

**Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB)**

## **Erläuterungen**

zum Projekt

### **Bereitstellung hydrogeologischer und geothermischer Grundlagen zur Nutzung der tiefen Geothermie/Hydrogeothermie in der Region Bodensee - Oberschwaben**

**Regionalverband Bodensee - Oberschwaben**  
(Bodenseekreis, Landkreis Ravensburg, Landkreis Sigmaringen)

**auf der Grundlage veröffentlichter und im LGRB dokumentierter Unterlagen**

Bearbeitung: Dr. Bruno Bertleff, Dipl.-Geoökologe Joris Ondreka, Dr. Hans Plum,  
Dipl.-Geologe Roman Storz und Dr. Wilhelm Schloz  
mit Beiträgen von Dr. Matthias Selg und Dr. Christian Trapp

#### **Inhalt:**

1	Einführung in das Projekt.....	2
2	Überblick über die hydrogeologischen und geothermischen Verhältnisse.....	4
3	Hinweise zu den Nutzungsmöglichkeiten .....	6
4	Obere Meeresmolasse .....	7
5	Oberjura.....	9
6	Oberer Muschelkalk.....	14
7	Tieferer Untergrund .....	17
8	Schutz sensibler Grundwassernutzungen .....	17
9	Auftreten von Kohlenwasserstoffen .....	18
10	Literaturverzeichnis.....	18

**Anlagen:**

- 1 - 3 Übersichtsdarstellungen (Karten 1 : 200 000)
  - 1 Gebietsübersicht
  - 2 Mineral- Heil- und Thermalwassernutzungen in der Region
  - 3 Kohlenwasserstoff-Fündigkeit
- 4 - 7 Obere Meeresmolasse (Karten 1 : 200 000)
  - 4 Schichtlagerung und Fazies der Oberen Meeresmolasse
  - 5 Transmissivität und Mächtigkeit der Oberen Meeresmolasse
  - 6 Grundwasseroberfläche bzw. -druckfläche für den Poren- und Kluffgrundwasserleiter der Obere Meeresmolasse
  - 7 Temperaturen im Poren- und Kluffgrundwasserleiter der Oberen Meeresmolasse
- 8 - 11 Oberjura (Karten 1: 200 000)
  - 8 Schichtlagerung und Fazies des Oberjuras
  - 9 Durchlässigkeit (T/H) und Mächtigkeit des Oberjuras (ki2 bis jo-Oberfläche)
  - 10 Grundwasseroberfläche bzw. -druckfläche für den Grundwasserleiter des Oberjuras
  - 11 Temperaturen im Grundwasserleiter des Oberjuras
- 12- 15 Oberer Muschelkalk (Karten 1 : 200 000)
  - 12 Schichtlagerung des Muschelkalks
  - 13 Durchlässigkeit (T/H) und Mächtigkeit des Oberen Muschelkalks
  - 14 Grundwasserdruckfläche für den Grundwasserleiter des Oberen Muschelkalks
  - 15 Temperaturen an der Oberfläche des Muschelkalks
- 16 Schichtlagerung und Temperaturen der Oberfläche Kristallines Grundgebirge (Karte 1 : 200 000)
- 17- 20 Geologische Schnitte (Längenmaßstab 1 : 12 500 bzw. 1 : 25 000, Überhöhung 10fach)
  - 17 Schnitt 1 - 1` : Brunnen Altheim EB Dingelsdorf 2
  - 18 Schnitt 2 - 2` : EB Gutenstein - EB Oberuhldingen
  - 19 Schnitt 3 - 3` : EB Veringenstadt - EB Markdorf 2
  - 20 Schnitt 4 - 4` : EB Trochtelfingen 1 - EB Opfenbach 1
- 21 Zusammenstellung der verwendeten Bohrungen (Tabelle)
- 22 Temperatur-Log Geothermiebohrung GB 3 Bad Saulgau
- 23 Temperatur-Log Thermalwasserbohrung Ravensburg
- 24 Temperatur-Log Geothermiebohrung GB 2 Bad Waldsee
- 25 Verwendete lithostratigraphische Begriffe und Kürzel mit Prinzipdarstellung
- 26 Zusammenfassende Beschreibung der Kohlenwasserstoff-Fündigkeit

**1 Einführung in das Projekt**

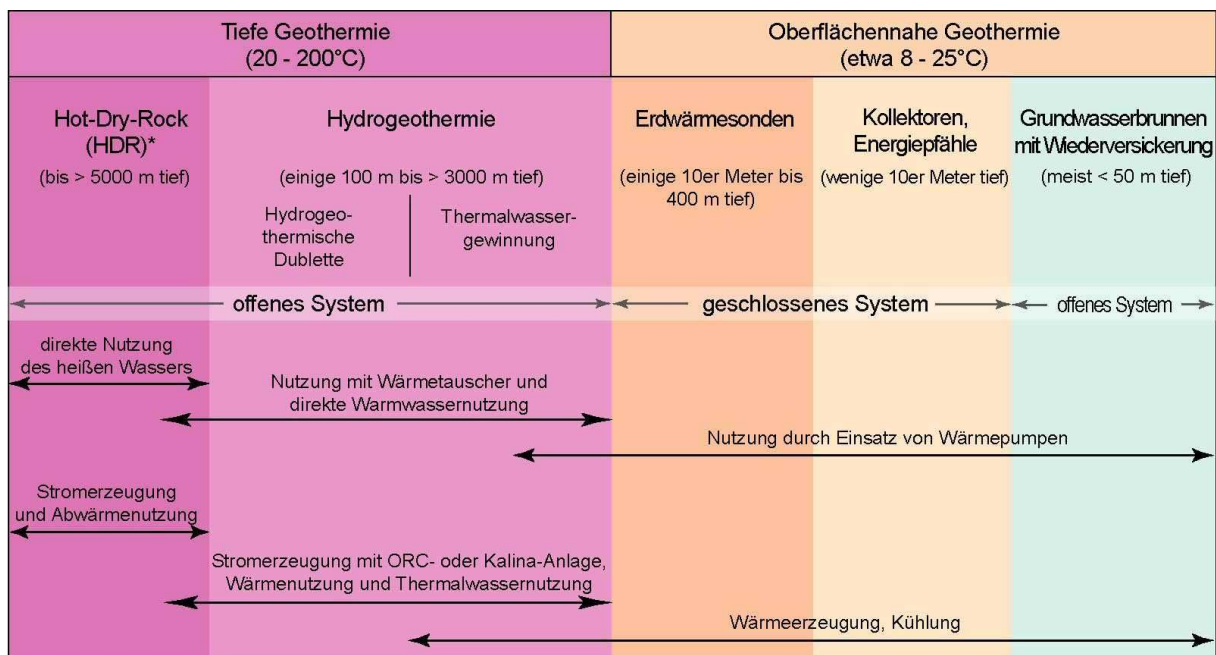
Die Nutzung der tiefen Geothermie zielt auf die Gewinnung von Wärme und, derzeit ab etwa 100 °C Temperatur des Wärmeträgermediums realisierbar, die Produktion von Strom. Die Abgrenzung zur oberflächennahen Geothermie wird meist bei 400 m Tiefe

und/oder bei einer Temperatur von über 20 °C (Definition von Thermalwasser) gezogen. Abb.1 zeigt einen Überblick über die aktuell bedeutsamen Arten der Erdwärmenutzung.

Als Hydrogeothermie wird die Nutzung warmer bis heißer tiefer Grundwässer zusammengefasst, wobei zunächst die klassische Thermalwassergewinnung für balneologisch, therapeutische oder sonstige Badezwecke und die Thermalwassernutzung zur Energiegewinnung zu unterscheiden sind. Aus tiefliegenden und folglich heißen aber gering grundwasserleitenden Gesteinen kann die gespeicherte Wärme durch einen geotechnisch erzeugten Untergrund-Wärmetauscher mittels Zirkulationsströmung gewonnen werden, bekannt unter der Bezeichnung Hot-Dry-Rock (HDR). Zwischen beiden Gewinnungstechniken werden zunehmend auch Kombinationslösungen erprobt, ebenso werden kombinierte und mehrfache Nutzungen von Thermalwasser entwickelt und angewandt. Als weitere Nutzungstechnik kann die im tieferen Untergrund gespeicherte Wärme auch mittels geschlossener Systeme, d. h. mittels tiefer Erdwärmesonden, gewonnen werden.

Bezüglich der allgemeinen geowissenschaftlichen und ingenieurtechnischen Grundlagen der tiefen Geothermie und ihrer Nutzung wird auf die Fachliteratur verwiesen.

**Abb. 1:** Übersicht über die wichtigsten technischen Verfahren der Erdwärmenutzung und die entsprechenden Teufen- und Temperaturbereiche



\* auch Deep-Heat-Mining (DHM) oder Hot-Fractured-Rock (HFR)

Der erzielbare Energiegewinn aus hydrogeothermischen Anlagen ergibt sich aus der Temperatur des Wärmeträgermediums (Grundwasser), der nutzbaren Temperaturdifferenz, der Ergiebigkeit des Nutzaquifers bzw. des optimal erreichbaren Volumenstroms aus der Fassungsanlage (Tiefbrunnen) sowie des erforderlichen Energieeinsatzes für die Förderung und Reinjektion, gegebenenfalls auch für den Betrieb einer Wärmepumpe.

Die geologischen Voraussetzungen für hydrogeothermische Fließsysteme und Nutzhorizonte bestehen bevorzugt im Bereich ausgedehnter Beckenstrukturen und Grabenbrüche. Hierzu zählt auch der baden-württembergische Anteil des voralpinen Molassebeckens mit tertiären und mesozoischen thermalen grundwasserleitenden Einheiten. Neben der bereits bestehenden Gewinnung von Mineral- und Thermalwasser sind hier - unter entsprechenden Randbedingungen - Projekte zur hydrogeothermischen Energiegewinnung möglich. Die für eine Stromproduktion erforderlichen Grundwassertemperaturen von zumindest 100 °C werden allerdings nur in den tieferen Einheiten und nur im Süden des Untersuchungsgebiets erreicht, wo mit abnehmender Durchlässigkeit und Ergiebigkeit der Thermalaquifere gerechnet werden muss. Damit sind die Untergrundverhältnisse der Region vorherrschend für Projekte zur geothermischen Wärmeenergiegewinnung geeignet. Darüber hinaus kann der tiefere Untergrund des Kristallinen Grundgebirges nach derzeitigem Kenntnisstand grundsätzlich mittels HDR-Technik auch für eine Strom- und Wärmeproduktion erschlossen werden, die geothermischen Voraussetzungen hierfür sind jedoch „normal“ und angesichts des aktuellen Standes von Forschung und Entwicklung hierfür nicht prädestiniert.

Über den tieferen Untergrund des baden-württembergischen Anteils am Molassebecken liegen umfangreiche hydrogeologische Erkundungsdaten und geowissenschaftliche Auswertungen insbesondere aus dem Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau vor. Ziel des vom Regionalverband Bodensee - Oberschwaben in Auftrag gegebenen Projekts Teil 2 „Bereitstellung hydrogeologischer und geothermischer Grundlagen zur Nutzung tiefer Geothermie/Hydrogeothermie in der Region Bodensee - Oberschwaben“ ist es, diese Daten und Auswertungen in einheitlicher, gut überschaubarer und unmittelbar nutzbarer Form für die Planung geothermischer Erkundungs- und Erschließungsvorhaben zur Verfügung zu stellen. Soweit örtlich neue Ergebnisse vorliegen, wurden die Unterlagen inhaltlich aktualisiert. Vollständig neue Auswertungen wurden nicht vorgenommen.

Das Projekt Tiefe Geothermie/Hydrogeothermie, besteht im wesentlichen aus den als Anlage 1 bis 26 beigefügten Karten, Schnitten und sonstigen Unterlagen. Die nachfolgenden kurzen Erläuterungen dienen der zusätzlichen Dokumentation und erforderlichen Erklärung, sie können die in Kapitel 10 zusammengestellte Fachliteratur zu den hydrogeologischen und geothermischen Verhältnissen im Bereich der Region Bodensee - Oberschwaben nicht ersetzen.

## **2 Überblick über die hydrogeologischen und geothermischen Verhältnisse**

Im oberschwäbischen Teil des süddeutschen Molassebeckens, das zwischen der Schwäbisch-Fränkischen Alb und den Alpen tief eingesunken ist und im Laufe des Tertiärs mit den Ablagerungen der Molasse verfüllt wurde, sind drei thermale Grundwasserstockwerke entwickelt. Nach Süden bis Südosten in Richtung Beckenachse nimmt die Mächtigkeit der tertiären Beckenfüllung keilförmig zu und erreicht vor dem Alpennordrand mit ungefähr 4000 m ihren Höchstwert.

Die Unterlage dieses Sedimentationsbeckens bildet in der Region Bodensee - Oberschwaben die bis über 500 m mächtige, überwiegend aus Kalkstein bestehende Oberjura-Tafel, die im Nordwesten die Schwäbischen Alb aufbaut. Darunter folgen die Gesteinsschichten von Mitteljura, Unterjura, Keuper und Muschelkalk, die nördlich der Schwäbi-

schen Alb ausstreichen und das schwäbisch-fränkische Schichtstufenland bilden. Unter dem Muschelkalk folgen im Nordwesten des Untersuchungsgebiets noch Buntsandstein in geringer Mächtigkeit und in einer Zone beiderseits etwa der Linie Überlingen – Schussenried – Biberach Ablagerungen des Rotliegenden (Perm). Unter den mesozoischen und permischen (eventuell auch permokarbonischen) Sedimenten lagert das Kristalline Grundgebirge aus Graniten und Gneisen.

Die ursprünglich etwa horizontal abgelagerten Sedimentgesteine wurden durch mehrfache, unterschiedlich starke Bewegungen in der Erdkruste angehoben, schräg gestellt und abgesenkt. Als Folge fallen im gesamten oberschwäbischen Teil des Molassebeckens die Schichten unter den quartären Ablagerungen generell nach Südsüdosten ein. Die in dieser Richtung zunehmende Mächtigkeit der tertiären Molasseschichten belegt die Einsenkung des Beckens während der Sedimentation.

Das generelle Schichteinfallen wird von tektonischen Störungen (Verwerfungen) unterschiedlicher, z. T. erheblicher Versatzbeträge unterbrochen. Insbesondere aufgrund der quartären Überdeckung sind sie bei der geologischen Kartierung an der Geländeoberfläche meist nicht erkennbar bzw. nur aus Tiefbohrungen und tiefen seismischen Messprofilen bekannt.

Für die Festlegung von Bohransatzpunkten zur Erschließung von Kluftaquiferen ist die Kenntnis der tektonischen Störungszonen von besonderer Bedeutung, da in ihrer Nähe einerseits mit erhöhter Klüftigkeit des Gebirges gerechnet werden kann, andererseits bei sehr hohen Versatzbeträgen aber auch die Gefahr einer Begrenzung der grundwasserleitenden Schicht berücksichtigt werden muss.

Im oberschwäbischen Molassebecken bestehen folgende Thermalwasser-Stockwerke:

- Poren- und Kluftgrundwasserleiter der Oberen Meeresmolasse (OMM, tOM)
- Kluft- und Karstgrundwasserleiter des Oberjuras (jo)
- Verkarsteter Kluftgrundwasserleiter des Oberen Muschelkalks (mo)

Untersuchungen von Spülproben und Bohrkernen, das Auftreten von Spülungsverlusten sowie die Ergebnisse geophysikalischer Bohrlochmessungen und hydraulischer Tests in Tiefbohrungen auf Kohlenwasserstoffe (Erdöl und Erdgas) und auf Mineral- und Thermalwasser sowie hydrochemische und isotopehydrologische Untersuchungen von Wasserproben erlauben eine weitgehende Darstellung der hydrogeologischen Eigenschaften und geohydraulischen Kennwerte und der Beschaffenheit des Grundwassers in den vorgenannten Aquiferen und damit auch Prognosen zu den darin erzielbaren Thermalwasser-Ergiebigkeiten und -Eigenschaften.

In anderen Horizonten der tertiären Beckenfüllung sowie der mesozoischen und permischen Schichtenfolge kann nach aktuellem Kenntnisstand thermales Grundwasser allenfalls örtlich und nur mit geringem Dargebot erschlossen werden.

Die Wärmestromdichte im Untergrund des baden-württembergischen Molassebeckens liegt nach HAENEL et al. (1979) weitgehend in der Größenordnung 60 - 80 mW/m<sup>2</sup> und damit im mitteleuropäisch mittleren Wertebereich. Die in den Thermalaquiferen erkennbaren

geothermischen Anomalien (z.B. im Oberjura für den Bereich Bad Saulgau, Anlage 11) stehen im Zusammenhang mit tektonischen Störungen und können insgesamt auf advektiven Wärmetransport der tiefen Fließsysteme zurückgeführt werden. Dieser beeinflusst auch die teufenabhängige Ausbildung des geothermischen Gradienten.

Beispiele von Temperatur-Logs sind als Anlage 22 bis 24 beigefügt. Als regional repräsentativ wird das Log der GB 2 Bad Waldsee vom 27.11.1981 (im Ruhezustand) angesehen. Über die Strecke 120 - 1900 m beträgt der durchschnittliche Gradient  $\text{grad}T = 39,0 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ , bis Oberkante Oberjura in 1441 m Tiefe  $38,9 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ , innerhalb des Oberjuras (1441 -1900 m mit  $65,04 -83,06^\circ\text{C}$ )  $39,3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ . Bei Thermalwasserförderung aus dem Oberjura werden am Auslauf  $69,0 \text{ }^\circ\text{C}$  gemessen.

Das Temperatur-Log GB 3 Bad Saulgau vom 15.03.1983 (im Ruhezustand) belegt die dortige advektive Anomalie. Für die Strecke 120 - 585 m (tUS und nicht produktiver oberster jo) beträgt der durchschnittliche Gradient  $53,2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$  und bis zur Endteufe von 928 m (im jo)  $37,1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ , mit einem starken Rückgang im Zuflusssbereich bei etwa 585 - 638 m Teufe auf  $4,7 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ .

Als grundlegende Arbeiten zu den hydrogeologischen und hydrogeothermischen Verhältnissen im Untersuchungsgebiet werden aus dem beigefügten Literaturverzeichnis BERTLEFF (1986) und BERTLEFF et al. (1988) genannt.

Die für das Bearbeitungsgebiet bekannten und im Rahmen des Projekts berücksichtigten Tiefbohrungen sind in Anlage 21 zusammengestellt. Zu den im Textteil und in den Anlagen verwandten lithostratigraphischen Einheiten und deren Kürzel wird auf die Zusammenstellung in Anlage 25 hingewiesen. Außerdem sind alle relevanten Pumpversuche, Markierungsversuche, die isopenhydrologischen Untersuchungsergebnisse und zahlreiche Wasseranalysen im LGRB, überwiegend in Datenbanken archiviert.

### **3 Hinweise zu den Nutzungsmöglichkeiten**

Die Grundwässer in den genannten Thermalaquiferen weisen hohe mittlere Verweilzeiten im Untergrund mit kaltzeitlicher bzw. pleistozäner Komponente ( $> 12\ 000$  Jahre) oder insgesamt pleistozänem Alter auf. In den südlichen Randgebieten werden auch hochmineralisierte tertiäre Formationswässer angetroffen. Eine aktuelle Erneuerung dieser Wässer durch Zusickerung aus hangenden Schichten bzw. durch Grundwasserneubildung ist nur für den sub- bis niederthermalen Randbereich des Molassebeckens bekannt, im Beckenzentrum dagegen ist eine Neubildung, insbesondere für den Oberjura, nicht nachweisbar und damit äußerst gering oder fehlend. Als Konsequenz daraus, wird das Thermalwasservorkommen auch als „Lagerstätte“ interpretiert (BERTLEFF & WATZEL 2002).

Zur Schonung des Gesamthaushalts der tiefen Grundwässer sowie zur Vermeidung umweltbelastender Abwasser-Ableitungen mit erheblicher Wärme- und z. T. auch hoher gelöster Stofffracht in die Vorflut, werden Anlagen zur hydrogeothermischen Energiegewinnung grundsätzlich mit Reinjektion des entwärmten Wassers in den Untergrund, d.h. mit zumindest 2 Tiefbrunnen (Doublette) zur Förderung und zur Wiedereinleitung des entwärmten Wassers in den Untergrund betrieben. Dabei erfolgt die Reinjektion zur bestmöglichen Vermeidung einer Kurzschlussströmung unter- oder seitstromig des Förderbrun-

nens in den gleichen Grundwasserleiter. Darin besteht ein wesentlicher Unterschied zur oberirdischen Ableitung von abgebadetem Thermalwasser, das aus hygienischen Gründen sowie infolge geänderter Redox-Verhältnisse und gegebenenfalls auch Gasgehalte bisher allgemein und auch in Oberschwaben nicht wieder versenkt wird. Aufgrund der damit anhaltenden Beanspruchung des Aquifers muss die Förderung thermaler tiefer Grundwässer ohne Reinjektion in besonderem Maße hydraulisch, hydrochemisch und isopenhydrologisch überwacht werden.

Die Entwicklung eines hydrogeothermischen Projekts zur Erdwärmenutzung bedarf neben der Klärung berg- und wasserrechtlicher Voraussetzungen (vgl. auch Kap. 8) über die vorliegende Dokumentation hinaus einer weitergehenden Begutachtung und möglicherweise auch zusätzlicher Voruntersuchungen. Zur Minderung des Fündigkeitsrisikos in den Thermalaquiferen sind grundsätzlich umfassende Bohrloch-Entwicklungsmaßnahmen vorzusehen.

#### **4 Obere Meeresmolasse (Anlage 4 bis 7 und 17 bis 20)**

Die Obere Meeresmolasse und die darin bestehenden grundwasserleitenden Schichten sind relativ gleichförmig über weite Gebiete des Molassebeckens ausgebildet und in der Region Bodensee - Oberschwaben durch eine Reihe von Tiefbrunnen zur Erschließung von sub- bis niederthermaleminalem Mineralwasser relativ gut bekannt.

Die im Betrachtungsgebiet bis über 350 m mächtige Wechselfolge aus Schluffmergeln, mergeligen Feinsanden und mürben Fein- bis Grobsandsteinen gehört zwei Sedimentationszyklen an. Dadurch ist auch die Grundwasserführung in Teilaquifere untergliedert. Weit verbreitet sind jeweils an der Basis der beiden Zyklen z. T. gut geklüftete Sandsteine ausgebildet. Im ersten Sedimentationszyklus sind dies die 70 - 100 m mächtigen Basissandsteine der Heidenlöcherschichten (HE) und im zweiten Zyklus die 20 - 40 m mächtigen Baltringen-Schichten (BS). Beide bestehen vorwiegend aus glaukonitreichen Fein- und Mittelsanden, die durch karbonatisches Bindemittel schwach zu Sandstein verfestigt sind. In den Baltringen-Schichten können auch Grobsande und Gerölle auftreten. Zwischen diesen sandigen Bereichen wurde eine Sandschiefer-Schluffmergelschicht abgelagert, die generell über 100 m Mächtigkeit erreicht. Da diese Gesteine inkompetent reagieren und keine vertikal durchgehend offenen, wasserwegsamten Klüfte bilden, ist eine weitgehende hydraulische Trennung zwischen den genannten Teilaquiferen anzunehmen.

Erfahrungsgemäß liegt die erschließbare und technisch mögliche Förderrate aus einer Bohrung zwischen 5 und 10 l/s. Diese Ergiebigkeit lässt sich möglicherweise durch Hydrofracs, im Regelfall jedoch nicht durch Drucksäuerung steigern.

In Bohrungen und Tiefbrunnen, die die Obere Meeresmolasse erschließen, wurden z. T. umfangreiche Pumpversuche durchgeführt. Da während der einzelnen Pumpversuche keine Mächtigkeitsreduktionen bzw. keine hydraulisch wirksame Ränder festgestellt wurden, kann auf einen ausgedehnte, relativ homogenen und isotropen Aquifer geschlossen werden. Die ermittelten Transmissivitäten nehmen vom nordwestlichen Beckenrand mit  $T \geq 1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  zum Beckeninnern auf Werte von  $T < 6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  für die Baltringen-Schichten bzw. auf  $T = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  für die Heidenlöcherschichten ab. Die Verteilung der ermittelten Transmissivitäten und die Mächtigkeit der Oberen Meeresmolasse sind in Anlage 5 dargestellt.

Da in den im Untersuchungsgebiet bisher abgeteuften Bohrungen und Tiefbrunnen die beiden Teilaquifere der Oberen Meeresmolasse meist im selben Bohrloch zusammen gefasst wurden, liegen bis heute keine für diese Teilaquifere eindeutig differenzierten Druckhöhenpläne vor. Aus den vorliegenden Wasserstand- bzw. Druckhöhenmessungen (Anlage 6) kann auf eine regionalen Grundwasserscheide etwa entlang der Linie Bad Buchau-Memmingen geschlossen werden. Südwestlich dieser Linie fließt das Grundwasser mit schwachem Potenzialgefälle dem Bodensee zu, der bei Bregenz und bei Rohrschach mit der Oberen Meeresmolasse Kontakt hat.

Im Westen des Untersuchungsgebiets ist das Strömungsbild ebenfalls auf den Bodensee, hier jedoch auf den Bereich Überlingen ausgerichtet, wo die Obere Meeresmolasse an beiden Ufern des Sees breitflächig ausstreicht. Zwischen diesen beiden Vorflutbereichen (westlicher und östlicher Bodensee) erfolgt der Abstrom wahrscheinlich unter dem Bodensee hindurch bis in den Raum Winterthur, wo die Obere Meeresmolasse in den Tälern der Thur und Töss ausstreicht. Nordöstlich der Grundwasserscheide zeichnet sich ein Gefälle und die Ablussrichtung nach Nordosten ab.

Die Temperatur des Grundwassers in den Baltringen-Schichten übersteigt erst südlich der Linie Insel Mainau – Aulendorf – Ochsenhausen die 20 °C- bzw. Thermalwassergrenze. Das Maximum von knapp über 35 °C wird im Raum Wangen (Allgäu) – Leutkirch erreicht. An der Basis der OMM sind die Temperaturen um etwa 6 - 8 °C höher als in den Baltringen-Schichten. Die Temperaturverteilung an der Basis der Baltringen-Schichten ist aus Anlage 7 ersichtlich.

Während die flachen Brunnen (Tiefe < 200 m) in der Oberen Meeresmolasse des nördlichen Molassebeckens Grundwasser vom Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-Typ erschließen, werden in den tieferen Brunnen im mittleren bis südlichen Beckenbereich (Thermalwasserbohrungen Bad Wurzach, Ravensburg, Bad Waldsee GB 1) Na-HCO<sub>3</sub>-Wässer (Kationenausrauschwasser) angetroffen. In den tieferen Abschnitten der OMM im Bodenseegebiet (z. B. Insel Mainau TB 1) wird ein Grundwasser vom Na-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>-Typ erschlossen. Für die tiefsten Bereiche des basalen Teilaquifers der Heidenlöcherschichten (Bohrung Kißlegg 13) ist der Na-HCO<sub>3</sub>-Cl-Typ charakteristisch.

Die Ergebnisse von Isotopengehaltsmessungen an Grundwässern der Oberen Meeresmolasse erlauben, wie die Ergebnisse der hydrochemischen Untersuchungen, einen nördlichen, beckenrandnahen von einem südlichen, beckeninneren Aquiferbereich zu unterscheiden. Während im beckenrandnahen Bereich Grundwässer mit mittleren Verweilzeiten von einigen Jahren bis maximal 11 000 Jahren auftreten und demzufolge unter heutigen klimatischen Bedingungen, d.h. im Holozän, neugebildet wurden, sind im beckeninneren Aquiferbereich Grundwässer gespeichert, die unter klimatischen Bedingungen einer Kaltzeit bzw. des Pleistozäns neugebildet wurden. Eine Ausnahme hiervon machen die Grundwässer aus der Bohrung Kißlegg 13 (Heidenlöcherschichten), deren Isotopengehalte auf eine Neubildung unter wärmeren klimatischen Bedingungen als heute hinweisen. Wahrscheinlich handelt es sich noch um Anteile von OMM-Formationswasser.

In den hangenden und liegenden Schichten der OMM, der Oberen Süßwassermolasse (tOS, OSM) und der Unteren Süßwassermolasse (tUS, USM) ist kein bedeutendes, für eine zentrale Wärmegewinnung ausreichendes Grundwasserdargebot zu erwarten. Die

Temperaturverhältnisse können beispielsweise aus den Profilen der Anlagen 22 bis 24 entnommen werden.

## **5 Oberjura (Anlagen 8 bis 11 und 17 bis 20)**

Von der unter dem oberschwäbischen Molassebecken etwa 350 - 550 m mächtigen Gesteinsfolge des Oberjuras (auch als Malm bezeichnet) bilden die teils massigen, teils geschichteten Kalk- und Dolomitsteine der Unteren und der Oberen Felsenkalk-Formation (Mittel- und Oberkimmeridge, ki2, ki3) und der Liegenden Bankkalk-Formation (ki4) den eigentlichen Grundwasserleiter. Die Gesteine sowohl der darunter liegenden Impressamergel- (Oxford-Mergel; ox1), Wohlgeschichteten Kalk- (Oxford-Kalke; ox2) und der Lacunosamergel-Formation (Kimmeridge-Mergel; ki1) als auch die der überdeckenden Zementmergel- (ki5) und Hangenden Bankkalk-Formation (ti1) sind in der Regel in geschichteter, z. T. mergeliger, mittel- bis dünnbankiger Fazies ausgebildet und weniger wasserwegsam geklüftet und weniger verkarstungsfreudig. Sie führen dem entsprechend nur wenig oder bereichsweise auch praktisch kein Grundwasser. Stellenweise reicht der Grundwasserleiter stratigraphisch höher, wenn die Zementmergel und Hangenden Bankkalke ganz oder teilweise ebenfalls in Massenkalk-Fazies ausgebildet sind.

In Anlage 8 sind die Schichtlagerung für den Top Oberjura mit zunehmend steilem Einfallen nach Südost und die Faziesverteilung im Abschnitt obere Untere Felsenkalke (ki2.4), differenziert in Riffdolomit und Massenkalk, Schichtfazies und Helvetische Fazies dargestellt.

Ergebnisse von Messungen in den ab 1977 in Oberschwaben abgeteuften Thermalwasser- und Geothermiebohrungen haben die Befunde aus zahlreichen Erdöl- und Erdgasbohrungen bestätigt, wonach innerhalb des Grundwasserleiters ki2 - ki4 hauptsächlich die Abschnitte mit frühdiagenetisch entstandenen Dolomiten und kavernen Dedolomiten – so genannter „zuckerkörniger Lochfels“ – grundwasserführend sind. Demnach reduziert sich die Nettomächtigkeit des Aquifers im eigentlichen Sinne auf 20 - 50 m, wobei der übrige, weitaus mächtigere Teil des Schichtpakets ki2 - ki4 infolge der Vernetzung unterschiedlich dimensionierter, wasserführender Klüfte als Speicherschicht wirkt.

Aufgrund der Misserfolge südlich einer ungefähren Linie Konstanz – Fronhofen – nördlich Memmingen Thermalwasser zu erschließen, dürfte der Oberjura hier sehr wahrscheinlich nicht nennenswert verkarstet und allenfalls als nur relativ schwach durchlässiger Kluftgrundwasserleiter ausgebildet sein. Als Südgrenze des Kluft- und Karstgrundwasserleiters im Oberjura wird damit der nördliche Rand der helvetischen Fazies angenommen, die von gebankten und soweit bekannt hier nur gering durchlässigen Quintner-Kalken eingenommen wird.

Die Kalksteine des Oberjuras, besonders die Massenkalk, sind von der Schwäbischen Alb als gut geklüftet und durch die Verkarstung reich an Hohlräumen, Höhlen und großen Quellen bekannt. Auch unter der Molasse-Überdeckung sind die Oberjura-Massenkalk verkarstet, allerdings in geringerem Maße. Zu unterscheiden sind die hydrogeologisch unwirksame Verkarstung an der Jura-Oberfläche mit Bildung von Boluston und die Verkarstung von Poren-, Lochfels- und Kluftstrukturen innerhalb des Aquifers, die dessen Durchlässigkeit und Ergiebigkeit bestimmen.

Die Thermalwasserbohrungen Bad Saulgau, Bad Buchau und Jordanbad haben gezeigt, dass zumindest in der weiteren nördlichen Randzone des Molassebeckens aus dem Grundwasserstockwerk des Oberjuras kurzfristig große Thermalwassermengen gefördert werden können (Größenordnung 50-100 l/s). Derart hohe Ergiebigkeiten sind jedoch nicht als „normal“, d. h. nicht als regional repräsentativ und langfristig ohne Konsequenzen einer Überbewirtschaftung anzusehen. Dies zeigen beispielsweise die Thermalwasserbohrungen Singen und TB 2 Bad Saulgau, aus denen nur 1,2 - 3,5 l/s gepumpt werden konnten. Die Ergiebigkeit jeder Oberjura-Bohrung hängt davon ab, in welchem Ausmaß offene Klüfte und Hohlräume angetroffen werden und in welcher Fazies das Aquifergestein ausgebildet ist. Da bisher keine Verfahren bekannt sind, Klüfte, Hohlräume oder die fazielle Ausbildung der Kalk- und Dolomitsteine von der Oberfläche her zu erkunden, muss hier mit Zufallergebnisse gerechnet werden (sogen. Fündigkeitsrisiko). Wie aus der räumlichen Verteilung der totalen Spülungsverluste in Kohlenwasserstoff- und Thermalwasserbohrungen im Karst- und Kluftwasserleiter des Oberjuras zu erkennen ist, sind Verkarstungsprozesse entlang von größeren Störungzonen aufgrund der stärkeren Zerklüftung und daher besseren Wegsamkeit für das durchströmende Wasser intensiver. Daher eignen sich solche Zonen besonders für den Ansatz von Bohrungen.

Bei zunächst kleinen Ergiebigkeiten besteht die Möglichkeit, ein Bohrloch durch das Verfahren der Drucksäuerung oder eines Hydrofracs besser an benachbarte Kluft- und Hohlraumssysteme anzuschließen und dadurch die Ergiebigkeit auf ein mehrfaches zu steigern. Im Einzelfall können auch Schräg- oder Horizontalbohrungen in Betracht gezogen werden.

In der Karte der Grundwasseroberfläche bzw. -druckfläche für den Kluft- und Karstaquifer (Anlage 10) ist eine ausgedehnte Kuppe westlich Meßkirch und im weiteren Verlauf Richtung Pfullendorf – Ravensburg die ausgeprägte Druckwasserscheide Rhein/Donau erkennbar. Die Grundwasser-Druckkuppe wird einerseits durch ein Potenzialgefälle bis zu 20 ‰ in Richtung Bodensee-Hochrhein und andererseits durch das nur 5 ‰ betragende Gefälle nach Osten gekennzeichnet, womit die Fließrichtungen des Grundwassers beiderseits der Kuppe und der Wasserscheide bestimmt sind. Der bedeutender östliche Abstrom verläuft mit nach Norden bis Nordosten verflachendem Gefälle über Bad Saulgau – Bad Buchau – Biberach zum regionalen Vorfluter Donau.

Im Verbreitungsgebiet des offenen und des von Molasse überdeckten Kluft- und Karstaquifers wurden die geohydraulischen Parameter durch zahlreiche Pumpversuche, in einzelnen Fällen auch durch Markierungsversuche ermittelt.

Als charakteristisch für alle Pumpversuche im Hauptaquifer des Oberjuras in Massenkalkfazies und mit Lochfelsbildung hat sich herausgestellt, dass die gemessenen Druckwasserspiegel während des Pumpbetriebs eine deutlich ausgeprägte Abminderung der Absenkung erfahren, die auf Leakage, d.h. eine Grundwasserzusickeung aus benachbarten Gebirgsräumen (Zusatzspeicher) innerhalb des Oberjuras zurückzuführen ist (vgl. STÖBER 1986). Diese hydraulische Stützung ist abhängig von der Größe und Ausbildung des Zusatzspeichers, da sie nur so lange funktioniert, als Wasser nachgeliefert werden kann.

Aufgrund der geohydraulischen Untersuchungsergebnisse lässt sich der von Molasse überdeckte Kluft- und Karstaquifer des Oberjuras in zwei Strömungs- und Durchlässigkeitsbereiche gliedern:

- ein nördlicher, beckenrandnaher Bereich mit hohen Transmissivitäten von  $T = 3,8 \cdot 10^{-3}$  bis  $5,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
- und
- ein südlicher Bereich im Beckenzentrum mit geringeren Transmissivitäten von  $T = 1,2 \cdot 10^{-4}$  bis  $6,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ .

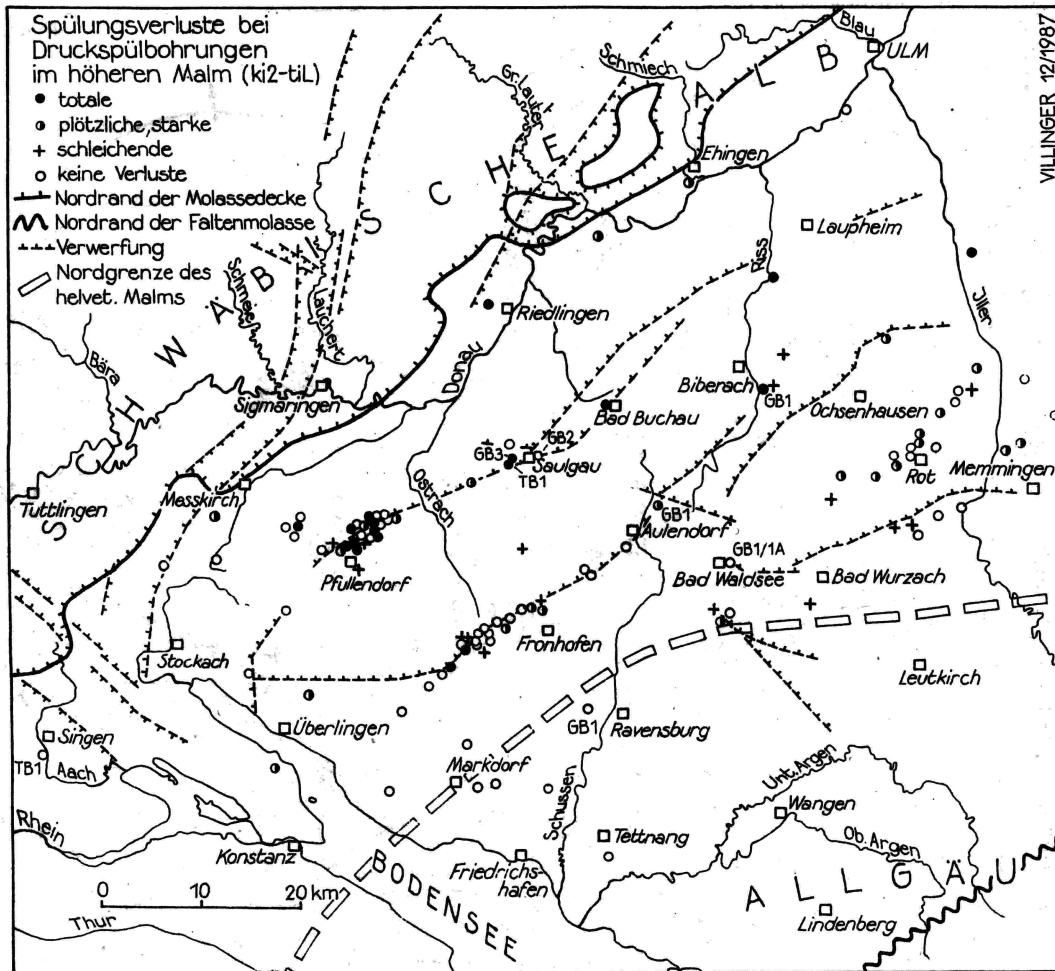
Im offenen Karst der Schwäbischen Alb steigen die Transmissivitäten des Karstaquifers nach Norden weiter an.

Die Verteilung der Durchlässigkeit (m/s)  $T/H$  im Kluft- und Karstaquifer des Oberjuras, berechnet aus dem Verhältnis Transmissivität  $T$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) und hydraulisch wirksame Aquifermächtigkeit  $H$  (m), hier im Bereich ki2 bis jo-Oberfläche, ist in Anlage 9 dargestellt.

Aus Markierungsversuchen im nördlichen Bereich des Kluft- und Karstaquifers wurde eine durchflusswirksame Porosität von 2,7% bestimmt.

Eine Zusammenstellung von Spülungsverlusten in Druckspülbohrungen im höheren Oberjura zeigt Abb. 2.

**Abb. 2:** Spülungsverluste im Kluft- und Karstgrundwasserleiter des Oberjuras (ki2 - ti1) beim Abteufen von Druckspülbohrungen im Molassebecken, aus BERTLEFF et al. (1988)



Die Temperaturverhältnisse im Oberjura sind in Anlage 11 dargestellt. Der Bezugshorizont 100 m unter der Grenze tertiäre Molasse/Oberjura entspricht im größten Teil Oberschwabens etwa der Obergrenze des Grundwasserleiters ki2 - ki4. Die Temperaturen steigen von 10 – 20 °C im weiteren Bereich der Donau bis auf 80 – 100 °C am Nordrand der helvetischen Fazies und darin bis über 140 °C ganz im Südosten der Region (Bereich Isny im Allgäu). Schließlich hängt die erschlossene und nutzbare Temperatur des Thermalwassers von der jeweiligen Tiefenlage der Hauptwasserzutritte unter GOK und innerhalb des Oberjuras ab (vgl. z.B. Temperatur-Log GB 3 Saulgau, Anlage 22).

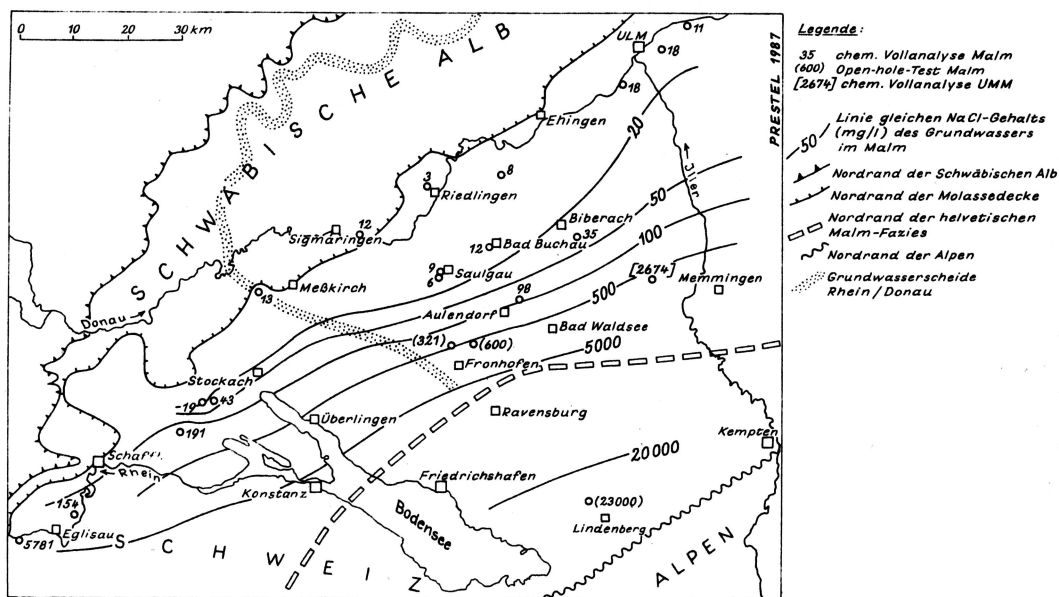
Umfangreiche hydrochemische Untersuchungen und zahlreiche Messungen der Gehalte des Grundwassers an stabilen und instabilen Isotopen haben zur Klärung der Funktionsweise der Strömungssysteme im Kluft- und Karstgrundwasserleiter des Oberjuras im Molassebecken beigetragen.

Aus den vorliegenden Ergebnissen können wiederum zwei Strömungsbereiche unterschieden werden:

- ein nördlicher, beckenrandnaher Bereich mit Grundwasser des Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-Typs; seine höheren <sup>2</sup>H- und <sup>18</sup>O-Gehalte sowie die ermittelten Edelgastemperaturen weisen auf eine Neubildung unter holozänen Klimabedingungen hin,
- ein südlicher, beckeninnerer Bereich mit Grundwasser des Na-Ca-HCO<sub>3</sub>-Cl-Typs (Ionenaustauschwasser), das aus den hangenden Aquiferen der Molasse in den Kluft- und -Karstaquifer infiltriert ist; seine geringen <sup>2</sup>H- und <sup>18</sup>O-Gehalte sowie die Edelgastemperaturen weisen auf eine Neubildung unter kaltzeitlichen, d. h. pleistozänen Klimabedingungen hin.

Etwa ab dem Übergangsbereich zur helvetischen Fazies nimmt die Mineralisierung des Grundwassers nach Süden, insbesondere durch steigende Na-Cl-Gehalte bis etwa 20 000 mg/l, sehr stark zu (Abb. 3).

**Abb. 3:** NaCl-Gehalte (mg/l) des Grundwassers im Oberjura des Molassebeckens, nach PRESTEL aus BERTLEFF et al. (1988)



Für den Fall, dass sich für den Oberjura im Beckeninneren die Vorstellung einer im Pleistozän neugebildeten Thermalwasser-Lagerstätte bestätigt (vgl. Kap. 3), hätte dies zur Folge, dass bei Überbewirtschaftung durch zusätzliche Entnahmen ohne Reinjektion sehr langfristig rezent neugebildetes kühleres Grundwasser mit anderer hydrochemischer Zusammensetzung vom Beckerrand zuströmt. Sowohl die Möglichkeit eines solchen Vorgangs als auch die Reinjektion von abgekühltem Thermalwasser bedarf deshalb einer sorgfältigen Prognose und Überwachung.

## **6 Oberer Muschelkalk (Anlagen 12 bis 15 und 17 bis 20)**

Die Dolomit- und Kalksteinserie des Oberen Muschelkalks (mo) ist im Untersuchungsgebiet aus Kohlenwasserstoffbohrungen sowie von westlich bis nordöstlich davon aus der Erschließung von Mineral-Thermalwasser (Tuttlingen, Bad Urach, Neu-Ulm) bekannt. Seine Mächtigkeit nimmt in der Region von etwa 70 m im Nordwesten bis zur Verbreitungsgrenze im Ostsüdosten, westlich Leutkirch, etwa gleichmäßig ab (Anlage 13).

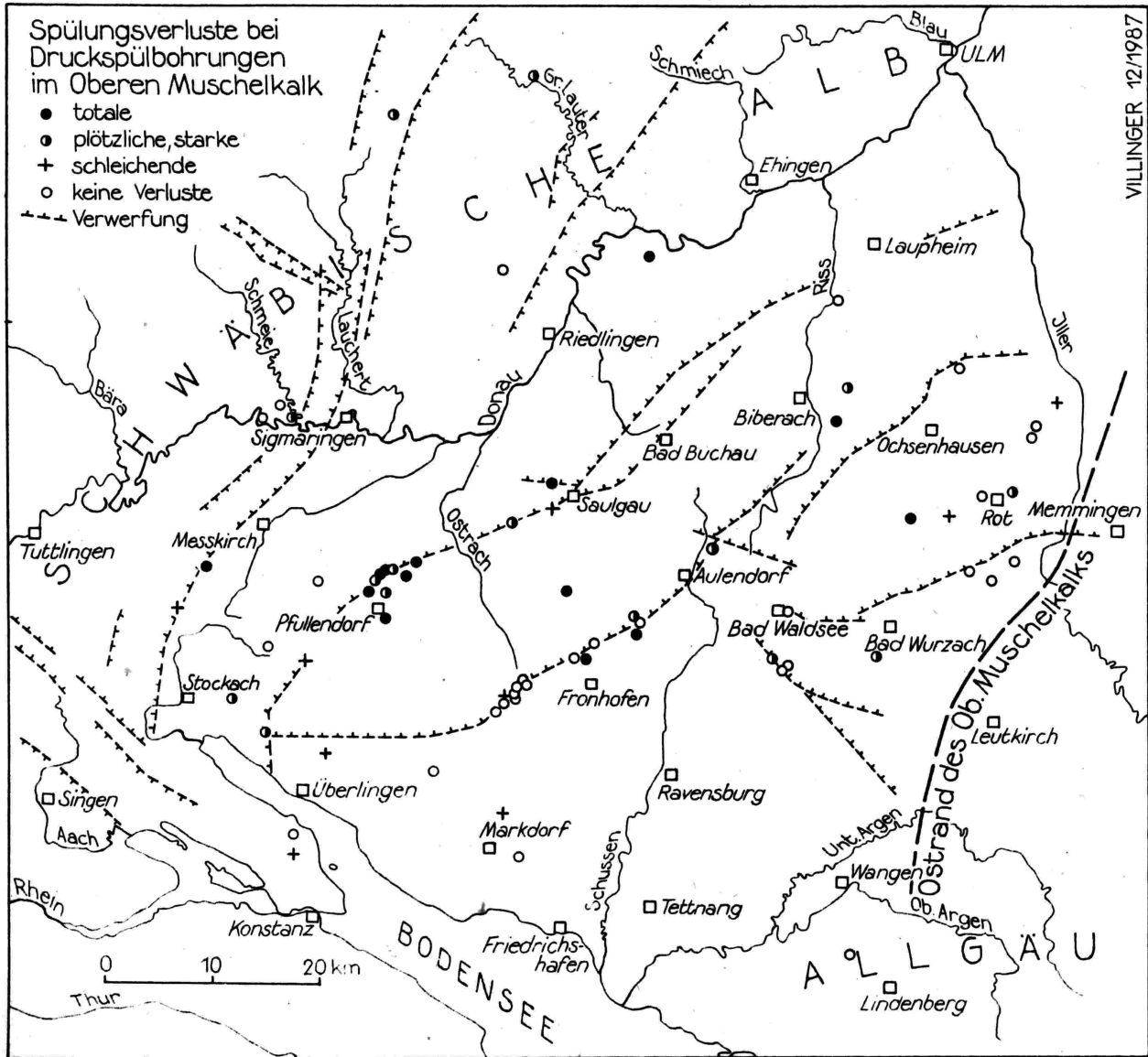
Mittlerer und Unterer Muschelkalk (mm, mu) zeigen entsprechend Mächtigkeitsreduktionen mit nach Ostsüdost verminderter Verbreitung. Der Untere Muschelkalk liegt praktisch vollständig in der Fazies des Muschelsandsteins (mus) vor.

Die Schichtfläche Top Oberer Muschelkalk fällt im Untersuchungsgebiet nach Südosten zunehmend steil von -100 auf -3500 m NN ab (Anlage 12). Als Aquifer fungiert insbesondere der poröse bis feinkavernöse Trigonodusdolomit, dessen Anteil am Profil von 25 bis 30 m Mächtigkeit im Norden und Westen der Region nach Südosten auf praktisch 100 % des Oberen Muschelkalks zunimmt. Darin wurden in einer Vielzahl von Erdöl- und Erdgasbohrungen starke Spülungsverluste beobachtet. Der Obere Muschelkalk ist demnach auch im Westteil des oberschwäbischen Molassebeckens so geklüftet und durchlässig, dass er als guter Kluftgrundwasserleiter wirkt. Örtlich sind dem Grundwasserleiter auch die geringmächtigen Dolomite des überlagernden Unterkeupers und die Oberen Dolomite des unterlagernden Mittleren Muschelkalks hinzuzurechnen.

Die in Kohlenwasserstoffbohrungen erfassten Spülungsverluste sind aus Abb. 4 ersichtlich. Die ermittelten Größenklassen des Aquiferkenntwertes T/H sind in Anlage 13 eingetragen. Beim Injektionsversuch in der Kohlenwasserstoffbohrung Fulgenstadt 1 wurde, vor Beginn der Injektion von insgesamt 45 m<sup>3</sup> Wasser, der Wasserspiegel bei rd. 336 m unter GOK gemessen. Es wurden jeweils 30 min lang Schluckraten von 8,3 l/s und 16,6 l/s erzielt. Der dabei bis auf 29 m u. GOK angestiegene Wasserspiegel stellte sich nach 1,5-stündigem Wiederabfall bei 331 m unter GOK = 276 m NN ein.

Die im Oberen Muschelkalk aus einem Tiefbrunnen erzielbare Ergiebigkeit wird auf 5 bis 10 l/s, unter sehr günstigen Voraussetzungen im Westen und Norden der Region auch höher, geschätzt.

**Abb. 4:** Spülungsverluste im Grundwasserleiter des Oberen Muschelkalks beim Abteufen von Druckspülbohrungen im Molassebecken, aus BERTLEFF et al. (1988)

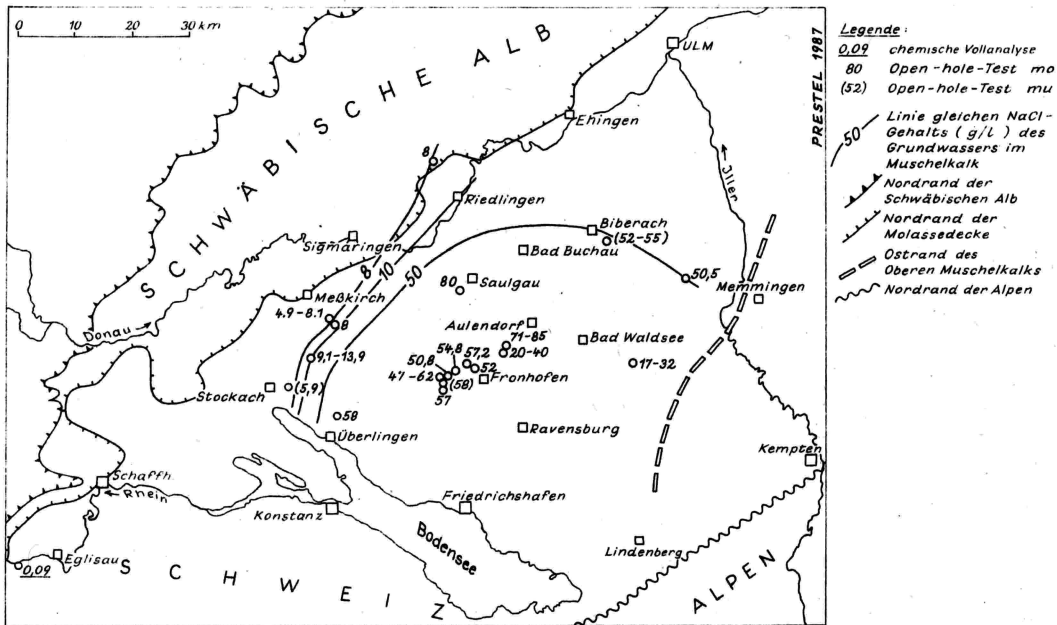


Die in Anlage 14 nach STÖBER & VILLINGER (1997) dargestellte Grundwasserdruckfläche für den Aquifer des Oberen Muschelkalks beruht größtenteils auf den Schließdrücken von Open-Hole-Tests in Erdöl-/Erdgasbohrungen, die generell mit einer Unsicherheit behaftet sind. Das Gesamtbild zeigt jedoch eine ausgeprägte Druckdepression vom westlichen Bodensee nach Nordnordost (in Richtung mittlerer Neckar). Außerdem ergibt sich, dass die Druckwasserspiegellhöhen im Oberen Muschelkalk sehr niedrig sind und ungefähr 200 - 250 m unter jenen des Kluft- und Karstaquifers im Oberjura liegen. Somit muss bei einer Erschließung und Nutzung des Thermalwassers mit sehr großen Förderhöhen gerechnet werden.

Die Mineralisation der Tiefen Grundwässer im Oberen Muschelkalk des Untersuchungsgebietes ist ebenfalls aus einer Anzahl von Tests in Kohlenwasserstoffbohrungen bekannt.

Es handelt sich um NaCl-Solen sehr hoher Konzentration (10 - 80 g/l NaCl). Nach Nordwesten hin und nördlich der Donau nehmen die Salzgehalte auf 5 - 10 g/l ab.

**Abb. 5:** NaCl-Gehalte (g/l) der Grundwässer im Muschelkalk des Molassebeckens, nach PRESTEL aus BERTLEFF et al. (1988)



Den Ergebnissen isotopenhydrologischer Untersuchungen an Erdöllagerstättenwässern aus stark vernässten Erdöl- und Erdgasproduktionsbohrungen im Oberen Muschelkalk des tieferen Molassebeckens zufolge, handelt es sich um Wässer, die unter wärmeren klimatischen Bedingungen als jenen der Kaltzeiten des Pleistozäns und auch denjenigen von heute neugebildet wurden. Wahrscheinlich wurde dieses Grundwasser durch die tektonische Bewegungen des nordwestlichen Molassetroges schon während des Tertiärs im Aquifer eingeschlossen, so dass es am aktiven Wasserkreislauf nicht mehr teilnehmen konnte (sogenanntes konnates Wasser). Nach Norden und Westen hin ist entsprechend den hydrochemischen Verhältnissen mit Übergängen zu „jüngeren“ (pleistozänen) Grundwässern zu rechnen.

Die Temperaturen im Bereich Top Muschelkalk sind, im Wesentlichen nach Messungen in Kohlenwasserstoffbohrungen, in Anlage 15 dargestellt. Sie nehmen von 45 °C im Nordwesten (etwa Bereich Gammertingen, Lkr. Sigmaringen) auf bis zu 150 °C am Südostrand der Region zu.

Im Gebiet Fronhofen – Illmensee ist der Trigonodusdolomit häufig ölführend, was seine Nutzung des Oberen Muschelkalks in diesem Bereich zur Gewinnung von Thermalwasser praktisch ausschließt (Karte Anlage 3, Beschreibung Anlage 26).

## **7 Tieferer Untergrund**

Die Schichtenfolge im Liegenden des Muschelkalks ist erst teilweise geklärt.

Die Verbreitungsgrenze des Buntsandsteins bzw. permotriassischer Ablagerungen verläuft nordwestlich der Linie Radolfzell – Pfullendorf – Ehingen (Donau) (s. Schnitte Anlage 17 und 20). Auch bei zunehmender Mächtigkeit nach NW ist darin keine nutzbare Grundwasserführung zu erwarten.

Die Fortsetzung des von Westsüdwest nach Ostnordost streichenden, in der Schweiz und bis zum Überlinger See nachgewiesenen Permo-Karbon-Trogs mit mächtigen Rotliegend- und Oberkarbon-Ablagerungen (Schnitt Anlage 17) durch das Untersuchungsgebiet ist noch nicht ausreichend belegt. Eine effektive geothermische Nutzung der generell nur gering durchlässigen Rotliegendesedimente ist mit derzeit verfügbarer Technik nicht möglich.

Unter dem sedimentären Deckgebirge, verbreitet direkt unter Muschelkalk, folgt Kristallines Grundgebirge. Die aus allen verfügbaren Bohrdaten ermittelte Höhenlage der Kristallinoberfläche ist in Anlage 16 dargestellt. Etwa ab einer Tiefenlage der Bezugsfläche auf -2000 m NN wird am Top Kristallin eine Temperatur 100 °C erreicht und nach Südsüdosten hin weiter überschritten. Innerhalb des Kristallinen Grundgebirges sind nach HAENEL et al. (1979) für das Untersuchungsgebiet in 5000 m Tiefe unter GOK Temperaturen von etwa 150 bis möglicherweise 180 °C zu erwarten.

## **8 Schutz sensibler Grundwassernutzungen**

Bestehende und wasserrechtlich abgesicherte Grundwassernutzungen dürfen durch ein Projekt zur Nutzung der tiefen Geothermie nicht beeinträchtigt werden. Für die wasserrechtliche Vorbeurteilung und Prüfung im Rahmen des bergrechtlichen Erlaubnisverfahrens zur Aufsuchung oder des Bewilligungsverfahren zur Nutzung von Erdwärme sind qualitative und quantitative Aspekte des Grundwasserschutzes zu berücksichtigen. Grundlage dafür sind die Karte der Wasserschutzgebiete im Projekt 1 (Oberflächennahe Geothermie, Erdwärmesonden), die erteilten bergrechtlichen Konzessionen (Anlage 1) und die Darstellung sensibler Grundwassernutzungen (Anlage 2).

Die Konzessionsgebiete für die Erdwärmennutzungen bzw. Thermalwassergewinnungen im Verbandsgebiet sind, mit Ausnahme von Nr. 2073-1 für Bad Saulgau, nur gering ausge dehnt (in Anlage 1 nur symbolisch darstellbar, konkrete Abmessungen erhältlich beim LGRB, Regierungspräsidium Freiburg Ref. 97).

Sensible Grundwassernutzungen sind die Gewinnungen von Mineral-, Heil- und Thermalwasser, insbesondere von nach Mineral- und Tafelwasserverordnung (MTV) anerkanntem natürlichem Mineralwasser, von Heilwasser sowie staatlich anerkannten Heilquellen für die ein Schutzgebiet nicht möglich ist oder derzeit nicht besteht.

Relativ oberflächennahe Mineralwassergewinnungen sind im Projekt 1, Oberflächennahe Geothermie, mit einem etwa einer 50tägigen Fließzeit entsprechenden engeren Zustrombereich dargestellt, in dem Eingriffe in den Untergrund bis in den genutzten Grundwasserleiter problematisch sind.

Für staatlich anerkannte Heilquellen können Quellen- bzw. Heilquellenschutzgebiete ausgewiesen werden. Dies ist in Oberschwaben aufgrund der natürlichen Geschütztheit der Fließsysteme bisher nicht erfolgt. Die Richtlinien der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser 1998 für die Abgrenzung von Heilquellenschutzgebiet empfiehlt allerdings auch für tiefe Systeme Schutzgebiete mit insbesondere quantitativen Schutzzonen auszuweisen, um darin konkurrierende Nutzungen oder schädliche Eingriffe abzuwehren.

Es war nicht möglich, im Rahmen des Projekts für die derzeit 6 staatlich anerkannten Heilquellen im Untersuchungsgebiet (4 im jo-, 2 im tOM-Grundwasserleiter) entsprechende Schutzzonen individuell abzugrenzen. Ersatzweise wurde ein durchschnittlicher, für alle Heilquellen einheitlich gewählter Zustrombereich mit 5 km Reichweite abgegrenzt und in Anlage 2 orientiert nach der Zustromachse (gemäß den Grundwassergleichenplänen Anlage 6 und 10) für den jeweils genutzten Grundwasserleiter eingetragen. Unabhängig von der für jeden Einzelfall erforderlichen Prüfung durch eingehende Begutachtung und/oder numerische Modellierung der hydraulischen Verhältnisse zur Gewährleistung einer unbeinträchtigten Heilquellennutzung, kann davon ausgegangen werden, dass innerhalb dieses ersatzweise abgegrenzten Zustrombereichs eine geothermische Energiegewinnung aus dem Nutzhorizont regelmäßig nicht möglich sein wird.

Weitere Anträge auf Anerkennung als Heilquelle sind für die erschlossenen Thermalwässer entlang des Bodensees zu erwarten.

## **9 Auftreten von Kohlenwasserstoffen**

Wesentliche Daten zum geologischen Bau des Molassebeckens und den hydrogeologischen und geothermischen Verhältnissen beruhen auf den Ergebnissen der früheren Prospektion auf Kohlenwasserstoffe (Erdöl, Erdgas) durch die Aufnahme seismischer Messprofile und die Durchführung von Tiefbohrungen (dokumentiert in Anlage 21).

Das unerwartete Auftreten von Kohlenwasserstoffen in der Bohrstrecke oder innerhalb des angezielten Nutzhorizonts für die Tiefbohrungen eines hydrogeothermischen Projekts kann zu Erschwernissen und Verzögerungen führen. Der Kenntnisstand zum Auftreten von Kohlenwasserstoffen im baden-württembergischen Molassebecken ist deshalb in Anlage 3 dargestellt und in Anlage 26 zusammenfassend beschrieben.

## **10 Literaturverzeichnis**

### **Verwendete Literatur**

BERTELFF, B. (1986): Das Strömungssystem der Grundwässer im Malm – Karst des Westteils des süddeutschen Molassebeckens. – Abh. Geol. Landesamt Baden-Württemberg, **12**, Abb. 6, Anl. 2, Anl. 3, Anl. 4, Anl. 6; Freiburg.

BERTLEFF, B., BAUER, B., CAMMERER, F., MICHEL, W. (2005): Die Thermalwassererschließung von Friedrichshafen. - Ber. Naturf. Ges. Freiburg i. Br., **95/1**, S. 213 - 235, Abb. 2 (mod.); Freiburg.

BERTLEFF, B., JOACHIM, H., KOZIOROWSKI, G., LEIBER, J., OHMERT, W., PRESTEL, R., STOBER, I., STRAYLE, G., VILLINGER, E., WERNER, J. (1988): Ergebnisse der Hydrogeothermiebohrungen in Baden-Württemberg. – Jahresheft des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg, **30**, S. 27 – 116, Abb. 8, Abb. 10, Abb. 11, Abb. 13, Abb. 18, Anl. 2; Freiburg.

BERTLEFF, B., WATZEL, R. (2002): Tiefe Aquifersysteme im südwestdeutschen Molassebecken. Eine umfassende hydrogeologische Analyse als Grundlage eines zukünftigen Quantitäts – und Qualitätsmanagements. – Abhandl. des LGRB BW, **15**, S. 75 – 90, Abb. 16; Freiburg.

HAENEL, R. ET AL. (1979): Atlas of Subsurface Temperatures in the European Community. – Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Karte 19; Hannover.

KÄMPFE, C. (1984): Tiefbohrungen in Baden-Württemberg und umgebende Länder. - Arb. Inst. Geol. Paläont. Univ. Stuttgart, Abb. 4 (mod.); Stuttgart.

LÄNDERGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA) (1998): Richtlinien für Heilquellenschutzgebiete. - 27 S., Kulturbuchverlag Berlin; Berlin.

LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU BADEN- WÜRTTEMBERG (BEARB.: PIKULSKI, A.) (1989): 1. Bericht zum Projekt „Grundwasserbilanz der Oberen Meeresmolasse in Oberschwaben, Abb. 8, Anl. 0, Anl. 2 (mod.), Anl. 4, Anl. 9; Freiburg; unveröffentlicht.

ROLF, K., MEYER, F., SCHMIDT – KALER, H. (1989): Paläogeographischer Atlas des süddeutschen Oberjura (Malm). – Geologisches Jahrbuch, Reihe A, **115**, Tafel 5; 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, **37**, S. 77 – 96, Abb. 3, Abb. 4, Abb. 5, Tab. 1; Freiburg.

VILLINGER, E. (1977): Über Potentialverteilung und Strömungssysteme im Karstwasser der Schwäbischen Alb (Oberer Jura, SW – Deutschland). – Geolog. Jahrbuch, Reihe C, **18**, Anl. 1 (mod.); Hannover.

### **Weiterführende Literatur**

ABELE, G., BESCHOREN, B., DEHM, R., ERB, L., FUCHS, B., GANSS, O., KIDERLEN, H., NATHAN, H., NEUMAIER, F., SCHMIDT- THOME, P., STEPHAN, W. (1955): Erläuterungen zur Geologischen Übersichtskarte der Süddeutschen Molasse 1 : 300 000. - 106 S., 7 Abb., 3 Taf.; München.

BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, INFRASTRUKTUR, VERKEHR UND TECHNOLOGIE (2004): Bayerischer Geothermieatlas. – 104 S., 23 Abb., 17 Tab.; München.

BERTLEFF, B. (1986): Hydrogeologisches Gutachten über die Möglichkeit der Erschließung von Thermal- Mineralwasser aus der Oberen Meeresmolasse zum Betrieb eines Thermal- und Mineralbades mit Erdwärmennutzung im Stadtgebiet Kißlegg (Lkr. Ravensburg). - Geologisches Landesamt, AZ. II/1 - 688/86, 23 S., 1 Anl.; Freiburg; unveröffentlicht.

BERTLEFF, B., CAMMERER, F., EICHINGER, L., FRITZ, J., HÄNEL, R., HORNBERGER, MICHEL, W., R., RAUERT, W., RIEBER, K., SALVAMOSER, J., SCHULZ, R., STICHLER, W., STOBER, I., STRAYLE, G., WERNER, J., ZOTH, W. (1985): Geothermisches Demonstrationsprojekt Saulgau. Abschlussbericht. – Bundesministerium für Forschung und Umwelt, Forschungsbericht 03 E – 4404 – A, 354 S.; Bad Urach.

BERTLEFF, B., CAMMERER, F., FRANZ, M., MICHEL, W. (2002): Die Thermalwassererschließung im Oberjura von Überlingen am Bodensee. - Abhandl. des LGRB BW, **15**, S. 105 – 126, 7 Abb., 6 Tab.; Freiburg.

BERTLEFF, B., EGGER, R., EICHINGER, L., RAUERT, W., STICHLER, W. (1983): Comparative study of different aquifer types in South Germany using environmental isotopes. – International Symposium on isotope hydrogeology in water resources development, International Atomic Energy Agency, IAEA-SM-270/30, 26 S., 8 Abb.; Wien.

BERTLEFF, B., ELLWANGER, D., SZENKLER, C., EICHINGER, L., TRIMBORN, P., WOLFENDALE, N. (1993): Interpretation of hydrochemical and hydroisotopical measurements on palaeogroundwaters in Oberschwaben, south Germany alpine foreland, with focus on quaternary geology. – Isotope techniques in the study of past and current environmental changes in the hydrosphere and the atmosphere, proceedings of a symposium, S. 337 ff., IAEA – SM/-329/63; Wien.

BERTLEFF, B., HAMMER, W., JOACHIM, H., KOZIOROWSKI, G., STOBER, I., STRAYLE, G., VILLINGER, E., WERNER, J. (1987): Hydrogeothermiebohrungen in Baden-Württemberg. Eine Übersicht. – Z. dt. geol. Ges., **138**, S. 411 – 423, 8 Abb., 1 Tab.; Hannover.

BERTLEFF, B. & WERNER, J. (1989): Die Geothermiebohrung Saulgau GB 3. – Abh. Geol. Landesamt Baden – Württemberg, **13**, S. 7 – 22, 2 Abb., 1 Anl.; Freiburg.

BUNDESMINISTERIUM FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE (1985): Abschlussbericht Geothermisches Demonstrationsprojekt Saulgau, Forschungsbericht 03 E - 4404 - A.

FRITZ, F., EBERWEIN, P., REICHEL, T. (1996): Geothermisches Projekt Meersburg - Geothermiebohrung Meersburg 1 - Technischer Schlussbericht und Dokumentation. 43 S., 16 Tab., 33 Anl.; Bad Urach; unveröffentlicht.

KIRALY, L. (1989): Grundwasserströmungsmodell, in Endbericht des Verbundprojektes des BMBF (Forschungsvorhaben 03 E 6240 A/B) „Hydrogeothermische Energiebilanz und Grundwasserhaushalt des Malmkarstes im süddeutschen Molassebecken“, LGRB und BLW, unveröffentlicht.

LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU BADEN- WÜRTTEMBERG (2002): Karte der Mineral-, Heil- und Thermalwässer, Solen und Säuerlinge in Baden- Württemberg. - 1 Karte, 1 Erläuterung mit 1 Abb. U. 1 Tab.; Freiburg.

LEMCKE, K. (1975): Molasse und vortertiärer Untergrund im Westteil des süddeutschen Alpenvorlandes. – Jber. u. Mitt. Oberrh. geol. Ver., **57**, S. 87 – 115, 25 Abb.; Stuttgart.

LEMCKE, K. (1976): Übertiefe Grundwässer im süddeutschen Alpenvorland. – Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing., **42**, S. 9 – 19, 4 Abb.; Basel.

LEMCKE, K. (1987): Zur Frage der alten Verkarstung des Malm im Untergrund des deutschen Molassebeckens und an dessen Nordwestrand. - Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. u. Ing., **53**, S. 33 – 46, 5 Abb.; Basel.

LEMCKE, K., TUNN, W. (1956): Tiefenwasser in der süddeutschen Molasse und in ihrer verkarsteten Malmunterlage. – Bull. Ver. Schweizer. Petrol.-Geol. U. Ing., Vol. 23, **64**, S. 35-57; Basel.

MEYER, R. K. F., SCHMIDT - KAUDER, H. (1989): Paläogeographischer Atlas des süddeutschen Oberjura (Malm). – Geol. Jb., A, 115: 77S., 45 Abb., 10 Taf.; Hannover.

PRESTEL, R. (1987): Isotopengehalte von Kluft- Calciten aus dem Malm-Kern der Bohrung Saulgau GB 3. – Abh. Geol. Landesamt Baden-Württemberg, **13**, S. 161 – 180, 8 Abb., 3 Tab.; Freiburg.

- PRESTEL, R. (1990): Untersuchungen zur Diagenese von Malm-Karbonatgesteinen und Entwicklung des Malm-Grundwassers im süddeutschen Molassebecken. – Institut für Geologie und Paläontologie der Universität Stuttgart; 271 S., 80 Abb., 32 Tab.; Dissertationsdruck; Stuttgart.
- SCHÄDEL, K. & STOBER, I. (1984): Die Störung des Temperaturprofils in der Bohrung Saulgau I. – Beiträge zur Hydrologie, **10** (1), S. 101 – 112, 3 Abb.; Kirchzarten.
- SCHÄDEL, K. & STOBER, I. (1988): Dispersion als Hinweis auf den Karsttypus. – DGM 32, **4**, 2 Abb., S. 107 – 110; Koblenz.
- SCHREINER, A. (1966): Zur Stratigraphie der Oberen Meeresmolasse zwischen der Oberen Donau und dem Überlinger See (Baden-Württemberg). – Jber. u. Mitt. Oberrh. Geol. Ver., **48**, S. 91 – 104, 5 Abb., 1 Tab.; Freiburg.
- STICHLER, W., RAUERT, W., WEISE, S., WOLF, M., KOSCHEL, G., STIER, P., PRESTEL, R., HEDIN, K., BERTLEFF, B. (1987): Isotopenhydrologische und hydrochemische Untersuchungen zur Erkundung des Fließsystems im Malmkarstaquifer des süddeutschen Alpenvorlandes. – Z. dt. geol. Ges., **138**, S. 387-398, 11 Abb.; Hannover.
- STOBER, I. (1986): Strömungsverhalten in Festgesteinsaquiferen mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen. – Geologisches Jahrbuch, Reihe C, **42**, 57 Abb., 8 Tab., 38 Abb. im Anh., 204 S.; Hannover.
- STOBER, I. (1991): Strömungsvorgänge und Durchlässigkeitsverteilung innerhalb des Weißjura-Aquifers im baden-württembergischen Anteil des Molassebeckens. – Laichinger Höhlenfreund, **26** (1), S. 29 – 42, 7 Abb., 1 Tab.; Laichingen.
- STRAYLE, G., STOBER, I., SCHLOZ, W. (1994): Ergiebigkeitsuntersuchungen in Festgesteinsaquiferen. – Informationen 6, Geologisches Landesamt Baden – Württemberg, 114 S., 65 Abb., 11 Tab.; Freiburg.
- STRAYLE, G., VILLINGER, E., WERNER, J. (1982): Erfahrungen bei Geothermiebohrungen in Oberschwaben. – Schweizer. Ing. – u. Architekt. – Verein, SIA – Dokument. 59, S. 95 – 103; Zürich.
- VILLINGER, E. (1988): Bemerkungen zur Verkarstung des Malms unter dem westlichen süddeutschen Molassebecken. – Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. u. Ing., **54**, S. 41-59, 6 Abb., 2 Tab.; Basel.
- VILLINGER, E. (1982): Hydrogeologische Aspekte zur geothermischen Anomalie im Gebiet Urach-Boll am Nordrand der Schwäbischen Alb (SW – Deutschland). – Geologisches Jahrbuch, Reihe C, **32**, 9 Abb., 9 Tab.; Hannover.
- VILLINGER, E. (1986): Hydrogeologisches Gutachten über die Ergebnisse der Geothermiebohrung Bad Waldsee (Lkr. Ravensburg). - Geologisches Landesamt, AZ. II/1 - 827/86, 12 S., 11 Anl.; Freiburg; unveröffentlicht.
- VILLINGER, E. (1985): Hydrogeologisches Gutachten über die Möglichkeit der Gewinnung von geothermischer Energie aus Thermalwasser im Stadtgebiet Bad Wurzach (Lkr. Ravensburg). - Geologisches Landesamt, AZ.II/1 - 194/83, 15 S., 2 Anl.; Freiburg; unveröffentlicht.
- VILLINGER, E. (1986): Untersuchungen zur Flussgeschichte von Aare – Donau / Alpenrhein und zur Entwicklung des Malm – Karsts in Südwestdeutschland. – Jh. Geol. Landesamt Baden-Württemberg, **28**, S. 297 – 362, 10 Abb., 2 Tab., 3 Beil.; Freiburg.

VILLINGER, E. (1988): Zur Verkarstung des Weißjura unter dem baden - württembergischen Teil des Molassebeckens. - Laichinger Höhlenfreund, **23** (1), S. 35 - 38, 1 Abb.; Laichingen.

VILLINGER, E., STOBER, I., BERTLEFF, B. (1985): Hydrogeologisches Gutachten über die Ergebnisse der Thermalwassererschließung in der Oberen Meeresmolasse bei Ravensburg, Lkr. Ravensburg. - Geologisches Landesamt, AZ. II/1 - 2238/85, 16 S., 10 Anl.; Freiburg; unveröffentlicht.

VOLLMAYR, TH. (1971): Zur Geologie des Feldes Pfullendorf - Ostrach. - Bull. Ver. Schweiz. Petrol.-Geol. u. -Ing., Vol. 37, **92**, S. 1 - 20, 16 Abb.; Basel.

WERNER, J. (1987): Das Forschungsvorhaben „Hydrogeothermische Energienutzung und Grundwasserhaushalt des Malmkarsts im süddeutschen Molassebecken“ – Ziele und Zwischenergebnisse. – Z. dt. geol. Ges., **138**, S. 399 – 409, 8 Abb., 1 Tab.; Hannover.

**Anmerkungen:** Weitere unveröffentlichte, LGRB-interne Berichte sind im Literaturverzeichnis nicht berücksichtigt.

Alle TK25 der Region Bodensee - Oberschwaben liegen auch als Geologische Karte GK25, z. T. mit Erläuterungen vor (s. aktuelle Karten-, Schriften- und Geodatenverzeichnisse des LGRB, Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9).