
- Stober, I., Richter, A., Brost, E., Bucher, K. (1999): The Ohlsbach Plume: Natural release of Deep Saline Water from the Crystalline Basement of the Black Forest.- Hydrogeology Journal, **7** (3), 273-283, Springer, Berlin/Heidelberg.
- Stober, I. & Bucher, K. (2000a): Herkunft der Salinität in Tiefenwässern des Grundgebirges - unter besonderer Berücksichtigung der Kristallinwässer des Schwarzwaldes. - Grundwasser, **3**, 125 - 140, Berlin Heidelberg.
- 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): Geothermisches Prognosetool für Baden-Württemberg (GeoTool). - Grundwasser, **16**, 54-56.
- Stober, I. & Jodocy, M. (2011b): Geothermische Nutzhorizonte im westlichen Teil des Süddeutschen Molassebeckens.- Z. geol. Wiss., **39/3-4**, 161-172.
- Tesmer, M., Möller, P., Wieland, S., Jahnke, C., Voigt, H., Pekdeger, A. (2007): Deep reaching fluid flow in the North Eats German Basin: origin and processes of groundwater salinisation.- Hydrogeology Journal, **15**, 1291-1306.
- Weber, H. (1935): Die neuen nordbadischen Erdölbohrungen. - Badische geologische Abhandlungen, **7**, 119 - 130; Karlsruhe.
- Wittmann, O. (1965): Haagen und das Röttler Schloß. - In: Schülin, F. (1965): Rötteln-Haaegn: Beiträge zur Orts-, Landschafts- und Siedlungsgeschichte

- anlässlich der 600-Jahrfeier von Haagen 1365 - 1965,
Gemeindeverwaltung, 715 S.
- 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.
- Wolfgramm, M. & Seibt, A. (2003): Geochemical characteristics of formation fluid identified during stimulation tests on the Rotliegend geothermal reservoir in the NE German Basin (NEGB).- book of abstracts of EGC from 25.5.-30.5.03 in Szeged (Hungary), p. 29.
- Wolfgramm, M., Seibt, A. Hurter, S., Zimmermann, G. (2003): Origin of geothermal fluids of Permo-Carboniferous rocks in the NE German Basin (NE Germany).- Journal of Geochemical Exploration, **78-79**, 127-131.
- Wolfgramm, M. (2005): Fluidentwicklung und Diagenese im Nordostdeutschen Becken - Petrographie, Mikrothermometrie und Geochemie stabiler Isotope.- Hallesches Jahrb. Geowiss., B, BH **20**, 1-143.
- Wolfgramm, M., Rauppach, K., Seibt, P. (2008): Reservoir-geological characterization of Mesozoic sandstones in the North German Basin by petrophysical and petrographical data.- Z. geol. Wiss, **36**/4-5, 249-265.
- Wolfgramm, M. & Seibt, A. (2008): Zusammensetzung von Tiefenwässern in Deutschland und ihre Relevanz für geothermische Anlagen.- GTV-Tagung in Karlsruhe 2008, 503 - 516.
- Wolfgramm, M., Thorwart, K., Rauppach, K., Brandes, J. (2011a): Zusammensetzung, Herkunft und Genese geothermaler Tiefengrundwässer im Norddeutschen Becken (NDB) und deren Relevanz für die geothermische Nutzung.- Zeit. Geol. Wiss., **39**/3-4, 173-193.
- Wolfgramm, M., Rauppach, K., Thorwart, K. (2011b): Mineralneubildungen und Partikeltransport im Thermalwasserkreislauf geothermischer Anlagen in Deutschland.- Zeit. Geol. Wiss., **39**/3-4, 213-239.
- Ziegler, P. A. (1990): Geological Atlas of Western and Central Europe.- Shell, The Hague, 239 S.