

PlaNeT SimTech

vom 29.11.2025

Team-ID: 5201

Fragestellung:

Der „Blautopf“ ist eine Karstquelle in Blaubeuren in der Nähe von Ulm. Normalerweise ist das Wasser hier kalt, aber aktuelle Messungen zeigen in der Tiefe eine zeitlich konstante Zunahme der Wassertemperatur. Vermutet werden vulkanische Aktivitäten. Vorhersagen deuten darauf hin, dass das Wasser im Blautopf in 10 Jahren kochen wird. Dies soll natürlich verhindert werden, da dies nicht nur das Ökosystem im Blautopf sondern auch im Fluss Blau und generell auch die ganze Region stark beeinflussen würde. Die Maßnahmen sollen außerdem möglichst kostengünstig und wirtschaftlich sein.

Wie kann dauerhaft verhindert werden, dass das Wasser im Blautopf den Siedepunkt erreicht?

I. Zusammenfassung

Um das Sieden des Wassers im Untergrund im Umfeld des Blautopfs zu vermeiden, wird die Energie, die die vulkanische Aktivität dem Wasser hinzuführt, in Form von heißem Wasser in Erdwärme-Kraftwerke abgeführt. Die Energie wird hier für Fernwärme und Stromerzeugung abgeführt. Anschließend wird das energieärmere, kältere Wasser wieder in den Untergrund geleitet. Die gewonnene Energie kann auch für ein neues Thermalbad eingesetzt werden, das als großer Energieverbraucher einen Anteil der abgeführten Energie nutzt und als positives Wahrzeichen der Region Alb-Donau-Kreis für den Einsatz von erneuerbaren Energien dient. Aus der prognostizierten, jährlichen Erwärmung des Blautopfs ergibt sich also eine geeignete Möglichkeit, unserer Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen entgegenzuwirken und lokale

II. Einführung

Spätzle und Maultaschen kochen in einem schwäbischen See? Was hier sehr absurd klingt, könnte in schon 10 Jahren Realität werden, denn wenn die Messungen stimmen, erwärmt sich eine Karstquelle in schon 10 Jahren auf Siedetemperatur.

Vulkanismus stellt einen Grundsatz unserer Erde da. Ob Island, Sizilien oder der Ring of Fire, dieses Phänomen ist stets eine Gefahr für Mensch und Umwelt. Nachdem am Ostrand der Schwäbischen Alb, am Blautopf, vulkanische Aktivitäten festgestellt wurden, stellt sich nun die Frage, wie man darauf reagiert. Es wird ein Anstieg der Temperatur des Wassers dieser sogenannten Karstquelle, die den Fluss Blau speist, von rund 90°C in 10 Jahren vorhergesehen [1]! Ziel muss es also im Folgenden sein, das Wasser vom Sieden abzuhalten, um eine Gefährdung des Ökosystems zu vermeiden. Aus diesem Grund stellen wir im Folgenden wichtige Lösungsvorschläge vor, die wir anschließend abwägen und diskutieren und die Relevanz und Umsetzbarkeit bewerten.

III. Hauptteil

1. Methode

1.1. Annahmen

Der Blautopf ist eine Karstquelle im Norden der Stadt Blaubeuren, die sich trichterförmig mit Radius $r = 40$ m und Tiefe $h = 22$ m erstreckt [2].

Um das Problem zu erfassen, nehmen wir an, dass vulkanische Aktivität keinesfalls einen kleinen Wirkungsbereich, sondern eher großflächig wirkt. Jedenfalls ist der Wirkungsbereich des Trichters (s.o.) viel zu klein. Alle Berechnungen stützen sich also auf die gesamte Ausbreitung der Blautopfhöhle.

Wir betrachten im Zusammenhang mit dem Blautopf also das gesamte Blauhöhlen-system, das nach [3, p. 444] ein Gesamtvolumen von $V_{Höhle} = 2 \cdot 10^6$ m³ aufweist. In guter Näherung beschreiben wir das Volumen des Blautopf-Trichters mit der quadratischen Funktion

$$f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \frac{21}{400} x^2$$

wobei $f(0) = 0$ den Tiefpunkt des Trichters, die beiden Werte $x = \pm 20$ in Höhe $y = 21$ die Ränder des Trichters darstellen. Alle Angaben erfolgen in Metern. Nun zeigen wir, dass die Rechnung alleine mit dem Blautopf-Trichter zu einem um mehrere Größenordnungen verschiedenen Ergebnis führt, und deshalb die Betrachtung des Höhlensystems notwendig ist.

Berechnet man nun das Rotationsvolumen dieses Trichters um die y -Achse, so lässt sich in guter Annäherung das Volumen des Trichters bestimmen. Dafür bilde man die Umkehrfunktion $f^{-1}(x)$, die im Intervall $[0, \infty)$ bijektiv und damit eindeutig ist. Durch elementare Termumformungen ergibt sich:

$$f^{-1}: \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \sqrt{\frac{400}{21} x}$$

Das Volumen des Rotationskörpers ist nun durch Rotation um die x -Achse bestimmen, wobei gilt (mit Einheit m³):

$$V = \pi \cdot \int_0^{21} \left(\sqrt{\frac{400}{21} x} \right)^2 dx = \pi \cdot \int_0^{21} \left(\frac{400}{21} x \right) dx = \frac{400}{21} \cdot \pi \cdot \left[\frac{1}{2} x^2 \right]_0^{21} \approx 13200$$

Das Gesamtvolumen des Trichters beträgt ca. $13,2 \cdot 10^3$ m³, also nur rund 0,7 % des Volumens in der Höhle. Die Betrachtung des Gesamtvolumens $V_{Höhle}$ ist also nötig unter der Annahme, dass sich der Vulkanismus großflächig erstreckt.

Die Temperatur wird im Folgenden als überall konstant angenommen, das gesamte Höhlensystem hat also überall dieselbe (zeitabhängige) Temperatur. Weiterhin wird durch den Temperaturanstieg eine Erhöhung des Druckes im Höhlensystem angenommen, sodass die Siedetemperatur von Wasser als $T > 100^\circ\text{C}$ postuliert wird.

1.2. Vorgehen

Nach den Annahmen gehen wir systematisch mit zwei Lösungsansätzen vor, deren Ergebnisse wir im Folgenden, speziell in Kapitel 2, betrachten. Da die Temperatur laut Fragestellung nicht sieden darf, nehmen wir einen unterirdischen Anstieg in bis zu 90°C in Kauf, um einen hohen wirtschaftlichen Nutzen aus der Erwärmung zu ziehen. Die zwei Lösungsansätze sehen wie folgt aus:

- a) Wegen des hohen langzeitlichen Anstieges der Temperatur sind kurzfristige Lösungen unwirtschaftlich und teuer, wir zielen also – auch insgesamt – auf einen langzeitlichen wirtschaftlichen Nutzen in Betracht. Dafür wählen wir ein rechteckiges Grundstück à $110\text{m} \cdot 70\text{m}$, auf dem ein geothermisches Organic-Rankine-Cycle-Kraftwerk (ORC) errichtet werden soll, was in der Nähe der nordwestlich von Blaubeuren verlaufenden Bundesstraße B28 und nahe dem Höhlenverlauf liegen soll. Im Idealfall bebauen wir hierfür Ackerland, da die Hürden hierfür unproblematisch sind, sofern der Landwirt das Grundstück anbietet. Die Funktionsweise dabei ist folgende: Wasser wird aus der Blautopfhöhle entnommen, um eine Turbine anzutreiben, die wiederum Strom erzeugt und die Temperatur reduziert.

Die Förderung des Wassers soll dabei quasi „von selbst“ passieren, wir pumpen also das Wasser nicht manuell hoch, sondern nutzen die Strömung, die auch die Schüttungen des Karstgebiets begünstigt.

- b) Der zweite Ansatz setzt sich zum Ziel, das Warmwasser auch touristisch zu nutzen. Hierfür errichten wir eine Therme, die auf circa $3,5 \pm 0,5$ ha Touristen aus der Region anziehen soll. Wir orientieren uns grob an der Franken-Therme in Bad Windsheim (Mittelfranken), die eine ähnliche Größe aufweist und die wir auch für alle weiteren Annahmen als exemplarisch verwenden. Zur Beheizung wird hierfür ebenfalls das Höhlenwasser verwendet, wobei man das ggf. mit Möglichkeit a) kombinieren kann. Ziel ist jedenfalls, eine möglichst hohe Tourismusförderung zu erzielen, um wirtschaftlich nicht ins Minus zu gehen, jedenfalls aber die Kosten zu senken. Das Wasser wird dabei mittels Wärmetauscher

2. Ergebnisse

- a) Die Stadt Blaubeuren misst die Temperatur des Blautopfs: Über das ganze Jahr verteilt ergibt sich eine durchschnittliche von 9°C [1]. Aufgrund der Annahme, dass die aktuelle Temperatur am Blautopf der aktuellen Temperatur des Wassers im Höhlensystem des Karstgebiets entspricht, ergibt sich für die jährlich steigende Temperatur die Formel $\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_{\text{Siedetepunkt}} - T_0}{10 \text{ Jahre}}$, wobei die Temperatur für den Siedepunkt des Wassers bei 100°C angenommen wird. Die Temperatur steigt also jährlich um $9,1^\circ\text{C}$. Um eine möglichst hohe Betriebstemperatur der Geothermie-Anlagen zu gewährleisten und gleichzeitig eine Pufferzone zum kritischen Zustand bei 100°C zu schaffen, wird eine Maximaltemperatur $T_{\text{max}} = 90^\circ\text{C}$ festgelegt. Bis zur Erwärmung auf 90°C wird keine Energie aus dem System entnommen. Nach $T_{\text{Jahr}} = 9,0^\circ\text{C} + \text{Jahr} \cdot 9,1^\circ\text{C}$ beträgt die maximale Bauzeit für das Kraftwerk 9 Jahre, da hier die festgelegte Maximaltemperatur leicht überschritten wird.

Mit $\text{Massenstrom} = 2280 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$, $c_{\text{Wasser}} = 4182 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ ergibt sich die thermische Gesamtleistung

$$P_{\text{thermisch}} = \text{Massenstrom} \cdot c_{\text{Wasser}} \cdot 9,1^\circ\text{C} \approx 86,77 \text{ MW}$$

Der elektrische Wirkungsgrad einer Organic-Rankine-Cycle-Anlage (ORC) [4] zur elektrischen Stromgewinnung liegt in etwa bei $\eta_{\text{elektrisch}} \approx 12\%$, der Wirkungsgrad zur Nutzung der übrigen thermischen Energie durch eine Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) [5] kann mit $\eta_{\text{thermisch}} \approx 60\%$ beschrieben werden. Daraus lassen sich die Leistungen [6] der beiden Kraftwerke [7] ermitteln.

- b) Bei einer durchschnittlichen jährlichen Betriebszeit von $\approx 8000 \text{ h}$ [8] ergeben sich die tatsächlichen jährlichen Strombeträge:

$$E_{\text{elektrisch,ORC}} = P_{\text{thermisch}} \cdot \eta_{\text{elektrisch}} \cdot 8000 \text{ h} \approx 83,28 \frac{\text{GWh}}{\text{a}}$$

$$E_{\text{thermisch,KWK}} = P_{\text{thermisch}} \cdot \eta_{\text{thermisch}} \cdot 8000 \text{ h} \approx 416,50 \frac{\text{GWh}}{\text{a}}$$

Durch die Abfuhr der gesamten vulkanisch-zugeführten Leistung in die Geothermiekraftwerke $P_{\text{Zufuhr}} - |P_{\text{Entzug}}| = P_{\text{Netto}} = 0$ wird das Wasser nicht weiter aufgeheizt, die Temperatur bleibt also stetig bei $T \approx 90^\circ\text{C}$.

Die Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahme lässt sich wie folgt ermitteln. Wegen der hohen Energieausbeute von allein $83,28 \frac{\text{GWh}}{\text{a}}$ könnte man damit viele Windkraftanlagen ersetzen. Die EnBW gibt für Deutschland eine Energieerzeugung von rund 118 TWh im Jahr 2023 an, was also $\approx 0,07\%$ der Jahresleistung aller Windkraftanlagen an Land im Jahr 2023 entspräche [9]. Trotz der hohen Baukosten wird eine Amortisierung der Investitionen durch die hohen gewonnen Energiebeträge angestrebt. Zusätzlich werden positive Synergieeffekte für den gesamten Wirtschaftsraum und im Alb-Donau-Kreis angestrebt. Für die tatsächliche Stromgeneration sind mehrere Kraftwerke nötig, da bei

herkömmlichen ORC-Anlagen eine maximale Leistung von $\approx 1,0 \text{ MW}$ erwartbar ist, müssten für die Ausgleichung der vulkanisch-entstehenden Energie bis zu elf Kraftwerke dieses Bautyps errichtet werden. Ein wirtschaftlicher Mittelweg würde sich in dem Bau von einzelnen ORC-Kraftwerken und einer verstärkten Nutzung der Geothermie für Industrie, Gewächshäuser und Heizen ergeben.

- c) Die Therme lässt sich mit einer Finanzierung von rund 18,6 Millionen Euro finanzieren [10], wobei der Umsatz nur rund 18 Monate dauern kann. Nimmt man die Zahlen des Zeitungsartikels, so ist mit rund 300.000 Besucherinnen und Besuchern jedes Jahr zu rechnen, wobei die Zahlen für 2023 einen Gewinn von mehr als 700.000 Euro offenbaren. Damit könnten die Baukosten in rund 27 Jahren hereingeholt werden. Wegen dem Wegfall der Heizkosten und ggf. einer nachhaltigen Installation von PV-Anlagen auf den Dächern lassen sich aber die Betriebskosten weiter drücken, was wiederum zu höheren Gewinnen und einer größeren Wirtschaftlichkeit führen kann. Die 27 Jahre sind also eine sehr konservative Schätzung und bilden den „worst case“.

Im Folgenden überblicken wir eine Kostenbetrachtung, die sich pro Jahr für die Heizung des Wassers ergeben und sich somit durch die Geothermie einsparen lassen.

$$V_{\text{Wasser}} = 2000 \text{ m}^3 = 2 \cdot 10^6 \text{ kg} \quad (\text{Dichte} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{l}})$$

Sei die Temperaturdifferenz die Erhitzung von 20°C auf 31°C (Durchschnitt), also $\Delta T = 11 \text{ K}$

Spezifische Wärmekapazität von Wasser: $c \approx 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

$$Q = 2 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 11 \text{ K} = 91.960.000 \text{ kJ}$$

$\frac{91.960.000 \text{ kJ}}{3.600} \approx 25.544 \text{ kWh} \approx 25.6 \text{ MWh}$ (Energiebedarf zur Erhitzung des Beckens)

Es wird weiterhin angenommen, dass 200 Tage im Jahr das Becken mit dieser Energie erhitzt wird.

$$\Rightarrow 25,544 \text{ MWh} \cdot 200 \text{ d} = 5.109 \text{ MWh (pro Jahr)}$$

Seien die Kosten für den Strom bei $0,46 \text{ €}$ pro kWh.

$$1000 \cdot 0,46 \text{ €} \cdot 5.109 \text{ kWh} = 2.350.140 \text{ €}$$

\Rightarrow Das Einsparungspotential läge also pro Jahr im Millionen-Euro-Bereich, die an Gewinn entstehen können.

3. Diskussion

Der Versuch einer Kühlung erschien aus unserer Sicht sehr ineffizient, da wir dafür enorme Mengen an Energie benötigen und das sehr hohe Kosten verursachen würde. Die Baumaßnahmen, die von uns vorgeschlagen werden, scheinen unter den Annahmen als teilweise plausibel zu gelten. Es gibt aber viele unklare Punkte.

Es ist kein Grundstück für die von uns genannten Zwecke vorhergesehen; die Baubranche ist aktuell sehr ausgelastet, was zu einer Verzögerung und zu erhöhten Preisen führen kann. Kann man für so einen Extremfall Grundstücke enteignen, unter welchen Umständen kann ein Kauf erfolgen? Diese Fragen sind sowohl bei Therme als auch bei den ORCs offen. Die Baukosten sind für die ORCs nicht berechenbar, wobei man sich die Frage stellen kann, ob der Bund als Finanzgeber für dieses Projekt einspringt, oder die Kommune/das Land BW die Kosten alleine tragen muss. Die Prämisse für die Lösungsvorschläge, dass das Wasser auf einer Temperatur von $T = 90^{\circ}\text{C}$ ist sicherlich ebenfalls kritikwürdig, da sowohl unterirdisch als auch beim Abfluss in der Blau unerwartete ökologische Nebeneffekte auftreten können.

Neben diesen wirtschaftlichen Effekten sind Umweltverbände und Bürgerbegehren ein Aspekt, der in solchen großen Bauvorhaben bedacht werden sollte. Gerade beim Bebauen der Natur, oder einer Therme mit mehreren Hunderttausend Touristen sind Bürgerinitiativen vorhersehbar. Es wird also auch eine Herausforderung sein, alle Anwohnenden von der Notwendigkeit der Maßnahme zu überzeugen, um eine zeitgerechte Errichtung der Kraftwerke und der Therme zu ermöglichen.

IV. Schlussfolgerung

Wir können festhalten, dass unsere Annahmen nachvollziehbar, aber nicht definitiv sind. Unter unseren gewählten Annahmen lassen sich die Bauprojekte bedingt umsetzen, dennoch ist es fragwürdig, ob man in der geforderten Zeit alle Maßnahmen umsetzen kann, oder ob nicht doch noch temporäre Kühlungen nötig wären. Da uns die Idee im Rahmen der Nachhaltigkeit und Sicherheit der Umwelt aber sehr überzeugt, halten wir den Ansatz für erstrebenswert, zumindest, solange es keine brauchbaren Alternativen gibt. Die konkrete Realisierung sollte von Fachkreisen aus Umwelt, Politik, Wissenschaft und Technik begleitet werden, um eine erfolgreiche Umsetzung zu ermöglichen.

Die Therme halten wir trotz der begrenzten Wirkung im Aspekt der Fragestellung als nützlich, um den Tourismus zu fördern. Die ORCs sind eine adäquate Möglichkeit, die Wärmeausbreitung einzudämmen, wobei zukünftige Erwärmungen jenseits eines konstanten Anstieges vernachlässigt werden.

V. Literaturverzeichnis

- [1] [Online]. Available: <https://www.blaubeuren.de/Geopoint-Blautopf>. [Zugriff am 29 November 2025].
- [2] „Wikipedia,“ [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Blautopf>. [Zugriff am 29 November 2025].
- [3] „Spatially resolved information on karst conduit flow from in-cave dye tracing,“ *Hydrology and Earth System Sciences*, Nr. 18, pp. 435-445, 2014.
- [4] [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Organic_Rankine_Cycle. [Zugriff am 28 11 2025].
- [5] [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Kraft-Wärme-Kopplung>. [Zugriff am 29 11 2025].
- [6] [Online]. Available: <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie//leistung-themische>. [Zugriff am 29 11 2025].
- [7] [Online]. Available: <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie//leistung-themische>. [Zugriff am 29 11 2025].
- [8] [Online]. Available: <https://www.topagrar.com/energie/aus-dem-heft/aus-abwaerme-wird-strom-9657182.html>. [Zugriff am 29 11 2025].
- [9] [Online]. Available: <https://www.enbw.com/unternehmen/themen/windkraft/windkraftanlagen.html>. [Zugriff am 29 November 2025].
- [10] gb, 16 Dezember 2010. [Online]. Available: <https://www.nordbayern.de/franken/bad-windsheim/franken-therme-schreibt-erfolgsgeschichte-1.385427>. [Zugriff am 29 November 2025].
- [11] [Online]. Available: <https://www.northdata.de/Franken%20Therme%20Bad%20Windsheim%20GmbH,%20Bad%20Windsheim/Amtsgericht%20Fürth%20HRB%209935>. [Zugriff am 29 November 2025].
- [12] [Online]. Available: <https://www.blaubeuren.de/Geopoint-Blautopf>. [Zugriff am 29. November 2025].