

Geothermische Bergwassernutzung zur Eis- und Schneefreihaltung von Verkehrsflächen an Tunnelportalen

Till Kugler M.Sc., Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik

Tim Hochstein M.Sc., Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach

Berg- bzw. Tunneldrainagewasser – ein bisher ungenutztes Nebenprodukt des Tunnelbetriebs – ist eine grundlastfähige Energiequelle, die zumeist ungenutzt bleibt. In Füssen wurde erstmals das in Moormann & Buhmann (2017) entwickelte Konzept der direkten, passiven Freiflächentemperierung zur Eis- und Schneefreihaltung von Fahrbahnen in einem messtechnisch voll ausgerüsteten TECHNIKUM umgesetzt. Mit einer umfangreichen Analyse der Messdaten und numerischen Simulationen wird die Übertragung des Konzeptes auf weitere Standorte ermöglicht.

1 Einleitung

Werden Tausalze eingesetzt, um Verkehrswege eis- und schneefrei zu halten, bleibt Salz mit nachteiligen Auswirkungen für Flora und Fauna in der Umwelt zurück. Auftausalze begünstigen die Korrosion von Fahrzeugen und konstruktiven Bauteilen aus Stahl und Stahlbeton. Eine Möglichkeit, Straßen und Gehwege salzfrei zu räumen, stellt die Temperierung der Oberflächen dar. Der Einsatz von Wärmeübertragern in Verkehrswegen und Infrastrukturfächern unter Verwendung von Geothermie wird bereits in Kleinanwendungen (Herrmann & Koch 2017), aber auch im Zusammenhang mit Infrastrukturprojekten (Feldmann et al. 2012) erprobt. Die Beaufschlagung der Wärmeübertrager mit Tunneldrainagewasser in direkter und passiver Betriebsweise stellt eine Fortentwicklung dieser Technologie dar. Direkte, passive Nutzung bedeutet, dass das Bergwasser ohne einen wärmepumpeninduzierten Temperaturhub direkt als Wärmeträgermedium verwendet wird, womit auf Wärmepumpen sowie zusätzliche Wärmetauscher verzichtet werden kann; hierdurch wird die Effizienz solcher Anlagen deutlich gesteigert. Ferner kann in der sommerlichen Nutzung die Temperatur des Fahrbahnaufbaus abgesenkt und hierdurch Spurrillenbildung vorgebeugt werden. Am Nordportal des Grenztunnels Füssen wurde dieses Verfahren erstmals umgesetzt und messtechnisch ausgerüstet. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV), vertreten durch

die Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), beauftragten Forschungsprojektes „Erprobung einer geothermischen Bergwassernutzung am Grenztunnel Füssen“ (FE 15.0656/ 2018/ERB), soll eine Implementierungshilfe für Betreiber und Anwender zum Einsatz von direkten, passiven Freiflächenheizungen zur Schnee- und Eisfreihaltung von Fahrbahnoberflächen entwickelt werden. Diese Implementierungshilfe soll Empfehlungen und Hinweise zur Planung, der Bemessung und dem Betrieb von direkten, passiven geothermischen Flächenheizungen mittels Tunneldrainagewasser enthalten. Als Grundlage hierfür soll das Verhalten des TECHNIKUMS im saisonalen Betrieb und für spezifische Testszenarien messtechnisch erfasst werden. Die Messdaten werden zur Validierung des entwickelten thermohydraulisch gekoppelten numerischen Simulationsmodells herangezogen, welches dann zur Durchführung von Parameterstudien verwendet wird. Die Parameterstudien ermöglichen es, das entwickelte Konzeptes auf von Füssen abweichende Standorte zu übertragen. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in eine selbstständig operierende Anlagensteuerung eingepflegt, die lokal gemessene Wetterdaten und das Frühwarnsystem (SWIS) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) berücksichtigt, um die Eis- und Schneefreihaltung der Flächen zu gewährleisten.



2 Tunnelgeothermie

Tunnelbauwerke besitzen große erd- und tunnelluftberührte Flächen. Aus dem in Deutschland wirkenden geothermischen Gradienten von 3 K je 100 m Tiefe (Bauer et al. 2018) und der thermischen Energie, die die Tunnelluft zusätzlich im konvektiven Wärmeübergang an die Tunnelschale übergibt (Buhmann 2019), ergibt sich das thermische Potential von Tunnelbauwerken. Die thermische Energie von Tunnelbauwerken kann mit dem hydrogeothermischen und dem absorbertechnologischen Verfahren genutzt werden.

Bei absorbertechnologischen Anwendungen wird der Primärkreislauf durch in der Tunnelschale verlegte Absorberleitungen (z. B. mäandrierend angeordnete Absorberrohre) gebildet.

Hydrothermische Verfahren nutzen hingegen die thermische Energie des aus der Tunnel drainage austretenden Bergwassers, welches nach der Energieextraktion in eine Vorflut geleitet wird, weshalb es als offenes System bezeichnet wird. Die durch das hydrogeothermische Verfahren extrahierte thermische Energie ist ein Nebenprodukt der aus tunnelstatistischer Sicht erforderlichen Drainage zum Abbau des auf die Tunnelschale wirkenden Wasserdrucks (Buhmann 2019). Dieser Umstand bietet den Vorteil, dass das hydrogeothermische Verfahren nachträglich bei Bestandstunneln installiert werden kann. In Abhängigkeit der Überdeckung eines Tunnels besitzt das Bergwasser oft eine über das Jahr hin weitgehend konstant hohe Temperatur, die für alpine Basistunnel in der Größenordnung von 24°C (Rybach 2015), aber auch deutlich darüber, wie z. B. beim Gotthard Basistunnel mit 27°C (Simoni 2013) liegen kann. Die Verwendung der thermischen Energie variiert je nach lokaler vorhandener Verwertungsmöglichkeiten, sodass abgesehen von der Fahrbahntemperierung die thermische Energie des Bergwassers u. a. auch zur Beheizung von Wohnhäusern und Aquakulturen verwendet wird.

3 Grenztunnel Füssen

In einem weiteren vom BMDV, vertreten durch die BAST, beauftragtem Forschungsprojekt (Moormann & Buhmann 2017) wurde festgestellt, dass sich das Nordportal des Grenztunnels Füssen (Bayern) für eine Erprobung der Temperierung von Freiflächen mittels des direkten, passiven hydrogeothermischen Verfahrens besonders eignet. Hierfür wurden die Temperatur und Schüttung des Drainagewassers über ein Jahr in den Ulmen gemessen. Die gemessenen Wassertemperaturen lagen zwischen +8,3°C und +10,5°C, die geringste Schüttung betrug 1 l/s. In der VDI 4640 werden Grenzttemperaturen zur Übergabe von Wasser in die Vorflut zu 5°C bzw. 20°C angegeben. Bei Anwendung dieser Grenzwerte ergab sich gemäß (1) rechnerisch ein minimal zuführbarer Wärmestrom für den Heizfall von 152 kW, während der minimal abführbare Wärmestrom für den Kühlfall zu 438 kW ermittelt wurde.

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

\dot{Q}	Wärmestrom [W]
\dot{V}	Drainageschüttung [m ³ /h]
$\rho_w \cdot c_{p,w}$	volumetrische spezifische Wärmekapazität des Wassers [kJ/(m ³ K)]
$\Delta\vartheta$	Temperaturspreizung des Wassers infolge Energieextraktion [K]

Neben thermischen Untersuchungen wurden auch hydrochemische und hydraulische Untersuchungen durchgeführt, die ebenfalls die Eignung des Nordportals zur Freiflächentemperierung bestätigen. Laut Richter (2009) reichen 400 W/m² zur Eis und Schneefreihaltung von Fahrbahnoberflächen aus, d. h. bei entsprechender Installation könnte rechnerisch für 40 Felder mit einer Fläche von 9 m² die zur Schnee- und Eisfreihaltung notwendige Wärmestromdichte von 400 W/m² bereitgestellt werden.

3.1 Entwurf

Die am Nordportal des Grenztunnel Füssen gelegene Freifläche der Autobahnmeisterei wurde genutzt, um ein TECHNIKUM mit 9 quadratischen Testflächen mit Seitenlängen von 3 m zu erstellen. Der Fahrbahnaufbau besteht bei sechs Freiflächen aus Asphalt und bei drei Freiflächen aus Beton (Abbildung 3-1). Die bifilar verlegten Rohrkonfigurationen bestehen entweder aus Kupfer oder Kunststoff und unterscheiden sich in den Tiefenlagen und Schenkkelabständen (Abbildung 3-2 und 3-3). Das Bergwasser wird in einem Tank gesammelt und mittels einer Umwälzpumpe über eine Zulaufleitung zu den Freiflächen geführt. Nachdem die Freiflächen durchströmt wurden, fließt das Bergwasser über einen Rücklauf in eine nachgeordnete Vorflut. In den Zulauf- und Rücklaufleitungen der einzelnen Felder sind Temperatursensoren angebracht, in der Zulaufleitung zusätzlich noch ein Durchflussmesser.

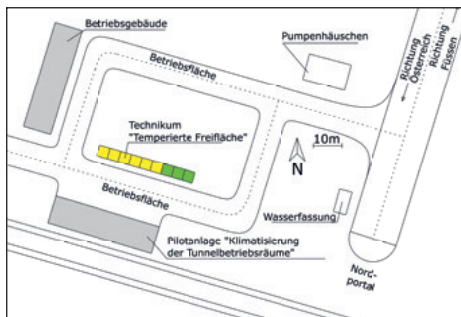


Abbildung 3-1: TECHNIKUM Füssen: gelb markierte Flächen mit Fahrbahnaufbau aus Asphalt, grün markierte Flächen mit Aufbau aus Beton.

Mit Gleichung (1) kann hieraus für jedes einzelne Feld die aus dem Bergwasser entzogene bzw. zugeführte Energie ermittelt werden.

In Feldmitte und am Rand jedes Feldes wurden zusätzlich noch Sensorebenen oberhalb und unterhalb der Rohrkonfigurationen in den Fahrbahnaufbau integriert. Die Sensorebenen bestehen aus zwei Temperatursensoren, die in einem vertikalen Abstand von 4 cm übereinander angeordnet wurden. Insgesamt sind pro Feld 8 Temperatursensoren verbaut, mit welchen die im Fahrbahnaufbau wirkenden Wärmeströme ermittelt werden können (Abbildung 4-5).

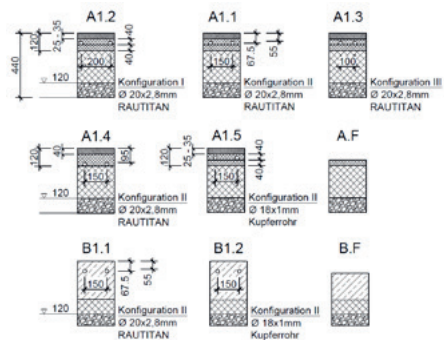


Abbildung 3-2: Realisierte Fahrbahnaufbauten

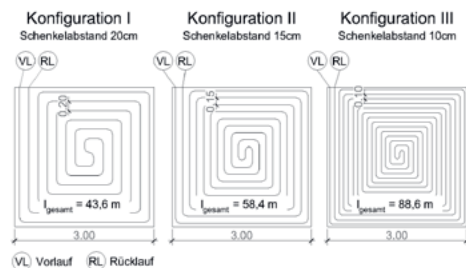


Abbildung 3-3: Verbaute Rohrleitungskonfigurationen (TECHNIKUM Füssen)

4 Anlagenbetrieb

Das Ziel der Anlagensteuerung ist es, die Freiflächen eis- und schneefrei zu halten. Bei einem direkten, passiven Betrieb der Anlage wird auf eine Wärmepumpe gänzlich verzichtet, sodass die Temperatur des Bergwassers unverändert bleibt. Einzig der Volumenstrom kann über die Pumpensteuerung angepasst werden. In Abhängigkeit des Volumensstroms stellt sich in den Rohrregistern eine laminare oder turbulente Durchströmung ein. Der dimensionslose Wärmeübergangskoeffizient (Nusseltzahl) des strömenden Wassers zur Umgebung nimmt im laminaren Bereich mit Anstieg der Durchströmung leicht zu, beim Übergang zur turbulenten Durchströmung steigt dieser jedoch sprunghaft an (von Böckh & Wetzel 2014).

Zur Bemessung und Auslegung der Anlage müssen alle auf die Freiflächen wirkenden und nicht regulierbaren Wärmeströme ermittelt und quantifiziert werden. Auf Basis dieser Werte kann mittels der an der



Geländeoberkante gebildeten Energiebilanz die zur Eis- und Schneefreihaltung erforderliche Wärmestromdichte \dot{q}_{zu} ermittelt werden. Die Energiebilanz setzt sich aus allen an der Straßenoberfläche wirkenden Wärmeströmen (Abbildung 4-1) wie folgt zusammen:

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

\dot{q}_{zu} Wärmestrom aus Bergwasser

\dot{q}_{KW} kurzwelliger Wärmestrom

\dot{q}_{LW} langwelliger Wärmestrom

\dot{q}_{konv} konvektiver Wärmestrom

\dot{q}_{lat} latenter Wärmestrom

\dot{q}_{regen} regeninduzierter Wärmestrom

\dot{q}_s Schneeschmelze

\dot{q}_{GEO} geothermischer Tiefenstrom

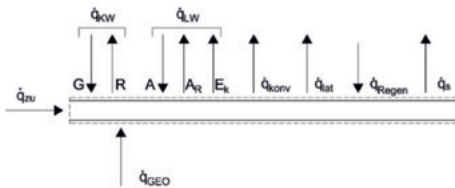


Abbildung 4-1: Energiebilanz einer Freiflächentemperatur

Zu allen genannten Wärmeströmen gibt es, sofern alle notwendigen Daten vorliegen, analytische Berechnungsmöglichkeiten. Datenerfassung und -übertragung erfolgen über einen Fernzugriff. Ferner wurde auch eine Wetterstation, welche Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, Niederschlagsmenge und -intensität misst, installiert. Zur visuellen Kontrolle der Anlage wurde eine Kamera angebracht, auf welche ebenfalls der Fernzugriff möglich ist.

4.1 Variation der Strömungszustände

Im Rahmen der Testszenarien wurde u.a. die Art der Durchströmung der Absorber variiert. Maßgebendes Kriterium hierbei ist die dimensionslose Reynoldszahl (Bauer et al. 2018):

$$Re = vd/\nu \quad (3)$$

v Fließgeschwindigkeit des Bergwassers [m/s]

d Rohrdurchmesser [m]

ν Kinematische Viskosität [m²/s]

Die Strömungsgeschwindigkeit des Bergwassers kann über die Leistungsregelung der Umwälzpumpe eingestellt werden. Die Werte des Rohrdurchmessers bzw. der kinematischen Viskosität sind konstant.

4.1.1 Laminare Durchströmung

Eine laminare Durchströmung stellt sich bei Rohrströmungen bis zu einer Reynoldszahl von $Re \leq 2300$ ein. Es ist bei diesem Szenario (Abbildung 4-2) eine deutliche Abhängigkeit der im Fahrbahnaufbau gemessenen Temperaturen von der Außentemperatur ersichtlich.

4.1.2 Turbulente Durchströmung

Ab einer Reynoldszahl von 3000 ist von einer rein turbulenten Durchströmung in den Rohrkonfigurationen auszugehen. In Abbildung 4-3 wird offensichtlich, dass die Temperaturen des Fahrbahnaufbaus nicht unmittelbar von der Temperatur der Außentemperatur, sondern eher von der Temperatur des Bergwassers beeinflusst werden.

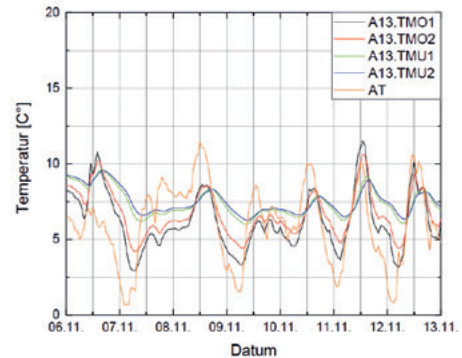


Abbildung 4-2: Laminare Durchströmung der Rohrkonfigurationen des Testfelds A1.3. (Asphaltaufbau, Kunststoffrohre), „AT = Außentemperatur“

Dieser Effekt lässt sich mit dem bereits beschriebenen deutlichen Anstieg des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Bergwasser und Rohr beim Übergang in eine turbulente Durchströmung erklären. Um eine möglichst effektive Flächenheizung zu realisieren, wurde daher bei der Auslegung der Anlagensteuerung ausschließlich turbulente Durchströmungsraten berücksichtigt.

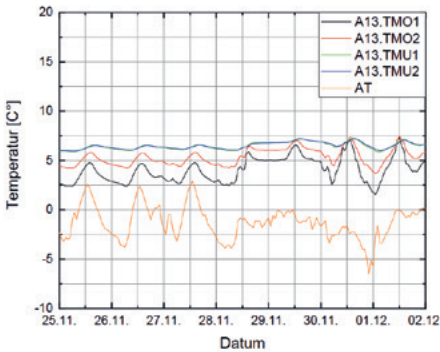


Abbildung 4-3: Turbulente Durchströmung der Rohrkonfigurationen des Testfeldes A1.3.

4.2 Witterungsabhängige Testszenarien

Die Aktivierungszeit ist bei der Anlagensteuerung elementar, d. h. es gilt zu klären, mit welchem zeitlichen Vorlauf die Anlage in Betrieb gehen muss, um Schnee- bzw. Glättebildung auf der Fahrbahnoberfläche und im Sommer extrem hohen Fahrbahnoberflächentemperaturen vorzubeugen. Hierfür wurden unterschiedliche Testszenarien untersucht.

4.2.1 Schneefallszenario

Zur Auslegung der Anlagensteuerung ist die Kenntnis der Schmelzgeschwindigkeit auf den jeweiligen Feldern elementar, weshalb ein Szenario konzipiert wurde, mit dem die Schmelzgeschwindigkeiten der Freiflächen untersucht wurde.

In der Nacht vom 10.02. auf den 11.02.2021 wurde vom DWD starker Schneefall vorhergesagt. Zusätzlich zu den ohnehin gemessenen Daten wurde in diesem Zeitraum die Dichte, Intensität und Temperatur des Schnees gemessen. Die Anlage

war zu Beginn des Testszenarios bereits in Betrieb. Die Temperatur der unterschiedlichen Fahrbahnaufbauten zu Beginn des Szenarios ist in Abbildung 4-5 dargestellt. Der Abbildung 4-5 ist die Anordnung der Temperatursensoren zu entnehmen, zwei liegen in Feldmitte oberhalb der Rohrregister und zwei weitere in Feldmitte unterhalb der Rohrregister. Die Rohrregister selbst sind in 67,5 mm Tiefe verlegt. Der bergwasserinduzierte Wärmeeintrag ist auf Höhe der Rohrregister offensichtlich. Am 10.02.2021 wurde die Anlage gegen 20:00 Uhr ausgeschaltet. Am 11.02.2021 wurde die Anlage gegen 9:00 Uhr wieder in Betrieb genommen, wobei sich auf den Freiflächen über Nacht eine ca. 10 cm hohe Schneedecke gebildet hatte.



Abbildung 4-4: Testfeld A1.5. während des Auftauprozesses

Nach Inbetriebnahme der Flächentemperierung war nach ca. 2 Stunden bereits das erste Feld B1.2 (Betonaufbau mit Kupferleitungen) gänzlich schneefrei und eisfrei, es folgten A1.5 (Asphaltaufbau mit Kupferleitungen; Abbildung 4-4 zeigt den Abschmelzvorgang) und danach B1.1 (Betonaufbau und Kunststoffleitungen). Es ist zu erkennen, dass der Versuchsaufbau in Feld B1.2 am effizientesten arbeitet. Parallel wurde die Schneedichte in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen (Abbildung 4-6). Es ist deutlich zu sehen, dass mit abnehmender Außentemperatur auch die Schneedichte abnimmt. Eine zusätzlich durchgeführte Temperaturmessung an einer Referenzfläche ergab bei einer 10 cm hohen Schneedecke eine Bodentemperatur von $-0,3^{\circ}\text{C}$, während die Temperatur an der Schneeoberfläche $-8,5^{\circ}\text{C}$ betrug, so dass sich ein Temperaturgradient von $8,2\text{ K}$ über eine Schneehöhe von 10 cm ergab.

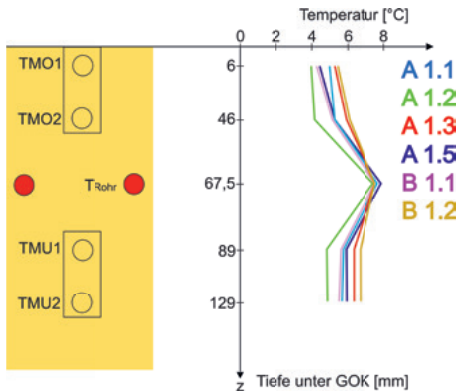


Abbildung 4-5: Temperaturverlauf der verschiedenen Fahrbahnaufbauten (siehe Abbildung 3-2) am 10.02.2021 um 12:00 Uhr während Schneefall, bei 2°C Außentemperatur.

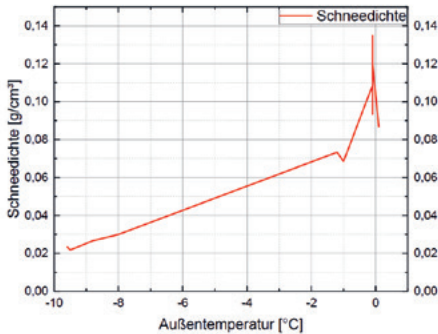


Abbildung 4-6: Schneedicke in Abhängigkeit der Außentemperatur.

Diese Messergebnisse weisen damit nach, dass mit abnehmender Außentemperatur die Dichte des Schnees abnimmt, wodurch die wärmedämmende Wirkung steigt; in der Folge ist umso mehr thermische Energie notwendig, um diesen „leichteren“ Schnee abzuschmelzen. Für die Steuerung der Anlage bedeutet dies, dass die von den Sensoren im Fahrbahnaufbau gemessenen Temperaturen trotz geschlossener Schneedecke an der Geländeoberkante positiv sein können. Die Steuerung der Anlage kann folglich nicht allein mit gemessenen „Ist-Daten“ erfolgen, vielmehr ist die Berücksichtigung von Wetterprognosen zwingend nötig sowie eine entsprechende situative Anpassung der Durchströmungsrate als maßgebende Steuerungsgröße.

4.2.2 Eis- und Glätteszenario

Um die Trägheit bzw. Reaktionszeit der Anlage zu erproben, wurde ein Szenario betrachtet, bei dem die Anlage über längere Zeit außer Betrieb genommen wurde, bevor die Anlage dann bei der Ankündigung von Glätte mit adäquater Vorlaufzeit aktiviert wurde. Für den 17.03.2021 um 20:00 Uhr meldete die Straßenwettervorhersage SWIS des Deutschen Wetterdienstes (DWD) Glätte. Entgegen der Wetterprognose setzte zusätzlich noch Schneefall ein. Um 17:30 Uhr, d. h. 2,5 Stunden vor der gemeldeten Glättebildung wurde die Anlage mit einer Gesamtdurchströmung von 1,5 l/s in Betrieb genommen. In Abbildung 4-7 ist zu erkennen wie die Temperatur des Fahrbahnaufbaus des Testfeldes A1.3 mit Inbetriebnahme der Anlage wärmer wird und sich von der Außentemperatur („AT“) entkoppelt. Die Temperatur des Fahrbahnaufbaus nimmt mit Sonnenaufgang deutlich zu (in der oberen Lage fast 10°C), obwohl die Außentemperatur nur etwa max. 3°C warm wird. Die Ursache liegt im merklichen Einfluss der langwelligen Sonnenstrahlung auf den Fahrbahnaufbau.

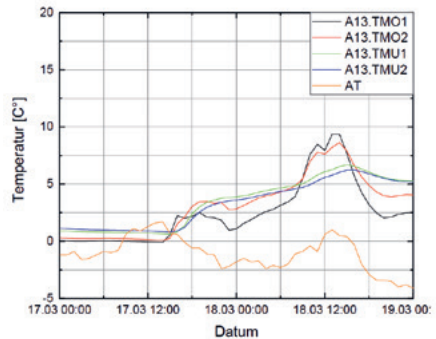


Abbildung 4-7: Temperatur des Fahrbahnaufbaus bei Durchführung eines "Kaltstarts".

In Abbildung 4-8 ist im Vergleich zu Abbildung 4-5 ein größerer Temperaturgradient zwischen Rohrleitungen und Fahrbahnoberfläche zu erkennen, der darauf zurückzuführen ist, dass bei der in Abbildung 4-8 dargestellten Situation, die Anlage wie erläutert zuvor nicht in Betrieb war, wodurch die Temperatur

des Fahrbahnaufbaus niedriger war als in Abbildung 4-5. Ferner ist ebenfalls zu erkennen, dass in den Testfeldern B1.2 und A1.5 (beide Kupferleitungen) die höchste Oberflächentemperaturen erreicht werden.

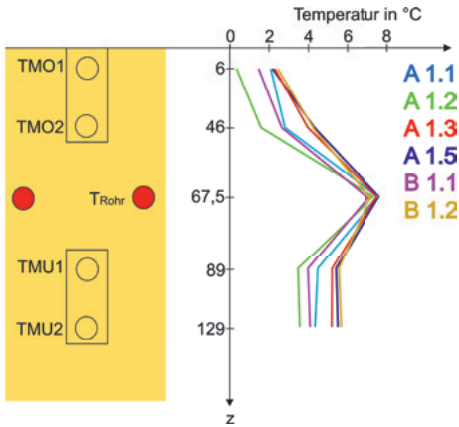


Abbildung 4-8: Temperaturverlauf der unterschiedlichen Fahrbahnaufbauten (siehe Abbildung 3-2) nach Durchführung eines "Kaltstarts" am 18.03.2021 um 23:00 Uhr.

4.2.3 Hitzeszenario

Der Sommer 2021 wurde genutzt, um den Einfluss der Flächenheizung zur Kühlung des Fahrbahnaufbaus zu untersuchen. In Abbildung 4-9 ist der Temperaturverlauf eines aus Asphalt bestehenden Testfeldes ohne Durchströmung dargestellt. Die Temperatur ist in diesem Feld stets höher als die Außentemperatur. Die Ursache liegt in dem radiativen Wärmestrom, welcher aufgrund des hohen Emissionsgrad des Asphalts ($\epsilon_A = 0,97$) sehr groß ist (von Böckh & Wetzel 2014).

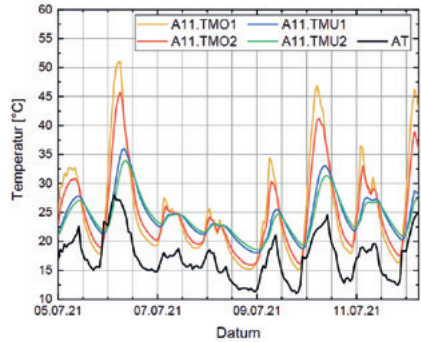


Abbildung 4-9: Temperaturverlauf eines aus Asphalt bestehenden Fahrbahnaufbaus ohne Durchströmung

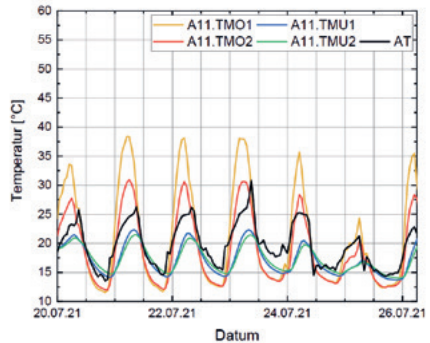


Abbildung 4-10: Temperaturverlauf eines Asphaltfeldes bei aktiver Durchströmung

In Abbildung 4-10 ist dasselbe Asphaltfeld bei durchströmten Rohrregistern dargestellt, die gemessene Außentemperatur ist hierbei sogar höher als in Abbildung 4-9. Die im Fahrbahnaufbau gemessenen Temperaturen sind hier bei durchströmten Rohren um 10 K geringer, als bei nicht durchströmten Rohren. Dieser Zusammenhang zeigt, dass durch eine direkte, passive Kühlung von Asphaltflächen in den Tunnelportallbereichen das Risiko von Spurrillenbildung deutlich reduziert werden kann.

5 Numerische Untersuchungen

Um die das Verhalten der Freiflächenheizung maßgebend beeinflussenden Parameter analysieren und einordnen zu können, wurden numerische Simulationen mit einem gekoppelten hydraulisch-thermischen Modell durchgeführt. Das Modell simuliert das Verhalten der Freiflächen während der Testszenarien und soll einen Beitrag leisten, um die in der Wärmebilanz gemäß Gleichung (2) nicht oder nur schwer durch Messungen ermittelbaren Wärmeströme (z. B., kurzwellige Strahlung) zu identifizieren. Das Modell, welches mit der Simulationssoftware Comsol erstellt wurde (siehe Abbildung 5-2), besitzt eine Grundfläche von 3 m x 3 m und eine Tiefe von 1 m. Die Materialeigenschaften des Aufbaus und der Rohre entsprechen den in Abbildung 3-2 dargestellten Fahrbahnkonfigurationen. Die Validierung der Simulation erfolgt in Perioden in denen die äußeren atmosphärischen Randbedingungen möglichst präzise bestimmbar sind. In dem folgenden Fall wurde eine turbulente Durchströmung im November 2020 gewählt. Die simulierte Durchströmungsrate entspricht der in diesem Zeitraum gemessenen Durchströmung.

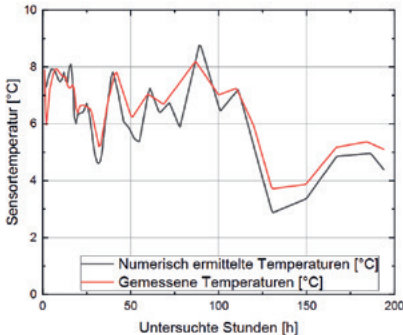


Abbildung 5-1: Vergleich numerisch ermittelte Temperaturen mit gemessenen Temperaturen beim Testfeld B1.2 in der obersten Sensorlage (TMO1).

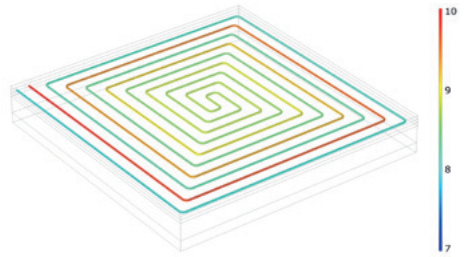


Abbildung 5-2: Numerisches Simulationsmodell

Aufgrund der Lage des TECHNIKUMS hinter einem Bergrücken ist ab Ende Oktober keine direkte Sonneneinstrahlung auf die Freiflächen zu erwarten, d.h. der Wärmestrom aus kurzwelliger Strahlung kann ignoriert werden. Ferner wurde darauf geachtet, dass in der gewählten Zeitperiode kein Niederschlag (Regen, Schnee) auftrat. Die weiteren in Gleichung (2) aufgeführten Wärmeströme wurden mittels analytischer Formeln, welche detailliert in (Buhmann 2019) aufgeführt sind ermittelt und als thermische Randbedingung in das Modell eingefügt.

Um die numerisch ermittelten Temperaturwerte anhand der gemessenen Temperaturdaten zu überprüfen, wurden die Temperaturen, welche in dem Fahrbahnaufbau an denen in Abbildung 4-5 aufgezeigten Temperatursensoren gemessen wurden, mit den numerisch ermittelten Daten verglichen (siehe Abbildung 5-1). In diesem Fall wurden die Daten des obersten Temperatursensors des Testfeldes B1.2 untersucht. Es zeigt sich, dass die numerisch ermittelten und gemessenen Daten gut übereinstimmen. Dasselbe gilt für die weiteren Felder, die in vergleichbarer Form simuliert wurden. Anhand des validierten numerischen Modells werden aktuell Parameterstudien durchgeführt, welche dann zur Untersuchung der maßgeblich die Freiflächentemperatur beeinflussenden Parameter verwendet werden.

6 Zusammenfassung

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Messungen an dem TECHNIKUM belegen, dass sich das innovative Konzept der direkten,

passiven Freilächentemperierung zur Schnee- und Eisfreihaltung von Verkehrsflächen an Tunnelportalen eignet. Neben einer Eis- und Schneefreihaltung im Winter kann mit einer Kühlung im Sommer die Lebensdauer der Verkehrsflächen positiv beeinflusst werden. Als günstiger Nebeneffekt können durch die Reduktion der Temperatur des Bergwassers die vorgeschriebenen Grenztemperaturen bei der Einleitung in die Vorflut eingehalten werden. Aus dem bisherigen Forschungsstand lässt sich ableiten, dass die Kombination aus Betonfahrbahn und Rohrregistern aus Kupferrohren mit flacher Verlegetiefe am effektivsten die thermische Energie des Bergwassers in Richtung der Fahrbahnoberfläche transportiert. Nach der Aktivierung dauert es ca. 5 bis 6 Stunden, bis die Fahrbahnoberfläche warm genug ist, um die Flächen bei einem Schneefall mittlerer Intensität eis- und schneefrei zu halten, d.h. um den fallenden Schnee kontinuierlich abzuschmelzen. Auch wurde erkannt, dass das lokal gemessene Wetter nicht immer mit der Wetterprognose übereinstimmt, aber auch dass nicht ausschließlich die lokal gemessenen Temperaturwerte zur Bestimmung des Straßenzustandes herangezogen werden dürfen. Bei der Programmierung der automatischen Steuerung der Anlage mittels eines mit 'Python' programmierten Scripts wurden daher die Wetterprognosen, als auch die lokal gemessenen Klimadaten integriert. Die Fernsteuerung wurde im Winter 2021/22 für den Betrieb der Anlage eingesetzt. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Flächen durch die Integration der Wetterprognosen in die Steuerung durchgehend eisund schneefrei gehalten werden konnten. Die derzeit in Ausarbeitung befindliche Implementierungshilfe zum Einsatz von direkten, passiven Freilächeneheizungen zur Schnee- und Eisfreihaltung von Fahrbahnoberflächen soll die Integration dieses nachhaltigen Konzeptes erleichtern. Die Implementierungshilfe wird zu diesem Zweck Empfehlungen und Hinweise zur Planung, der Bemessung und dem Betrieb von direkten, passiven geothermischen Flächenheizungen mittels Tunnel-drainagewasser enthalten.

Literaturverzeichnis

- Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T. (2018). *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*. Berlin: Springer Spektrum.
- Buhmann, P. (2019). *Energetisches Potential geschlossener Tunnelgeothermiesysteme*. Stuttgart: Mitteilungen des Instituts für Geotechnik der Universität Stuttgart, Heft 73
- Feldmann, M., Döring, B., Hellberg, J., Kuhnhenne, M., Pak, D. (2012): *Vermeidung von Glätteisbildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: Brücken- und Ingenieurbau B 87, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven.
- Herrmann, V., Koch, S. (2017): *Schneefreihaltung und Eisfreihaltung einer Grundstückszufahrt: Geothermie in Kombination mit Walzasphaltschichten*. Bbr – Fachmagazin für Brunnen und Leitungsbau, 09, 54-57.
- Moormann, C., Buhmann, P. (2017). *Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau B141, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven.
- Oeser, M., Carreño, N., Renken, L., Kemper, D., Kneer, R., Gouya, S., zu Dohna, J., Steins, C. (2019). *Temperierte Straße – Untersuchungen zur Realisation eines Demonstrators auf dem duraBAST*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: Straßenbau S 132, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven
- Richter, T. (2009). *Verwendung von Erdwärme zur Schnee- und Eisfreihaltung von Freiflächen*. Hannover: Berichte des Institutes für Bauphysik der Leibniz Universität Hannover
- Rybach, L. (2015). *Innovative energy-related use of shallow and deep groundwaters – Examples from China and Switzerland*. Central European Geology 57, 100-113



Simoni, R. (2013). *Gotthard-Basistunnel - Der längste Tunnel der Welt*. Beton- und Stahlbetonbau Spezial 2013 – Europas längster Tunnel. DOI: 10.1002/best.201380002

VDI 4640 Blatt 2 (2010). *Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH

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