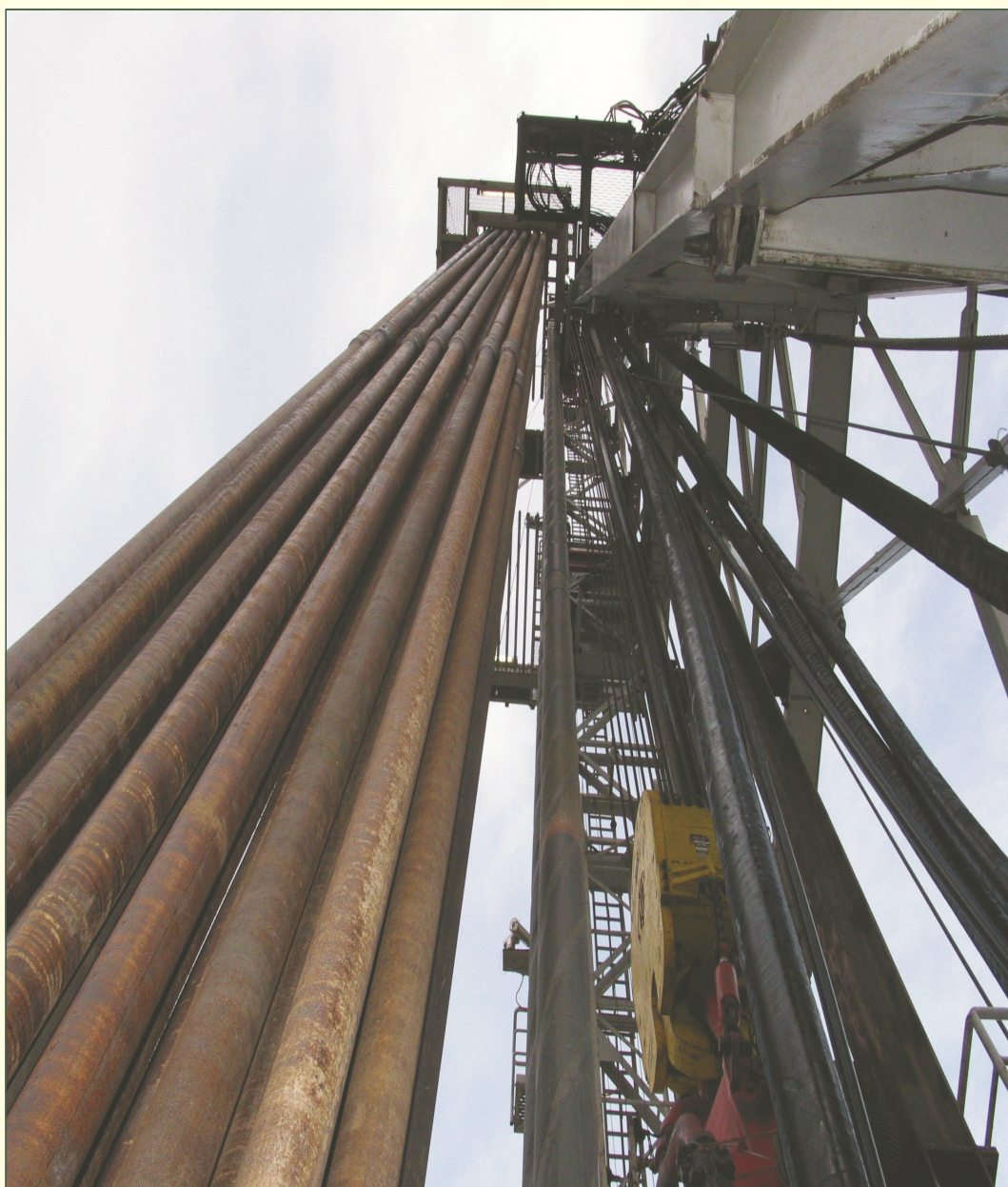


Untergrundtemperaturen in Baden-Württemberg



Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Titelbild: Bohrturm einer Tiefbohrung – Blick von unten.
Links: Gestänge, Mitte: Flaschenzug.



Untergrundtemperaturen in Baden-Württemberg

Bearbeiter:

RÜDIGER SCHELLSCHMIDT* &

INGRID STOBER**

Mit Beiträgen von:

WILHELM SCHLOZ**, REINHARD JUNG* und RÜDIGER SCHULZ*

* Institut für

Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA-Institut), Hannover

** Regierungspräsidium Freiburg, Abteilung 9:

Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (RPF-LGRB)

LGRB-Fachbericht	2/2008	28 S.	14 Abb.	2 Tab.	Freiburg i. Br. Mai 2008
------------------	---------------	-------	---------	--------	-----------------------------



Herausgeber: REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG – Abteilung 9
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB)
Albertstraße 5, 79104 Freiburg i. Br.
Telefon: (07 61) 208-30 00
Telefax: (07 61) 208-30 29
E-Mail: abteilung9@rpf.bwl.de
Internet: <http://www.rpf-freiburg.de>

Bearbeiter: Dr. RÜDIGER SCHELLSCHMIDT,
Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA-Institut),
Stilleweg 2, 5000 Hannover und
Prof. Dr. INGRID STÖBER (RPF-LGRB)

Beiträge von: Dr. WILHELM SCHLOZ (RPF-LGRB),
Dr. REINHARD JUNG und Dr. RÜDIGER SCHULZ (beide GGA-Institut)

Redaktion: Dipl.-Ing. (FH) Bettina Schmücking (RPF-LGRB)

Graphik: Dip.-Geol. Isabel Rupf, Dipl.-Ing. (FH) BETTINA SCHMÜCKING,
Dipl.-Ing. (FH) JOACHIM SCHUFF (alle RPF-LGRB)

DTP: BRIGITTE WOLF (RPF-LGRB)

Druck: RP- und Polizeidruckerei, Bissierstraße 7, 79114 Freiburg i. Br.

Ausgabe: Mai 2008

© Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Übersetzung, Nachdruck, Vervielfältigung auf fotomechanischem oder ähnlichem
Wege sowie Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen – auch auszugsweise –
nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.

Inhalt

1	Geologie und Hydrogeologie von Baden-Württemberg	5
2	Temperaturdaten	9
3	Ausgewählte Temperaturprofile in Baden-Württemberg	13
4	Erstellen der Temperaturkarten	17
5	Charakteristik des Temperaturfeldes, geologische und hydrogeologische Interpretation der Temperaturkarten	19
	<i>Literatur</i>	<i>27</i>
	Dank	28





1 Geologie und Hydrogeologie von Baden-Württemberg

Das Regierungspräsidium Freiburg, Abteilung 9: Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (RPF-LGRB), erstellte in Zusammenarbeit mit dem Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA-Institut) neue Karten der Temperaturverteilung im tieferen Untergrund von Baden-Württemberg.

Die Geologie von Baden-Württemberg ist, wie in Abb. 1 zu sehen, äußerst vielfältig. In Baden-Württemberg können die unterschiedlichsten Gesteine in unterschiedlichen Tiefen angetroffen werden. Die hydraulischen und thermischen Eigenschaften des geologischen Untergrundes sind daher entsprechend vielfältig. Da Erdwärme auf zweierlei Weise trans-

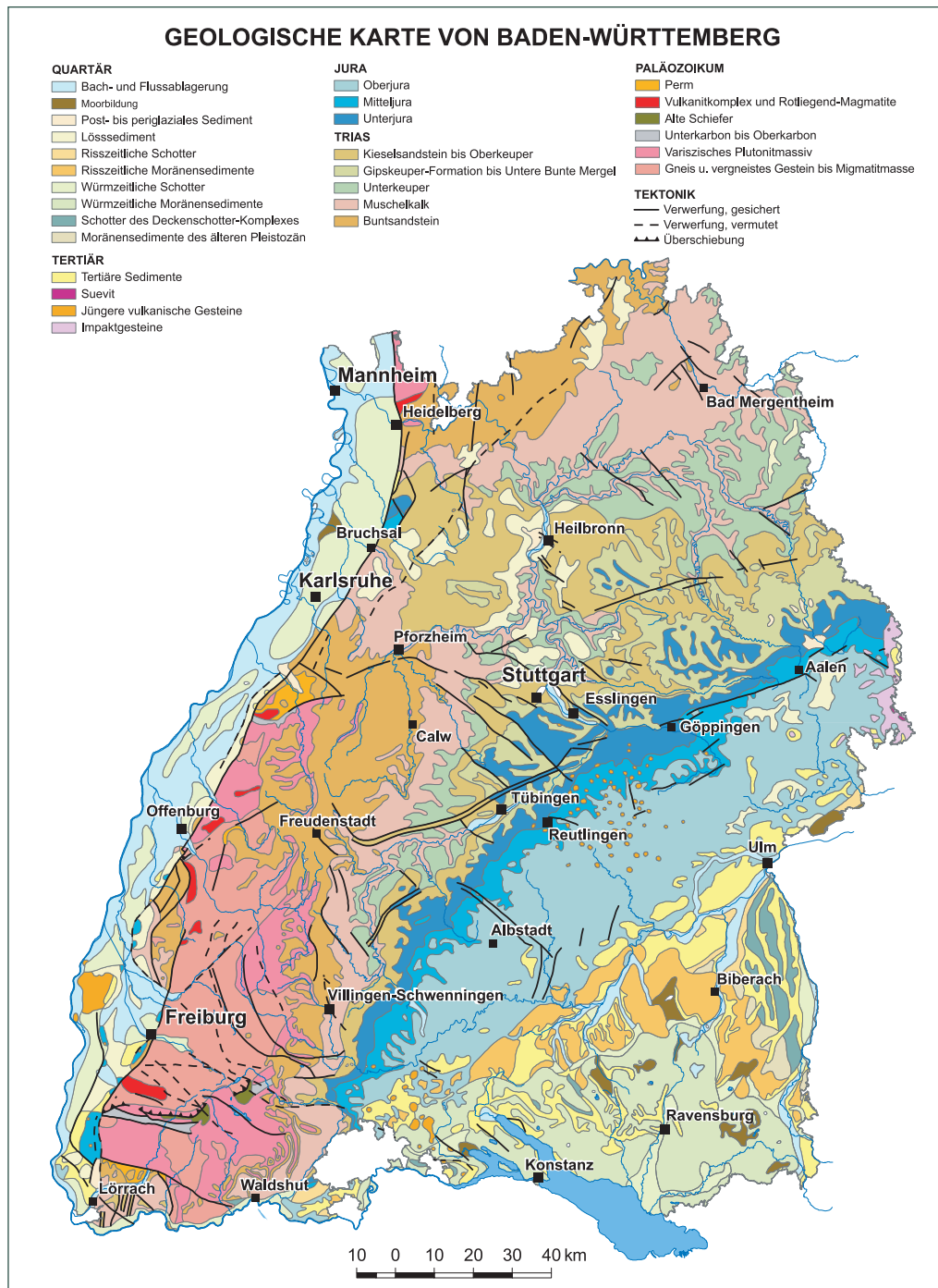


Abb. 1 Geologische Karte von Baden-Württemberg.

portiert werden kann – einmal konvektiv, sozusagen mit dem fließenden Grundwasser (oder anderen Fluiden) oder konduktiv durch das Gestein –, sind die wesentlichen Größen für diese Temperaturverteilung – zumindest in Baden-Württemberg – die Durchlässigkeit und die Wärmeleitfähigkeit des Gebirges. Durch die Vielfalt der Gesteine in Baden-Württemberg streuen diese Werte in entsprechend weiten Grenzen.

Abbildung 2 zeigt die Höhenlage der Kristallinoberfläche Baden-Württemberg. Während im westlichen

Bereich im Odenwald und südlichen Schwarzwald das kristalline Grundgebirge an der Erdoberfläche ansteht, taucht es nach Osten, insbesondere auch nach Südosten bis in größere Tiefen unter die Erdoberfläche ab. Die größte Tiefenlage der Kristallinoberfläche wird im Oberrheingraben sowie im südöstlichen Teil von Baden-Württemberg erreicht. Das Kristalline Grundgebirge wird hier in mehreren tausend Metern unter Normalnull (m u. NN) erwartet.

Die Karte der Geländehöhe (Abb. 3) veranschaulicht die großen Reliefunterschiede, die in bestimmten

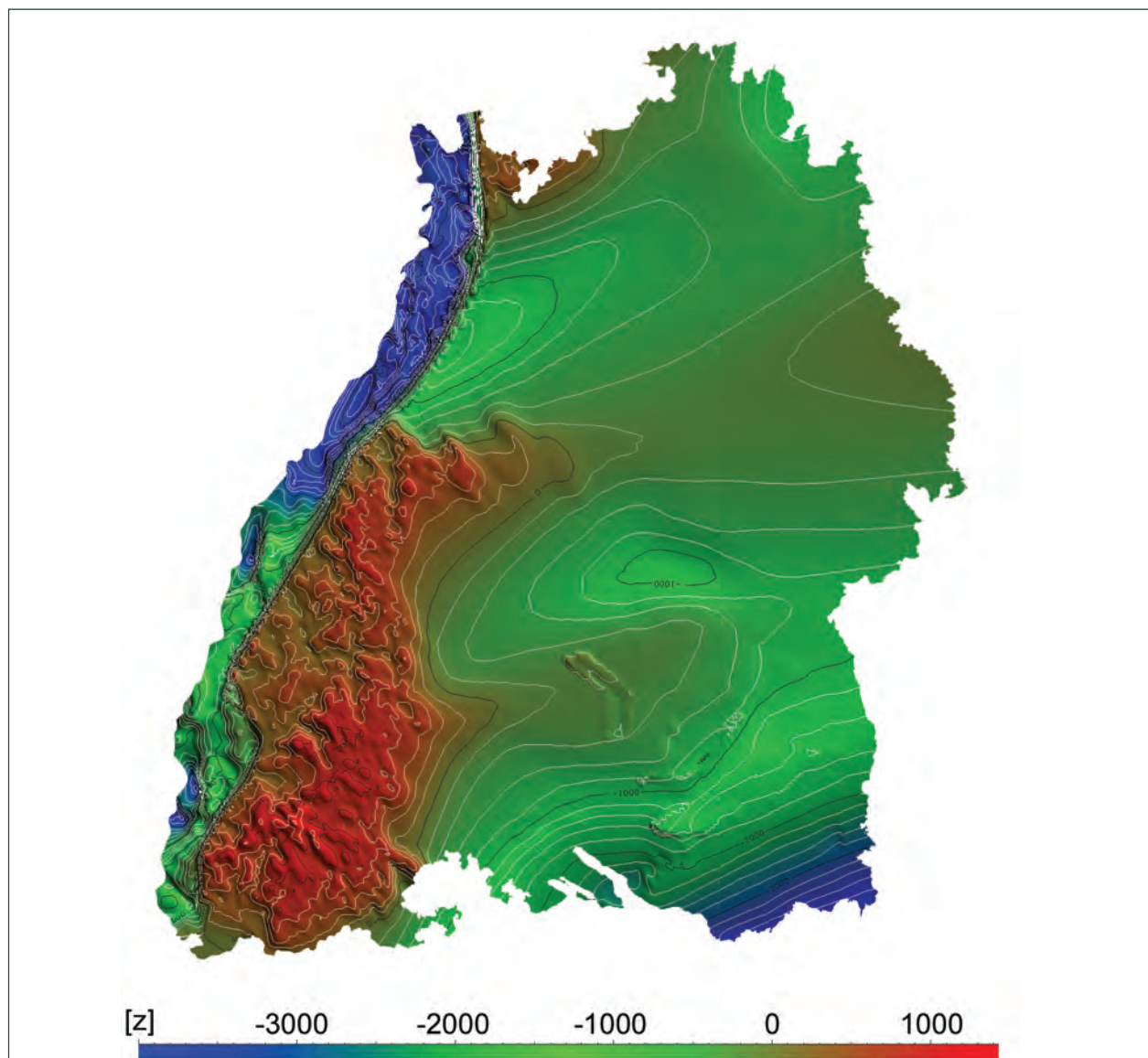


Abb. 2 Höhenlage der Kristallinoberfläche in Baden-Württemberg.

Regionen in Baden-Württemberg auftreten. Besonders große Höhenunterschiede auf kleiner Distanz von z. T. über 1 000 m liegen insbesondere zwischen Schwarzwald und Oberrheingraben vor. Diese Höhenunterschiede haben unmittelbare Auswirkungen auf den Temperaturgradienten (POWELL et al. 1988). Je größer der Reliefunterschied ist, desto größer ist der Temperaturgradient in Tallage und desto kleiner ist er unterhalb der Höhenzüge.

Aus dem Vergleich von Abb. 2 und 3 ergibt sich, dass auf dem Kristallinen Grundgebirge in Baden-

Württemberg Sedimentmächtigkeiten von 0 bis über 4 000 m lagern. Diese Sedimente können z. T. sehr vom Kristallinen Grundgebirge abweichende hydraulische und thermische Eigenschaften aufweisen und wirken sich daher unmittelbar auf die Temperaturverhältnisse im Land aus.

Auffallend ist die große Tiefenlage des Kristallinen Grundgebirges im zentralen Bereich von Baden-Württemberg, die etwa mit der Lage der Wärmeanomalie von Bad Urach – Bad Boll übereinstimmt.

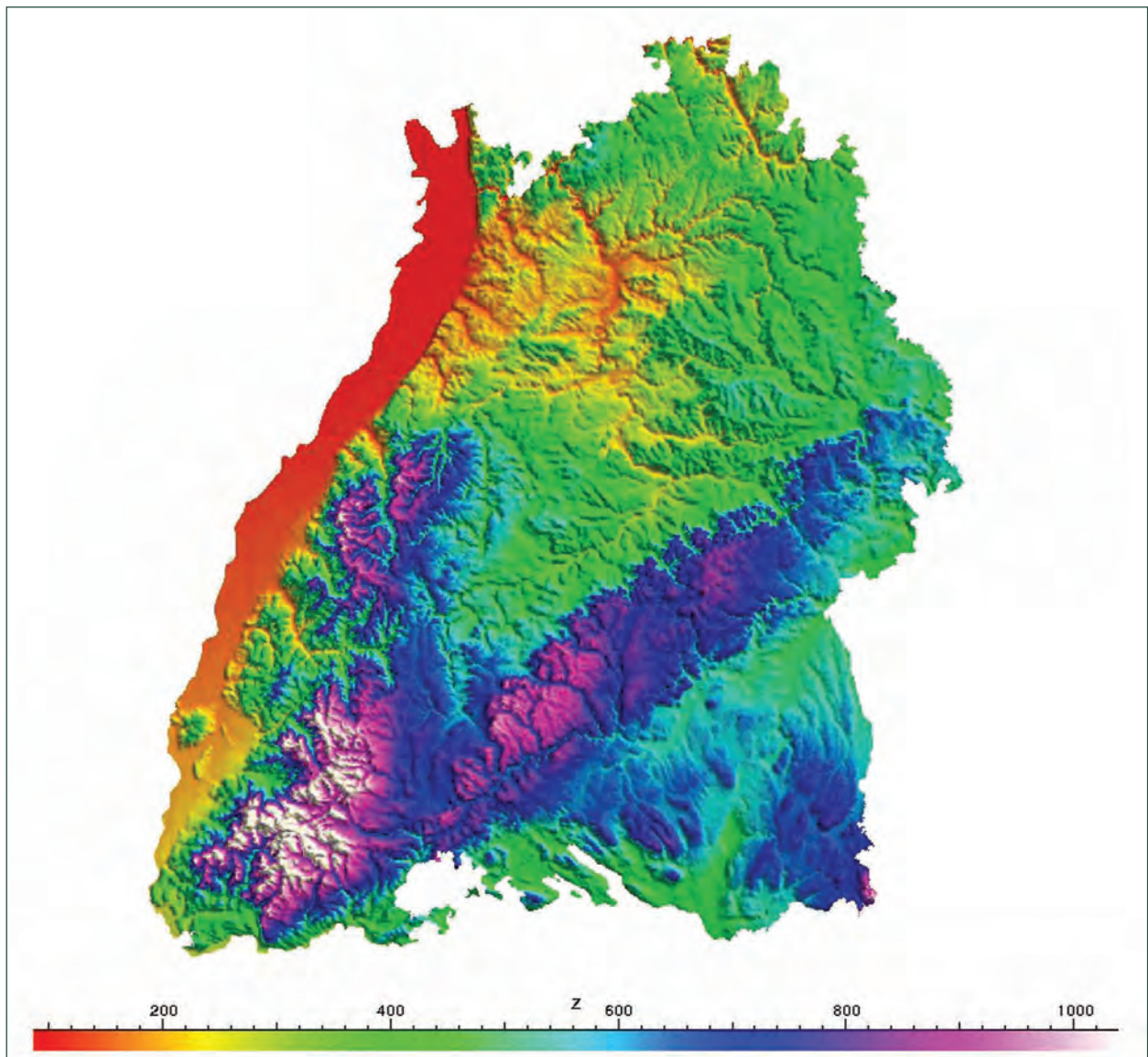


Abb. 3 Karte der Geländehöhen von Baden-Württemberg.





2 Temperaturdaten

Das Regierungspräsidium Freiburg, Abteilung 9: Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, (RPF-LGRB) sammelt, prüft und archiviert für das Land Baden-Württemberg relevante geowissenschaftliche Untersuchungen und dabei gewonnene Daten. Diese werden im Zuge der allgemeinen Landesaufnahme ausgewertet. Darüber hinaus führt das RPF-LGRB eigene Datenerhebungen, landesbezogene Untersuchungen und angewandte Forschungen durch. Die gewonnenen geowissenschaftlichen Erkenntnisse werden, soweit sie nicht der Vertraulichkeit unterliegen, durch das RPF-LGRB als Dienstleistungsbehörde vorzugsweise in Form von digitalen Datensätzen (http://www.lgrb.uni-freiburg.de/lgrb/home/interaktive_karten), von Karten, Berichten und Publikationen der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt.

Beim Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA-Institut) wird das Fachinformationssystem (FIS) Geophysik (https://www.gga-hannover.de/app/fis_gp/startseite/start.htm) geführt (KÜHNE et al. 2003). Die Datenbank enthält Messdaten und Auswertungen verschiedener geophysikalischer Verfahren, vorrangig für das Gebiet von Deutschland. Es sind Daten des GGA-Instituts, aber auch von Partnerinstitutionen, wie z. B. dem RPF-LGRB in Baden-Württemberg, gespeichert. Das FIS Geophysik unterstützt über eine neu entwickelte Internet-Schnittstelle auch die Informationsansprüche der wissenschaftlichen Öffentlichkeit. Dabei bleiben die rechtlichen Randbedingungen gewahrt. Die Datenbank des FIS Geophysik besteht aus einem Überbau und verschiedenen Subsystemen. Jedes Subsystem nimmt die spezifischen Daten eines geophysikalischen Verfahrens (z. B. Geothermik) auf.

Für die Erstellung der Temperaturkarten von Baden-Württemberg mussten zunächst die beiden unabhängig voneinander erstellten und betriebenen Datenbanken des RPF-LGRB und des GGA-Instituts abgeglichen und zu einer gemeinsamen Datengrundlage zusammengestellt werden. Hierzu waren umfangreiche Korrekturen, die auch Stammdaten von Bohrungen, Schichtenverzeichnisse und den Ausbau von Bohrungen umfassten, erforderlich. Zudem musste ein bislang noch nicht in digitaler Form vorliegender, nicht unerheblicher Altdatenbestand in die Datenbank des FIS Geophysik aufgenommen werden. Da von den meisten Bohrungen mehrere Temperaturmessungen vorliegen, die nach verschiedenen Verfahren und unter unterschiedlichen Betriebszuständen (Förderbetrieb, Ruhebetrieb) durchgeführt wurden, war eine Evaluation erforderlich.

Das Subsystem Geothermik des FIS Geophysik enthält Informationen aus über 10000 Bohrungen über das Temperaturfeld im Untergrund Deutschlands. Ungestörte Temperaturlogs und Lagerstättentemperaturen werden als optimale Daten angesehen. Lagerstättentemperaturen liegen aufgrund der regelmäßigen, langjährigen Kontrolle der Förderbohrungen als umfangreiche Messwertreihen vor; die Schwankungsbreite dieser Temperaturwerte liegt überwiegend unter 1 K. Zur Erstellung von Temperaturkarten in beliebigen Maßstäben und für beliebige Tiefen werden neben Temperaturlogs, Lagerstättentemperaturen und Fördertests vor allem Bottom Hole Temperatures (BHT) verwendet. Diese BHT-Messungen werden in fast allen Industriebohrungen im Bohrlochtiefsten, unmittelbar nach Einstellen der Bohrarbeiten, ausgeführt und sind durch den Bohrvorgang (Spülungsumlauf) thermisch gestört. Eine Korrektur (Extrapolation) dieser BHT-Werte auf ungestörte Temperaturen ist möglich, da im Bohrlochtiefsten der störende Einfluss des Spülungsumlaufs auf das Temperaturfeld am geringsten ist.

In Abhängigkeit von der Stillstandszeit nach Bohrende, der Spüldauer (Spülungsumlauf) und der Anzahl der für jede Tiefe zur Verfügung stehenden Temperaturwerte können unterschiedliche Extrapolationsverfahren angewendet werden (SCHULZ & SCHELLSCHMIDT 1991, SCHULZ et al. 1990):

- (1) „Explosionszylinderquellenansatz“
(LEBLANC et al. 1982)
- (2) Annahme einer
„kontinuierlichen Linienquelle“
(HORNER 1951)
- (3) „Explosionslinienquelle“
(LACHENBRUCH & BREWER 1959)
- (4) „Zylinderquellenansatz“
(MIDDLETON 1982)
mit statistischen Parametern

Bei der Extrapolation von zeitlich nur einfach belegten BHT-Werten auf die ungestörte Temperatur müssen aus umgebenden Messungen mit höherem Informationsgehalt statistische Parameter ermittelt werden. Zusätzlich werden die Werte in Verbindung mit einer statistischen Auswertung aller verfügbaren Bohrlochdaten aus dem jeweiligen Untersuchungsgebiet ausgeglichen. Trotz der angewendeten Kor-

rekturen sind diese Ergebnisse im Gegensatz zu ungestörten Temperaturlogs noch mit einem Fehler von ca. ± 5 K behaftet.

Aufgrund der unterschiedlichen Messverfahren und der verschiedenen Korrekturverfahren – letzteres gilt nur für die BHT-Werte – werden die Temperaturdaten in unterschiedliche Güteklassen eingeteilt.

In Tab. 1 sind die Güteklassen und Korrekturverfahren für Baden-Württemberg zusammengefasst.

Ab einer Teufe von 2500 m nimmt in Baden-Württemberg die Anzahl der zur Verfügung stehenden Bohrungen mit Temperaturinformationen stark ab (Tab. 2). Aufgrund der geringen Belegungsdichte konnten für Teufen über 2500 m daher keine Tem-

Tab. 1 Güteklassen verschiedener Temperaturmessungen. Anzahl der Bohrungen mit Temperaturdaten und Korrekturverfahren (nur bei BHT-Werten, vgl. S. 9) für Baden-Württemberg.

Güteklassen	Anzahl	Korrektur (vgl. S. 9)
Temperaturlogs (bohrtechnisch ungestört)	294	—
Temperaturlogs (bohrtechnisch gestört)	83	—
Lagerstättentemperaturen	—	—
Messungen aus Fördertests	49	—
BHT-Werte (zeitlich mindestens dreifach belegt)	17	(1), (2)
BHT-Werte (zeitlich zweifach belegt)	43	(2), (3)
BHT-Werte (zeitlich einfach belegt):		
• Standzeit bekannt	27	(4)
• Standzeit unbekannt	12	(4)

Tab. 2 Anzahl der Bohrungen, Temperaturminimum, Temperaturmittelwert und Temperaturmaximum für die Teufen von 0 bis 4440 m. Der Temperaturwert für die Teufe 0 m entspricht etwa der mittleren Jahrestemperatur an der Erdoberfläche für die jeweilige Bohrung.

Tiefe [m]	Bohrungen Anzahl	Temperatur [°C]		
		Minimum	Mittelwert	Maximum
0	725	6,5	9,3	13,6
250	458	8,4	20,7	64,0
500	390	17,6	32,0	55,5
750	320	26,1	41,9	74,8
1 000	282	34,3	51,9	81,1
1 250	213	40,7	60,8	97,7
1 500	154	47,2	68,6	111,2
1 750	114	53,7	77,5	128,0
2 000	78	60,5	86,1	123,0
2 250	42	67,3	95,3	137,6
2 500	21	82,8	105,3	132,8
2 750	8	95,9	116,6	140,7
3 000	4	95,7	121,5	150,1
3 250	1	140,5	140,5	140,5
3 500	1	147,2	147,2	147,2
3 750	1	152,6	152,6	152,6
4 000	1	158,0	158,0	158,0
4 250	1	163,4	163,4	163,4
4 440	1	167,5	167,5	167,5

peraturkarten erstellt werden. Neben der Belegungsdichte nimmt auch die Qualität der Temperaturdaten mit der Tiefe ab.

Die Temperaturwerte für Baden-Württemberg sind in Abb. 4 zu Temperatur-Tiefen-Profilen zusammengefasst. Diese Abbildung veranschaulicht die Verteilung und Spannweite der Temperaturwerte mit der Tiefe. Insgesamt liegen Temperaturdaten von 725 Bohrungen vor. Die grauen Kreise sind Werte aus Temperaturlogs, die grünen Dreiecke stammen aus Messungen bei Fördertests und die blauen Quadrate sind Daten von BHT-Messungen. In diese Punktwolke wurden drei Geraden eingetragen, die Temperaturgradienten von 25 K km^{-1} , 40 K km^{-1} und 60 K km^{-1} entsprechen. Der normale, ungestörte Temperaturgradient für Deutschland liegt bei 30 K km^{-1} . Ab-

bildung 4 zeigt, dass in Baden-Württemberg durchweg höhere Temperaturgradienten vorliegen, d. h., dass bereits in wesentlich geringerer Tiefe gleich hohe Temperaturen angetroffen werden als in den weitaus meisten anderen Teilen von Deutschland.

In Abb. 4 sind zusätzlich die in den Bohrungen Bad Waldsee GB2 im voralpinen Molassebecken, Urach 3 am Fuß der Schwäbischen Alb und Bühl 1 im Oberrheingraben zwischen Offenburg und Karlsruhe gemessenen Temperatur-Tiefen-Profile eingetragen. Der höchste Gradient von z. T. deutlich über 60 K km^{-1} wurde in der Bohrung Urach 3 gemessen. Eine sehr hohe Temperaturzunahme mit der Tiefe zeigt auch die Bohrung Bühl 1, während die Bohrung Bad Waldsee GB2 einen geringeren Temperaturanstieg mit zunehmender Tiefe erkennen lässt.

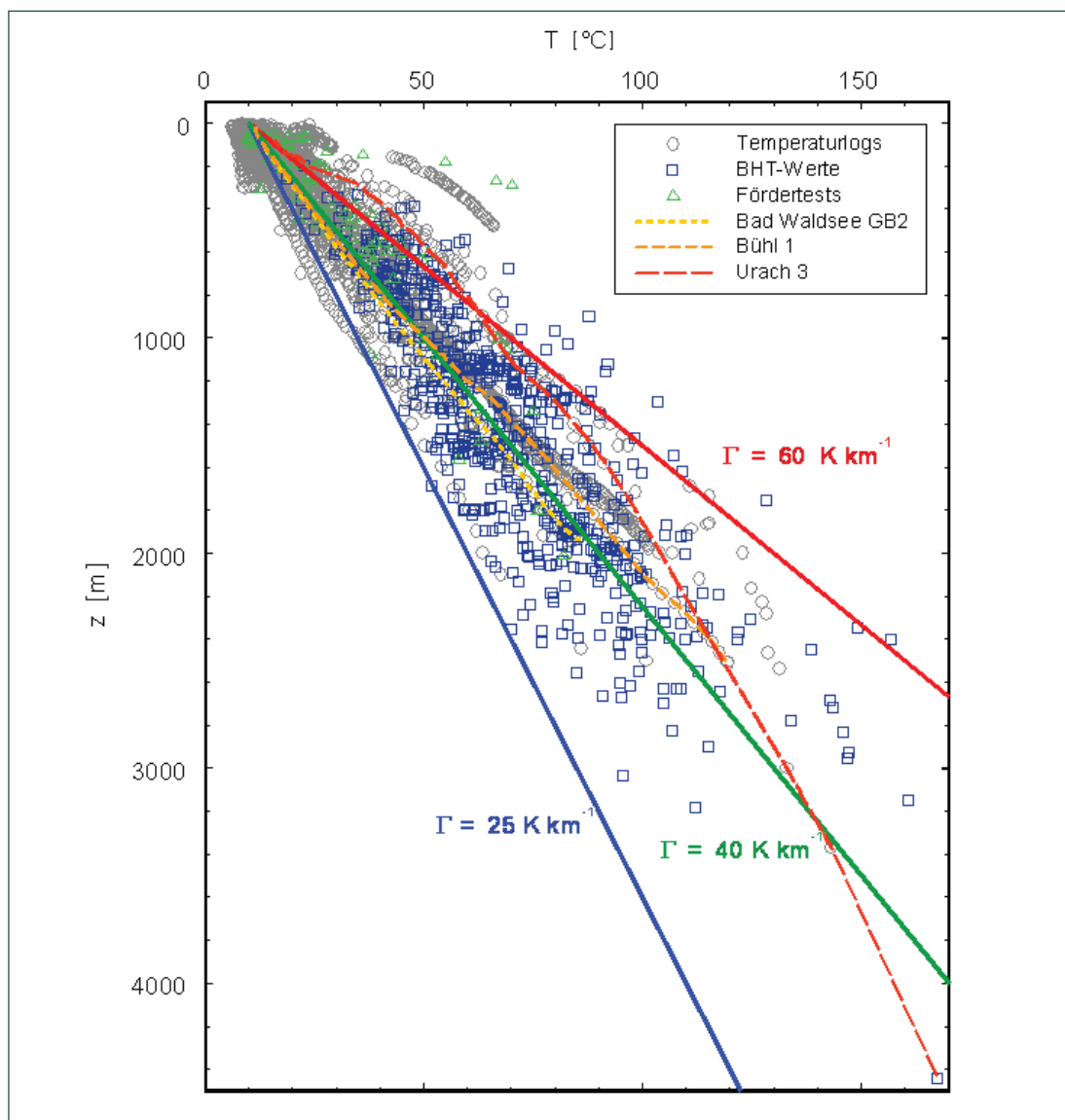


Abb. 4 Temperatur-Tiefenprofil für Baden-Württemberg. Die eingezeichneten Geraden (Γ) entsprechen Temperaturgradienten von 25 K km^{-1} , 40 K km^{-1} und 60 K km^{-1} .



3 Ausgewählte Temperaturprofile in Baden-Württemberg

In den Abb. 5, 6 und 8 sind Temperatur-Profile, Temperaturgradienten und Schichtenverzeichnisse von Bohrungen für drei verschiedene Regionen Baden-Württembergs dargestellt. In diesen Abbildungen stellt die Ordinate die wahre Tiefe (seiger Teufe) dar. Abbildung 5 zeigt das Temperaturprofil der Bohrung Bad Waldsee im voralpinen Molassebecken. Die Temperaturzunahme mit der Tiefe erfolgt relativ konstant. Stärkere Abweichungen treten allenfalls im Oberjura (Malm) auf. Der Temperaturgradient beträgt über die gesamte Tiefe ca. 40 K km^{-1} und liegt damit deutlich über dem Normalwert. In 1940 m Tiefe wurden etwa 86°C gemessen. Unter Normalbedingungen würde die Temperatur dort um etwa 20°C geringer sein.

Die Bohrung Bühl 1 (Abb. 6) wurde am Rand des Oberrheingrabens im Südwesten der Stadt Bühl, zwischen Karlsruhe und Offenburg, als Schrägbohrung abgeteuft. Mit dieser Bohrung sollte die östliche Rheingraben-Hauptverwerfungszone angefahren werden, in der Hoffnung, dort vermutetes Thermalwasser zu erschließen (BERTLEFF et al. 1988). Die Ablenkung der Bohrung erfolgte bei 440 m Tiefe mit einer mittleren Neigung von $10,5^\circ$. Unterhalb von 1400 m Tiefe wurde die Neigung zunächst auf $22,5^\circ$ erhöht und betrug bei Endteufe von 2699 m sogar $28,4^\circ$.

Ab etwa 750 m Tiefe nimmt der Gradient deutlich zu. Der Abschnitt zwischen Melettaschichten

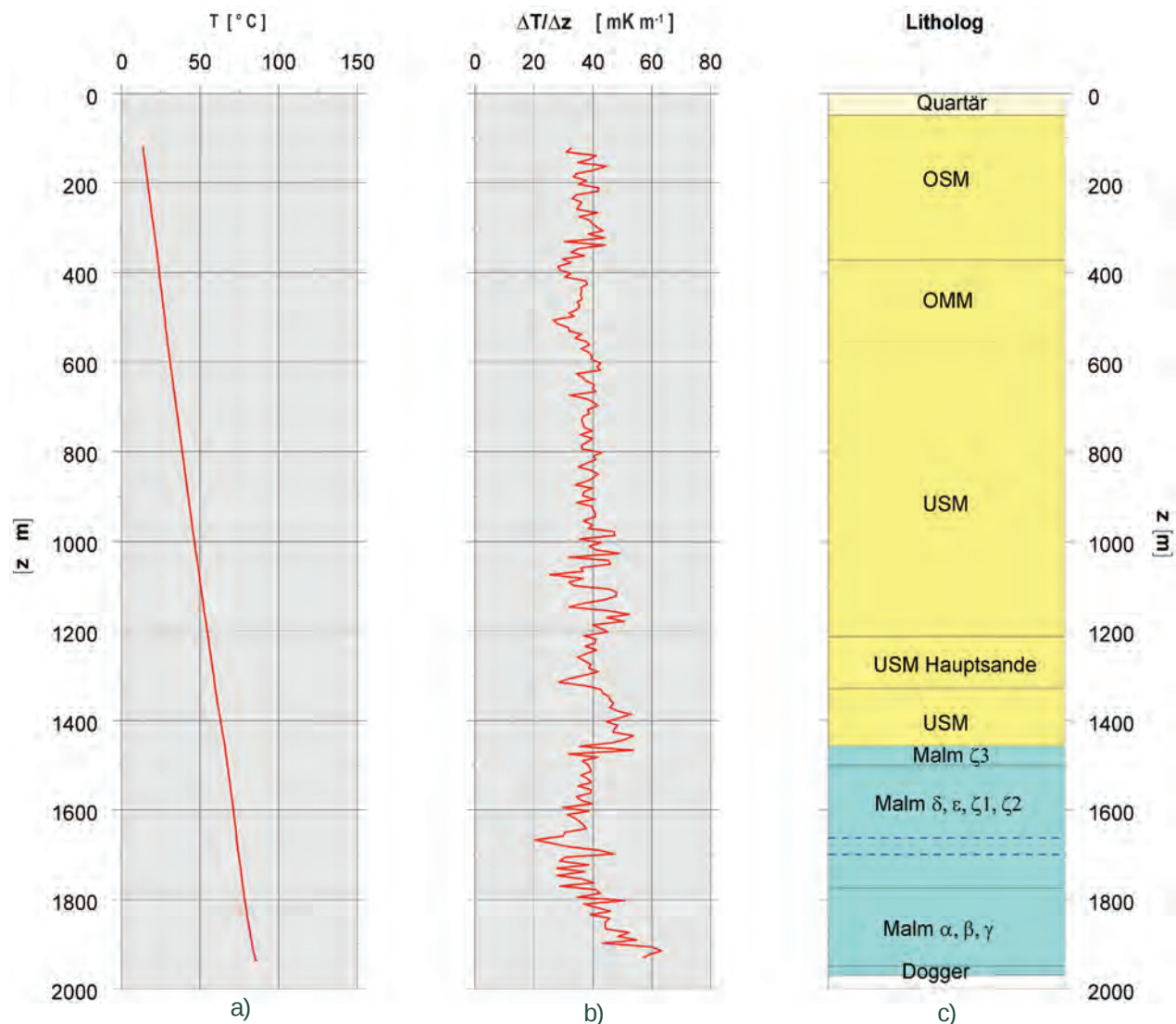


Abb. 5 Kompositlog der Bohrung Bad Waldsee GB2. Von links nach rechts sind dargestellt: **a)** Temperatur, **b)** der Temperaturgradient $\Delta T/\Delta z$ sowie **c)** die Lithostratigraphie. Die „blau gestrichelten“ Linien symbolisieren Wasserzutritte.

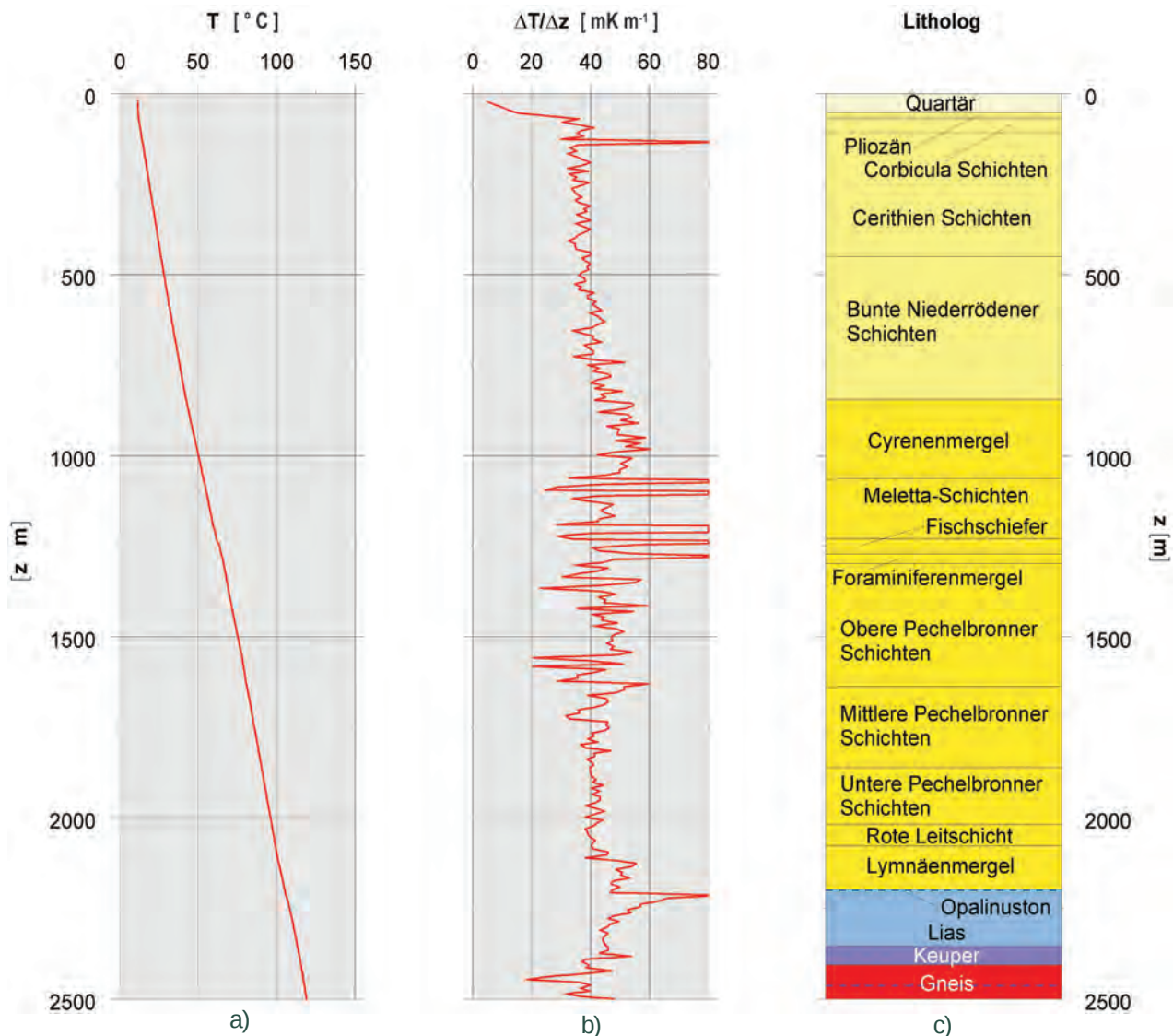


Abb. 6 Kompositlog der Bohrung Bühl 1. Von links nach rechts sind dargestellt: **a)** Temperatur, **b)** der Temperaturgradient $\Delta T / \Delta z$ sowie **c)** die Lithostratigraphie des Deckgebirges und die Lithologie des Kristallinen Grundgebirges, aufgetragen gegen die Bohrtiefe z . Die „blau gestrichelten“ Linien symbolisieren Wasserzutritte.

und Oberen Pechelbronner Schichten ist durch starke Schwankungen des Temperaturgradienten gekennzeichnet. Häufig sind dies Hinweise auf Wasserzutritte. Unterhalb dieser Zone liegt der „Temperaturgradient“ bei konstanten 40 K km^{-1} . Ein erneuter Anstieg auf etwa 50 K km^{-1} erfolgt im Lymnäenmergel. Die Transgression des Tertiärs auf tiefstem Opalinuston ist durch eine sprunghafte Temperaturzunahme gekennzeichnet. Im Bereich der Oberrheingraben-Hauptverwerfung unterhalb des Keupers wurden zahlreiche kleinere Störungen und teilweise offene Klüfte angetroffen. Der durchhörte Gneis war zunächst tektonisch stark beansprucht, geklüftet und brekziiert. Die dort vorgefundene natürliche Wasserführung war zwar unbefriedigend, ist jedoch im Gradientenlog durch markante Spitzen erkennbar.

Im Raum Bad Urach – Bad Boll befindet sich die größte Wärmeanomalie von Baden-Württemberg. Seitdem Graf Mandesloh in einem Bohrloch in Neuffen 1839 die anomal starke Zunahme der Temperatur mit der Tiefe entdeckt hat (MANDELSLOH 1844, BRANCO 1894; Abb. 7), sind im Gebiet, das der mittleren Schwäbischen Alb vorgelagert ist, mehr als ein Dutzend Bohrungen abgeteuft worden. Aufgrund der Temperaturmessungen in diesen Bohrungen konnte die Größe und Form der Anomalie, deren elliptisches Zentrum die Orte Bad Urach und Bad Boll umschließt, umrissen werden. Die Längsachse der Anomalie folgt annähernd dem Trauf der Schwäbischen Alb. Ausnahmslos alle Bohrungen mit anomal hoher Temperaturzunahme sind im Bereich des Mitteljura (Dogger) in Talnähe angesetzt.



Abb. 7 Denkmal für die Bohrung in Neuffen, in der die Uracher-Anomalie entdeckt wurde.

Abbildung 8 für die Geothermiebohrung Urach 3 zeigt, dass die Temperaturzunahme im Bereich der sedimentären Überdeckung des Kristallinen Grundgebirges am größten ist. Innerhalb des Kristallinen Grundgebirges nimmt die Temperatur mit der Tiefe nur noch normal, d. h. mit etwa $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro Kilometer Tiefe, zu. Die höchsten Temperaturgradienten mit deutlich über 40 K km^{-1} treten oberhalb von 400 m auf. Hier entsteht der eigentliche Temperatur-Zugewinn von annähernd $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, der bis in große Tiefen anhält.

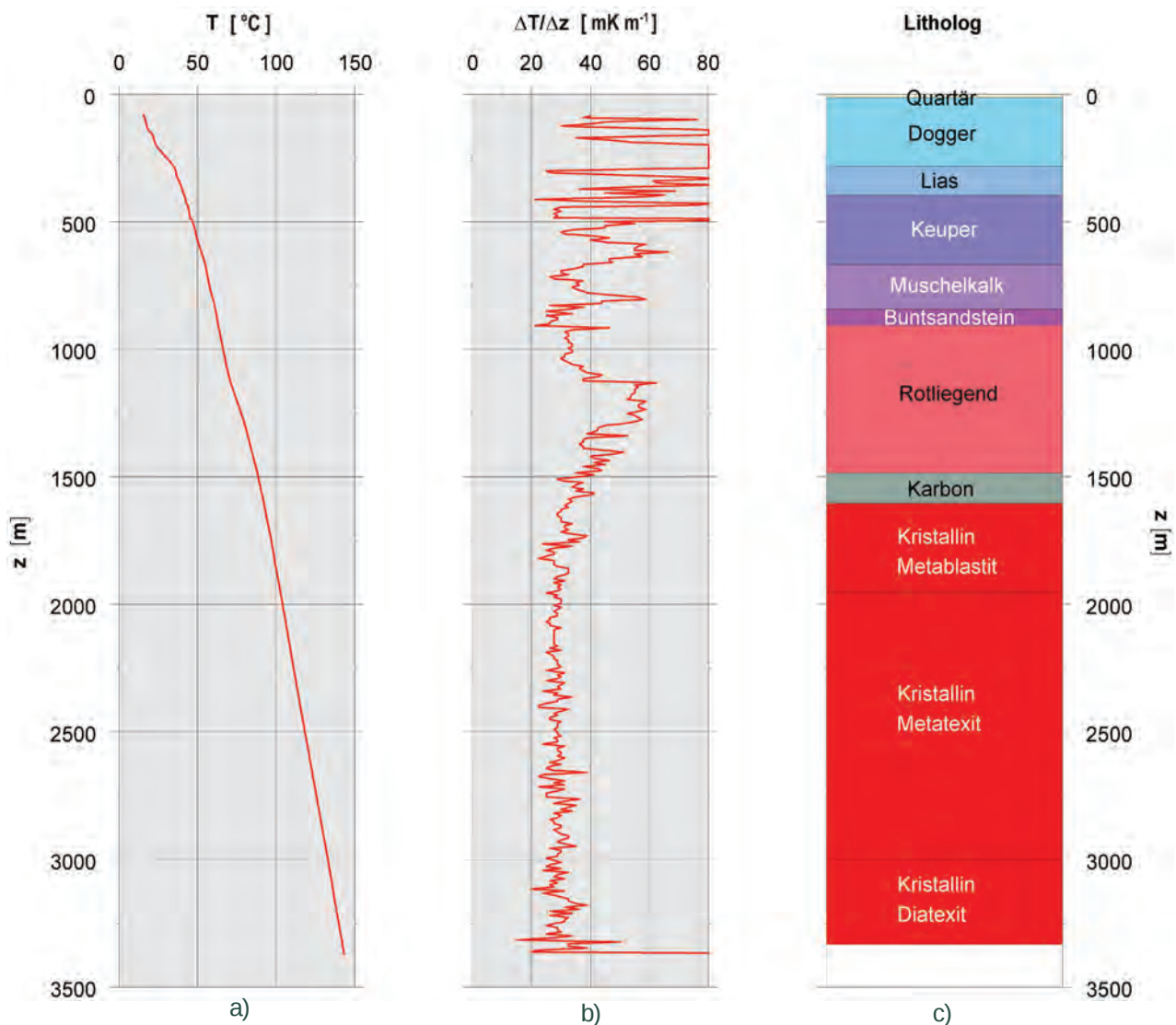


Abb. 8 Kompositlog der Bohrung Urach 3. Von links nach rechts sind dargestellt: **a)** Temperatur, **b)** der Temperaturgradient $\Delta T/\Delta z$ sowie **c)** die Lithostratigraphie des Deckgebirges und die Lithologie des Kristallinen Grundgebirges.

In verschiedenen Forschungsprojekten und Studien wurde versucht, die Ursache für die Wärmeanomalie zu erkunden. Da sich die Anomalie ungefähr mit dem Uracher Vulkangebiet deckt, wurde zunächst ein Zusammenhang mit dem Vulkanismus vermutet (BRANCO 1894). Durch Modellrechnungen konnte jedoch gezeigt werden, dass die vulkanische Wärme einer großen Magmakammer längst ausgekühlt sein müsste (WERNER 1976, HOFFERS 1978). Eine derartige Magmakammer wurde außerdem

bislang nicht entdeckt. Auch wurde versucht, die Anomalie durch aufsteigende Wässer oder Gase zu erklären, eine Theorie, die hydrogeologisch nicht belastbar ist (HAENEL & ZOTH 1982, WERNER 1982). Als Ursache für die Anomalie wurden auch wärmeerzeugende Vorgänge in dem 400 m mächtigen Schichtenpaket des Unter- und Mitteljuras diskutiert, sowie die Isolationswirkung der gering wärmeleitfähigen tonigen Sedimentpakete des Unter- und Oberjuras (SCHÄDEL & STÖBER 1984).



4 Erstellen der Temperaturkarten

Für die Erstellung der Temperaturkarten sind die Temperaturdaten in zwei Richtungen (horizontal und vertikal) interpoliert worden. Zunächst wurden die Daten auf einen vorgegebenen Tiefenhorizont interpoliert und anschließend lateral in die Fläche. Eine Extrapolation der Temperaturwerte in die Tiefe, über die Endteufe der Bohrung hinaus, erfolgte nicht.

Die Konstruktion der Isolinien (Abb. 9 bis 14) erfolgte mit dem Programmpaket GMT (The Generic Mapping Tools, <http://gmt.soest.hawaii.edu/>), entwickelt von WESSEL & SMITH (1995). Das GMT-Programm-Paket erlaubt die Bearbeitung und Visualisierung von geophysikalischen Daten oder ähnlichen (x, y, z) Daten, die in ein geographisches Netz eingebunden werden sollen. Das verwendete Interpolationsverfahren wird als „*continuous curvature splines in tension*“ bezeichnet (SMITH & WESSEL 1990). Dieses Verfahren basiert auf der „*Methode der kleinsten Krümmung*“. Dieser Griding-Algorithmus wurde von SMITH & WESSEL (1990) verallgemeinert und um einen Spannungsparameter (tension) erweitert, der unerwünschte Oszillationen in den Isolinienberechnungen unterdrückt.

Die Datenpunkte z_k werden bei diesem Algorithmus immer honoriert. Mathematisch betrachtet soll eine Funktion $z(x_k, y_k)$ gefunden werden, die folgende Randbedingungen erfüllt:

$$z(x_k, y_k) = z_k, \text{ für alle } z_k, k = 1, \dots, n$$

$$(1 - t) \nabla^4 z - \nabla^2 z = 0, \text{ sonst mit } 0 \leq t \leq 1,$$

wobei t der Spannungsparameter (tension) ist

Das verwendete GMT-Programm ist ein erprobtes Isolinienprogramm, das im Bereich der Geophysik und Geographie (neben dem Kriging-Verfahren) weltweit sehr häufig angewendet wird. Für die Erstellung der Karten wurde ein regelmäßiges Gitter mit einer Gitterweite von 500 x 500 m verwendet.

Die weißen Punkte in den Abb. 9 bis 14 markieren die Bohrungen mit Temperaturinformationen. Die Belegungsdichte der Bohrungen nimmt mit der Tiefe ab (vgl. Tab. 2). So lagen beispielsweise in 500 m Tiefe noch insgesamt 390 Messwerte vor, während in 2500 m Tiefe nur noch 21 Temperaturmesswerte zur Verfügung standen. Auch waren die Messdaten nicht gleichmäßig verteilt. Zu beobachten ist eine Anhäufung im Bereich des Oberrheingrabens sowie südlich der Donau. In einigen Gebieten fehlen direkte Temperaturinformationen. Verfahrensbedingt nimmt die Aussagekraft und Güte daher mit der Tiefe stark ab und sie ist dort besser, wo die Anzahl der Bohrungen größer ist. Für die Interpolation wurden randlich außerhalb von Baden-Württemberg liegende Bohrungen bzw. Temperaturwerte mitverwandt.





5 Charakteristik des Temperaturfeldes, geologische und hydrogeologische Interpretation der Temperaturkarten

Die sechs Karten (Abb. 9 bis 14) zeigen die Temperaturverteilung von Baden-Württemberg in den Tiefen 300, 500, 1000, 1500, 2000 und 2500 m u. Gel. In den einzelnen Karten sind die Bohrungen mit Temperaturinformationen eingetragen und durch ein weißes Kreissymbol gekennzeichnet. In der Karte für die Temperaturverteilung in 300 m Tiefe markieren rote Dreiecke natürliche Thermalwasseraufstiege. Dort wurden Thermalwasserbohrungen mit einer Tiefe von weniger als 300 m niedergebracht; sie fanden daher bei der Isolinieninterpolation keine Berücksichtigung. Diese Bohrungen liefern dennoch Hinweise auf höhere Temperaturen im Untergrund.

Die Temperaturkarten veranschaulichen, dass in Baden-Württemberg die Untergrund-Temperaturen fast überall und in allen Tiefen höher sind als im Normalfall (Temperaturgradient von etwa 30 K km⁻¹).

Für die in den Karten dargestellten Temperaturen unter Gelände wurden nur Messdaten berücksichtigt. Fast alle Bohransatzpunkte befinden sich in Talnähe, es existieren keine Bohrungen beispielsweise auf Schwarzwaldhöhen oder Höhen der Schwäbischen Alb. Daher ist die Topographie in den Temperaturkarten von Baden-Württemberg nur minimal berücksichtigt. Die in den Karten dargestellten Temperaturen unter Gelände beziehen sich somit nicht auf höhere Erhebungen oder Berge, da hier keine Messdaten vorliegen.

Für die Konstruktion der Karten konnte nicht berücksichtigt werden, dass die Temperaturzunahme in Tallage i. d. R. wesentlich größer ist als unterhalb der benachbarten Höhenzüge. Auch geologische Informationen oder der Einfluss von Störungen und Grundwasserströmungen sind nicht direkt in die Konstruktionen der Karten eingegangen. Der Einfluss von Störungen oder Grundwasserströmung ist nur in Gebieten mit einer guten Bohrpunktbelegung (Teile des Rheingrabens und des Molassebeckens) indirekt und sehr schwach zu erkennen. Das Interpolationsverfahren „verwischt“ den Einfluss des gegenüber den Schwarzwaldhöhen tief liegenden Oberrheingrabens bzw. lässt diesen nicht deutlich erkennen. Diese Tatsachen müssen bei einer Interpretation der Temperaturkarten berücksichtigt werden.

Für Baden-Württemberg beträgt die mittlere Temperatur in 500 m u. Gel. 32,0 °C. Die Bandbreite ist groß (Minimum: 17,6 °C, Maximum: 55,5 °C).

Bei einer mittleren Jahrestemperatur von 9,3 °C in Baden-Württemberg an der Erdoberfläche (KESSELS 1980) berechnet sich daraus ein mittlerer geothermischer Gradient von 45,4 K km⁻¹. Dieser Wert ist – verglichen mit dem Normalwert – deutlich erhöht. Aus den Temperaturangaben, die für 2500 m u. Gel. vorliegen, wurde eine mittlere Temperatur in dieser Tiefe von 105,3 °C ermittelt, mit einer Bandbreite, die zwischen 82,8 °C und 132,8 °C liegt (vgl. Tab. 2). Der daraus berechnete mittlere Temperaturgradient von 38,4 K km⁻¹ ist zwar gegenüber dem Normalwert auch noch erhöht, zeigt jedoch, dass in flacheren Bereichen die Temperaturen mit zunehmender Tiefe stärker ansteigen als in größeren Tiefen. So nimmt unterhalb von 500 m Tiefe die Temperatur im Mittel um 36,7 K km⁻¹, unterhalb von 1000 m nur noch um 35,6 K km⁻¹ zu. Die Ursachen können vielfältiger Natur sein, wie z. B.: Effekte der Tallage der Bohrungen, unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten der Gesteinspakete, aufsteigende Tiefenwässer, wärmeerzeugende Prozesse in Sedimentgesteinen u. ä.

Auf allen Abbildungen tritt im zentralen Bereich von Baden-Württemberg markant die große Wärmeanomalie von Bad Urach – Bad Boll hervor mit Temperaturgradienten von z. T. über 80 K km⁻¹ (Abb. 8). Im Zentralbereich der Anomalie wurden in 500 m u. Gel. Temperaturen von bis zu 55,5 °C gemessen; der Normalwert liegt in dieser Tiefe bei 24 °C. Die positive Anomalie von Bad Urach – Bad Boll ist im Sinne einer Anomalie erhöhter Temperaturgradienten nur im Bereich der obersten Schichten ausgebildet. Im tieferen Bereich (>1600 m), innerhalb des Gneisgebirges, erfolgt die Temperaturzunahme mit der Tiefe „normal“, d. h. mit etwa 30 K km⁻¹. Dennoch liegen in diesem Bereich infolge des anomalen Temperaturgewinns innerhalb der obersten Schichten über die gesamte bisher erbohrte Teufe erhöhte Temperaturen vor.

Anomal hohe Temperaturen wurden auch im Bereich des Oberrheingrabens gemessen. Innerhalb des Oberrheingrabens ist die Temperaturzunahme mit der Tiefe jedoch nicht einheitlich verteilt; i. d. R. werden Temperaturgradienten von 35 bis 55° K km⁻¹ beobachtet. Die beiden bedeutendsten thermischen Anomalien im Oberrheingraben befinden sich bei Landau (Pfalz) und Soultz-sous-Forêts (Elsass, nördlich von Straßburg). Die Temperaturzunahme mit der Tiefe liegt im Raum Soultz-sous-Forêts im oberen Bereich in einer ähnlichen Größenordnung wie bei Bad Urach – Bad Boll. Die Anomalie von

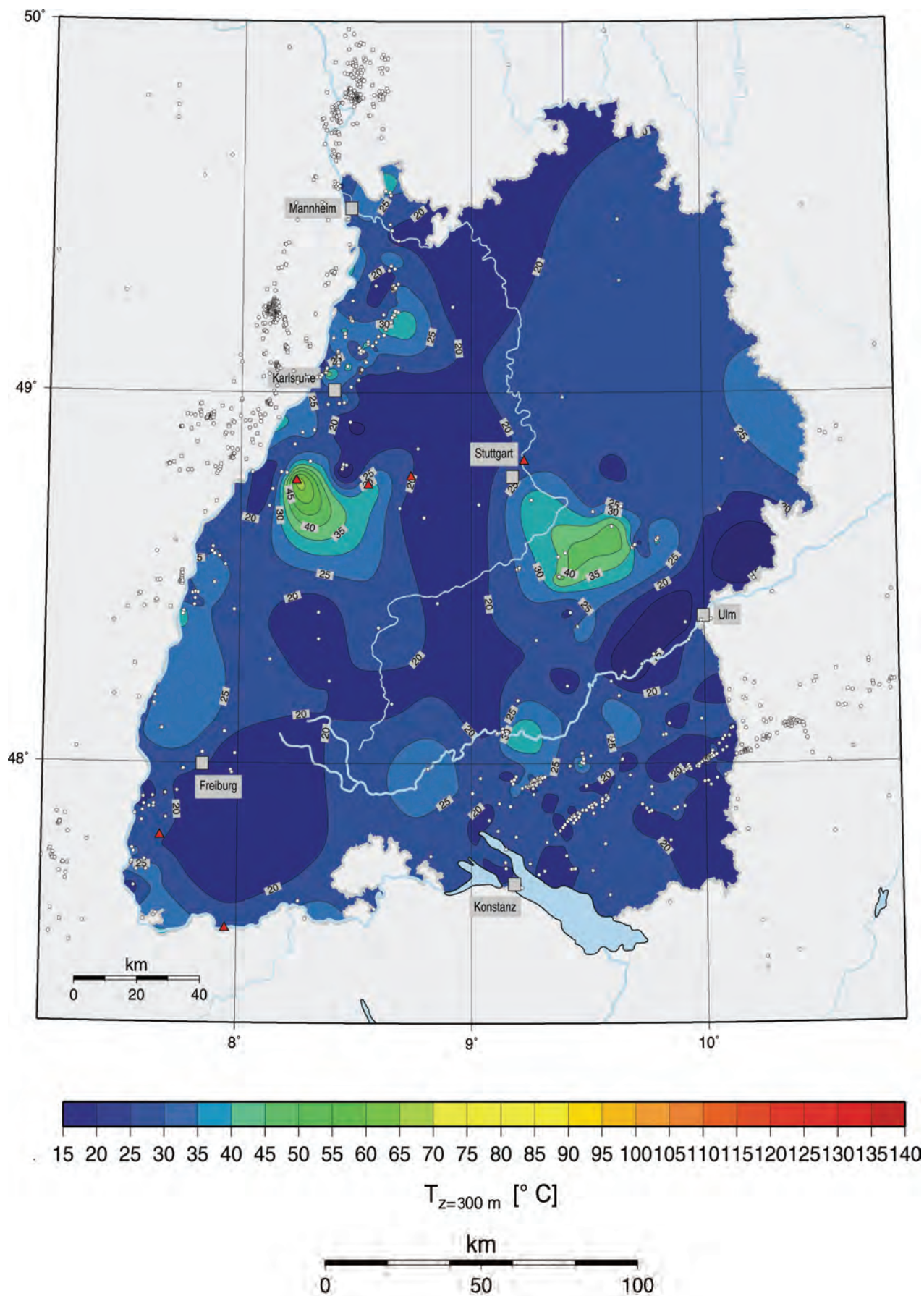


Abb. 9 Temperaturen in 300 m Tiefe. Rote Dreiecke: Thermalwasserbohrungen mit einer Tiefe von weniger als 300 m. Sie liefern Hinweise auf höhere Temperaturen im Untergrund (s. Text).

— Temperaturkarten für verschiedene Tiefen: 300 m, 500 m, 1000 m, 1500 m, 2000 m und 2500 m —

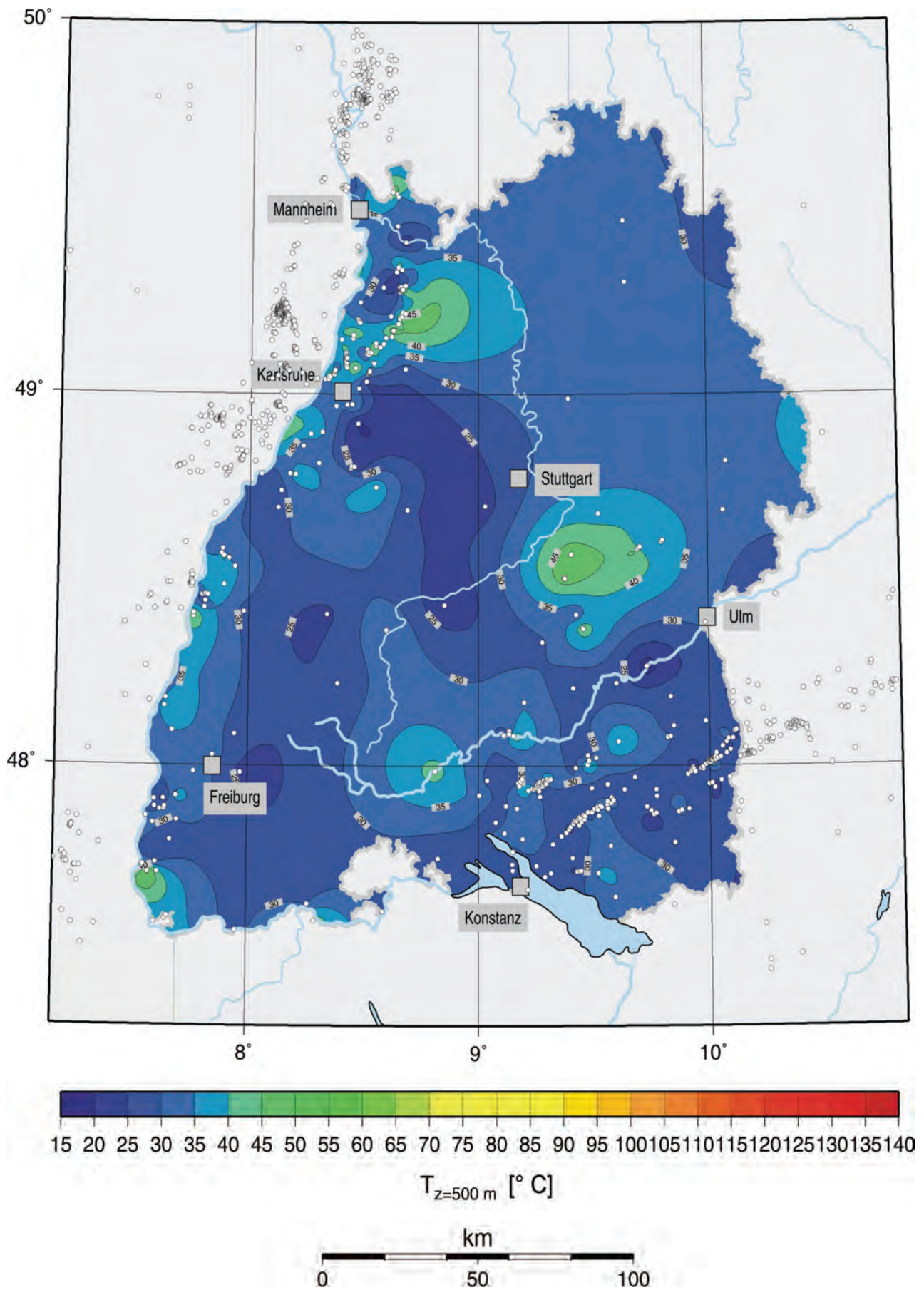


Abb. 10 Temperaturen in 500 m Tiefe.

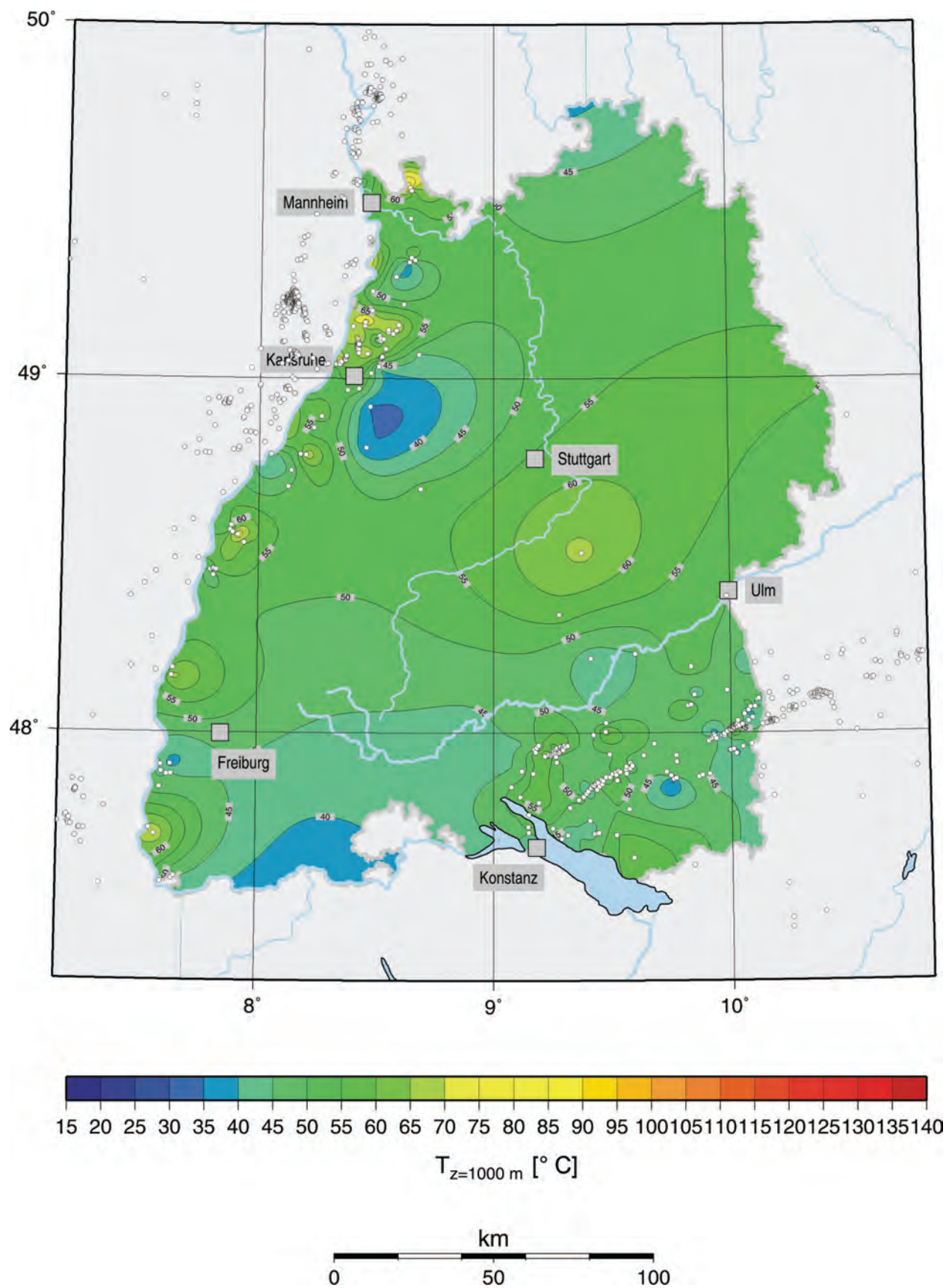


Abb. 11 Temperaturen in 1000 m Tiefe.

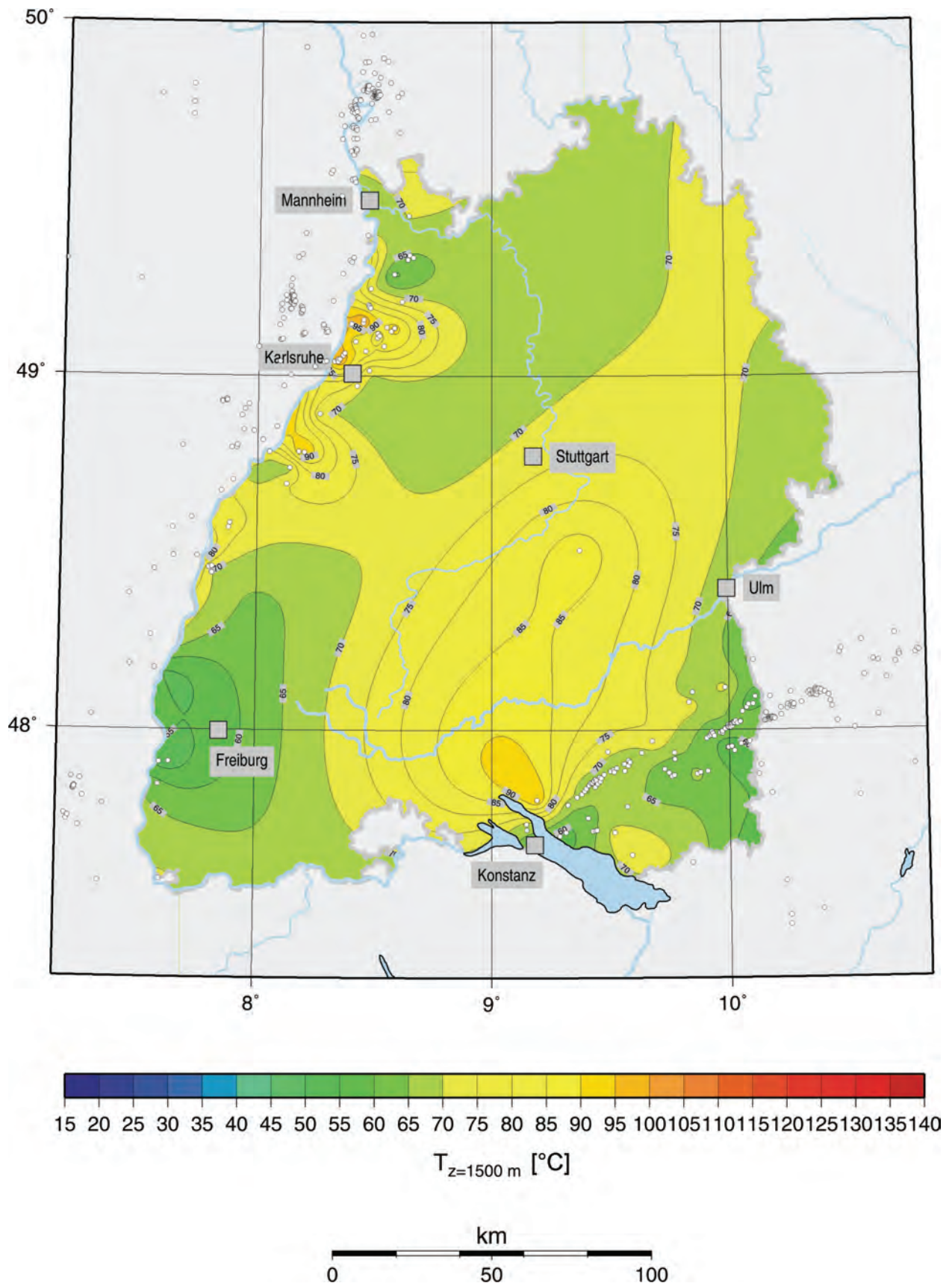


Abb. 12 Temperaturen in 1500 m Tiefe.

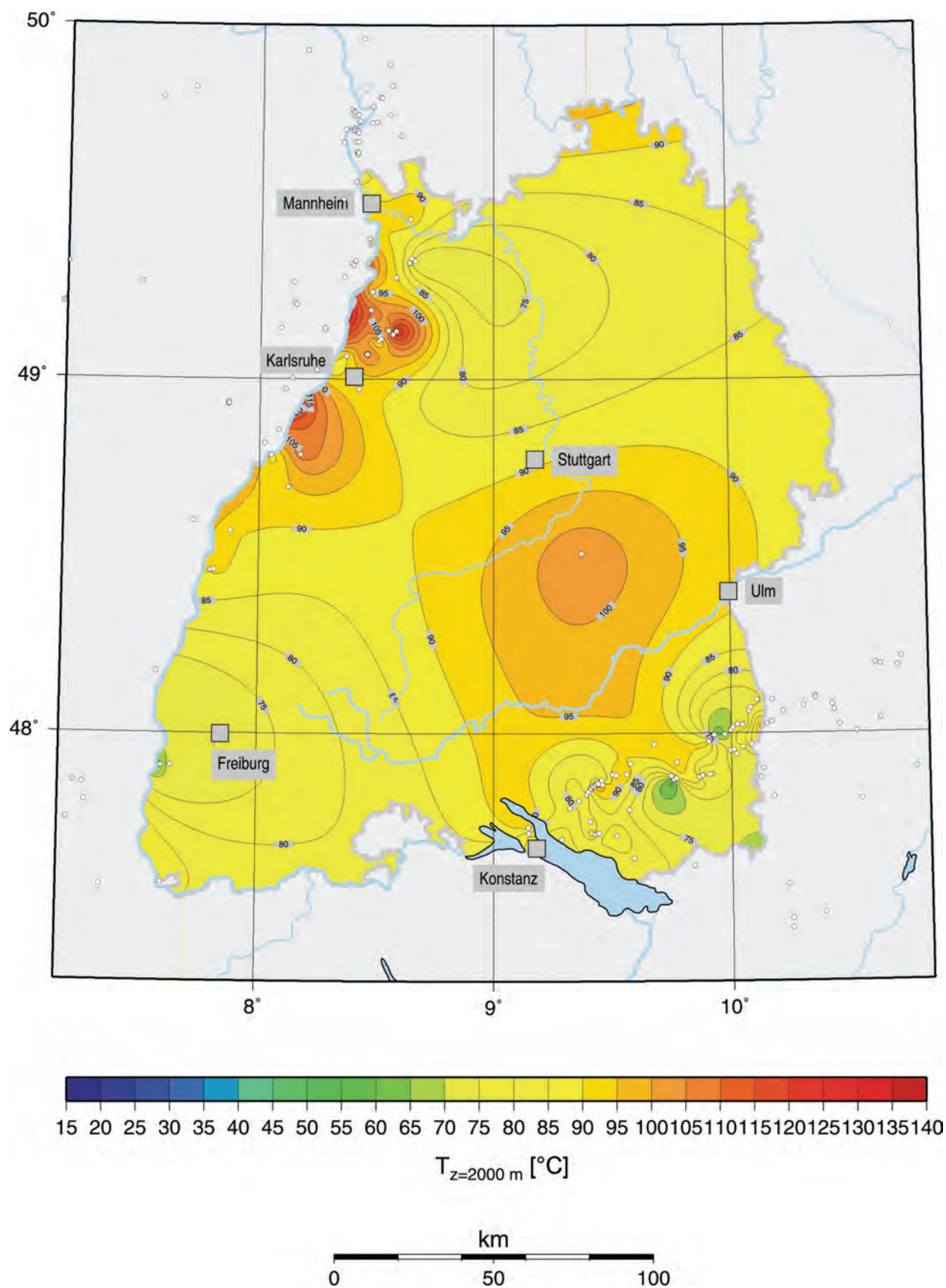


Abb. 13 Temperaturen in 2000 m Tiefe.

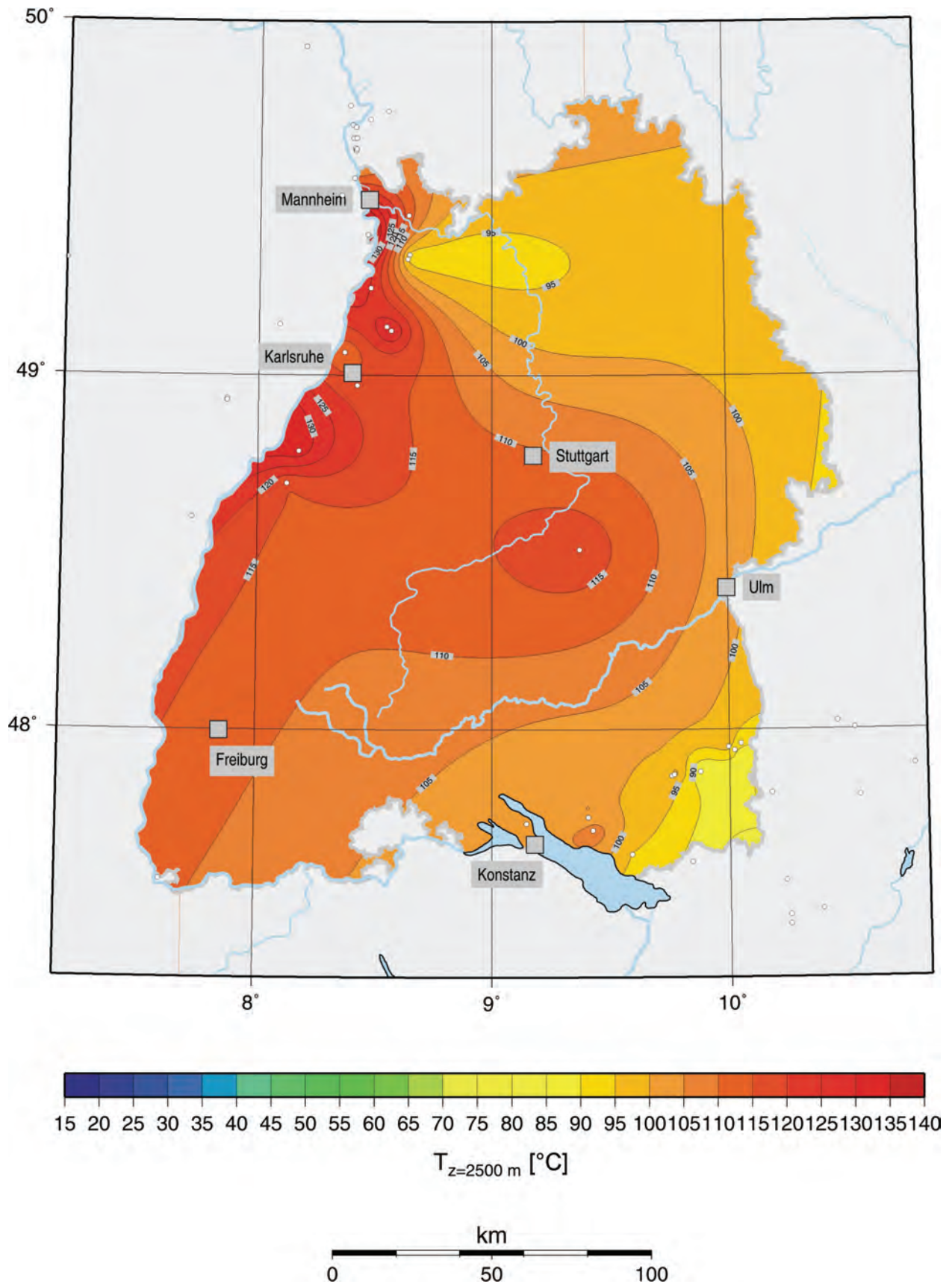


Abb. 14 Temperaturen in 2500 m Tiefe.

Soultz-sous-Forêts wird, im Gegensatz zur Anomalie Bad Urach – Bad Boll, durch aufsteigende heiße Tiefenwässer verursacht. Die Anomalie Soultz-sous-Forêts ist teufenbegrenzt. Im tieferen Bereich des Granitgebirges liegen normale Temperaturverhältnisse vor.

In den Abb. 9 bis 14 treten darüber hinaus noch weitere kleinere positive und negative Anomalien – vorzugsweise im Bereich zwischen Donau und Bodensee – hervor.

Von den natürlichen Thermalwasseraufstiegen in Baden-Württemberg ist nur das System von Baden-Baden in Abb. 9 erkennbar, da nur hier Werte von Bohrungen aus Tiefen über 300 m vorliegen. In allen anderen Systemen wie z. B. Badenweiler, Bad Wildbad, Bad Liebenzell, Bad Säckingen oder Bad Cannstadt existieren keine Tiefbohrungen mit Temperaturangaben in entsprechender Tiefe. Die Lokation dieser Standorte ist in Abb. 9 mit einem roten Dreieck markiert.



Literatur

- BERTLEFF, B. & JOACHIM, H., KOZIOROWSKI, G., LEIBER, J., OHMERT, W., PRESTEL, R., STÖBER, I., STRAYLE, G., VILLINGER, E., WERNER, J. (1988): Ergebnisse der Hydrogeothermiebohrungen in Baden-Württemberg. – Jh. Geol. L.-Amt Baden-Württ., 30: 27 – 116, 30 Abb., 6 Tab; Freiburg i. Br.
- BRANCO, W. (1894): Schwabens 125 Vulkan-Embryonen und deren tuffgefüllte Ausbruchsröhren. – Jh. Ver. vaterl. Nat.kd. Württ., 50: 505 – 997; Stuttgart.
- Deutscher Wetterdienst (1964): Klima-Atlas. – 38 S., 8 Abb., 77 Kt.; Offenbach (Selbstverlag Deutscher Wetterdienst)
- HAENEL, R. & ZOTH, G. (1982): Temperature Measurements and Determination of Heat Flow Density. – In: HAENEL, R. [Hrsg.]: The Urach Geothermal Project: 81–88, 3 Abb., 2 Tab; Stuttgart.
- HOFFERS, B. (1978): Modellrechnungen zur Uracher Wärmeanomalie. – Oberrhein. Geol. Abhandl., 27: 33 – 39; Karlsruhe.
- HORNER, D.R. (1951): Pressure build-up in wells. – Proc. Third World Petroleum Congress, 34: 503 – 521, 10 Abb., 4 Tab.; The Hague, The Netherlands.
- KESSELS, W. (1980): Die Bestimmung des stationären Temperaturgradienten und des geothermischen Wärmeflusses aus Flachbohrungen. – Techn. Univ. Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Diss. Nat.wiss. Fak.: 184 S., 78 Abb., 8 Tab.; Braunschweig.
- KÜHNE, K. & MAUL, A.-A., GÖRLING, L. (2003): Aufbau eines Fachinformationssystems Geophysik. – Z. Angew. Geol. 2/2003: 48 – 53, 6 Abb.; Hannover.
- LACHENBRUCH, A.H. & BREWER, M.C. (1959): Dissipation of the temperature effect of drilling a well in Arctic Alaska. – Geological Survey Bulletin, 1083-C: 73 – 109, 35 Abb., 8 Tab.; Washington.
- LEBLANC, Y. & LAM, H.-L., PASCOE, L.J., JOHNES, F.W. (1982): A comparison of two methods of estimating static formation temperature from well logs. – Geophys. Prosp., 30: 348 – 357, 6 Abb., 1 Tab.
- VON MANDELSLOH, F. (1844): Beobachtungen über die Zunahme der Erd-Wärme in dem 1186 württb. tiefen Bohrloch zu Neuffen, angestellt mit dem Magnus'schen Geo-Thermometer. – N. Jb. Mineral., Geognosie u. Petrefaktenkde., XV: 440 – 443, 1 Tab; Stuttgart.
- MIDDLETON, M.F. (1982): Bottom-hole temperature stabilization with continued circulation of drilling mud. – Geophysics, 47: 1716 – 1723, 11 Abb., 1 Tab.
- POWELL, W.G. & CHAPMAN, D.S., BALLING, N., BECK, A.E. (1988): Continental Heat-Flow Density – In: HAENEL, R., RYBACH, L. und STEGENA, L.: Handbook of Terrestrial Heat-Flow Density Determination, Kluwer Academic Publishers: 56 S., 18 Abb., 6 Tab.; Dordrecht.
- SCHÄDEL, K. & STÖBER, I. (1984): Die Wärmeanomalie Urach aus geologischer Sicht. – Jh. Geol. L.-Amt Baden-Württ., 26: 19 – 25, 2 Abb.; Freiburg i. Br.
- SCHULZ, R. & HÄNEL, R., WERNER, K.H. (1990): Geothermische Ressourcen und Reserven: Weiterführung und Verbesserung der Temperaturdatensammlung. – Report EUR 11998 DE: 75 pp; Luxembourg (Office for Official Publications of the European Communities): 75 S.
- SCHULZ, R. & SCHELLSCHMIDT, R. (1991): Das Temperaturfeld im südlichen Oberrheingraben. – Geol. Jb., E48: 153 – 165, 5 Abb., 1 Tab.; Hannover.
- SMITH, W.H.F. & WESSEL, P. (1990): Gridding with continuous curvature splines in tension. – Geophysics, 55: 293 – 305, 7 Abb.
- WERNER, D. (1976): Zur Wärmeanomalie bei Urach. – 36. Tagung der Dt. Geophys. Ges. Bochum: 2 S.; Bochum.
- (1982): The Relationships between the Volcanism and the Geothermal Anomaly in the Urach-Region. – In: HAENEL, R. (Hrsg.): The Urach Geothermal Project: 223 – 228; Stuttgart.
- WESSEL, P. & SMITH, W.H.F. (1995): A new version of the Generic Mapping Tools (GMT). – Eos Trans. AGU, 76 (33): S. 329.



Dank

Wir bedanken uns bei Frau Dipl.-Hydrol. ANETTE PFEIFFER und den studentischen Hilfskräften: Frau SABINE BRODHAG, Herrn MARC VOGLER und Herrn MARCO JODOCY für die Unterstützung von Aktenrecherchen zu Temperaturdaten sowie bei Dipl.-Geol. Frau ISABEL RUPF für die Erstellung der Abb. 2 und 3. Herzlichen Dank auch an Herrn Dipl.-Ing. (FH) JOACHIM SCHUFF und Frau Dipl.-Ing. (FH) BETTINA SCHMÜCKING für kartographische und redaktionelle Arbeiten. Für das Layout danken wir Frau BRIGITTE WOLF.

1/2006	(2006)	Mineral-, Heil- und Thermalwässer, Solen und Sauerlinge in Baden-Württemberg (1. Ausg. 03-2002/überarb. Ausg. 06-2006) 20 S., 1 Abb., 1 Tab., 1 Kt.	10,– €
1/2006	(2006)	Hydrogeologische Untersuchungen zur Beurteilung von Tiefbaggerungen durch den Oberen Zwischenhorizont in der Rheinniederung nördlich von Karlsruhe 66 S., Abb. 37, 7 Tab.	10,– €
1/2007	(2007)	Hochauflösende Reflexionsseismik auf dem Rhein und dem Rheinseitenkanal zwischen Mannheim und Rheinfelden 60 S., 32 Abb., 7 Tab., 1 CD-ROM	18,– €
1/2008	(2008)	Verweilzeiten des Grundwassers in oberflächennahen Grundwasserleitern in Baden-Württemberg 31 S., 4 Abb., 5 Tab.	10,– €

 LGRB – Informationen des Regierungspräsidiums Freiburg • Abteilung 9

Bis Heft 9 Fachberichte des GLA (Geologisches Landesamt Baden-Württemberg)

Bis Heft 15 Fachberichte des LGRB (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg)

Heft 6	(1994)	Ergiebigkeitsuntersuchungen in Festgesteinsaquiferen 114 S., 65 Abb., 11 Tab.	10,– €
Heft 10	(2001)	Wechselwirkungen zwischen Baggerseen und Grundwasser 64 S., 42 Abb., 15 Tab., 1 CD-ROM	10,– €
Heft 12	(1999)	Freiburg im Breisgau – Geologie und Stadtgeschichte 60 S., 28 Abb., 2 Tab., 1 Taf., Beil. (2 Kt.)	5,– €
Heft 15	(2004)	Exotische Gehölze im Kirchheimer-Arboretum Freiburg 36 S., 48 Abb.	5,– €
Heft 16	(2005)	Ingenieurgeologische Gefahren in Baden-Württemberg 79 S., 46 Abb.	10,– €
Heft 17	(2005)	Ergebnisse neuer Forschungsbohrungen in Baden-Württemberg 150 S., 17 Abb., 7 Tab., 3 Taf.	10,– €
Heft 18	(2006)	Rohstoffbericht Baden-Württemberg 2006 202 S., 209 + 12 Abb., 15 Tab., 1 Kt.	10,– €
Heft 19	(2007)	Hydrogeologischer Bau und Aquifereigenschaften der Lockergesteine im Oberrheingraben (Baden-Württemberg) 130 S., 118 Abb., 12 Tab.	10,– €
Heft 20	(2008)	Hydrogeologische Einheiten in Baden-Württemberg 106 S., 79 Abb., 21 Tab., 1 Kt.	15,– €
Heft 21	(2008)	Das Geologische Landesmodell von Baden-Württemberg: Datengrundlagen, technische Umsetzung und erste geologische Ergebnisse 82 S., 36 Abb., Anh. (3 Tab), 10 Beil.	15,– €

Preise zuzüglich Versandkosten.

Nicht aufgeführte Titel sind zurzeit vergriffen.