

Tunnel als geothermische Quelle und Senke

Bericht aus dem Fasanenhoftunnel in Stuttgart

Es ist nur ein geringer technischer Aufwand nötig, um Tunnelbauwerke als geothermische Quelle oder Senke für Heiz- und Kühlzwecke zu nutzen. Diese Idee wurde im Rahmen von Messungen im Fasanenhoftunnel in Stuttgart umgesetzt. Dabei wurden zwei jeweils etwa zehn Meter lange Tunnelabschnitte mit Absorberrohren ausgestattet und mit einer Wärmepumpe gekoppelt. Der Tunnel wurde mit einer Vielzahl an Messsensoren ausgerüstet. Die Messungen wurden zwischen 2011 und 2017 durchgeführt. Als Ergebnis lässt sich insgesamt feststellen, dass die Geothermienutzung in Tunneln in Zukunft eine zunehmende Rolle spielen kann.



Anders Berg, M.Sc.,
Wissenschaftlicher
Mitarbeiter,
Institut für Gebäude-
energetik (IGE),
Universität Stuttgart



Prof. Dr.-Ing.
Konstantinos
Stergiaropoulos,
Institutsleiter,
Institut für Gebäude-
energetik (IGE),
Universität Stuttgart

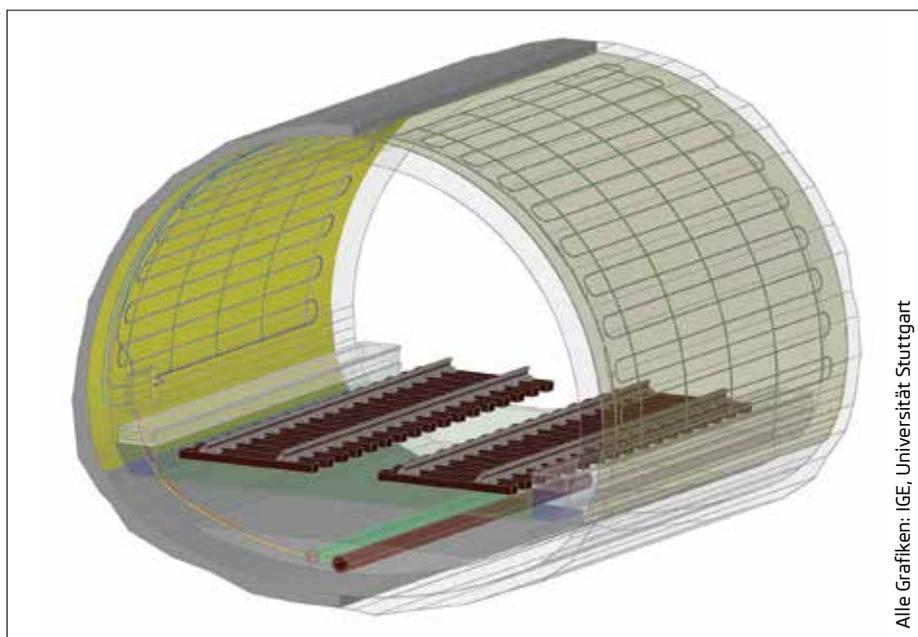
Hintergrund

Die deutsche Bundesregierung strebt an, dass der Gebäudebestand bis zum Jahr 2050 nahezu klimaneutral wird. Da in Deutschland etwa 40 Prozent des Endenergieverbrauchs

auf den Gebäudebestand entfallen, bildet die Bereitstellung von Wärme und Kälte aus erneuerbaren Energieträgern einen wesentlichen Baustein der Energiewende. Für das Heizen und Kühlen von Gebäuden kann als

erneuerbare Energie die oberflächennahe Geothermie (Bezeichnung für Geothermie bis zu einer Tiefe von maximal 400 m) in Kombination mit einer Wärmepumpe genutzt werden. Die Absatzzahlen für erdgekoppelte Wärmepumpen in Deutschland stagnieren jedoch in den vergangenen Jahren [1]. Die Gründe hierfür sind unter anderem die hohen Investitionskosten für Geothermiebohrungen und die derzeit niedrigen Energiekosten für fossile Brennstoffe. Es ist daher das Ziel, die Investitionskosten zu reduzieren, um die Wirtschaftlichkeit der Methode weiter zu steigern. Die geothermische Aktivierung von Bauteilen des Spezialtief- und Tunnelbaus reduzieren die Investitionskosten für die Integration des Wärmeübertragers im Erdreich und bieten durch den hohen Grad an erdberührter Fläche im Falle von Bahn- oder Straßentunneln eine wirtschaftlich interessante Alternative zu klassischen Erdwärmesonden. Im Falle eines thermisch aktivierten Tunnels werden die Wärmeübertrager (Tunnelabsorber) üblicherweise in der Tunnelenschale integriert (Abbildung 1).

Ein bedeutender Unterschied im Vergleich mit anderen Geostrukturen wie Energiepfählen ist, dass die Wärme nicht nur aus dem Erdreich, sondern auch aus der Tunnelluft extrahiert wird. Daher spielt die Lufttemperatur im Tunnel bei einem Tunnelabsorber eine zentrale Rolle für die entzogene Wärme- und Kälteleistung. Um das Verhalten der Tunnelabsorber bewerten zu können, ist des Weiteren eine fundierte Kenntnis über die thermischen Eigenschaften des Tunnels essenziell. Wie verändert sich die Tunnellufttemperatur im Jahresverlauf und wie unterscheidet sich die Tunnelluft von der Außenluft als geothermische Wärmequelle und -senke? Wie verhält sich die Luftströmung



Alle Grafiken: IGE, Universität Stuttgart

Abbildung 1: Beispiel für die thermische Aktivierung eines Tunnels



Foto: Stuttgarter Straßenbahnen AG

Abbildung 2: Tunnelsektion mit Tunnelabsorber vor der Betonierung

in Tunnelbauwerken unterschiedlicher Bauart und wie wirkt sich die Durchströmung des Tunnels auf den Energieentzug aus? Wie wird die Temperatur im Baugrund und der Tunnelumgebung durch den Betrieb der Tunnelabsorber beeinflusst? Um diese Fragen zu beantworten, wurde eine Versuchsanlage für Tunnelgeothermie im Fasanenhofunnel in Stuttgart errichtet.

Versuchsanlage im Fasanenhofunnel

Deutschlands erste Versuchsanlage für Tunnelgeothermie wurde 2011 im Fasanenhofunnel in Stuttgart installiert. Die Messungen wurden zwischen 2011 und 2017 durchgeführt. Der Tunnel hat eine Länge von etwa 380 m, eine Höhe von 9,2 m und eine Breite von 7,2 m. Er enthält zwei parallel verlegte Zuggleise für den Verkehr in beide Richtungen. Zwei 10 m lange Betonierabschnitte der Tunnelinnenschale, Block 73 (B73) und Block 82 (B82), wurden mit Absorberleitungen ausgerüstet und übernehmen die Funktion eines Wärmeübertragers. Der Abstand zwischen B73 und dem westlichen Portal des Tunnels beträgt 65 m. Der Abstand zwischen B73 und B82 beträgt etwa 80 m, wobei diese in Schichten von Sandstein und Schiefer eingebettet sind. Eine Wärmeträgerflüssigkeit bestehend aus einem Wasser-Mono-Ethylenglykol-Gemisch wird verwendet, um die Wärme in den Leitungen zu transportieren. Polyethylenrohre mit einer Länge von 800 m und einer Gesamtläche von $A_{\text{Abs}} = 360 \text{ m}^2$ werden entlang der zwei Tunnelverkleidungssektionen aufgeteilt und bilden dadurch die zwei Absorberblöcke (Tunnelabsorber). Die jeweilige Wärmeüber-

tragungsfläche beträgt 180 m^2 , bei einer Rohrlänge von 400 m. Abbildung 2 zeigt, wie die Rohre der Tunnelabsorber vor der Betonierung an der Tunnelverkleidung positioniert wurden. In einem vom ersten Absorberblock (B73) 90 m entfernten Betriebsraum befinden sich eine Steuerungseinheit und die Messdatenerfassung.

Die Absorberblöcke wurden mit folgender Messtechnik ausgestattet: Drei Temperaturmesslanzen mit einer Länge von je 5 m im Anströmbereich und 10 m auf der Abströmseite des Grundwassers wurden im Baugrund integriert. Die Messlanzen bestehen aus Hüllrohren, die im Ringspalt zum Gebirge mit thermoaktivem Zement-Bentonit-Gemisch befüllt sind. In den Hüllrohren sind Thermis-

torenketten mit acht bis zwölf Sensoren und Abständen zwischen 50 und 150 cm eingebaut. Die Betontemperatur der Innenschale wurde an vier unterschiedlichen Positionen mit jeweils sechs Thermoelementen in unterschiedlichen Tiefen und die Lufttemperatur an vier Stellen pro Energieblock gemessen. Darüber hinaus wurde an jedem Block je ein Windgeschwindigkeitsmesser installiert.

Die Verwendung des Erdreichs als Wärmequelle und -senke ist durch die wasserrechtliche Genehmigung limitiert. Im Falle der tunnelgeothermischen Teststrecke im Fasanenhofunnel hat die genehmigende Behörde Vorschriften erlassen [2]. Die tunnelgeothermische Teststrecke ist so zu betreiben, dass bei Wärmeentzug die Grundwassertemperatur in der Nähe des Wärmeübertragers $0 \text{ }^\circ\text{C}$ nicht unterschreitet und die Abkühlung in 50 m Abstand vom Wärmeübertragerfeld maximal 2 K beträgt. Bei Wärmeinleitung darf die Grundwassertemperatur in der Nähe des Wärmeübertragers $25 \text{ }^\circ\text{C}$ nicht überschreiten und die Erwärmung in 50 m Abstand vom Wärmeübertragerfeld darf maximal 2 K betragen.

Temperaturverlauf im Tunnel

In Abbildung 3 wird der Verlauf der Außenlufttemperatur (T_{Au}) und der ermittelten Tunnellufttemperatur an B73 ($T_{\text{Tun,B73}}$) und B82 ($T_{\text{Tun,B82}}$) für die Jahre 2015 und 2016 dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass die Differenz zwischen maximaler und minimaler Außenlufttemperatur größer ist als die maximale Differenz der Tunnellufttemperatur. Außerdem zeigt sich, dass die täglichen Amplitudenschwankungen für die Außenlufttemperatur im Vergleich zur Tunnellufttemperatur größer sind. Die Amplitude

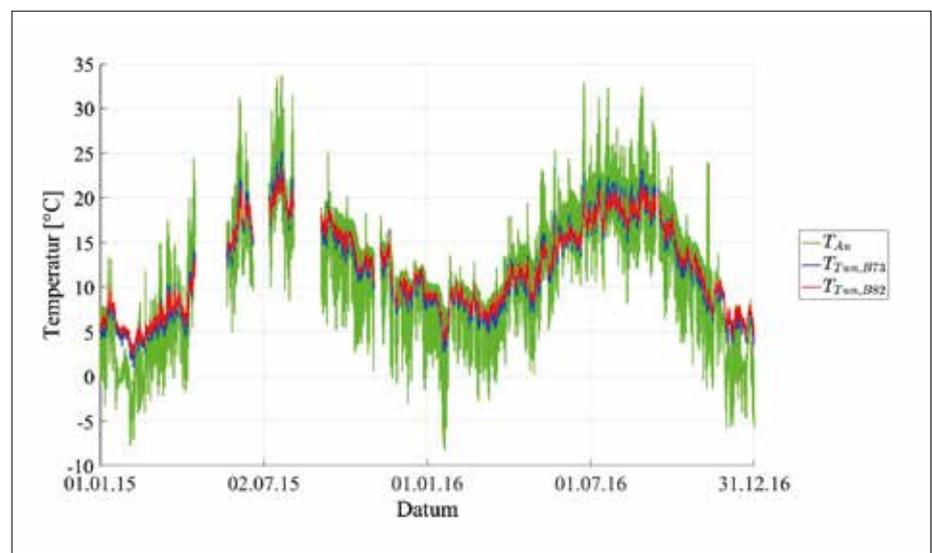


Abbildung 3: Temperaturverlauf der Tunnel- und Außenluft für 2015 und 2016

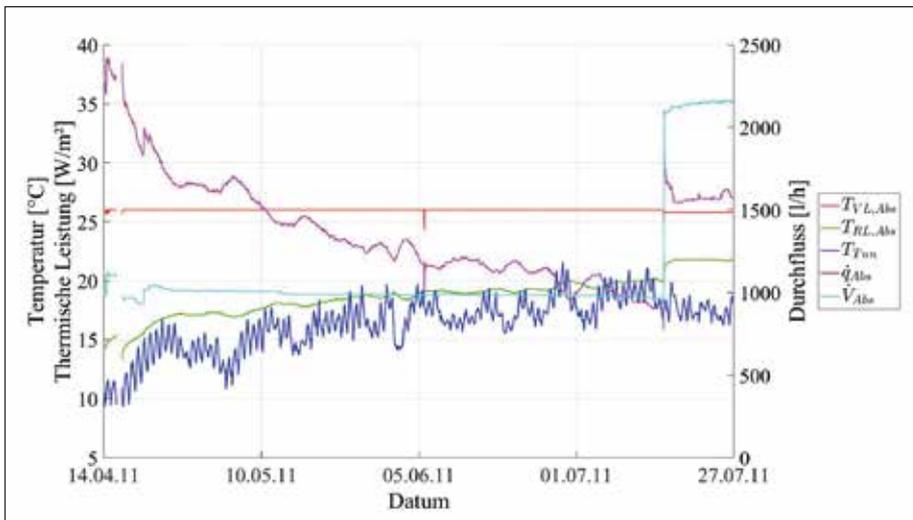


Abbildung 4: Temperatur- und Leistungsverlauf des Kühlversuchs

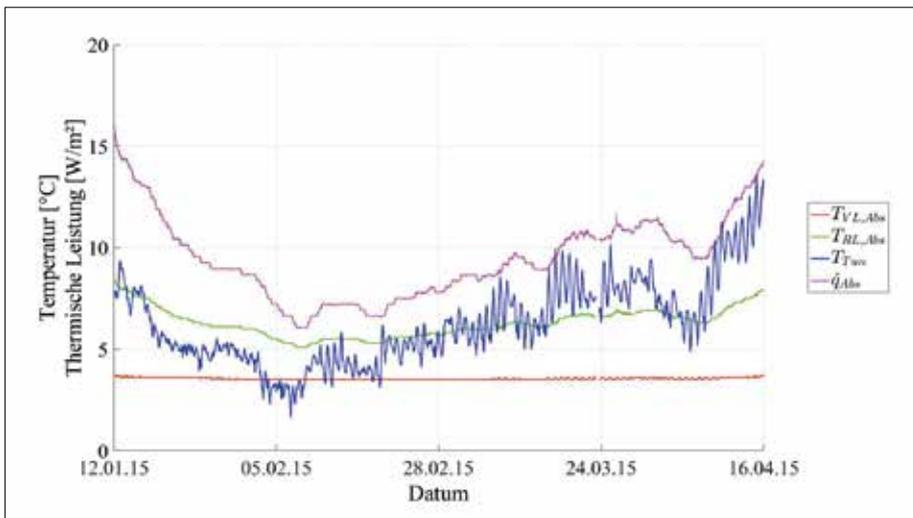


Abbildung 5: Temperatur- und Leistungsverlauf des Heizversuchs

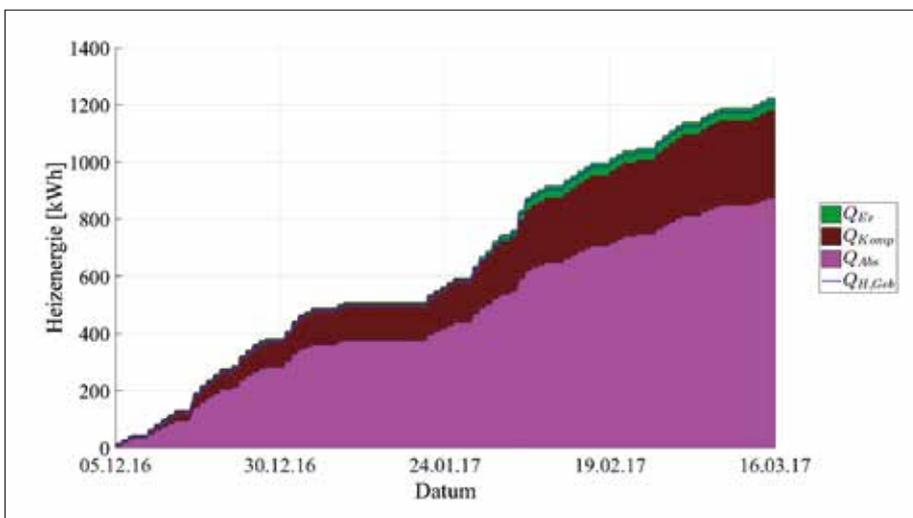


Abbildung 6: Akkumulierter Heizenergiebedarf und bereitgestellte Heizenergie der Absorber, des Kompressors und des Erwärmers

der täglichen mittleren Temperatur beträgt bei der Tunnelluft etwa nur ein Viertel im Vergleich zur Außenluft. Zwischen den Absorberblöcken B82 und B73 sind ebenfalls Unterschiede bei den Tunnellufttemperaturen ersichtlich. Die Tunnellufttemperatur im Bereich von B82 variiert in geringerem Ausmaß als die Tunnellufttemperatur in B73. Je kürzer der Tunnel ist, desto größer sind die Temperaturschwankungen der Tunnelluft. Bei sehr kurzen Tunneln nähert sich die Tunnellufttemperatur immer mehr der Außenlufttemperatur an, mit zunehmender Länge sinken die Temperaturdifferenzen der Tunnelluft. Es ist daher sinnvoll, das geothermische Potenzial von möglichst langen Tunneln zu nutzen, um eine konstante Tunnellufttemperatur verwenden zu können, da diese eine gute Energiequelle darstellt.

Kühl- und Heizversuch im Dauerbetrieb

Mittels Langzeitlastprofilen wurde die mittlere Entzugsleistung der Tunnelabsorber für Heizen und Kühlen ermittelt. Die Anlage wurde dabei dauerhaft betrieben und über die Regelungsgrößen Vorlauftemperatur und Durchfluss der Wärmeträgerflüssigkeit gesteuert.

Um die mittlere Entzugsleistung der Tunnelabsorber für das Kühlen bestimmen zu können, wurde die Vorlauftemperatur der Absorber konstant bei etwa $T_{VL,Abs} = 25,5\text{ °C}$ gehalten. Der Gesamtdurchfluss für die zentrale Umwälzpumpe beträgt zunächst etwa $\dot{V}_{Abs} = 1.000\text{ l/h}$ und wird nachfolgend auf $\dot{V}_{Abs} = 2.200\text{ l/h}$ erhöht. Abbildung 4 zeigt den Verlauf der Vor- und Rücklauftemperatur der Absorber ($T_{VL,Abs}$ und $T_{RL,Abs}$), die gemessene mittlere Tunnellufttemperatur T_{Tun} die Wärmestromdichte der Absorber, \dot{q}_{Abs} und den Gesamtdurchfluss der Absorber \dot{V}_{Abs} .

Am Anfang ist eine schnelle Leistungsabnahme zu erkennen. Die Wärmestromdichte der Absorber beträgt zu Beginn der Phase nahezu $\dot{q}_{Abs} = 40\text{ W/m}^2_{Abs}$. Die schnelle Leistungsminderung lässt sich dadurch erklären, dass das Erdreich vor der Aktivierung noch nicht abgekühlt ist und dass im Erdreich gespeicherte Kälteenergie vorhanden ist. Es ist erkennbar, dass eine Abhängigkeit zwischen der Leistung und der Temperatur im Tunnel besteht. Nach der Erhöhung des Durchflusses steigt die thermische Leistung wiederum an und beträgt etwa $\dot{q}_{Abs} = 27\text{ W/m}^2_{Abs}$. Die mittlere thermische Leistung beträgt $\dot{q}_{Abs} = 24\text{ W/m}^2_{Abs}$ für den Kühlversuch im Dauerbetrieb.

Die Ergebnisse des Heizversuchs im Dauerbetrieb mit einer Vorlauftemperatur von $T_{VL,Abs} = 3,0\text{ °C}$ werden in Abbildung 5 dargestellt. Der gemessene Gesamtdurchfluss



der Absorber beträgt während dieser Phase etwa $\dot{V}_{\text{Abs}} = 940 \text{ l/h}$. Es lässt sich wiederum der Zusammenhang zwischen Außenluft-, Tunnellufttemperatur und entzogener Leistung erkennen. Die mittlere flächenbezogene Entzugsheizleistung beträgt etwa $\dot{q}_{\text{Abs}} = 9,4 \text{ W/m}^2_{\text{Abs}}$. Die niedrigere flächenbezogene Entzugsleistung des Heizversuchs im Vergleich mit dem Kühlversuch im Dauerbetrieb lässt sich auf den niedrigeren Volumenstrom (\dot{V}_{Abs}) und die niedrigere Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf- und Tunnellufttemperatur ($T_{\text{VL,Abs}}$) und Tunnellufttemperatur (T_{Tun}) zurückführen, welcher folglich einen signifikanten Einfluss auf die Leistungsabgabe zeigt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Tunnelluft einen großen Einfluss auf die Entzugsleistung der Tunnelabsorber hat. Somit verändert sich die potenzielle Kühl- oder Heizleistung der Tunnelabsorber durch den klimatischen Einfluss über das Jahr hinweg. Nicht nur die Tunnelluft spielt eine Rolle für die Entzugsleistung, sondern auch die im Erdreich gespeicherte Wärme oder Kälte. Es lässt sich auch erkennen, dass der Durchfluss der Tunnelabsorber sowie der Unterschied zwischen Vorlauf- und Tunnellufttemperatur eine zentrale Rolle für die Entzugsleistung spielen. Bereits bei geringeren Änderungen des Durchflusses oder des Temperaturunterschieds zwischen Außenluft und der Tunnelluft lässt sich ein Einfluss auf die Entzugsleistung erkennen.

Bei den weiteren Messungen der Temperaturen des Erdreichs im Forschungsvorhaben konnte gesehen werden, dass die Absorberrohre sowie die Tunnellufttemperatur einen minimalen Einfluss auf die Erdreichtemperatur haben. Die wasserrechtlichen Vorschriften hinsichtlich der Grundwassertemperatur in der Nähe des Wärmeübertragers und einer Temperaturveränderung von 2 K in einem Abstand von 50 m zum Wärmeübertragerfeld wurden dabei eingehalten.

Versuche mit Lastprofilen

Durch die Versuche mit vorgegebenen Lastprofilen wurde simuliert, wie das gesamte tunnelgeothermische System mit einem Endverbraucher interagiert und wie viel Kühl- und Heizenergie letztendlich von den Tunnelabsorbern bereitgestellt werden kann. Die Versuche mit Lastprofil wurden als Emulationen durchgeführt. Hierfür wurde die Simulationsumgebung TRNSYS verwendet, um Kühl- und Heizlastprofile zu generieren, welche auf den Prüfstand im Betriebsraum des Fasanenhoftunnels aufgeprägt wurden. In TRNSYS wurde hierfür ein Büromodell aufgebaut, für welches ein entsprechendes

Lastprofil für Heizen und Kühlen erzeugt wurde. Die Wärmedurchgangskoeffizienten für die Wände und Fenster erfüllen die Anforderungen der EnEV 2014 [3]. Die Anzahl an Büroräumen konnte variiert werden, um unterschiedliche Gebäudegrößen betrachten zu können. Das Gebäude wurde in jedem Raum mit kombinierten Heiz- und Kühldecken ausgestattet, um entweder Wärme aus dem Gebäude ab- oder zuzuführen. Für die Heiz- und Kühldecken konnte hierbei ein Lastprofil für die Emulationsperioden ermittelt werden.

Für den Heizfall wurde ein in TRNSYS modellierter Pufferspeicher von einer Sole-Wasser-Wärmepumpe erwärmt, welche ebenfalls in TRNSYS modelliert wurde. Dabei wurde ein Modell für eine Kompressionswärmepumpe [4] implementiert.

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse des Heizversuchs mit Lastprofil. In der Darstellung sind der Heizenergiebedarf des Bürogebäudes ($Q_{\text{H,Geb}}$) und die kumulierten Energien der Absorber (Q_{Abs}), der Wärmepumpe (Kompressor, Q_{Komp}) und des Erwärmers Q_{Er} gegenübergestellt. 71 Prozent der benötigten Heizenergie werden direkt durch die Absorber geliefert; 25 Prozent stammen vom Kompressor und 4 Prozent vom Erwärmer. Mit diesen Ergebnissen lässt sich für die Wärmepumpe eine Arbeitszahl von $\beta = 3,5$ für den Emulationszeitraum ermitteln.

Die Ergebnisse zeigen, dass Wärmepumpen in Kombination mit Tunnelgeothermie eine geeignete Methode zur Versorgung von Gebäuden darstellen. Ein weiterer Vorteil ist der Beitrag zur Gebäudekühlung – entweder direkt oder unter Verwendung einer Wärmepumpe. Da die Absorber nur bei Bedarf aktiviert wurden, wurde nicht kontinuierlich Wärme aus den Tunnelabsorbern entzogen, wie es beim Dauerbetrieb geschehen würde. Durch diese Betriebsvariante wird die im Erdreich gespeicherte Wärme langsamer genutzt.

Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass die Tunnelluft einen großen Einfluss auf die Entzugsleistung der Tunnelabsorber hat. Somit verändert sich die potenzielle Kühl- oder Heizleistung der Tunnelabsorber durch den klimatischen Einfluss über das Jahr hinweg. Der Tunnel stellt jedoch eine gute Wärmequelle bzw. -senke für das Heizen und Kühlen von Gebäuden dar, die für die Kopplung mit einer Wärmepumpe geeignet ist. Dabei besteht die Möglichkeit, eine hohe Jahresarbeitszahl zu erreichen. Während der Messungen wurden die Anforderungen der wasserrechtlichen Vorschriften eingehalten. Das zeigt, dass der

Einfluss der Tunnelabsorber auf das Erdreich gering ist. Tunnel können daher als eine geeignete Quelle für oberflächennahe Geothermie betrachtet werden. ◀

Danksagung

Das Forschungsvorhaben wird vom BMWi aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen des EnEff.Wärme Programms unter der Forschungskennziffer 03ET1122A gefördert. Es wird gemeinsam mit dem Institut für Geotechnik (IGS) an der Universität Stuttgart und in Zusammenarbeit mit der Stuttgarter Straßenbahnen AG (SSB) bearbeitet.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Literatur:

- [1] BWP e.V., Bundesverband Wärmepumpe – Absatzzahlen für Heizungswärmepumpen in Deutschland 2010-2016, Berlin 2017.
- [2] Moormann, C., Schneider, M., Schmidt, M., Schlosser, T., GeoTU 6 – Geothermienutzung in Tunnelbauwerken in innerstädtischen Bereichen am Beispiel des Stadtbahntunnels Stuttgart Fasanenhof (U6), Bericht, Universität Stuttgart 2012.
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Bundesgesetzblatt Jahrgang Teil I Nr. 67 – Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung, Bundesanzeiger Verlag, Bonn 2013.
- [4] Afjei, T., Wetter, M., TRNSYS Type - Compressor heat pump including frost and cycle losses: Version 1.1 Model description and implementing into TRNSYS, Zentralschweizerisches Technikum Luzern, Luzern 1997.