

Nachhaltigkeit im Tief- und Tunnelbau durch innovative geothermische Konzepte

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann, Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik, Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Gero Marzahn, Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Referat Ingenieurbauwerke, Bonn

Dr.-Ing. Ingo Kaundinya, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASf), Referat Tunnel- und Grundbau, Tunnelbetrieb, Zivile Sicherheit, Bergisch-Gladbach

Martin Pozybill, Die Autobahn GmbH Südwest, Stabstelle Innovation, Stuttgart

Die in diesem Beitrag präsentierten Forschungsvorhaben und Anwendungen zeigen das Potential der Oberflächennahen Geothermie für innovative Anwendungen im Straßen-, Tief- und Tunnelbau auf. Vorge stellt werden u. a. Konzepte zur Nutzung der an deutschen Straßentunneln anfallenden Berg- und Drainagewässer (hydrogeothermisches Verfahren), zum Einsatz von absorbertechnologischen Verfahren u. a. in Tunneln des neuen Alaufstiegs der BAB A8, zur regenerativen Versorgung von Park- und Rastanlagen an deutschen Autobahnen sowie zur thermischen Aktivierung von Infrastruktureinrichtungen des Siedlungswasserbaus.

1 Einleitung

Trotz der immer eindeutigeren Hinweise auf einen beschleunigten Klimawandel und der daraus resultierenden Notwendigkeit einer umfassenden Energiewende hinkt die entscheidende Wärmewende der Stromwende hinterher. Während Wind und Sonne in guten Jahren bereits die Hälfte der Stromenergie nachhaltig liefern, decken regenerative Wärmequellen weniger als ein Fünftel des Wärmebedarfs. Politik, Verwaltung, Wirtschaft und Bürger müssen daher die Weichen für eine Wärmeversorgung ohne Öl und Gas stellen, die nachhaltig, Versorgungssicher, regional und bezahlbar ist.

Neben der Tiefen Geothermie, die insbesondere in Form der Hydrothermalen Geothermie schwerpunktmäßig in den geothermischen Provinzen des Molassebeckens im Alpenvorland, des Oberrheingrabens und des norddeutschen Beckens national aktuell wieder verstärkt durch zahlreiche Projekte realisiert wird, kommt der Oberflächennahen Geothermie als erprobter Lösung für die klimafreundliche Bereitstellung von Wärme und Kälte eine zentrale Bedeutung zu.

Die Vorteile der oberflächennahen Geothermie liegen in Zeiten des Klimawandels auf der Hand: sie ist heimisch und grundlastfähig, verbraucht wenig Fläche, kann sowohl Wärme als auch – was im Zeichen des Klimawandels zunehmend bedeutsam wird – Kälte zur Verfügung stellen und verursacht dabei keine Emissionen.

Ogleich es für viele Anwendungen der Oberflächennahen Geothermie bereits technisch erprobte Anwendungen gibt, kann zum einen durch wirklichkeitsnähere Modellbildungen eine wirksamere Nutzung erreicht werden, zum anderen besteht das Potential für weitere, bisher nicht übliche und daher auch nicht erprobte Anwendungen.

In diesem Kontext werden nachfolgend Forschungsvorhaben und neue Konzepte zur Integration der Oberflächennahen Geothermie im Straßen-, Tief- und Tunnelbau aufgezeigt. Vorge stellt werden u. a. Konzepte zur Nutzung der an deutschen Straßentunneln anfallenden Berg- und Drainagewässer (hydrogeothermisches Verfahren), zum Einsatz von absorbertechnologischen Verfahren u. a. in Tunneln des neuen Alaufstiegs der BAB A8, zur Übertragung dieses Konzeptes auf Infrastruktureinrichtungen des Siedlungswasserbaus sowie zur



Integration der oberflächennahen Geothermie als regeneratives Versorgungsquelle von Park- und Rastanlagen an deutschen Autobahnen.

2 Hydrogeothermische Verfahren für Tunnelbauwerke

2.1 Grundlagen

Ein regenerativer und damit nachhaltiger Ansatz zur Temperierung von Tunnelbetriebsräumen und von Verkehrsflächen zur Eis- und Schneefreihaltung ist die Nutzung der Geothermie in Verbindung mit dem Bau und Unterhalt des Tunnelbauwerks selbst. Tunnelbauwerke können aufgrund ihrer großen erd- und tunnelluftberührenden Oberfläche einen besonderen Beitrag zur Temperierung mittels regenerativer Energie leisten (Moormann 2014).

Hydrogeothermische Verfahren nutzen die Wärmeenergie des aus der Bergwasserdrainage austretenden Wassers. Während das absorbertechnologische Verfahren als geschlossenes System arbeitet, ist das hydrogeothermische Verfahren ein offenes System, da das Drainagewasser nach der Energieextraktion in eine Vorflut übergeben wird. Die durch hydrogeothermische Verfahren extrahierte Energie ist ein Nebenprodukt der aus tunnelstatischer Sicht erforderlichen Drainage zum Abbau des auf die Tunnelschale wirkenden Wasserdrucks.

Das geothermische Potential ist der extrahierbare Wärmestrom des Drainagewassers $\dot{Q}_{\text{Heiz/Kühl}}$, der im thermischen Gleichgewicht mit dem geothermischen Wärmestrom \dot{Q}_{Geo} und dem Wärmeeintrag aus dem Tunnelinnerem \dot{Q}_{TL} steht (Abb. 1b). Der sich ergebende Wärmestrom $\dot{Q}_{\text{Heiz/Kühl}}$ ist dann das Produkt aus der Drainagewasser-Abstrommenge \dot{V} , der Dichte ρ_w und der spezifischen Wärmekapazität $c_{p,w}$ sowie der realisierbaren Temperaturspannung $\Delta\vartheta$ des Wassers.

$$\dot{Q}_{\text{Heiz/Kühl}} = \dot{V} \cdot \rho_w \cdot c_{p,w} \cdot \Delta\vartheta \quad (1)$$

Die Temperatur des Drainagewassers ist dabei u. a. von den hydrogeologischen Randbedingungen und der Gesteinstemperatur abhängig, wobei letztere wiederum von der Tunnelüberdeckungen, der Topographie und weiteren Faktoren abhängt. Auf der anderen Seite wird die realisierbare Temperaturspannung durch die minimal zulässige Einleittemperatur in die Vorflut begrenzt.

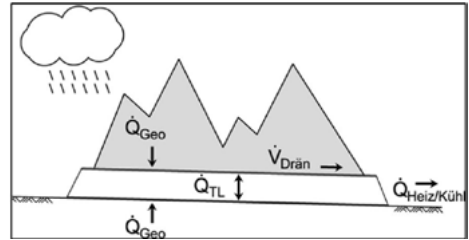


Abbildung 2-1: Tunnelgeothermie: Hydrogeothermische Verfahren (offenes System): Wärmestrom

Ein großer Vorteil der hydrogeothermischen Tunnelanlagen im Vergleich zu den absorbertechnologischen Anwendungen ist die Möglichkeit der nachträglichen Nachrüstung eines Bestandtunnels. Bei dem hydrogeothermischen Verfahren ist die mögliche Energieextraktion eine Funktion der Drainagewassertemperatur, der Schüttung sowie der realisierbaren Wiedereinleittemperatur. In Abhängigkeit von der Überdeckung eines Tunnels liefert eine Bergwasserdrainage oft eine über das Jahr hin weitgehend konstant hohe Temperatur, die für alpine Basistunnel in der Größenordnung von 24°C (Rybach 2015) oder auch noch deutlich darüber (Buslinger 1998) liegen kann. Das bisherige Einsatzgebiet hydrogeothermischer Nutzungen in der Tunnelgeothermie wurde daher meist im alpinen Raum mit seinen typischen hydrogeologischen und morphologischen Verhältnissen gesehen.

Tunnelhydrogeothermische Anlagen existierten vornehmlich in der Schweiz (SVG 2008). Aktuell sind in der Schweiz sieben geothermische Anlagen mit einer jährlichen Gesamtwärmeleistung von ca. 5.300 MWh/Jahr in Betrieb. Eine weitere Möglichkeit der thermischen Nutzung des Bergdrainagewassers stellt die Aquakultur dar. Das Bergwasser des Gotthard-Basistunnels tritt am Nordportal

mit einer Schüttung von 150-400 l/s und einer Temperatur von 14° bis 16°C aus dem Tunnel; seit letztem Jahr wird das anfallende Bergwasser genutzt, um die größte schweizerische Fischzucht „Basis 57“ mit Frischwasser zu versorgen und zu beheizen (Aquakultur 2021). Potential für den Einsatz an deutschen Straßentunneln.

2.2 Potential für den Einsatz an deutschen Straßentunneln

Eine Vorstudie der Bundesanstalt für Straßenwesen (Blosfeld & Rönnau 2014) zeigt, dass nicht nur alpine Straßen- und Eisenbahntunnel für den Einsatz hydrogeothermischer Verfahren bei Tunneln in Frage kommen. In dieser Vorstudie wurden die Drainagewasserschüttungen an 15 Portalen deutscher Straßentunnel hinsichtlich ihres hydrogeothermischen Potentials untersucht und bewertet. Ferner wurden für die genannten Tunnel die chemisch-physikalischen Parameter des Drainagewassers, die für den dauerhaften Betrieb einer Grundwasserwärmepumpe relevant sind, analysiert. Dabei wurden bereits während der Entnahmen häufig organoleptische Auffälligkeiten der Wasserproben, wie z.B. ein Bodensatz, eine Trübung/Färbung bzw. Auffälligkeiten im Bergwasserdrainagesystem, wie Sandablagerungen oder Versinterungen, beobachtet.

Unter der Annahme einer für Wärmepumpen üblichen Temperaturspreizung auf der Seite des Primärkreislaufes von 4 K ergaben sich für die fünf ergiebigsten Tunnelportale die in Abbildung 2-2 dargestellten Wärmeleistungen. Diese fünf Portale hoben sich auch im Hinblick auf die bei der Probenahme festgestellten Auffälligkeiten und die chemisch-physikalischen Parameter positiv von der Mehrzahl der anderen Portale ab.

Hierauf aufbauend wurden vom Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart (IGS) im Auftrag der BASF Detailuntersuchungen an drei Portalen deutscher Straßentunnel, dem Nord- und Südportal des Tunnels Rennsteig (Thüringen) sowie dem Nordportal des Grenztunnels Füssen (Bayern), durchgeführt

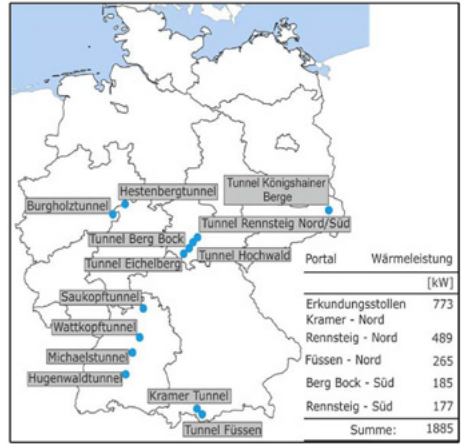


Abbildung 2-2: Wärmeleistung der Tunneldrainagewasserschüttungen an ausgesuchten deutschen Straßentunneln (Blosfeld & Rönnau 2014)

(Moormann & Buhmann 2017). Ziel der Studie waren detaillierte Untersuchungen zum thermischen Potential, die Ausarbeitung von möglichen Nutzungskonzepten sowie die planerische Vorbereitung der technischen Umsetzung einer Pilotanlage an einem der drei Tunnelportale. In diesem Kontext wurden Messeinrichtungen zur Erfassung der Drainagewassertemperatur und der Durchflussmenge an den Tunnelportalen installiert und Langzeitmessungen durchgeführt (Abb. 2-3).



Abbildung 2-3: Installation von Messeinrichtungen zur Erfassung von Drainagewassertemperatur und Durchflussmenge am Tunnel Rennsteig



Neben unterschiedlichen Anwendungen wie der Klimatisierung der Tunnelbetriebsräume, der Klimatisierung externer Gebäude mittels erdverlegter Fernwärmeleitung oder der Beheizung von Aquakulturen wurde das energetische Potential einer hydrogeothermischen Tunnelanlage zum Betrieb von Flächentemperierungen zur Eis- und Schneefreihaltung von Fahrbahnoberflächen an den einzelnen Tunnelportalen untersucht.

Im Ergebnis dieser Untersuchungen wurden seit 2019 zwei Pilotanlagen realisiert: am Portal Nord des Rennsteigtunnels wurde seitens des Thüringer Landesamts für Bau und Verkehr eine Anlage zur Klimatisierung der Betriebsräume eingerichtet, während am Portal Nord des Grenztunnels Füssen durch die Autobahndirektion Südbayern zwei Anwendungen realisiert wurden, i.e. die Klimatisierung der Betriebsgebäude und – mit Unterstützung des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und der BAST – ein Technikum, also eine großmaßstäbliche Pilotanlage für die Temperierung von Verkehrsflächen, die nachfolgend auf Grund ihres Innovationscharakters detaillierter vorgestellt werden soll.

2.3 Pilotanlage am Tunnel 'Rennsteig'

Der mit zwei Röhren ausgestattete Tunnel „Rennsteig“ im Zuge der BAB A71 in Thüringen ist mit einer Länge von 7.916 m der längste Straßentunnel Deutschlands. Die maximale Überdeckung beträgt 205 m. Die Drainagewasserschüttung schwankt an beiden Portalen (Portal Nord: 14 bis 60 l/s; Portal Süd: 17 bis 70 l/s) relativ stark, ohne dass eine unmittelbare Korrelation zu Niederschlagsereignissen im Einzugsgebiet möglich ist. Die Drainagewassertemperatur liegt bei 6,8 bis 9,6°C am Portal Nord und bei 7,4 bis 11,4°C am Portal Süd (Moormann & Buhmann 2017).

Am Nordportal des Tunnels „Rennsteig“ wurde bei der Umrüstung des Betriebsgebäudes ab 2019 eine tunnelgeothermische Anlage integriert, die das Gebirgswasser aus der Tunneldrainage zur Klimatisierung der Technikräume (Bestand und Erweiterung) verwendet. Abbildung 2-4 zeigt wesentliche

Komponenten der installierten Anlage. Das geothermische Potential der Drainagewasserschüttung am Portal Nord wurde auf der Basis der Bestandserhebung (Moormann & Buhmann 2017) bezüglich der Klimatisierung von Betriebsräumen für den Lastfall Heizen zu $\dot{Q}_{(Heiz)} = 147 \text{ kW}$ und für den Lastfall Kühlen zu $\dot{Q}_{(Kühl)} = 589 \text{ kW}$ ermittelt. Die Auslegungslast des erweiterten Technikgebäudes von 10,5 kW und die maximale Soll-Kühlleistung von 21,8 kW können somit ganzjährig vollständig über die hydrogeothermische Nutzung des Tunneldrainagewassers abgedeckt werden.



Abbildung 2-4: Pilotanlage am Tunnel „Rennsteig“: Nutzung des am Portal Nord anfallenden Drainagewassers zur Heizung und Kühlung der Technikräume

2.4 Pilotanlage am Tunnel 'Füssen'

2.4.1 Überblick

Der Grenztunnel Füssen (BAB A7 / Fernpassstraße) in Südbayern besitzt eine Röhre mit Gegenverkehr und einer Länge von 1.284 m bei einer maximalen Überdeckung von 210 m. Die am Nordportal auftretende Drainageschüttung ist relativ geringen Schwankungen unterworfen und liegt bei 11 bis 23 l/s bei einer Drainagewassertemperatur von 7,8 bis 12,1°C. Am Nordportal wurde 2019 die Klimatisierung eines bestehenden Gebäudes umgerüstet und ein Neubau für die Tunnelbetriebstechnik direkt mit der Nutzung des Drainagewassers zur Klimatisierung und Beheizung realisiert (Abb. 2-5).

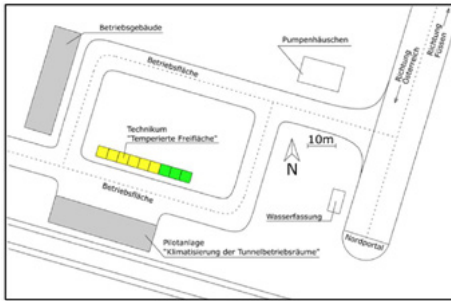


Abbildung 2-5: Nördl. Portal Grenzunnel Füssen mit Pilotanlagen „Klimatisierung Tunnelbetriebsräume“ und TECHNIKUM „Temperierte Freifläche“ mit Fahrbahnaufbau aus Asphalt (gelb) und aus Beton (grün)

Ferner wird an diesem Tunnelportal die Nutzung des Tunneldrainagewassers zur Temperierung von Verkehrs- und Betriebsflächen in einem Technikum untersucht. Es handelt sich um eine Pilotanwendung für das in Moormann & Buhmann (2017). entwickelte innovative Konzept einer „direkten, passiven geothermischen Freiflächentemperierung“, bei der das bisher ungenutzten Tunneldrainagewasser direkt und ohne den Einsatz eines Wärmepumpenkreislaufs und ohne Zusatz von Frostschutzmitteln durch die in der Freifläche installierten Rohrleitungen zirkuliert. Auf den Einsatz von potentiell umweltgefährdenden Kühlmitteln im Sekundärkreislauf kann so verzichtet werden, wodurch sich die Erteilung einer wasserrechtlichen Genehmigung der Anlage vereinfacht. Zudem kann nach erfolgter Energieextraktion das Drainagewasser bedenkenlos der Vorflut übergeben werden. Der Einsatz solcher Anlagen ermöglicht es, ausgewählte Bereiche vor Tunnelportalen und auf Betriebsflächen im Winter energieeffizient zu beheizen und somit den aufwändigen Winterdienst und Taumittelinsatz und damit auch den bauwerksschädigenden Eintrag von Chloriden in den Tunnel zu verringern.

Die hohe thermische Leistung des Drainagewassers an dem Standort Nordportal Füssen lässt beide Anwendungen, die Klimatisierung der Tunnelbetriebsgebäude und die Temperierung der Freifläche zu. Die Pilotanwendung am Grenzunnel Füssen belegt damit, dass die direkte Nutzung des bei dränen Straßentunneln anfallenden Bergwassers eine be-

sonders nachhaltige und energieeffiziente Nutzung von natürlichen Ressourcen darstellt.

Nachfolgend soll das Konzept der „direkten, passiven geothermischen Freiflächentemperierung“, das mit dem Technikum „Temperierte Freifläche“ erstmalig angewendet und wissenschaftlich untersucht wird, näher betrachtet werden.

2.4.2 Technikum „Temperierte Freifläche“

Das TECHNIKUM „Temperierte Freifläche“ wurde in den Jahren 2019/20 auf der Grundlage der Entwurfsplanung (Moormann & Buhmann 2017). auf dem Betriebsgelände des Nordportals des Grenzunnels Füssen durch die Autobahndirektion Südbayern errichtet. An neun Testflächen mit unterschiedlichen Fahrbahnaufbauten (Abb. 2-5 bzw. 2-8) wird der effizienteste Aufbau und Betrieb solcher Anlagen untersucht. Die Temperierung der Verkehrsflächen erfolgt durch Rohrregister, die in dem Fahrbahnaufbau der Freiflächen verlegt sind und direkt von dem an dem Tunnelportal anfallenden Drainagewasser durchströmt werden. Durch die konstant hohe Schüttung und Temperatur des Drainagewassers ist eine passive Aktivierung der Freiflächen ohne einen Temperaturhub möglich.

Die Reduktion von Streusalz sowie maschineller und manueller Schneeräumung durch den Einsatz von Wärmeübertragern Infrastrukturfächen unter Nutzung von Geothermie wurde bereits in Kleinanwendungen (u.a. Herrmann & Koch 2017) aber auch im Zusammenhang mit Infrastrukturprojekten (u.a. Feldmann et al. 2012, Hanschle et al. 2009) erprobt. Der Betrieb dieser Wärmeübertrager in einem direkten, passiven Betrieb unter Nutzung von Tunneldrainagewasser stellt eine konsequente Fortentwicklung dieser Technologie dar, um hierdurch die Effizienz des Anlagenbetriebs zu steigern und Amortisationszeiträume zu verringern.

Mit dem TECHNIKUM am Nordportal des Grenzunnels Füssen soll zusätzlich die Möglichkeit einer Erhöhung der Dauerhaftigkeit der Fahrbahnen durch eine Kühlung der Verkehrsflächen an heißen Sommertagen untersucht werden.



Funktionsweise

Für die Bemessung von Anlagen zur Flächentemperierung ist es relevant, ob die zur Eis- und Schneefreihaltung erforderliche Wärmeenergie für die Dimensionierung von Freiflächenheizungen für den Spitzenlastfall, d.h. die im jährlichen Verlauf maximal auftretende Energieabgabe, ausgelegt werden soll, oder aber, ob an wenigen Tagen im Jahr mit Spitzenlastfall auch ein ergänzender Winterdienst vorgesehen werden kann. Die Basis der Ermittlung der erforderlichen Wärmestromdichte \dot{q}_{zu} bildet die Energiebilanz, die im Bereich des einzubauenden Wärmeübertragers (Rohrleitungen im Freiflächenaufbau) wie folgt aufzustellen ist (Abb. 6):

$$\dot{q}_{zu} = \pm \dot{q}_{KW} \pm \dot{q}_{LW} + \dot{q}_{konv} + \dot{q}_{lat} - \dot{q}_{regen} + \dot{q}_s - \dot{q}_{GEO} \quad (2)$$

Dabei sind folgende Wärmeströme zu berücksichtigen:

- *Geothermischer Tiefenstrom* \dot{q}_{GEO} , wobei der Einfluss der Erdwärme bei einer Freiflächenheizung gegenüber den anderen an der Energiebilanz beteiligten Wärmeströmen verhältnismäßig gering ist.
- *Wärmestrom aus Drainagewasser* \dot{q}_{zu} , im vorliegenden Fall wird das Drainagewasser ohne Temperaturhub direkt thermisch genutzt.
- *Kurzwelliger Wärmestrom* \dot{q}_{KW} , wobei die auf der Erde auftretende Globalstrahlung sich aus direkter und diffuser Strahlung zusammensetzt.
- *Langwelliger Wärmestrom* \dot{q}_{LW} , der abhängig ist von den Bauteileigenschaften, der Bauteiloberflächentemperatur und den geometrischen Sichtverhältnissen der im Strahlungsaustausch stehenden Bauteile.
- *Konvektiver Wärmestrom* \dot{q}_{konv} , am Übergang der Geländeoberfläche zur Atmosphäre.
- *Latenter Wärmestrom* \dot{q}_{lat} infolge Verdunstung oder Kondensation an einer mit der Umgebungsluft in Kontakt stehenden schneebedeckten Fläche.
- *Wärmestrom durch Regenereignis* \dot{q}_{regen} ; der Einfluss eines Regenereignisses auf das Abschmelzen einer Schneedecke wird häufig überschätzt, da durch den Niederschlag eine Verdichtung der Schneedecke, nicht jedoch eine Reduzierung der Schneemenge erfolgt.

- *Schmelzenergie* \dot{q}_s , die für den Fall, dass sich auf den Verkehrsflächen im Bereich der Tunnelportale bereits eine Schneedecke gebildet hat, zum Abschmelzen der Schneedecke aufzubringen ist.

Der einzige Wärmestrom, der vom Betreiber reguliert werden kann, ist die Durchströmung des Drainagewassers. In Abhängigkeit von der Durchflussrate kann sich in dem Rohrregister eine laminare oder eine turbulente Strömung ausbilden, wobei der Wärmeübergangskoeffizient des strömenden Wassers zur Umgebung im laminaren Bereich mit Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit leicht ansteigt, während beim Übergang von laminarer zur turbulenten Strömung der Wärmeübergangskoeffizient stark anwächst (von Böckh & Wetzel 2014).

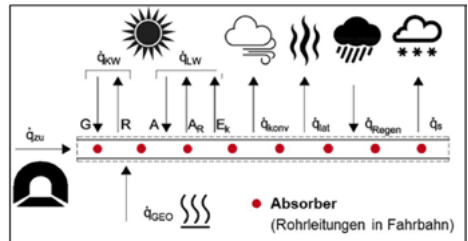


Abbildung 2-6: Energiebilanz einer Freiflächentemperierung (Moormann & Buhmann 2017).

Entwurfsplanung

Der Dimensionierung des TECHNIKUMS Füssen gingen hydraulische und hydrochemische Untersuchungen voraus Moormann & Buhmann (2017). Aus Messungen der Drainageschüttungen an der West- und Ostulme wurde eine minimale Drainagewassermenge beider Drainagewasserefassungen von 11,0 l/s sowie eine minimale bzw. maximale Temperatur des Drainagewassers von 8,3°C bzw. 10,5°C festgestellt. Nach VDI (2010) muss die Übergabetemperatur des Drainagewassers in die Vorflut zwischen 5°C und 20°C liegen. Bei Ausschöpfung dieser Grenzwerte beläuft sich das rechnerische geothermische Potential für den Heizfall zu 152 kW und für einen Kühlfall zu 438 kW. Von Richter (2009) wird die zur Eis- und Schneefreihaltung der Fahrbahnoberflächen erforderliche Wärmestromdichte mit 400 W/m² angegeben. Dieser Wert wurde bei numerischen Simulationen

der Wärmetransportvorgänge innerhalb der Freiflächen mit einer Multiphysics-Software unter Berücksichtigung der lokalen klimatischen Verhältnisse bestätigt (Abb. 2-7). Bei der installierten Pumpenleistung können somit rechnerisch 40 Felder mit einer Fläche von 9 m² die erforderliche Wärmestromdichte von 400 W/m² bereitstellen.

Ausführung

Das TECHNIKUM am nördlichen Portal des Grenztunnels Füssen wurde mit neun Feldern ausgestattet, wobei der Fahrbahnaufbau der neun Testflächen bei sechs Freiflächen aus Asphalt (A) und bei den weiteren drei Testflächen aus Beton (B) besteht; jeweils eine Beton- und eine Asphaltfläche wurde nicht mit Rohrregistern (F) versehen. Abbildung 2-8 zeigt die Detailausbildung der unterschiedlichen Testflächen, die sich nicht nur bezüglich des Fahrbahn- bzw. Deckschichtaufbaus und der hierfür eingesetzten Materialien, sondern auch bezüglich der Anordnung der Rohrleitungen in ihrer Tiefenlage und des Rohrachsabstandes (drei unterschiedliche Rohrkonfigurationen mit 10, 20 und 30 cm Schenkellabstand) unterscheiden.

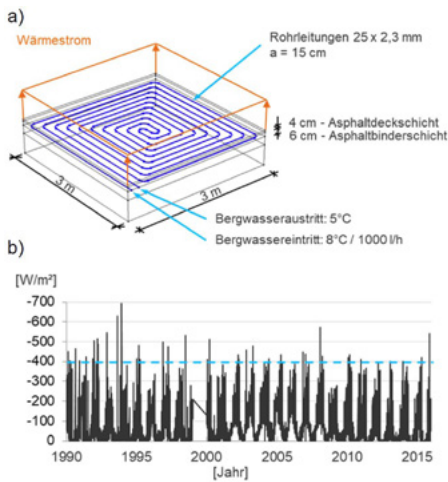


Abbildung 2-7: a) Numerisches Berechnungsmodell für ein Testfeld; b) Energiebedarf Freiflächenheizung Tunnel Füssen zur Eis- und Schneefreihaltung (Moormann & Buhmann 2017).

In jedem aktivierten Feld wird innerhalb der Rohrregister der Durchfluss sowie die Vor- und Rücklauf-temperatur gemessen. Ferner wird innerhalb des Fahrbahnaufbaus in Feldmitte und am Rand des Feldes die Temperatur in jeweils zwei Sensorebenen unterhalb und oberhalb der Rohrleitungen gemessen. Hierdurch wird ein direkter Rückschluss auf die aufwärts und abwärts gerichteten Wärmeströme möglich. Die Sensorebenen bestehen aus zwei Sensoren, die mit einem vertikalen Abstand von 4 cm übereinander angeordnet sind. Insgesamt sind so pro Feld acht Temperatursensoren verbaut. Details zur Instrumentierung und zur Ausführung können Moormann et al. (2021) entnommen werden. Mit dem direkten, passiven Betrieb der Flächen-temperierung unter Verzicht auf zusätzliche Wärmeübertrager und auf den Einsatz von Frostschutzmitteln werden die Herstellungs- und Betriebskosten der Anlage reduziert und dadurch ihre Effizienz gesteigert. Allerdings besteht bei dieser Betriebsart die Gefahr des Auffrierens und damit der Zerstörung der Rohrleitungen und im ungünstigsten Fall auch der Schädigung des Fahrfächenaufbaus, wenn – z. B. bei einem Stromausfall – die Rohre mit Wasser gefüllt verbleiben und die Temperaturen unter den Gefrierpunkt fallen. Eigens für dieses mögliche Havariezenario wurden Regelkreise entwickelt, die bei Frostgefahr die Anlage gezielt außer Betrieb nehmen und ein Auffrieren verhindern, indem die Rohrregister stufenweise mit Druckluft ausgeblasen werden.

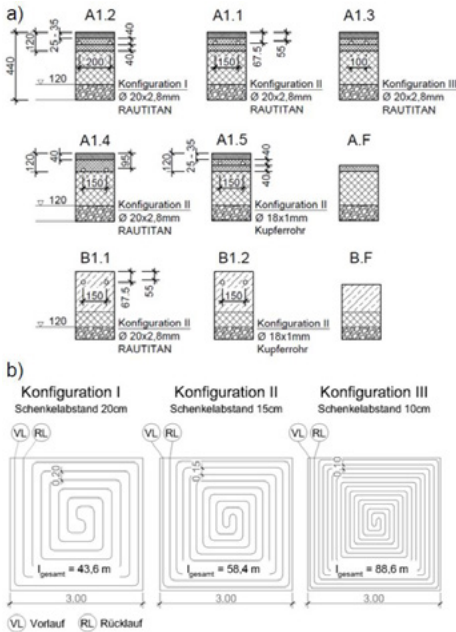


Abbildung 2-8: TECHNIKUM Füssen: Aufbau der temperierten Tesflächen a) Fahrbahnaufbauten mit integrierten Absorber-Rohrleitungen, b) Rohrleitungskonfigurationen im Grundriss

Im Rahmen der Ausführung des TECHNIKUMS Füssen wurden die entwickelten Konzepte für die Ausstattung der unterschiedlichen Fahrbahnaufbauten mit Rohrregistern hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit unter Baustellenbedingungen überprüft (Abb. 2-9).



Abbildung 2-9: TECHNIKUM Füssen: Bauausführung, Einbau Kupferrohrregister auf Asphaltragschicht

Erfahrungen

Das TECHNIKUM wurde im Sommer 2020 erfolgreich in Betrieb genommen. Im Rahmen des von der Bundesanstalt für Straßenbau (BASt) geförderten Forschungsvorhabens „Erprobung einer geothermischen Bergwassernutzung am Grenzunnel Füssen“ wird das TECHNIKUM durch das Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart (IGS) über zwei Jahre im Einsatz getestet. Kugler & Hochstein (2022) berichten erstmals detailliert über die messtechnisch gewonnenen Erfahrungen. Danach belegen die Messungen, dass sich das neue Konzept der direkten, passiven Freilächentemperierung zur Schnee- und Eisfreiheit von Verkehrsflächen an Tunnelportalen eignet. Neben einer Eis- und Schneefreihaltung im Winter (siehe Abb. 2-10) kann mit einer Kühlung im Sommer die Lebensdauer der Verkehrsflächen positiv beeinflusst werden. Im Fokus der Forschungsaktivitäten steht die vollständige Erfassung und Analyse der Wärmeströme temperierter Verkehrsflächen und anwendungsorientiert die Entwicklung eines möglichst effizienten und störungsfreien Betriebskonzeptes solcher Anlagen. In eine optimierte Anlagensteuerung wurden Wetterprognosen integriert. Im Ergebnis wird eine Implementierungshilfe zum Einsatz von direkten, passiven Freilächentemperaturen zur Schnee- und Eisfreiheit von Verkehrsflächen an Tunnelportalen formuliert, die einen wesentlichen Beitrag dazu leisten soll, solche nachhaltigen Konzepte zu einer Regelanwendung an Tunnelportalen zu machen.



Abbildung 2-10: TECHNIKUM Füssen: erfolgreiche Schneefreihaltung während der Erprobungsphase

3 Absorbertechnologische Verfahren für Tunnelbauwerke

3.1 Grundlagen

Bei absorbertechnologischen Anwendungen wird der Primärkreislauf durch in die Bauteile integrierte Wärmeübertrager (z. B. registerförmig angeordnete Absorberrohre), die bei Tunnelbauwerken in der Tunnelschale integriert werden (Abb. 3-1), gebildet. Das Verfahren kann dabei sowohl auf in Spritzbetonbauweise als auch auf maschinell aufgefahrene Tunnel angewendet werden.

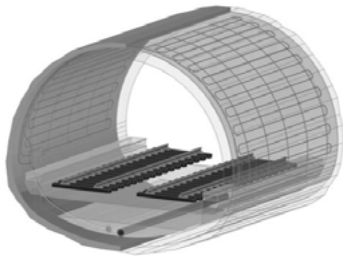


Abbildung 3-1: Energieblock im Fasanenhofunnel mit Absorberleitungen zwischen Innen- und Außenschale (Schneider 2013, Moormann 2014)

Die Rohrleitungen werden von einem Absorberfluid durchströmt, das die Wärme der Tunnelluft und des Baugrunds aufnimmt und dem Wärmepumpenkreislauf zuführt. Auf messtechnisch begleiteten Pilotanwendungen sowie auf umfangreichen numerischen Studien basierende Forschungsarbeiten u. a. von Schneider (2013) und Buhmann (2019) haben diese Form der Tunnelgeothermie intensiv untersucht und dabei u. a. den erheblichen Einfluss der Tunnelluft auf die potentielle Energieextraktion verdeutlicht. Die Untersuchungen zeigen, dass von einer mittleren Wärmestromdichte von 30 bis $> 40 \text{ W/m}^2$ ausgegangen werden kann. Im Ergebnis dieser Forschungen stehen für die Praxis heute vereinfachte Bemessungsansätze und webbasierte Simulationen zur Verfügung (Buhmann & Moormann 2017), die projektspezifische technische Vorstudien und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen ermöglichen.

3.2 Tunnel Rosenstein in Stuttgart

Nach Pilotprojekten wie den Tunneln 'Fasanenhof' und 'Jenbach' ist die Verfahrenstechnik der Tunnelgeothermie hinreichend erprobt, so dass sie für reale Tunnelbauwerke angewendet werden kann. Eine entsprechende Anwendung ist der Tunnel 'Rosenstein', der in der Landeshauptstadt Stuttgart mit zwei Röhren auf einer Länge von rund 1.000 m, davon 750 m in bergmännischer Bauweise den Rosensteinpark mit der Wilhelma unterfährt und kürzlich dem Verkehr übergeben wurde. Ausgehend von entsprechenden konzeptionellen Untersuchungen (Hofmann & Schmitt 2010) wurden je Tunnelröhre 7 Blöcke und damit eine Fläche von 3.330 m^2 mit Absorbern ausgestattet.

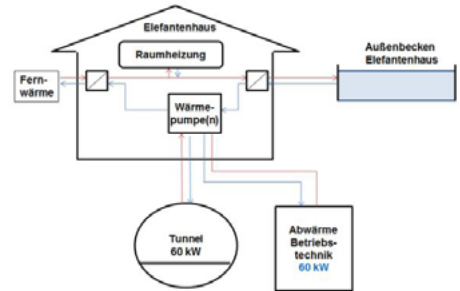


Abbildung 3-2: Nutzungskonzept der Tunnelgeothermieanlage des Tunnels 'Rosenstein', Stuttgart

Die extrahierte Wärme- und Kälteenergie soll zur Klimatisierung des geplanten neuen Elefantenhauses der Wilhelma und des zugehörigen Wasseraußenbeckens eingesetzt werden (Abb. 3-2). In der Herstellungs- und Betriebsphase werden die Temperaturen im Tunnel und im umgebenden Erdreich gemessen und durch das IGS ausgewertet und analysiert.

3.3 Alaufstieg der BAB A8

Als eine weitere großmaßstäbliche Anwendung wurde durch das IGS im Zuge einer Machbarkeitsstudie die geothermischen Ausrüstung der Straßentunnel 'Himmelschleife' und 'Drackenstein' im Zuge des Ausbaus des Alaufstiegs der Bundesautobahn A8 betrachtet. Hierzu wurde neben der



Klimatisierung der Tunnelbetriebsräume die Schnee- und Eisfreiheit für die an die Tunnel anschließenden Brückenoberflächen untersucht, da diese im Gegensatz zu erdgebundenen Fahrbahnen verstärkt zu Glättebildung neigen. Die Grundlage zur Beurteilung des thermischen Potentials der Tunnel bilden hier die beiden gekoppelten Berechnungsmodelle 'Tunnel' und 'Brücke', für die jeweiligen Festkörperstrukturen räumlich diskretisiert und die klimatischen Einflüsse transient simuliert wurden (Abb. 3-3). Die Ergebnisse zeigen das Potential für eine Umsetzung:

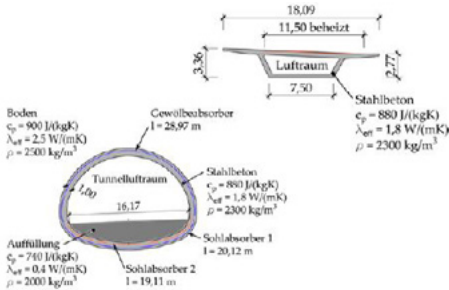


Abbildung 3-3: Berechnungskonzept Alaufstieg mit Modellen Tunnel und Talbrücke (Buhmann 2019)

4 Thermische Aktivierung von Abwasserkanälen ('Hybridkanal')

Das Konzept der aus dem Tunnelbau bewährten absorbertechnologischen Anwendungen wurde in einem jüngsten Schritt auch auf die Infrastrukturen des Siedlungswasserbaus, sprich auf Abwasserkanäle übertragen, die sich von Tunneln neben dem signifikant kleineren Durchmesser vor allem auch durch die Präsenz des Abwassers und andere klimatische Bedingungen im Inneren der Struktur unterscheiden. Der 'Hybridkanal' ist ein Abwasserkanalsegment, das zu einem die originäre Aufgabe des Abwassertransportes erfüllt, infolge der thermischen Aktivierung der Kanallaubung ('äußere Absorber') aber auch dem umgebenden Erdreich, der Kanalluft und dem Abwasser thermische Energie entziehen als auch zuführen kann. Ein Rinnenabsorber ('innerer Absorber') zum gezielten Wärmeentzug aus dem Abwasser kann zusätzlich in das System integriert werden. Daneben kann der Hybridkanal mit zwei

oder drei Leitungen ausgerüstet werden, mit denen thermische Energie auf unterschiedlichen Energiestufen durch ein städtisches Quartier transportiert werden kann. Abb. 4-2 zeigt die Grundkonfiguration und mögliche Betriebsmodi.

Abb. 4-1 zeigt die mögliche Ausbildung eines solchen Hybridkanals aus Kunststoff, bei dem an der äußeren Oberfläche des Kanals die Absorberleitung in Form einer Helix angebracht ist



Abbildung 4-1: Thermisch aktivierter Hybridkanal aus Kunststoff (Fa. Frank)

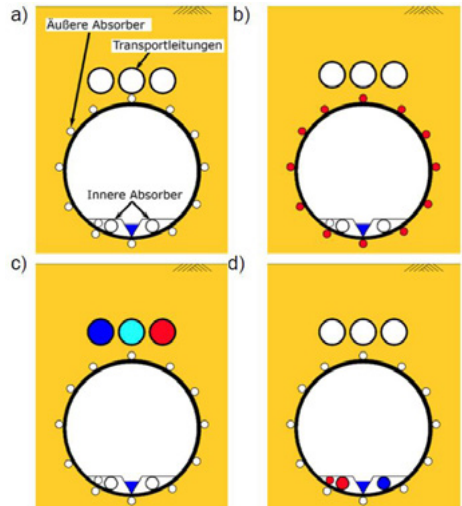


Abbildung 4-2: Thermisch aktivierter Hybridkanal
 a) Grundkonfiguration; Betriebsmodi: b) Eintrag/Entzug aus Erdreich u. Kanalluft; c) Transport; d) Entzug über Rinnenabsorber (Kugler & Moormann 2022)

Im Rahmen des vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Forschungsinitiative „Ressourceneffiziente Stand-

quartiere für die Zukunft“ (RES:Z) geförderten Verbundforschungsvorhabens „Integrative Betrachtung einer nachhaltigen Wärmebewirtschaftung von Stadtquartieren im Stadtentwicklungsprozess“, kurz „IWAES“, zielt darauf ab, unter Einsatz dieser Hybridkanäle energetisch autarke Stadtquartiere zu schaffen, bei denen Heiz- und Kühlenergie aus den thermisch aktivierten Infrastruktureinrichtungen der Siedlungswasserwirtschaft gezogen und zugleich thermische Energie im Stadtquartier so transportiert und ausgeglichen wird, dass die externen Energielieferungen über die Quartiersgrenzen hinweg minimiert und letztlich ein weitgehender Ausgleich innerhalb eines Stadtquartiers erzielt wird, was die Einbindung weiterer regenerativer Energiequellen erforderlich macht (Kugler & Moormann 2022, Kugler et al. 2022). Die 'Abwasserthermie' als eine besondere Form der Geothermie, stellt so regenerative und grundlastfähige thermische Energie bereit, welche sowohl zum Kühlen als auch zum Heizen eingesetzt werden kann. Im Rahmen des vom Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart initiierten und geleiteten Projekts IWAES wird u. a. die thermische Leistungsfähigkeit der Hybridkanäle unter Berücksichtigung der komplexen Wechselwirkungen und Wärmeströme in dreidimensionalen Simulationen mit einer Multiphysics-Modellbildung ermittelt und durch Feldmessungen validiert. Danach kann bei Kanaldurchmessern von 300 mm bis 800 mm von einer Wärmeentzugsleistung von ca. 120+150 W/m² und von einer Wärmeeintrags- bzw. Kühlleistung von ca. 650+830 W/m² (bezogen auf die innere Oberfläche) ausgegangen werden. In weiteren Untersuchungen werden interdisziplinär Konzepte für den Anschluss und Integration des Hybridkanals in das quartiersbezogene Verbundnetz sowie für die städtebaulichen Aspekte entwickelt und ein Handlungsleitfaden für die Anwendung dieser Technologie entwickelt.

5 Geothermische Versorgung von Park- und Rastanlagen an Autobahnen

Ein gutes Beispiel dafür, dass die Anwendungsgebiete und -potentiale der oberflächennahen Geothermie noch lange nicht ausgeschöpft sind, bilden

die Überlegungen der Autobahngesellschaft des Bundes (AdB) im Kontext mit dem Leuchtturmprojekt „Verbesserung der Sicherheit und Sauberkeit auf PWC-Anlagen“ für die Parkplätzen mit WC ('PWC') entlang des deutschen Autobahnnetzes auf eine weitgehend dezentral autarke, regenerative Energieversorgung zu setzen. In diesem Kontext wird für die Autobahnen in Baden-Württemberg eine Potentialanalyse zur Klärung der technischen Machbarkeit und der Wirtschaftlichkeit der Nutzung von Geothermie, z.B. durch Grundwasser oder Erdwärme auf diesen Parkplätzen durchgeführt. Dabei ist ein erhöhter Energiebedarf aus dem Umstand zu berücksichtigen, dass diese Parkplätze zukünftig grundsätzlich mit Duschkabinen in den WC-Gebäuden ausgestattet werden sollen. Zu dem formulierten Anforderungsprofil zählt die Erwärmung des Duschwassers für die Duschkabinen, eine Fußbodenheizung zur Eisfreihaltung für WC-Kabinen im Winter sowie – bei ausreichendem geothermischem Potential) – Schnee- und Eisfreihaltung für Gehwege und PKW-Stellplätze unmittelbar bei den WC-Gebäuden im Winter und gegebenenfalls auch von den unmittelbar zugehörigen Fahrgassen im Winter.

Die vom Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart erstellte Potentialstudie gliedert sich in zwei Teile. In einem ersten Teil wird fachtechnisch untersucht, welchen Beitrag die Geothermie zur Abdeckung des vorgenannten Energiebedarfs leisten kann bzw. in welchem Umfang hierfür technische Installationen, z.B. Erdwärmesonden (EWS), Wärmetauscher etc. erforderlich werden bzw. welche Konstellationen, z.B. in Verbindung mit Photovoltaik (PV) optimal sind. Für diese Grundsatzuntersuchungen werden repräsentative Baugrund- und Grundwasserhältnisse angenommen. Die Untersuchungen zeigen, dass bereits mit sechs EWS ein wesentlicher Beitrag zur Abdeckung des Wärmebedarfs geleistet werden kann, wenn zusätzlich PV und ein Speicher in das Konzept integriert werden. Hierauf aufbauend erfolgt eine Wirtschaftlichkeitsabschätzung unter Berücksichtigung der Installationskosten und Lebensdauer der einzelnen Komponenten.



In einem zweiten Teil wird für die 71 PWC-Anlagen, die im Zuständigkeitsbereich der Niederlassung Südwest der AdB liegen auf Basis der Kartenlage (geologische Karte und weitere Archivunterlagen) eine geclusterte Erstbewertung erarbeitet, ob an den einzelnen Standorten der PWC-Anlagen die Nutzung von Erdwärme technisch möglich bzw. lohnend ist und ob geologische Risiken bestehen. Die Untersuchungsergebnisse lassen weitere Schritte zur Erprobung dieses nachhaltigen energetischen Versorgungskonzeptes Konzeptes von Park- und Rastanlagen an Autobahnen erwarten.

6 Resümee und Ausblick

Im Zeichen des globalen Klimawandels zeigen die vorgestellten Forschungsprojekte und Anwendungen das Potential der oberflächennahen Geothermie für ein „Mehr“ an Nachhaltigkeit bei Projekten des Tief- und Tunnelbaus auf. Den Konzepten ist dabei gemein, dass in der Regel mit einem geringen technischen und ökonomischen Mehraufwand, z.B. durch die Nutzung per se anfallender Drainagewässer oder die thermische Aktivierung per se vorhandener Bauteile die klimafreundliche Bereitstellung von Wärme und Kälte gelingt. Damit kann die Geotechnik einen Beitrag leisten für die besonders wichtige Wärmewende (Moormann 2021), der grundlastfähig neben der Bereitstellung von Wärme auch die im Zeichen des Klimawandels zunehmend nachgefragte Kühlung ermöglicht.

Literaturverzeichnis

Aquakultur (2021). <https://www.basis57.ch>. Letzter Zugriff am 01.02.2021

Blosfeld, J., Rönau, I. (2014): *Wärmeenergie aus dränierten Bergwässern von Straßentunneln*. Bundesanstalt für Straßenwesen (unveröffentlicht)

von Böckh, P., Wetzel, T. (2014): *Wärmeübertragung*. Springer Vieweg, Berlin Heidelberg

Buhmann, P., Moormann, Ch. (2017): *Webbasierte Simulationsanwendungen zur Wirtschaftlichkeitsuntersuchung von thermisch aktivierten Tunneln: Berechnungsrandbedingungen, Sensitivitätsanalyse, Ergebnisse von Parameterstudien, Empfehlungen*. STUVA-Tagung 2017, Forschung+Praxis 49, 427-432

Buhmann, P. (2019): *Energetisches Potential geschlossener Tunnelgeothermiesysteme*. Mitteilungen des Institutes für Geotechnik, Universität Stuttgart, Heft 74

Busslinger, A. (1998): *Geothermische Prognosen für tieferliegende Tunnel*. Dissertation. Eidgenössische technische Hochschule Zürich

Feldmann, M., Döring, B., Hellberg, J., Kuhnhenne, M., Pak, D., Mengerling, I., Beucher, S., Hess, A., Steinhauer, B., Kemper, D., Scharnigg, K. (2012): *Vermeidung von Glatteisbildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: B, Brücken- und Ingenieurbau B 87. Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Hanschke, T., Kühl, J.-U., Freund, R., Mackert, K.-U. (2009): *Die Geothermische Brücke Berkenithin*. Bautechnik 86, 11, 729-732

Herrmann, V., Koch, S. (2017): *Schnee- und Eisfreihaltung einer Grundstückszufahrt: Geothermie in Kombination mit Walzasphaltschichten*. bbr – Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, 09, 54-57

Hofmann, K., Schmitt, D. (2010): *Geothermie im Tunnelbau – Konzept für die Nutzung der Geothermie am Beispiel des B10vTunnels Rosenstein*. Geotechnik 33 (2), 135-139

Kugler, T.; Buhmann, P.; Moormann, Ch., Schreck, E. (2021) *Eisfreie Straßen durch Hydrogeothermie*. bbr – Leitungsbau | Brunnenbau | Geothermie, 72. Jhg., Heft 3/2021, S. 54-59

Kugler, T., Hochstein, T. (2022): *Geothermische Bergwassernutzung zur Eis- und Schneefreihaltung von Verkehrsflächen an Tunnelportalen*. Spezialsitzung „Forum für junge Geotechnik-Ingenieure und -Ingenieurinnen“, Baugrundtagung 2022 in Wiesbaden, DGGT

- Kugler, T., Moormann, Ch. (2022): *(Geo)Thermische Aktivierung von Abwasserkanälen und deren Einbettung in ein Wärme-Kälteverbundnetz – Konkrete Anwendung eines Quartieransatzes*. TA Esslingen, 13. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, TAE, Ostfildern 2022, 15-23
- Kugler, T., Schittenhelm, C., Volkmer, S., Ryba, M., Moormann, Ch., Kurth, D., Koenigsdorff, R., (2022): *Sustainable Heating and Cooling Management of Urban Quarters*. Sustainability 2022, 14, 4353
- Moormann, Ch. (2014): *Tunnelgeothermie: Technische und ökonomische Perspektiven für regenerative Energiekonzepte im Tunnelbau*. Vorträge der 33. Baugrundtagung, Berlin, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Essen, 235-243
- Moormann, Ch., Buhmann, P. (2017): *Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 141
- Moormann, Ch. (2021): *Geotechnik im Zeichen des Klimawandels*. Editorial, Geotechnik 44(3), 149-150
- Moormann, Ch., Marzahn, G., Kaundinya, I., Capraro, R. (2021): *Nachhaltiger Tunnelbetrieb durch geothermische Bergwassernutzung – Erfahrungen bei Pilotprojekten an den Tunneln Rennsteig und Füssen: Temperierung von Betriebsgebäuden und Portal-Verkehrsflächen*. STUVA-Tagung 2021, Karlsruhe, Forschung+Praxis Vol. 56, 342-354
- Richter, T. (2009): *Verwendung von Erdwärme zur Schnee- und Eisfreihaltung von Freiflächen*. Berichte des Institutes für Bauphysik der Leibniz Universität Hannover, Fraunhofer IRB-Verl., Stuttgart
- Rybach, L. (2015): *Innovative energy-related use of shallow and deep groundwaters – Examples from China and Switzerland*. Central European Geology 58, 1-2, 100-113
- Schneider, M. (2013): *Zur energetischen Nutzung von Tunnelbauwerken – Messungen und numerische Berechnungen am Beispiel Fasanenhoftunnel*. Mitteilungen des Institutes für Geotechnik, Universität Stuttgart, Heft 68
- VDI – Verein Deutscher Ingenieure (2010): *Thermische Nutzung des Untergrunds, Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte ICS 27.010*. Beuth Verlag GmbH, Berlin ICS 27.010, VDI 4340 Blatt 1