

Positive Anomalien können u.a. auf Bereiche aufsteigender thermaler Tiefengrundwässer zurückgeführt werden. Sekundäre Temperaturquellen, wie z.B. Grubenbrände, nehmen eine Sonderstellung ein.

Der Transport der Erdwärme erfolgt prinzipiell auf zwei Arten (STOBER & BUCHER, 2012): 1) **konvektiv** in einem strömenden Medium (Grundwasser, Gas etc.) und 2) **konduktiv** durch die Leitfähigkeit des Gesteins. Die **Wärmeleitfähigkeit** der Gesteine ist unterschiedlich. Dies trifft auch auf ihre **Wärmekapazität** zu, die beschreibt, wie viel Wärme gespeichert werden kann. Tabelle 6 gibt einen Überblick zur Wärmeleitfähigkeit und zur spezifischen Wärmekapazität ausgewählter Materialien (das ist die Wärmemenge, die benötigt wird, um die Temperatur eines Kilogramms eines Materials um ein Kelvin anzuheben). Zusammengefasst nimmt die Temperatur mit der Tiefe rascher zu, je höher der Wärmestrom und je geringer die Wärmeleitfähigkeit ist.

Einen Sonderfall, der ebenfalls zur Temperaturerhöhung beitragen kann, stellt die **bakterielle Reduktion** dar. Hier werden im Wasser gelöste Sulfate unter anaeroben Bedingungen und in Gegenwart von organischer Substanz durch Bakterien zu Schwefelwasserstoff reduziert. Dies wirkt temperaturerhöhend. So nehmen beispielsweise WALLHÄUSER & PUCHELT (1966) bei geeigneten Bedingungen Temperaturzunahmen bis ca. 50 °C an.

Nach GÖTZL et al. (2012b) liegt die Wärmestromdichte in Österreich im Mittel bei ca. 0,071 mW/m², das entspricht etwa durchschnittlichen Werten von kontinentaler Kruste (Abb. 2). In den Nördlichen Kalkalpen und Karawanken liegen generell unterdurchschnittliche geothermische Verhältnisse vor. Diese sind vorwiegend

auf eine erhöhte Krustenmächtigkeit aufgrund der alpinen Überschiebung zurückzuführen. Zudem spielen tief infiltrierende kalte Oberflächenwässer eine Rolle für diese niedrigen Werte. Die höchsten Wärmestromdichten sind im Oststeirischen Becken anzutreffen, die mit einer Hochlage der Asthenosphäre im Bereich des Pannonischen Beckens zu erklären sind. In der Molassezone und im Wiener Becken herrschen im Allgemeinen durchschnittliche geothermische Bedingungen vor. Insbesondere in Gebieten mit tief zirkulierenden Thermalwässern (z.B. niederbayerisch-oberösterreichischer Thermalwasserkörper) können lokale bis regionale Anomalien auftreten. Eine weitere großräumige Anomalie tritt im Bereich des Tauernfensters auf.

1.3.1 Bestimmung von Untergrundtemperaturen

(P. NIEDERBACHER)

Für die Bestimmung von Untergrundtemperaturen werden direkte Messungen in Tiefenaufschlüssen (Bohrungen, Tunnel, Schächte) herangezogen. Bohrungsaufschlüsse liefern, neben den Informationen zum Intern- und Tiefbau, wertvolle Hinweise zum vertikalen Temperaturverlauf im Untergrund und zu potenziellen Tiefenaquiferen. Im Falle von durchgeführten Formationstests und Probeförderungen liegen auch Informationen zum Chemismus und Ergiebigkeit der angetroffenen Poren- und Kluftmedien (Formationswässer) vor. Temperaturinformationen beim Abteufen der Tiefbohrungen liefern die Auslauftemperaturen der Bohrspülung, die Messungen der Maximaltemperaturen bei geophysikalischen Bohrlochmessungen (Borehole Tem-

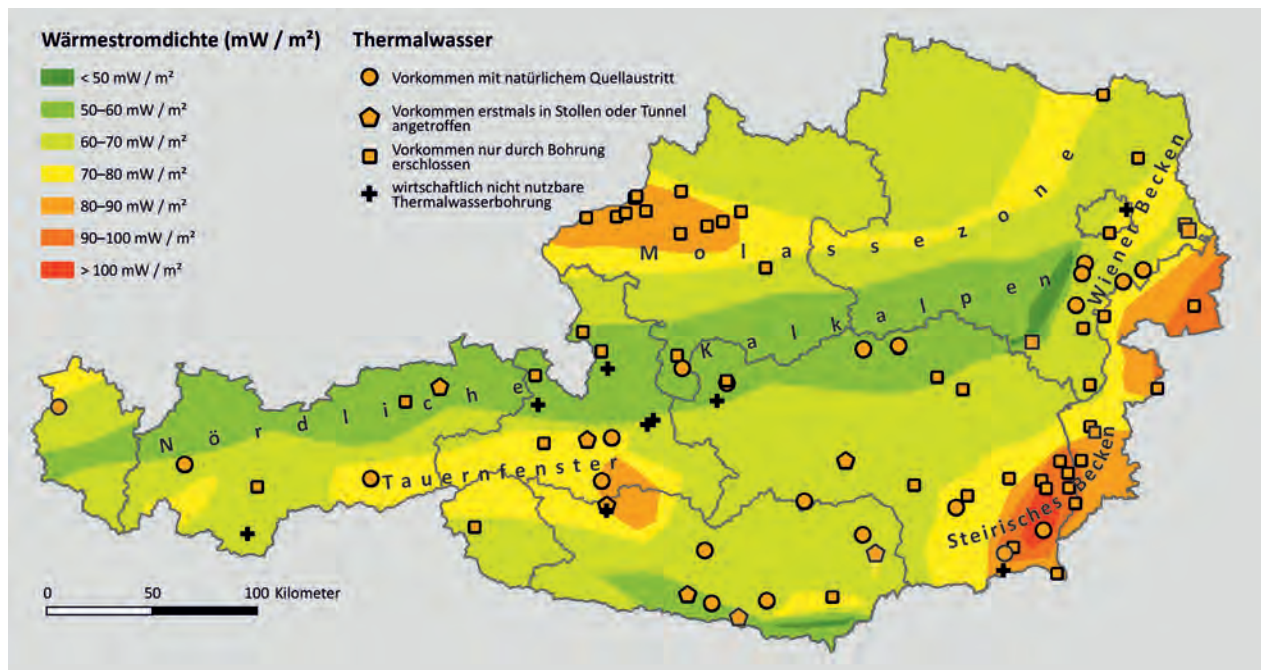


Abb. 2. Konzeptionelle Karte der terrestrischen Wärmestromdichte in Österreich (verändert nach GÖTZL et al., 2012b).

perature, BHT) und Temperaturlogs, sowie die Temperaturmessungen bei Formationstests (Open Hole- und Casing Tests). Bei Fördertests werden die Auslauftemperaturen des zu Tage tretenden Mediums gemessen und durch Messgeräte im Bohrloch die Temperaturen in-situ bestimmt.

Während in-situ Messungen bei Fördertests verlässliche Temperaturdaten liefern (Reservoir Temperature, TR) sind die im Zuge der Bohrungsherstellung durchgeführten Messungen durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst, wie z.B. durch die Meißelarbeit (Erwärmung), Abkühlung durch die zirkulierende Spülung im unteren Abschnitt der Bohrung und relative Erwärmung im oberen Bohrlochbereich, Eintritt von Spülung in durchlässige Formationen, unterschiedliche Standzeit der Bohrung bis zur Messung etc. Zur Bestimmung der tatsächlichen Formationstemperaturen in bestimmten Tiefen werden die technisch im Bohrloch gemessenen Temperaturen auf die von der Bohrtiefe (Measured Depth, MD) abweichende wahre Teufe (True Vertical Depth, TVD) bezogen und mit empirischen Verfahren oder Modellrechnungen auf Grundlage der Wärmeleitungsgleichung korrigiert. Dazu werden bohrtechnische Daten wie zeitlicher Bohrablauf, Bohrlochgeometrie, Spülungsdaten, BHT-Zeitreihen, Testtemperaturen und Ansätze zur thermischen Leitfähigkeit der Gesteine herangezogen. Diese internen Daten sind vielfach nicht verfügbar. Die Abschätzung der Gebirgstemperaturen und geothermalen Gradienten erfolgt daher auf Grundlage freigegebener und publizierter Daten unter Hinweis auf den Übersichtscharakter der Daten.

Durch die bei den Explorationsbohrungen festgestellten geothermalen Tiefenstufe ist davon auszugehen, dass ab Tiefen von ca. 800 bis 1.000 m Untergundtemperaturen > 20 °C erreicht werden und im Falle des Antreffens wasserführender Gesteinsformationen Thermalwasser vorliegt. Für eine geothermale Nutzung sind höhere Fluidtemperaturen erforderlich, die in größeren Aufschlusstiefen erreicht werden.

1.4 Zur Hydrogeochemie und Isotopenhydrologie von Thermalwasser

(D. ELSTER)

1.4.1 Zur Herkunft des Thermalwassers und seiner Lösungsinhalte

Bei der Herkunft des Thermalwassers unterscheidet man prinzipiell zwischen meteorischem Wasser, juvenilem Wasser und Formationswasser. Unter **juvenilen Wässern** werden jene verstanden, die aus der Tiefe kommen und erstmals in den Wasserkreislauf gelangen. In Österreich dürften sie kaum von Bedeutung sein. In Gebieten mit aktivem Vulkanismus spielen sie sehr wohl eine wichtige Rolle. **Meteorische Wässer** nehmen am Wasserkreislauf teil. Aufgrund von langen und tiefreichenden Zirkulationswegen müssen sie aller-

dings nicht unbedingt jung sein, sondern können Verweilzeiten von vielen tausenden Jahren aufweisen. **Formationswässer** weisen hohe Salzkonzentrationen auf. Dies wird in der Regel auf bei der Sedimentation eingeschlossenes Meerwasser zurückgeführt. MICHEL (1997) berücksichtigt die folgenden weiteren Einflüsse: 1) Zersetzung von organischer Substanz, 2) Auflösung von Mineralien der Gesteine, 3) gelöste Stoffe aus der tieferen Erdkruste.

Die Konzentrationen der im Wasser gelösten festen Stoffe sind im Wesentlichen vom Angebot im Gestein, von der Löslichkeit, den Mineralphasen und von der Beschaffenheit des Wassers abhängig. In Tabelle 7 befindet sich eine Übersicht über die Zusammensetzung ausgewählter Gesteine. Für die Beweglichkeit der Bestandteile sind jedoch auch weitere Faktoren wie z.B. der Einbau in Mineralneubildungen, Fällungsreaktionen, das Sorbieren an Oberflächen und Ionenaustausch wichtig.

Thermalwässer mit mehr als 250 mg/l freiem Kohlenstoffdioxid werden als **Säuerlinge** bezeichnet (Tab. 2). Das Kohlenstoffdioxid selbst wird in den meisten Fällen mit vulkanischer Aktivität aus vergangener Zeit assoziiert (KÄSS & KÄSS, 2008). Prinzipiell ermöglichen tiefreichende Bruchstrukturen die Freisetzung von Kohlenstoffdioxid aus dem Erdmantel. Zum Teil kann das Kohlenstoffdioxid auch mit über Bruchstrukturen aufsteigende basaltische Magmen in Verbindung gebracht werden. **Solen** können entweder auf Formationswässer zurückgeführt werden oder gehen auf einen Kontakt mit Salzvorkommen zurück. Treten **Sulfatwässer** auf, so wurde in den meisten Fällen Sulfat wie Gips oder Anhydrit gelöst. Bei **Schwefelwässern** kommen mehrere Prozesse in Betracht. So können unterschiedliche Schwefelspezies aufgrund verschiedener Redox-Reaktionen aus Sulfaten entstehen. Für das Hochtemperatur-Regime < 80–140 °C ist die thermodynamische Reduktion und für das Niedrigtemperatur-Regime < 60–80 °C die bakterielle Reduktion von Bedeutung (KÄSS & KÄSS, 2008). Auch postvulkanische Wasserdampf-Exhalationen können große Mengen an Schwefelwasserstoff enthalten, sie sind in Österreich jedoch nicht bekannt. In Österreich treten vermehrt thermale **Ionen-austausch-Wässer** auf. Bei Ionenaustauschern (z.B. Tonminerale) handelt es sich um wasserunlösliche Stoffe, die aus Wässern positive oder negative Ionen aufnehmen und dafür eine äquivalente Menge Ionen (stöchiometrische Umsetzung) abgeben (MICHEL, 1997). Von Bedeutung sind hier vor allem thermale Natrium-Hydrogencarbonat-Chlorid-Wässer wie sie z.B. mit dem Oberjura der österreichischen Molasse zu assoziieren sind.

Radonhaltige Wässer (Kap. 1.4.4) sind oft an saure, silikatreiche kristalline Gesteine gebunden, da diese Uran-Mineralien enthalten, mit denen das in Klüften zirkulierende Wasser in Kontakt kommt (KÄSS & KÄSS, 2008). Über die natürlichen elementaren Zerfallsprozesse, wie z.B. bei dem radioaktiven Element Uran, entsteht als Zwischenprodukt das radioaktive Edelgas Radon,