



Offene hydrothermische Tunnelsysteme – Untersuchungen zu Möglichkeiten der Optimierung

Georg Kaml¹, Thomas Marcher¹, Thomas Geisler¹

¹ Technische Universität Graz, Institut für Felsmechanik und Tunnelbau, 8010, Graz, AT
kaml@tugraz.at

Kurzfassung:

Die Nutzung von Tunnelbauwerken zur Wärmebereitstellung gewinnt angesichts des Klimawandels an Bedeutung. Im folgenden Beitrag werden Optimierungsstrategien für offene geothermische Tunnelsysteme diskutiert, welche die thermische Energie der Drainagewässer direkt nutzen. Maßnahmen wie die Separierung von kälteren Teilströmen und die Installation von Absorbern können die thermische Leistung erheblich steigern. Langfristig könnten neben der Implementierung solcher Systeme in Neubautunnel vor allem Bestands-Tunnel zu einer wertvollen Ressource für eine nachhaltige Energiewirtschaft werden.

1 Einleitung

Eine Diversifizierung im Energiesektor hat neben dem Klimawandel auch durch geopolitische Krisen zunehmend an politischer sowie gesellschaftlicher Bedeutung gewonnen. In diesem Zusammenhang rückt die Geothermie verstärkt in das Bewusstsein der Öffentlichkeit. Diese Art der Energiegewinnung bietet ein breites Spektrum an Möglichkeiten. So werden zunehmend geothermische Anlagen in Tunnelbauprojekten implementiert [1], geplant und weiterentwickelt [2]. Bei der geothermischen Nutzung von Tunneln werden zwei Verfahren unterschieden: geschlossene und offene Systeme. Geschlossene Systeme führen ein Wärmeträgerfluid im Kreislauf, welches sich beim Durchströmen erwärmt. Unter Nutzung von Wärmepumpen wird die dadurch gewonnene Energie mit dem Abnehmer ausgetauscht. Geschlossene Absorbersysteme im Tunnelbau können durch aktivierte Bauteile in die Tunnelstruktur implementiert werden, beispielsweise durch Energietübbinge [1][3]. Offene hydrothermale Systeme hingegen nutzen die thermische Energie der Drainagewässer direkt [4][5]. Offene hydrothermische Anlagen nutzen das durch den natürlichen Wärmestrom aus dem Erdinneren erwärmte Drainagewasser, welches mit der Umgebungstemperatur in der Regel im Equilibrium liegt. Der weltweit durchschnittliche geothermische Gradient liegt bei rund 3°C pro 100 m Tiefe. Es ist jedoch zu beachten, dass dieser Temperaturverlauf nicht konstant ist, sondern lokale Variationen aufweist, die wiederum die Temperaturen des Bergwassers beeinflussen [6]. Prinzipiell lässt sich die thermische Leistung eines offenen hydrothermischen Systems durch Formel 1 beschreiben. Durch den linearen Zusammenhang der Schüttungsmenge (D_{total}) [m³/sec] und Temperatur [°C] ist erkennbar, dass je höher die Schüttungsmenge und die Temperatur desto größer die Leistung (P_{TW}) [W].

$$P_{TW} = c \times \rho_{Water} \times D_{total} \times \Delta T_{TW} \quad (1)$$

| | |
|-----------------|--|
| P_{TW} | Thermische Leistung [MW] |
| c | Wärmekapazität [J/kg K] |
| ρ_{Water} | Dichte des Fluids [kg/m ³] |
| D_{total} | Volumenstrom [m ³ /s] |
| ΔT_{TW} | Differenztemperatur [°C] |

Parameter wie die Wärmekapazität [J/kg/K] (c) und die Dichte des Tunnelwassers (ρ_{Water}) sind temperaturabhängige, dynamische Größen, welche die thermische Leistung beeinflussen. Während diese Parameter nur schwer beeinflussbar sind, sind Parameter wie die Temperaturspreizung ($\Delta T_{TW} = T_{TW} - T_0$) und Schüttungsmenge (D_{total}) veränderbar. Da das Herbeiführen von höheren Tunnelwasserzutrittsmengen große

Konsequenzen mit sich bringt (Veränderung des Bergwasserspiegels, Umweltverträglichkeit und Tunnelvortrieb), beziehen sich die folgenden Optimierungsvarianten in erster Linie auf eine Steigerung der Temperaturspreizung des Tunnelwassers.

2 Analyse der Teilströme

Eine Optimierungsstrategie besteht darin, den Gesamtabfluss, der sich aus verschiedenen Tunnelwasserzutritten zusammensetzt, hinsichtlich deren Temperatur zu optimieren. Jeder dieser Tunnelwasserzutritte weist unterschiedliche Temperaturniveaus auf, die durch die Verweilzeit im Gebirge und die Überlagerung beeinflusst werden. Insbesondere in Bereichen mit geringer Überlagerung kann die Temperatur dieser Tunnelwasserzutritte niedrig sein. Je nach Schüttung der einzelnen Tunnelwasserzutritte beeinflussen diese den Gesamtabfluss hinsichtlich der Temperatur entsprechend ihrer Schüttung. Eine Optimierungsstrategie könnte darin bestehen, die kälteren Tunnelwasserzutritte separat abzuleiten, um die Temperatur des Gesamtabflusses zu erhöhen. Die Überprüfung dieser Maßnahme an konkreten Beispieldaten [7] hat jedoch gezeigt, dass der Temperaturgewinn den Verlust an Abflussmenge nur in einzelnen Jahreszeiten ausgleichen kann und daher über das Jahr gemittelt nur bedingt zielführend ist [8]. Es ist allerdings anzumerken, dass diese Maßnahme unter anderen hydrogeologischen Bedingungen ein probates Mittel zur Leistungssteigerung sein kann.

3 Implementierung von Absorbern

Eine weitere Möglichkeit zur Leistungssteigerung offener hydrothermaler Systeme ist die Kombination mit Absorbern, die darauf abzielen, die Temperatur einzelner Tunnelwasserzutritte zu erhöhen, bevor diese in die Gesamtdrainage gelangen. Insbesondere Zuflüsse mit hoher Schüttung, aber niedriger Temperatur haben einen signifikanten Einfluss auf die Gesamttemperatur des Drainagewassers. Durch die Führung dieser kalten Tunnelwasserzutritte durch Absorberrohre, die in die Tunnelinnenschale eingebettet oder auf der Tunnelinnenschale montiert sind, wird der Energieaustausch zwischen dem Fluid, dem umgebenden Gestein und der Tunnelluft verbessert, was zu einer Erhöhung der Fluidtemperatur führt. Ein wesentliches Merkmal dieses Systems ist, dass die Absorberrohre nur durch die hydraulische Druckdifferenz durchströmt werden und somit keine zusätzliche Pumpenleistung erforderlich ist. Am Institut für Felsmechanik und Tunnelbau wurden numerische Berechnungen durchgeführt, um die Effizienz und Zweckmäßigkeit dieses Konzeptes zu

beurteilen [7][9]. Diese numerischen Berechnungen zeigen, dass die Temperatur des durch den Absorber geleiteten Tunnelwasserzutritts signifikant erhöht werden kann, insbesondere durch Absorberrohre, die in die Tunnelinnenschale eingebettet sind. Aufgrund der Temperaturerhöhung vergrößert sich auch die Temperaturspreizung, was zu einer deutlichen Steigerung der thermischen Leistung des Gesamtsystems führt. Zudem wurde eine langfristige Simulation des Wärmeentzugs angestellt, siehe Abb. 1. Dabei zeigte sich, dass trotz eines Leistungsabfalls über 50 Jahre die thermische Leistung deutlich im Vergleich zu Systemen ohne Absorber höher bleibt. Unter Verwendung der Formel 1 errechnet sich die thermische Leistung ohne Absorbersystem bei einem Volumenstrom von angenommenen 15 Litern pro Sekunde auf etwa 0,138 Megawatt, bei einer Austrittstemperatur von 12,2°C. Im Gegensatz dazu bleibt die thermische Leistung mit einem Absorbersystem auch nach 50 Jahren, unter Berücksichtigung des Wärmeentzugs aus dem Gebirge, bei einer Austrittstemperatur von 16,83°C bei rund 0,429 Megawatt und ist damit circa dreimal so hoch. Diese Berechnungen basieren auf der Annahme, dass das Drainagewasser auf maximal 10°C abgekühlt werden darf. Die optimierte Temperaturerhöhung ermöglicht es, die Gesamtmischtemperatur zu steigern und somit die verfügbare geothermische Leistung des gesamten Abflusses zu erhöhen.

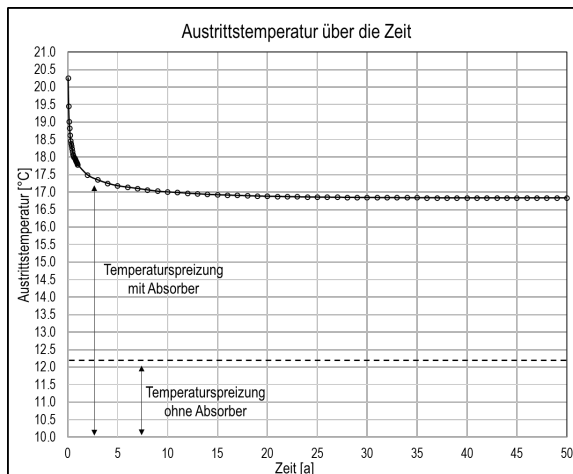


Abb. 1: Vergleich der Temperaturspreizung mit und ohne Absorber-System, verändert nach Geisler, 2024 [9]

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellte Optimierungsstrategie für offene Geothermiesysteme im Tunnelbau mit Absorbern beinhaltet einige offene Punkte. So fungieren die an der Tunnelinnenschale befestigten Absorberrohre als zusätzliche Brandlast. Leitungen aus Metallen wie Edelstahl oder Kupfer sind davon ausgenommen. Diese verursachen wiederum höhere Kosten, besitzen aber auch eine höhere Wärmeleitfähigkeit, was sich positiv auf die Leistungssteigerung auswirkt. Generell ist die Art der Befestigung ein wichtiges Thema, um die Balance zwischen Wirtschaftlichkeit, Effizienz und Sicherheit zu gewährleisten. Darüber hinaus müssen diese Systeme möglichst wartungsarm sein, um den Tunnelbetrieb nicht zu behindern und mögliche Sperrungen zu vermeiden. Eine Unterteilung des Absorbersystems in einzelne Segmente wäre hier hilfreich, so dass bei einem Störfall nicht die gesamte Anlage zum Stillstand kommt, sondern nur einzelne Segmente (ähnlich einer Reihenschaltung). In diesem Zusammenhang ist auch zu erwähnen, dass Bergwässer aufgrund ihrer Genese und in Abhängigkeit ihrer Verweilzeit im Gebirge, die von der Lithologie und der Trennflächenstruktur (Störungen) abhängt, einen hohen Anteil an gelösten Mineralien enthalten können. Da bei offenen Systemen das in den Drainagen gefasste Bergwasser direkt genutzt wird, ist darauf zu achten, dass es in

den Absorberleitungen zu einer reduzierten Ausfällung von Mineralien kommt. Die hydrochemischen Prozesse innerhalb der Absorber sind somit zu berücksichtigen, was Analysen des Absorberrohrmaterials sowie der Tunneldrainagewässer erfordert.

Die vorgestellten Optimierungsmethoden für die geothermische Energiegewinnung durch Tunnelbauwerke, insbesondere mittels Einsatzes von Absorbern, basieren auf numerischen Modellierungen und erfordern eine empirische Validierung durch Laborversuche und groß angelegte Feldtests [7]. Zur Auswahl des effizientesten Systems sind umfangreiche Sensitivitäts- und Parameterstudien notwendig. Die Betrachtung saisonaler Effekte der Tunnelwasserzutrittstemperaturen könnte zur Effizienzsteigerung beitragen, indem unterschiedliche Betriebsabläufe und Methoden zur Speicherung überschüssiger Energie im Gebirge für spätere Extraktion untersucht werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass offene hydrothermische Systeme weiteren Forschungsbedarf aufweisen. Die vorgestellten Strategien sind zielführend, um die Systemleistung zu erhöhen. Die in Abb. 1 gezeigte erhöhte Temperaturspreizung ermöglicht eine Wärmebereitstellung für mehrere hundert Haushalte. Generell verspricht die umfassende Erschließung dieser Technologie erhebliche Leistungssteigerungen und unterstützt das Ziel einer nachhaltigen und grundlastfähigen Energiequelle, die unabhängig von geopolitischen Krisen und deren Folgen ist [8].

Literaturverzeichnis

- [1] Barla, M., Di Donna, A., 2017. A prefabricated modular energy segment, a tunnel lining made with a plurality of such segments and a method for exchanging heat in a tunnel by making a lining with a plurality of such segments: E21D 11/08.
- [2] Buhmann, P., 2019. Energetisches Potential geschlossener Tunnelgeothermiesysteme. Dissertation. Stuttgart.
- [3] Frodl, S., Franzius, J.N., Bartl, T., 2010. Design and construction of the tunnel geothermal system in Jenbach. *Geomechanics and Tunneling* 3, 658–668. <https://doi.org/10.1002/geot.201000037>.
- [4] Rybach, L., Wilhelm, J., Gorhan, H., 2003. Geothermal use of tunnel waters - a Swiss speciality.
- [5] Stemmler, R., Menberg, K., Rybach, L., Blum, P., 2022. Tunnelgeothermie – Ein Überblick. *Geomechanics and Tunneling* 15, 104–111. <https://doi.org/10.1002/geot.202100084>.
- [6] Rybach, L., 1995. Thermal waters in deep Alpine tunnels. *Geothermics*, Volume 24, Issues 5–6, 631–637. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(95\)00029-1](https://doi.org/10.1016/0375-6505(95)00029-1).
- [7] Geisler, T., 2024. Assessment of geothermal power in tunnels using open hydrothermal systems and engineering optimization options. Dissertation. Graz.
- [8] Geisler, Thomas & Wolf, M. & Goetzl, et al., 2022. Optimizing the geothermal potential of tunnel water by separating colder sectional discharges - Case study Brenner Base Tunnel. *Renewable Energy*. 203. 10.1016/j.renene.2022.12.069.
- [9] Geisler, T., Richter, W. & Marcher, T., Mar 2024. Enhancing the performance of open geothermal tunnelwater systems by heat absorbers. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 145, 105591.