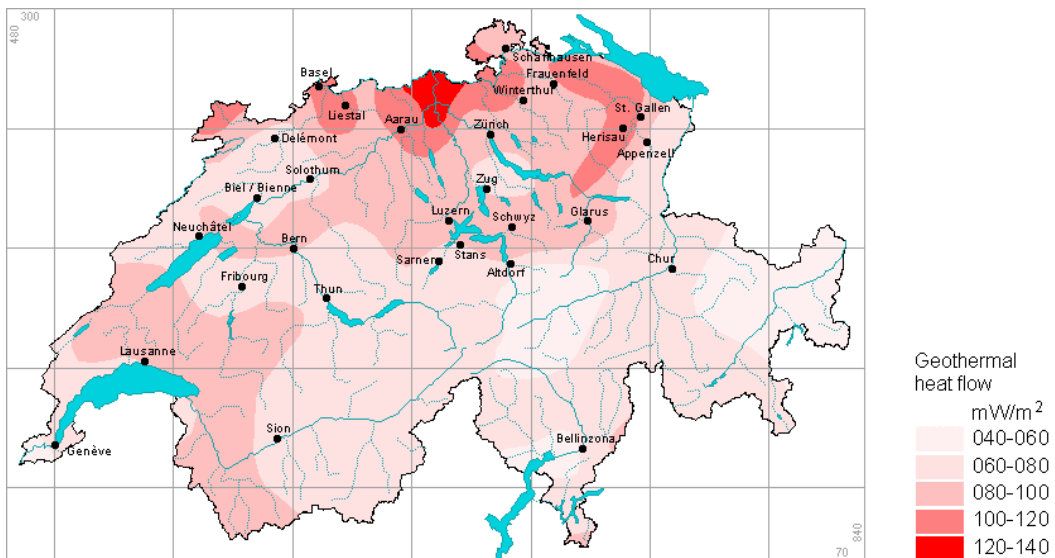

3. März 2014



Bodentemperaturen und geothermischer Wärmefluss in der Schweiz

Arthur Huber

Huber Energietechnik AG
Ingenieur- und Planungsbüro
Jupiterstrasse 26, CH-8032 Zürich
Tel: 044 227 79 78 Fax: 044 227 79 79
<http://www.hetag.ch> mail@hetag.ch

Zusammenfassung

Unter Prof. L. Rybach wurden an der ETH bis 2002 systematisch das Wissen über den geothermischen Wärmefluss der Schweiz gesammelt und publiziert. Er basiert auf der Messung der Temperatur und der Wärmeleitfähigkeit von tiefen Sondenbohrungen. Leider hat sich die ETH entschlossen, nach der Emeritierung von Prof. Rybach den Lehrstuhl zu schliessen, womit die Forschung in der Schweiz in diesem Bereich praktisch zum Erliegen kam. Die NAGRA hat diese Rolle nur partiell für den bereits vorgängig gut untersuchten Bereich der Nordschweiz übernommen.

Medici und Rybach [10] haben 1995 eine Karte des geothermischen Wärmeflusses der Schweiz publiziert. Im geothermischen Ressourcenatlas der Schweiz [18] wurde auf der Basis von Simulationsmodellen ein wesentlich geringerer geothermischer Wärmefluss vorausgesagt. Eine Diskussion der Abweichungen fand nicht statt.

Neuere Messungen haben gezeigt, dass der geothermische Wärmefluss in einigen Gebieten der Schweiz wesentlich höher liegt als bisher angenommen, zumindest in Tiefen bis 1'000m. Die nach wie vor am häufigsten zitierte Wärmeflusskarte von Medici und Rybach [10] basiert auf einer qualitativ unterschiedlichen Datenbasis (Gegenden mit vielen, qualitativ guten Messungen z.B der Nagra und Lücken bei der Datenbasis) und teilweise auf einer Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Bohrklein (Cuttings), die einen systematischen zu geringe Wärmeleitfähigkeit ergaben, wenn die Cuttings unterschiedliche Grössen aufwiesen. Es wäre zu begrüßen, wenn die Forschung auf diesem Gebiet auf systematischer Basis wieder aufgenommen würde.

Die vorliegende Zusammenstellung stellt den Stand des publizierten Wissens in der Schweiz auf diesem Gebiet im Jahr 2014 dar und wurde durch keine öffentliche Stelle gefördert. Für Teilgebiete (z.B. Genf) gibt es weitere Publikationen, die in diesem Bericht nicht erfasst sind. Eine generelle Zusammenstellung neuerer Werte für die ganze Schweiz ist dem Autor nicht bekannt.

Inhalt

1	Grundlagen	4
1.1	Geothermischer Wärmefluss und Temperaturgradient.....	4
1.2	Problematik der Bestimmung des Wärmeflusses	4
1.3	Beispiel Pilotbohrung Hotel Dolder	5
1.4	Temperturen in Oberflächennähe	5
1.4.1	Mittlere Oberflächentemperaturen T_{mo}	5
1.4.2	Jahreszeitenschwankungen	6
2	Geothermischer Wärmefluss in der Schweiz	7
2.1	Karte von Medici, Rybach, 1995.....	7
2.2	Karte von Schärli und Rybach, 2002	8
2.3	Karte von Signorelli, Andenmatten und Kohl	9
2.4	Wärmefluss im Bereich Oftringen - Aarau	9
3	Literaturverzeichnis.....	10

1 Grundlagen

1.1 Geothermischer Wärmefluss und Temperaturgradient

Die Wärmeleitungsgleichung, in der Form des Fourierschen Gesetzes geschrieben, sieht für den geothermischen Wärmefluss aus dem Erdinnern \dot{q}_{geo} im stationären Zustand wie folgt aus:

$$\dot{q}_{geo} = \lambda \cdot \Delta T_{geo} \quad [\text{W/m}^2] \quad \text{Gl. 1.1}$$

wobei ΔT_{geo} der Temperaturgradient in die Tiefe und λ die Wärmeleitfähigkeit des Gesteins darstellt. In der äusseren Erdkruste ist im ebenen Gelände und stationären Fall der geothermische Wärmefluss über die Tiefe angenähert konstant, der Temperaturgradient aber schwankt mit der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins. Je grösser die Wärmeleitfähigkeit ist, um so geringer ist auch der geothermische Gradient. Im Gebirge kann die Topografie zu grösseren Abweichungen im geothermischen Wärmefluss auch über die Tiefe führen und so die Bestimmung dieser Grösse erschweren.

1.2 Problematik der Bestimmung des Wärmeflusses

Die Bestimmung des geothermischen Wärmeflusses geschieht indirekt über Messungen des Temperaturgradienten ΔT_{geo} und der Wärmeleitfähigkeit λ des Gesteins und ist z.B. in [17] beschrieben. Dabei können nur die Werte in Tiefen von mehr als 80m-100m ausgewertet werden, da in den ersten 20m die Jahreszeitenschwankungen sichtbar sind und in den Tiefen bis 80m-100m die Klimaerwärmung der letzten 30 Jahre zu erkennen ist (Abb 1.2). Temperaturmessungen in Erdwärmesonden sind vor der Inbetriebnahme der Sonden relativ einfach und präzise möglich. Die Messung der Wärmeleitfähigkeit hingegen erfordert Bohrkern, die nur in sehr wenigen Fällen zur Verfügung stehen. Messungen an Bohrkern (Cuttings) hingegen sind recht aufwendig und teilweise wenig genau. Ursache für die Ungenauigkeit sind teilweise die unterschiedlichen Grössen der Cuttings, die ein gleichmässiges Aufliegen der Messplatte verhindern können und so systematisch zu tiefe Wärmeleitfähigkeiten ergeben.

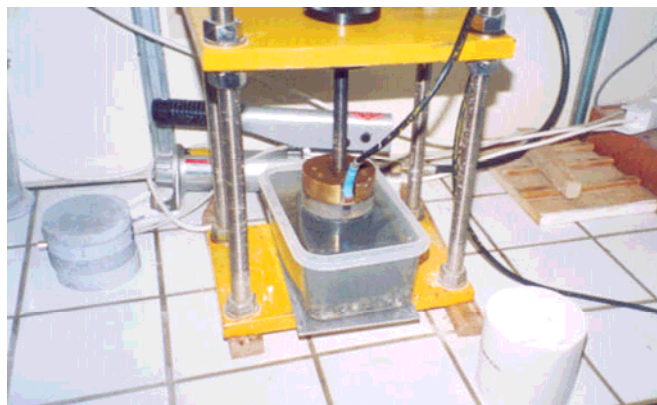


Abb 1.1: Messung an Cuttings mit dem Messgerät TK04 gemäss [17]

1.3 Beispiel Pilotbohrung Hotel Dolder

Zur Veranschaulichung sind in Abb 1.2 zwei Messungen von Rohner / Basetti [11] dargestellt und ausgewertet:

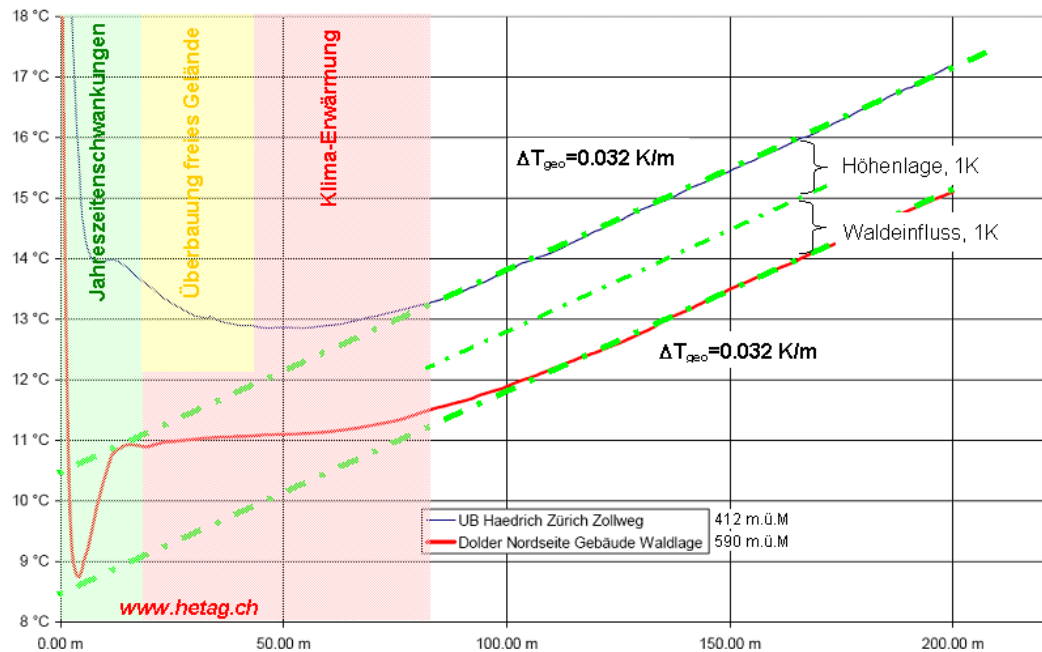


Abb 1.2: Interpretation zweier Temperaturmessungen in der Stadt Zürich, aufgeteilt in Jahreszeitschwankungen, städtischer Einfluss, Klimaerwärmung und ungestörter Temperaturgradient. Messung durch Rohner / Basetti [11]

Für die Messung an der Pilotbohrung Dolder in Zürich liegt eine genaue Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mittels Thermal Response-Test (TRT) der TU München vor. Diese Messung ergab einen Wert von 2.5 W/mK. Mit dem gemessenen Temperaturgradienten von 0.032 K⁻¹ ab 100m Tiefe kann somit der geothermische Wärmefluss in Zürich von 80 mW/m² berechnet werden.

1.4 Temperaturen in Oberflächennähe

1.4.1 Mittlere Oberflächentemperaturen T_{mo}

Extrapoliert man die Temperaturmessungen Abb 1.2 unterhalb von 80m an die Geländeoberfläche, so erhält man die Jahres-Mitteltemperatur der Erdoberfläche T_{mo}. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine Temperaturmessung ins Erdinnere immer auch ein Blick in die Vergangenheit darstellt, wir also hier nicht die heutige Jahres-Mitteltemperatur erkennen, sondern die Jahresmitteltemperatur an der Oberfläche der Vergangenheit. Betrachten wir die Messung Abb 1.2, so trifft die extrapolierte Temperaturmessung bei der Messung Dolder (590 m. ü. M.) bei ca. 8.5 °C auf die Erdoberfläche, dies dürfte also die mittlere Oberflächentemperatur an diesem Standort vor ca. 100 Jahren gewesen sein. Die Temperaturaufzeichnungen der nahegelegenen Wetterstation Zürich SMA zeigen aber auch

in der Vergangenheit wärmere Luft-Temperaturen \overline{T}_{Luft} (Jahresmittel). Dies bedeutet, dass der Waldeinfluss (Bodenerwärmung) an diesem Standort ein negatives Vorzeichen hat und ca. -1K beträgt. In Schneereichen Regionen kann der Oberflächeneinfluss (Bodenerwärmung) andererseits bis zu $+4\text{K}$ betragen.

$$T_{mo} = \overline{T}_{Luft} + \text{Bodenerwärmung} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad \text{Gl. 1.2}$$

Bei der Abschätzung von Bodentemperaturen macht es also keinen Sinn, auf aktuelle Wetterdatensätze zurückzugreifen, besser bedient man sich der Werte, die auf historischen Wetteraufzeichnungen basieren.

Bei der Wahl der Wetter-Datensätze muss auch die Höhenlage der Wetterstation in Bezug zum Projektstandort berücksichtigt werden. Die Temperaturabhängigkeit aus der Höhenlage ergibt sich aus dem Gasgesetz. Im Schweizer Mittelland kann vereinfacht mit folgendem Wert gerechnet werden:

$$\Delta T_{mo} = -0.47 \text{ K pro } 100\text{m Höhenzunahme} \quad \text{Gl. 1.3}$$

1.4.2 Jahreszeitenschwankungen

Die Jahreszeitenschwankungen im Erdreich können mit der folgenden Formel berechnet werden [19]:

$$T = T_{mo} - \Delta T_o \cdot \exp\left(-z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a \cdot t_a}}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{t_a} t - z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a \cdot t_a}}\right) \quad \text{Gl. 1.4}$$

Für die Periodendauer t_a ist $1 \text{ Jahr} = 8760\text{h/a} \cdot 3600 \text{ s/h}$ einzusetzen. Für ein Gestein mit einer Temperaturleitfähigkeit a von $1.25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ergibt dies folgendes Bild:

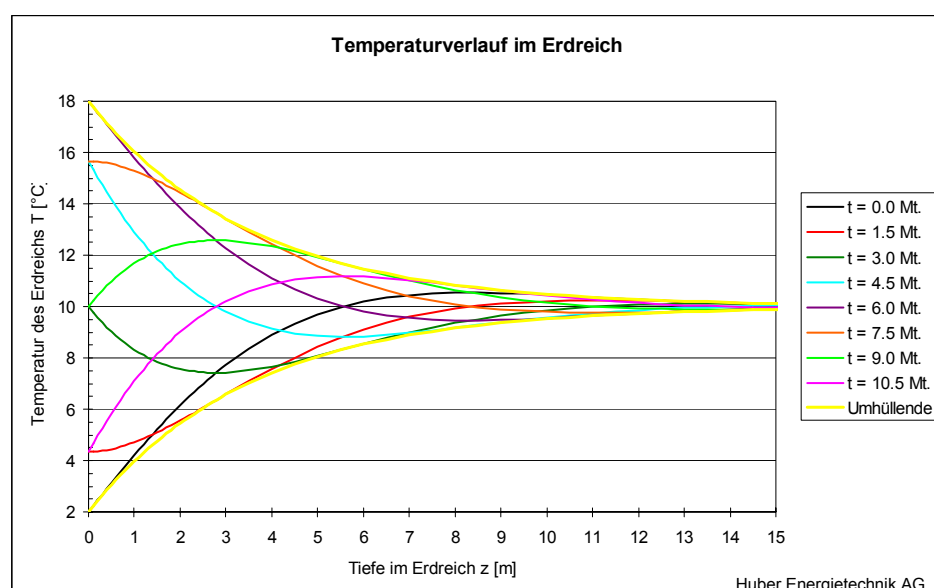


Abb 1.3: Jahreszeitenschwankungen im Erdreich mit $a = 1.25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

2 Geothermischer Wärmefluss in der Schweiz

2.1 Karte von Medici, Rybach, 1995

An der ETH wurden unter Prof. L. Rybach systematisch alle zugänglichen Grundlagendaten zur Bestimmung des geothermischen Wärmeflusses gesammelt und bestehende Bohrungen teilweise neu ausgemessen [15]. Auf der Grundlage dieser Daten entstand 1995 die Karte des Geothermischen Wärmeflusses in der Schweiz von Medici und Rybach [10]:

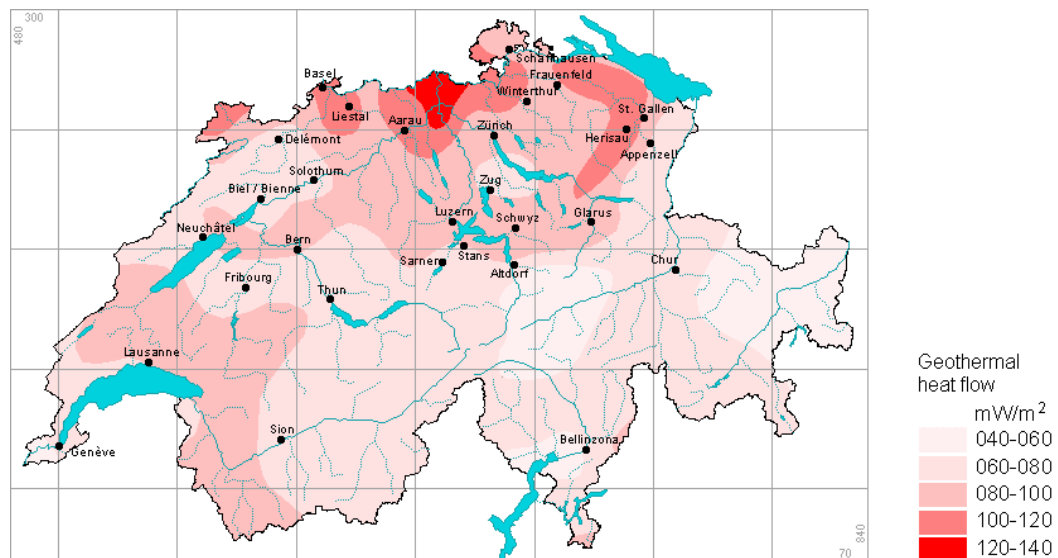


Abb. 2.7: Geothermischer Wärmefluss der Schweiz nach Medici, Rybach, 1995 [10].

Die Karte zeigt geothermischen den Wissenstand von 1995, der 2002 von Schärli und Kohl archiviert wurde [15]. Die beste Datenlage stammt aus den NAGRA-Tiefen-Bohrungen, diese sind aber nicht gleichmässig verteilt:

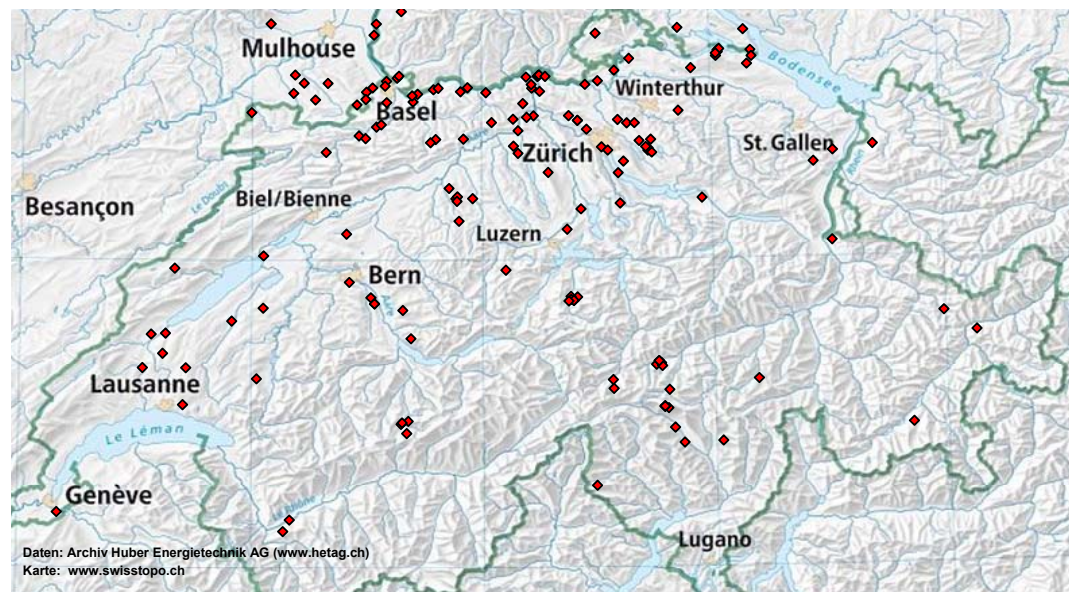


Abb. 2.7: Verteilung der archivierten Tiefenbohrungen der ETH [15] als Grundlage für die Erstellung der Wärmeflusskarte von Medici und Rybach [10].

2.2 Karte von Schärli und Rybach, 2002

Eine Aktualisierung und Verfeinerung der geothermischen Wärmeflusskarte für die Nord-Ostschweiz wurde von Schärli und Rybach im NAGRA-Bericht NTB 02-03 [16] veröffentlicht:

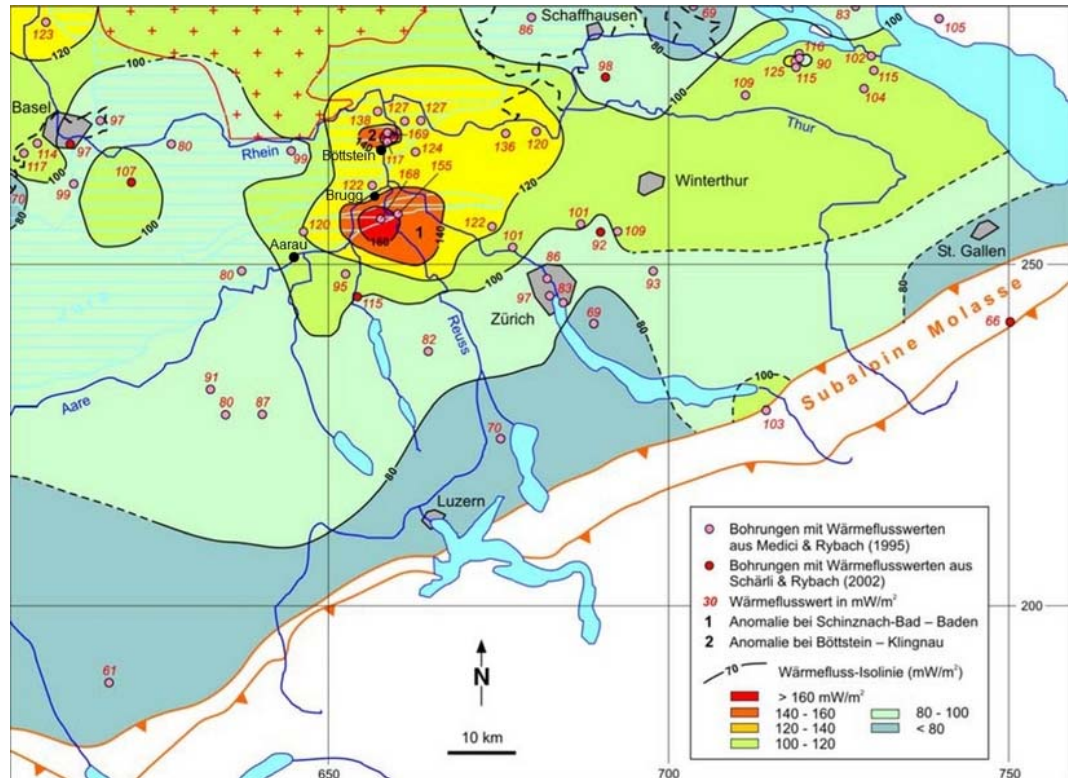


Abb 2.1: Geothermischer Wärmeflusses der Nordschweiz nach Schärli & Rybach, 2002 [16]

Interessant ist, dass die neueren Auswertungen tendenziell höhere, geothermische Wärmeflüsse aufzeigen als die Karte von Medici und Rybach von 1995. Ausserdem ist auch offensichtlich, dass die Grundlagendaten noch sehr lückenhaft sind.

2.3 Karte von Signorelli, Andenmatten und Kohl

Gemäss dem Geothermische Ressourcenatlas der Schweiz von Signorelli, Andenmatten und Kohl [18] sieht der geothermische Wärmefluss in der Nordschweiz in einer tiefe von 10 km wie folgt aus:

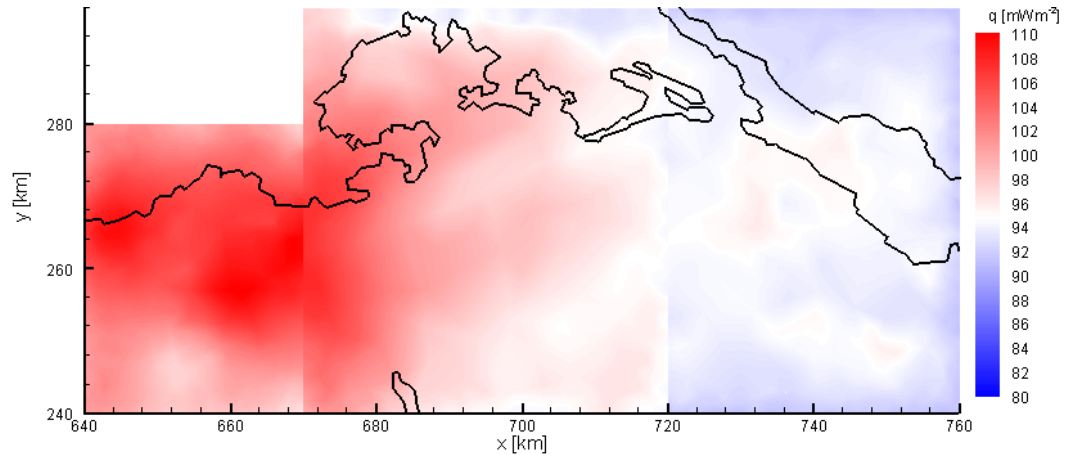


Abb 2.2: Geothermischer Wärmeflusses der Nordschweiz nach Signorelli, Andenmatten und Kohl, 2004 [18]. Karte weicht stark von übrigen Publikationen ab.

2.4 Wärmefluss im Bereich Oftringen - Aarau

In der Messung der Tiefensonde in Oftringen 2010 [12] wurde ein geothermischer Wärmefluss von über 120 mW/m² gemessen, ein wesentlich höherer Wert als von Medici und Rybach [10] 1995 vorausgesagt wurde:

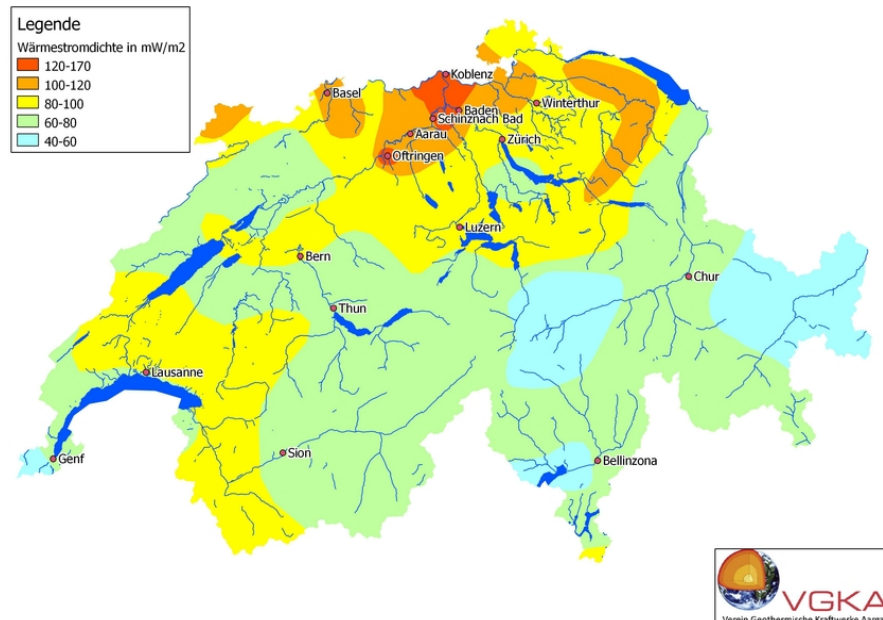


Abb 2.3: Wärmeflusskarte von Sachs und Eberhard [14] auf der Basis der geothermischen Karte von Medici und Rybach [10] unter Berücksichtigung der Messung von Sachs und Eberhard [12]

Auch die Messung in Aarau von Sachs und Eberhard [13] zeigt einen geothermischen Wärmefluss von über 120 mW/m².

3 Literaturverzeichnis

- [1] **Eskilson, P. (1987):** Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
- [2] **Huber, A.; Schuler, O. (1997):** Berechnungsmodul für Erdwärmesonden. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie (BFE), Bern. ENET-Nr. 9658807/1, 1997.
- [3] **Huber, A.; Pahud, D. (1999):** Untiefe Geothermie: Woher kommt die Energie? Forschungsprogramm Geothermie. Bundesamt für Energie (BFE), Bern.
- [4] **Huber, A.; Pahud, D. (1999):** Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie (BFE), Bern.
- [5] **Huber, A. (2005):** Erdwärmesonden für Direktheizung. Phase 1: Modellbildung und Simulation. Schlussbericht. Bundesamt für Energie, Bern.
- [6] **Huber A.; Ochs M. (2007):** Hydraulische Auslegung von Erdwärmesondenkreisläufen mit der Software „EWSDRUCK“, Vers. 2.0. Schlussbericht. Bundesamt für Energie (BFE), Bern.
- [7] **Huber A. (2011): Programm EWS, Version 4.7. Berechnung von Erdwärmesonden.** Benutzerhandbuch. Huber Energietechnik AG, Zürich. <http://www.hetag.ch>.
- [8] **Kohl, T.; Salton, M.; Rybach, L. (2000):** Data analysis of the deep borehole heat exchanger plant Weissbad. Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu - Tohoku, Japan
- [9] **Loose, P. (2009):** Erdwärmennutzung. Versorgungstechnische Planung und Berechnung. 3. überarbeitete Auflage. C.F.Müller-Verlag. ISBN 978-3-7880-7831-7.
- [10] **Medici F., Rybach, L., (1995):** Geothermal map of Switzerland 1:500'000 (Heat Flow Density). Beitr. Geol. Schweiz, Ser. Geophys. Nr. 30, 36 p.
- [11] **Rohner, E.; Bassetti, S. (2004):** Projekt Erfolgskontrolle und Planungsinstrumente für EWS-Feld Hotel Dolder Zürich. Zwischenbericht, BFE, Bern.
- [12] **Sachs, O.; Eberhard, M. (2010):** Tiefen-EWS Oftringen (706 m). Direktheizen mit einer 40-mm-2-Kreis PETiefen-Erdwärmesonde. Schlussbericht, BFE, Bern.
- [13] **Sachs, O.; Eberhard, M. (2011):** Effizienz- und thermische Behaglichkeitsermittlung einer über den Fussboden wirkenden erdekoppelten Heiz- und Kühlanlage für ein Gewerbehause in Aarau (AG). Schlussbericht, BFE, Bern.
- [14] **Sachs, O.; Eberhard, M.:** Geothermische Kraftwerktechnik. Download www.vgka.ch.
- [15] **Schärli, U.; Kohl, T. (2002):** Archivierung und Kompilation geothermischer Daten der Schweiz und angrenzender Gebiete. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geophysik Nr. 36. Publiziert durch die Schweizerische Geophysikalische Kommission. ISSN 0253-1186.
- [16] **Schärli, U.; Rybach, L. (2002):** Erstellung einer aktuellen Karte der Temperaturgradienten und des Wärmeflusses der Nordschweiz. Nagra Int. Bericht. Publiziert im NAGRA-Bericht NTB 02-03: Projekt Opalinuston. Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. ISSN 1015-2636. Fig. 3.8-1
- [17] **Schärli, U.; Ernst Rohner, E.; Signorelli, S.; Wagner, R. (2007):** Thermische Leitfähigkeit: Eichung von in-situ Messungen (d.h. „kabellose Temperatursonde“) mit Laborbestimmungen als Grundlage für die geothermische Kartierung des Kantons ZH und der umliegenden Kantone. Schlussbericht, BFE, Bern.
- [18] **Signorelli, S.; Andenmatten Berthoud, N.; Kohl, T. (2004):** Geothermischer Ressourcenatlas der Schweiz. Erarbeitung und Bewertung des geothermischen Potentials der Schweiz. Schlussbericht. Bundesamt für Energie, Bern.
- [19] **Zürcher, C.; Frank, T. (1998):** "Bauphysik. Bau und Energie", vdf, Hochschulverlag AG an der ETH Zürich und B. G. Teubner Stuttgart.