

MuLT_predict: Ein numerisches Multi-komponentengeothermometer zur präzisen Bestimmung der Reservoirtemperatur

TEXT: Lars Yström, Fabian Nitschke, Sebastian Held, Thomas Kohl

Lars Yström wurde beim Geothermiekongress 2019 als bester Jungwissenschaftler ausgezeichnet.

Für die genaue Abschätzung des Potentials eines geothermischen Reservoirs muss dessen Temperatur bestimmt werden. In der Explorationsphase wird diese aus der chemischen Zusammensetzung von geothermischen Quellaustritten abgeleitet. Das neuentwickelte Multikomponentengeothermometer »MuLT_predict« reduziert dabei, durch eine mehrstufige Optimierung, die typischerweise sehr hohen Unsicherheiten konventioneller Geothermometer stark. Dabei ist es von großem Vorteil, dass MuLT_predict auch basierend auf einer Standardfluidanalyse sehr präzise Resultate liefert.



Lars Yström

Doktorand in der Abteilung Geothermie, Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW), Karlsruhe Institut für Technologie (KIT)

Kontakt:

lars.ystroem@kit.edu
www.agw.kit.edu



Dr. Fabian Nitschke

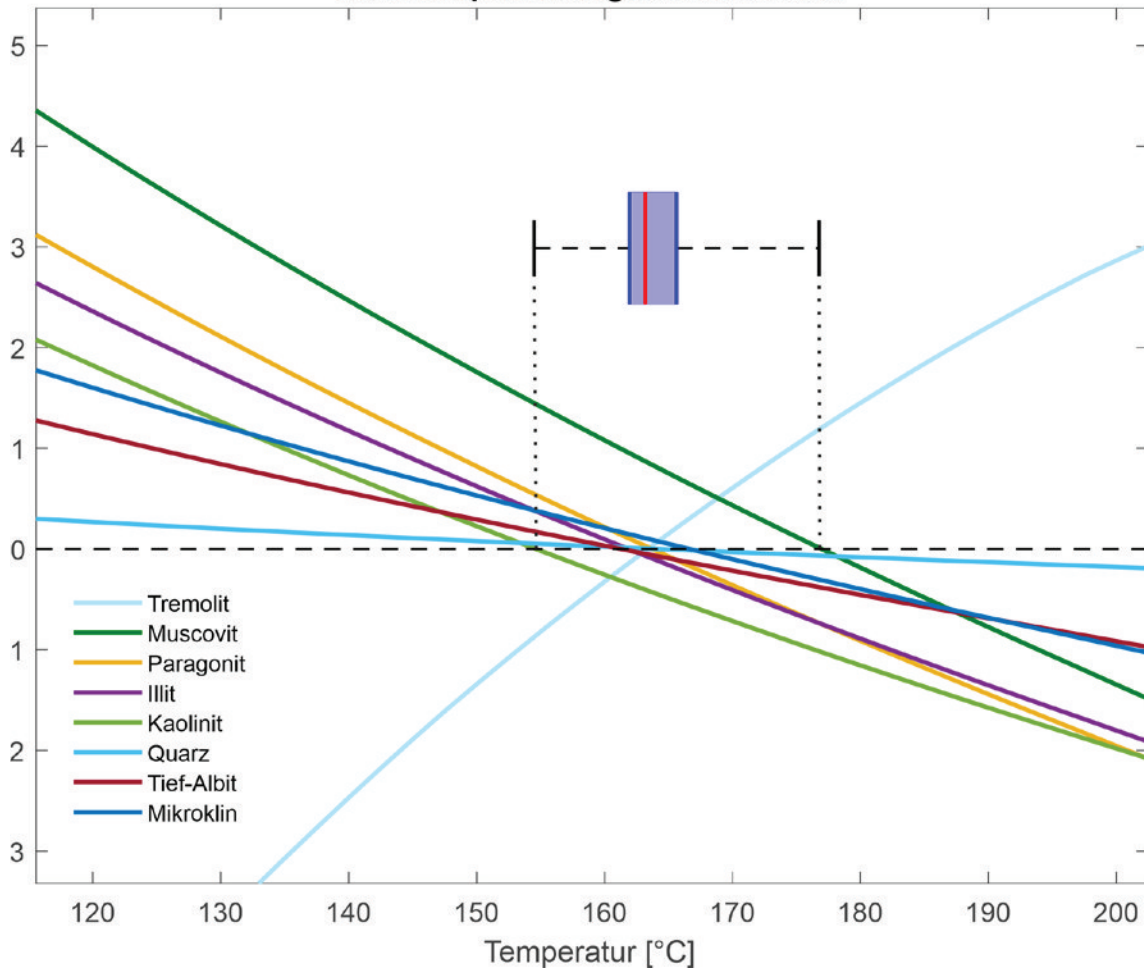
Post-Doc in der Abteilung Geothermie, Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW), Karlsruhe Institut für Technologie (KIT)

Für die erfolgreiche Exploration eines geothermischen Reservoirs ist dessen Temperaturabschätzung erforderlich. Eine seit Jahrzehnten etablierte Standardmethode ist die Geothermometrie. Dabei wird die Reservoirtemperatur durch empirische Zusammenhänge, den konventionellen Lösungsgeothermometern, aus der chemischen Zusammensetzung von geothermalen Quellen oder Bohrungen bestimmt. Diese Geothermometer basieren auf temperaturabhängigen Lösungs-/Fällungsreaktionen der Minerale des Reservoirgesteins in Interaktion mit dem geothermalen Fluid. Die Grundannahme der Methode ist, dass sich das chemische System, eine ausreichende Verweildauer vorausgesetzt, im Gleichgewicht befindet. So werden zur konventionellen Geothermometrie die Löslichkeiten einzelner Mineralphasen (z. B. SiO₂) oder sich aus komplexeren Reaktionen ergebende Elementverhältnisse (Na-K, Mg-K, usw.) genutzt, um auf die Reservoirtemperatur zu schließen. Diese Methode resultiert oft in großen Unsicherheiten, teilweise werden Abweichungen > 100 K bei der Kombination unterschiedlicher Geothermometer auf eine Probe errechnet. Diese Unsicherheiten können zahlreiche Ursachen haben. Die größten Fehlerquellen sind neben der Probennahme und der Analytik vor allem sekundäre Prozesse, die zu einer Änderung des chemischen Gleichgewichts führen. Während des meist langsamen Aufstiegs der Fluide an die Erdoberfläche kann es zu Mineralausfällungen infolge der Re-Equilibration kommen. Ebenso kann sich das Fluid mit oberflächennahen, niedrig mineralisierten Wässern mischen oder ein Teil des Fluides durch den

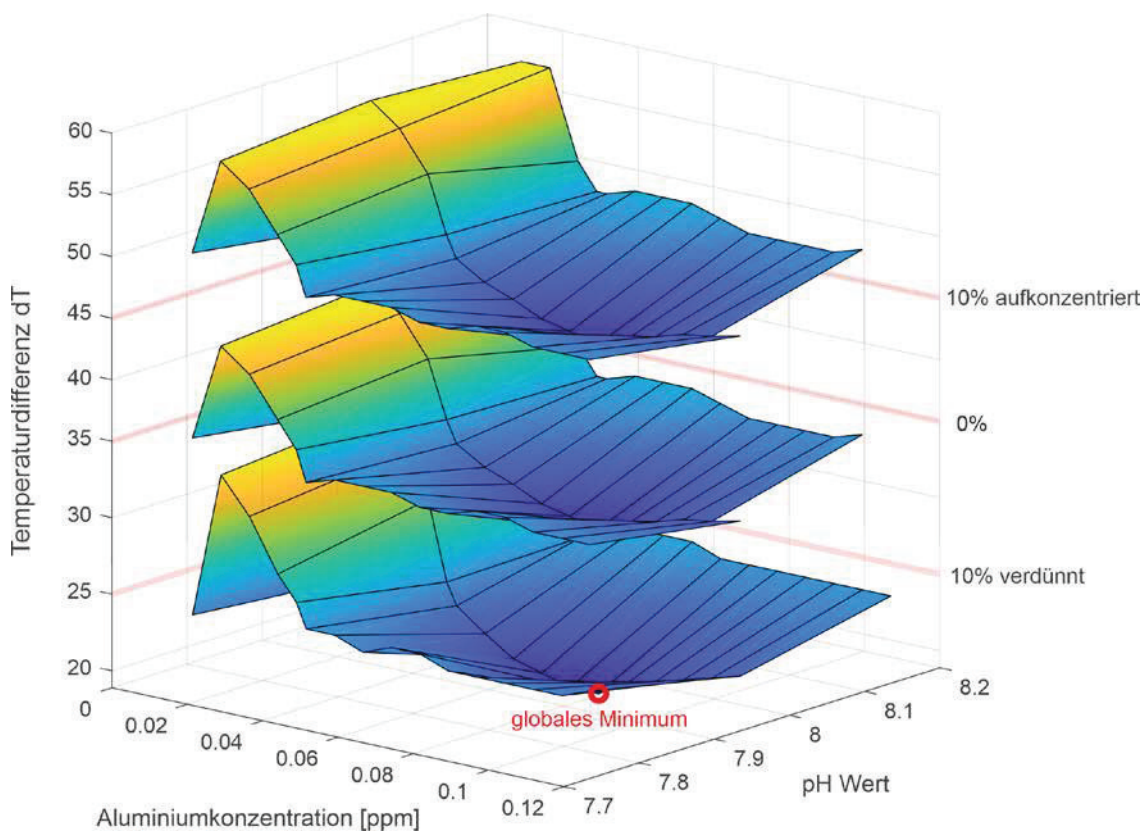
Druckabfall verdampfen. Beides hat eine Änderung der Lösungsmittelmenge (Verdünnung oder Aufkonzentration) zur Folge. Zur Minimierung dieser Unsicherheiten haben wir MuLT_predict, eine automatisierte Kopplung von IPhreeqc (Parkhurst and Appelo 2013) und MATLAB, entwickelt. Mittels integriertem Optimierungsschema lassen sich mit dem Tool störende sekundäre Prozesse korrigieren, um die ursprünglichen Reservoirbedingungen zu bestimmen. Das optimierte Multikomponentengeothermometer nutzt darüber hinaus, anstelle der Löslichkeit von einem einzelnen Mineral bzw. sich daraus ergebenden Elementverhältnissen, eine gleichzeitige Evaluierung temperaturabhängiger Sättigungen einer Vielzahl reservoirspezifischer Mineralphasen. Dabei werden die Sättigungsindices, anhand bekannter Löslichkeiten der Minerale, über einen vorgegebenen Temperaturbereich berechnet und über die Temperatur aufgetragen (Reed and Spycher 1984). Diese temperaturabhängigen Minerallöslichkeiten sind in Abbildung 1 dargestellt.

Im Nulldurchgang der Sättigungskurve wird die Gleichgewichtstemperatur der betrachteten Mineralphase erreicht. Da eine große Anzahl an Mineralphasen betrachtet wird, erhält man eine Gleichgewichtstemperaturverteilung. Diese lässt sich am besten als BoxPlot visualisieren. Da der so ermittelten Reservoirtemperatur das Löslichkeitsverhalten vieler unterschiedlichster Mineralphasen zugrunde liegt, ist die Methode sehr robust gegenüber Störeinflüsse, die durch die statistische Unsicherheit des Box-Plots

Multikomponentengeothermometer



◀ Abb. 1: Beispiel einer Temperaturabschätzung. Darstellung der temperaturabhängigen Sättigungsindices der Mineralphasen. Die Verteilung der Gleichgewichtstemperaturen in den Nulldurchgängen ist als Box-Plot dargestellt.



◀ Abb. 2: Gleichgewichtstemperaturverteilung einer Parametervariation. Gleichzeitige Optimierung der Aluminiumkonzentration, des pH-Werts sowie der Verdünnung bzw. Aufkonzentration. Das globale Minimum gibt die rückgerechneten In-situ-Werte der Reservoirparameter an, wobei die minimierte Temperaturverteilung die Reservoirtemperaturabschätzung darstellt.



Dr. Sebastian Held

Post-Doc in der Abteilung Geothermie, Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)



Prof. Dr. Thomas Kohl

Leiter des Lehrstuhls Geothermie, Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Sprecher Topic "Geothermische Energiesysteme" des KIT HGF-Programms

dargestellt wird. Die Rückrechnung der Störinflüsse erfolgt in einem weiteren Schritt. Ein mehrstufiger numerischer Optimierungsprozess reduziert die Unsicherheit durch Variation sensibler Parameter (Redoxpotential, pH-Wert, Verdünnungs-/Konzentrationsfaktor und die Aluminium-, Eisen- und Magnesiumkonzentrationen) und minimiert die resultierende Gleichgewichtstemperaturverteilung. Dazu werden für jede Kombination der Parametervariationen die Gleichgewichtstemperaturen der Mineralphasen neu berechnet und in einer multidimensionalen Matrix gespeichert (vgl. Abbildung 2).

Gemäß der zugrundeliegenden Annahme des Gleichgewichtszustands im Reservoir, konvergieren die Nulldurchgänge der Sättigungsindices der Minerale und die Unsicherheit in der Temperaturverteilung wird minimal (Nitschke et al. 2017). Dieses globale Minimum in der Streuung der Temperaturabschätzung gibt In-situ-Werte der sensiblen Parameter an. Gleichzeitig stellt dieser minimierte Temperatur-Box-Plot die bestmögliche Reservoirtemperaturabschätzung dar.

Zur Validierung des MulT_predict Tools werden berechnete Temperaturabschätzungen mit gemessenen Bohrlochtemperaturen verglichen.

Abbildung 3 zeigt diese Evaluation für Geothermiestandorte im Oberrheingraben und auf Island. Sowohl die geothermischen Systeme (EGS vs. vulkanische Systeme) als auch die Reservoirbedingungen unterscheiden sich deutlich. Im Oberrheingraben werden granitische Reservoirre mit teilweise hohen Salinitäten erschlossen, während in Island basaltische Reservoirre zur Energieproduktion genutzt werden, die meteorisch (Krafla) bzw. von Meerwasser (Reykjanes) gespeist werden. Eine eindeutige Übereinstimmung zwischen den berechneten Temperaturvorhersagen und den gemessenen In-situ-Temperaturen ist ersichtlich (Abb. 3). Die Ergebnisse bestätigen den Nutzen des vorgestellten Tools, da die Unsicherheiten von Geothermometern, thematisiert beispielsweise in Nitschke et al. (2018), stark reduziert werden können. Ausgehend von einer Standardfluidanalyse kann die Reservoirtemperatur voll automatisiert und mit hoher Präzision berechnet werden. Die Reduktion der Ausgangsdaten begünstigt eine Nutzung in einer frühen Explorationsphase, da detaillierte Kenntnisse des Reservoirs nicht benötigt werden und vereinfacht darüber hinaus die Anwendbarkeit für den Nutzer. Eine ausführlichere Vorstellung des Tools findet sich in Ystroem et al. (2020). ♦

References

- Nitschke F, Held S, Villalon I, Neumann T, Kohl T (2017) Assessment of performance and parameter sensitivity of multicomponent geothermometry applied to a medium enthalpy geothermal system. *Geotherm Energy* 5:1. <https://doi.org/10.1186/s40517-017-0070-3>
- Nitschke F, Held S, Neumann T, Kohl T (2018) Geochemical characterization of the Villarrica geothermal system, Southern Chile, part II: Site-specific re-evaluation of SiO₂ and Na-K solute geothermometers. *Geothermics* 74:217–225. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.03.006>
- Parkhurst DL, Appelo CAJ (2013) Description of Input and Examples for PHREEQC Version 3—A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. U.S. Geological Survey Techniques and Methods: 497 p.
- Reed MH, Spycher N (1984) Calculation of pH and mineral equilibria in hydrothermal waters with application to geothermometry and studies of boiling and dilution. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48:1479–1492. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90404-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90404-6)
- Ystroem LH, Nitschke F, Held S, Kohl T (2020) A multicomponent geothermometer for high-temperature basalt settings. *Geotherm Energy* 8:13. <https://doi.org/10.1186/s40517-020-0158-z>



Ihr Erfolg ist unser Auftrag

Sondier- und Tiefbohrtechnik
Engineering & Consulting

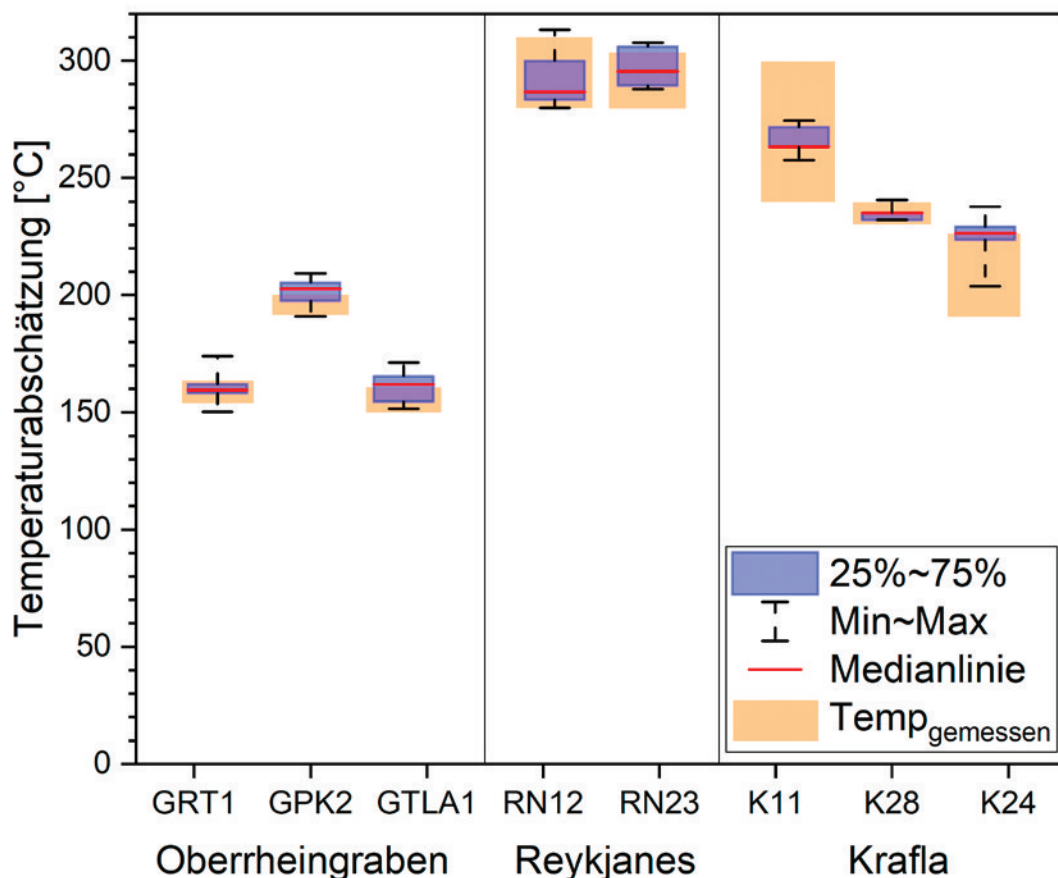
Kirchweg 24c
5417 Untersiggenthal
Schweiz

Tel: +41 (0)56 290 34 50
Fax: +41 (0)56 290 34 51
Mail: geowell@bluemail.ch



- **Neutrale bohrtechnische Beratungen**
- **Bohrkonzept- und Ausführungsplanungen**
- **Ausschreibungs- und Vertragswesen**
- **Bauleitung und Field Operating**
- **Projekt- und Qualitätsmanagement**
- **Fachgutachten und Analysen**

Ergebnisse der Geothermiestandorte



◀ Abb. 3: Vergleich berechneter Temperaturabschätzungen (Box-Plots) mit gemessenen In-situ-Temperaturen (orangene Kästchen) geothermaler Standorte. Oberreingraben: GRT1 (Rittershoffen), GPK2 (Soultz-sous-Forêts), GTLA1 (Landau in der Pfalz). Reykjanes (Island): RN12, RN23 und Krafla (Island): K11, K28, K24

optimum eventum

Das Ergebnis zählt! Kompetente Projektberatung und individuelle Lösungen. Wellheads, Ausrüstungen und Ersatzteile für Bohranlagen und für tiefe Geothermie-Bohrungen. Seit 1992!

The result is the key! Competent project consulting and individual solutions. Wellheads, equipment and spare parts for drilling rigs and deep geothermal drilling. Since 1992!

NORMEC®

**Oilfield Products
Sales and Services GmbH**

Bruchkampweg 14 · 29227 CELLE · Germany
Telefon +49 5141 90059-0
normec@normec.de · www.normec.de

