



**zentrum für energieforschung
stuttgart**



Regelungsstrategien zum Betrieb von Systemen zu Eis- und Schneefreihaltung von Freiflächen unter Nutzung von Tunneldrainagewasser

P. Buhmann, C. Moormann; IGS, Universität Stuttgart

H. Lens; IFK, Universität Stuttgart

August 2019

Inhalt

1	Vorbemerkungen	2
2	Grundlagenermittlung	4
2.1	Systeme zur Eis- und Schneefreihaltung.....	4
2.1.1	Besprühung der Freifläche.....	5
2.1.2	Anordnung von Rohrleitungen in der Freifläche ohne Dämmschicht ..	5
2.1.3	Anordnung von Rohrleitungen in der Freifläche mit Dämmschicht.....	6
2.1.4	Durchströmung poröser Zwischenschichten	6
2.2	Energiebilanz an der Fahrflächenoberkante.....	7
2.3	Klimadaten am Standort Füssen.....	13
2.4	Prognoseszenarien	15
3	Numerisches Simulationsmodell	18
3.1	Beschreibung der Wärmetransportvorgänge.....	19
3.2	Beschreibung des Simulationsablaufs.....	20
4	Regelung der Oberflächentemperatur.....	22
4.1	Regelungsaufgabe	23
4.2	Reglerentwurfmodell.....	23
4.3	Regelungskonzept.....	31
5	Fazit und Ausblick.....	40
6	Literatur	41

1 Vorbemerkungen

Straßenbefestigungen werden nicht nur durch Schwerverkehr stark mechanisch beansprucht, sondern erfahren auch durch klimatische Einwirkungen eine deutliche, für die Lebensdauer maßgebliche Beeinflussung. Im Sommer können dabei aufgrund direkter Sonneneinstrahlung Oberflächentemperaturen von bis zu 75°C [1] erreicht werden; an kalten Tagen können die Oberflächentemperaturen weit unter dem Gefrierpunkt liegen, woraus strukturelle Schädigungen des Oberbaus der Verkehrsflächen resultieren können. Der Zeitraum, in dem eine Verkehrsfläche erneuert werden muss, i.e. die Lebenszeit, ist stark von den jahreszeitlichen thermischen Einwirkungen abhängig. Mit einer thermischen Aktivierung, i.e. der Temperierung von Verkehrsflächen in Beton- beziehungsweise Asphaltbauweise im Sinne einer Begrenzung der Extremwerte der Temperaturen, ergeben sich Vorteile hinsichtlich der Dauerhaftigkeit und der Verkehrssicherheit. Durch die Begrenzung von extremen Temperaturen im Sommer wie im Winter kann eine wirtschaftlichere Dimensionierung der Fahrflächenaufbauten erfolgen und Schädigungen durch z.B. Frost-Tauwechsel Beanspruchung können reduziert werden. Der Portalbereich von Straßentunneln stellt eine besondere Herausforderung für den Winterdienst dar, da hier zumeist kleinteilige Betriebsflächen aus Sicherheitsgründen permanent eis- und schneefrei zu halten sind, und dies oft nur durch eine händische Räumung erreicht werden kann.

Das an drainierten Straßentunneln anfallende Bergwasser bietet die Möglichkeit der thermischen Energieextraktion. Diese als „Hydrogeothermisches Verfahren“ bekannte Technologie wird bereits seit den siebziger Jahren umgesetzt, als man sich im Zusammenhang mit der Energiekrise 1973 dazu entschloss, das Drainagewasser des Gotthard-Straßentunnels zur Klimatisierung eines Autobahnwerkhofes zu nutzen [2]. Unter „Hydrogeothermisches Verfahren“ wird grundsätzlich die direkte Nutzung der Energie aus Grund- bzw. Schichtwasser verstanden. Ursprünglich gehen die hydrogeothermischen Verfahren auf die Nutzung von Thermalwässern zurück, die Wasser aus tiefliegenden Grundwasserleitern über Förder- und Schluckbrunnen (Primärkreislauf), an einen Wärmepumpenkreislauf (Sekundärkreislauf) übergeben. Hydrogeothermische Anlagen existieren derzeit vornehmlich in der Schweiz [3]. Aktuell sind in der Schweiz sieben geothermische Anlagen mit einer jährlichen Gesamtwärmeleistung von ca. 5.300 MWh/Jahr in Betrieb, weitere Anlagen sind in Planung.

Im Rahmen einer Vorstudie [4] der Bundesanstalt für Straßenwesen wurden die Drainagewasserschüttungen an 15 Portalen deutscher Straßentunnel hinsichtlich ihres geothermischen Po-

tentials untersucht und bewertet. Unter der Annahme einer für Wärmepumpen üblichen Temperaturspreizung auf der Seite des Primärkreislaufes von 4 K ergab sich für die vier ergiebigsten Tunnelportale die Wärmeleistungen gemäß Abbildung 1.

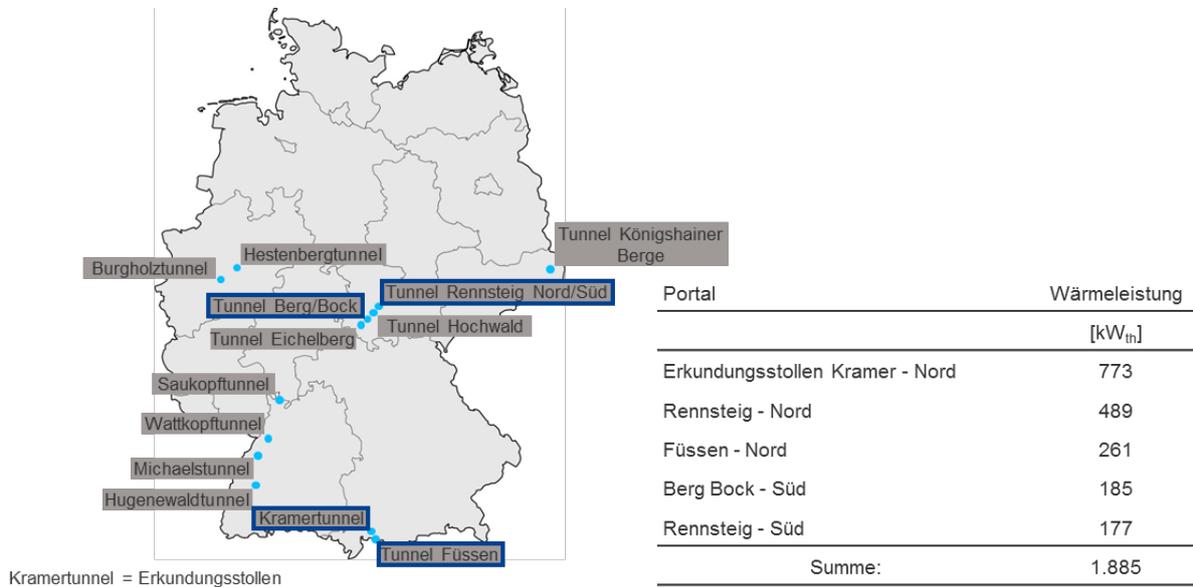


Abbildung 1: Wärmeleistungen der Tunneldrainagewasserschüttungen an ausgesuchten deutschen Straßentunneln

Hierauf aufbauend wurden vom Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart (IGS) Detailuntersuchungen an drei Portalen deutscher Straßentunnel durchgeführt [5], die in der Entwurfsplanung eines Technikums zur Erprobung der Temperierung von Freiflächen auf dem Betriebsgelände des Grenztunnels Füssen (Bayern) mündeten (siehe Abbildung 2).

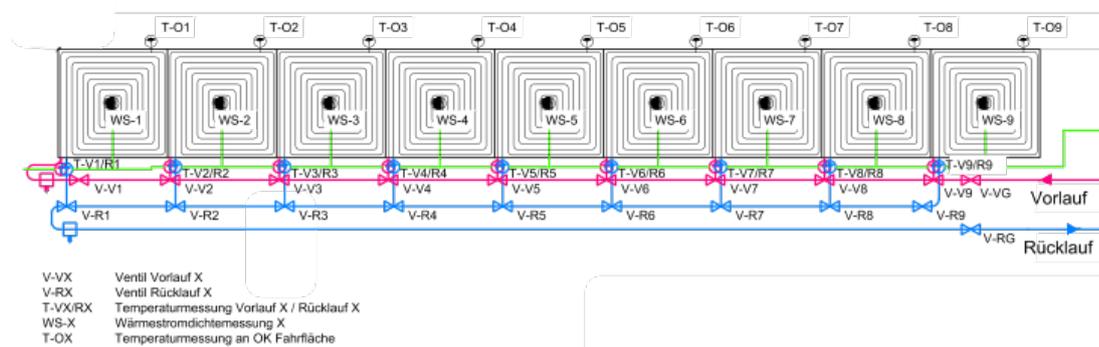


Abbildung 2: Entwurfsplanung für die Testfelder des Technikums "Temperierte Freifläche", hydraulisches Schema und Messtechnik

Für den Technikumsbetrieb sind 9 Testflächen zu je 9 m² geplant, bei denen die Ausbildung des Wärmeübertragers innerhalb des Fahrbahnaufbaus wie auch der Fahrbahnaufbau selber

variiert werden. Neben der Ausführung der Deckschichten in Asphalt und Beton ist auch der Einsatz von thermisch modifizierten Materialien vorgesehen. Die Abbildung 2 zeigt neben dem hydraulischen Anschluss der Testflächen im Tichelmann-System auch die nach dem derzeitigen Planungsstand vorgesehene Messtechnik. Für den Betrieb des Technikums wird eine Betriebsart gewählt, bei der das Tunneldrainagewasser direkt und ohne Temperaturhub durch ein im Fahrflächenaufbau angeordnetes Rohrleitungssystem zirkuliert [6]. Dies reduziert die Herstellungs- und Betriebskosten der Anlage und steigert dadurch ihre Effizienz. Allerdings besteht bei dieser Betriebsart die Gefahr des Auffrierens und damit der Zerstörung der Rohrleitungen und ggf. des Fahrflächenaufbaus.

Für einen störungsfreien und effizienten Betrieb einer Freiflächentemperierung mittels Tunneldrainagewasser sind Regelungskonzepte zu entwickeln, die zum einen die Eis- und Schneefreiheit an der Oberfläche sicherstellen und darüber hinaus ein Auffrieren des Wassers in den Rohrleitungen verhindern. Das Technikum soll vor diesem Hintergrund die erforderlichen Erfahrungen mit der Regelung und dem Betrieb dieser Anlagenart generieren, die dann in weiterer Folge auf eine Anlage im Realmaßstab projiziert werden können. Die Umsetzung des Technikums an Nordportal des Grenztunnels Füssen ist derzeit beim IGS in der Ausführungsplanung.

Die Erarbeitung von Regelungsstrategien zum Betrieb einer Freiflächentemperierung mittels Tunneldrainagewasser berührt die Fachdisziplinen Rohrhydraulik, Wärmübertragung, Bergwasserchemie, Bautechnik (Asphaltbau, Betonbau, Geotechnik), Klimatologie und Regelungstechnik.

2 Grundlagenermittlung

2.1 Systeme zur Eis- und Schneefreihaltung

Die Temperierung von Verkehrsflächen mittels Geothermie wurde bereits in mehreren Forschungsprojekten untersucht [7], wobei weltweit noch wenig Anwendungen existieren. Durch Untersuchungen der BAST in dem Vorhaben „Glättevermeidung durch die Nutzung von Geothermie“ [8] und dem Bericht der BAST „Vermeidung von Glättebildung auf Brücken“ [9] konnte gezeigt werden, dass eine Freiflächentemperierung mittels geothermischer Energie technisch umsetzbar ist. Bei der Ausbildung einer Anlage zur Schnee- und Eisfreihaltung können folgende Verfahren unterschieden werden:

2.1.1 Besprühung der Freifläche

Das Verfahren zur Besprühung von Freiflächen mit Grundwasser wird in Japan seit 1961 angewendet. Anzustrebende Wassertemperaturen zum Einsatz dieser Technologie liegen zwischen 8°C bis 18°C. Die erforderliche Wassermenge je m² freizuhaltende Fläche kann für eine Neuschneemenge von 10 cm pro Tag und eine Temperaturspreizung von 10 K näherungsweise zu 0,1 m³/min = 100 l/min berechnet werden.



Abbildung 3: Shosetsu (Schneesmelze) Leitung [10]

2.1.2 Anordnung von Rohrleitungen in der Freifläche ohne Dämmschicht

Die Anordnung von Rohrregistern im Bereich der Verkehrsfläche ist bis dato das am häufigsten eingesetzte Verfahren zur Fahrbahntemperierung. Zahlreiche Beispiele aus der Baupraxis werden in [9] zitiert und vorgestellt. Die Anordnung einer Dämmung gegen das Erdreich ist bei diesen Konstruktionen nicht erforderlich, da bereits ein nach oben gerichteter Bodenwärmestrom existiert und den Prozess der Eis- und Schneefreihaltung unterstützt. Im Bereich der Temperierung von Fahrflächen bieten mittlerweile eine größere Zahl an Herstellern (REHAU, AQUATHERM, PENTAIR u.a.) entsprechende Systemkomponenten und Rohrleitungen an, die auch für den Einsatz in Asphaltfahrflächen geeignet sind. Hinsichtlich der Einbettung und Fixierung von Rohrleitung in den Asphalt wurden in [9] Untersuchungen zu entsprechenden Materialien und Befestigungsarten vorgenommen. Untersucht wurden die thermische Beständigkeit und Verarbeitbarkeit der Rohrleitungen sowie die Anordnung der Rohrleitungen innerhalb des Fahrflächenaufbaus. Auch die Verbundeigenschaften zwischen Asphaltschicht und Rohrregister konnten in Laborversuchen über 5-Punkt-Biegeversuche nachgewiesen werden. Gemäß [1] ist zur Herstellung von Rohrregistern innerhalb von Asphaltbahnen der Werkstoff PE-

Xa/Al/PE-HD als geeignet einzustufen. Die nachfolgende Abbildung 4 zeigt prinzipielle Schichtaufbauten zur Anordnung der Zirkulationsleitungen.

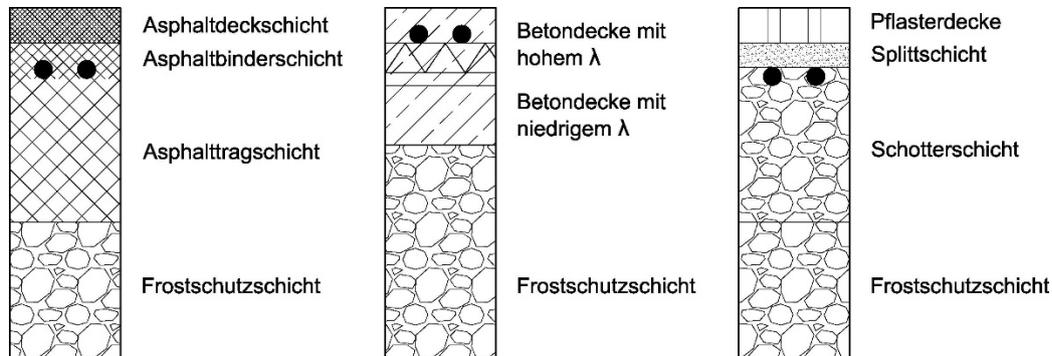


Abbildung 4: Anordnung der Zirkulationsleitungen, Links: Asphaltaufbau, Mitte: Betonfahrbahn, Rechts: Pflasterdecke

2.1.3 Anordnung von Rohrleitungen in der Freifläche mit Dämmschicht

In [11] werden Untersuchungen zu wärmegeprägten Konstruktionen zur Freiflächenbeheizung durchgeführt. Sind z.B. aufgeständerte Konstruktionen wie Bahnsteige eis- und schneefrei zu halten, kann eine entsprechend dimensionierte Wärmedämmung an der Unterseite der Konstruktion die Effektivität des Heizsystems auf das Niveau der erdgleich verlegten Systeme anheben

2.1.4 Durchströmung poröser Zwischenschichten

In [12] werden synthetisch gebundene, offenporige Zwischenschichten zur gezielten Temperierung von Straßen vorgestellt. Diese Art der Ausbildung eines Wärmeübertragers im Bereich der Verkehrsfläche ist Gegenstand der Forschung und wurde bis dato noch nicht im Realmaßstab getestet. Das Konzept der offenporigen Zwischenschichten wurde anhand von dreischichtigen „Sandwich-Probekörpern“ im Labormaßstab geprüft [12]. Hierbei wurden sowohl die Wasserdurchlässigkeit der durchströmten Schicht, die Verformungseigenschaften anhand eines Spurbildungsversuches sowie die thermische Wirksamkeit des Verbundsystems untersucht. Hierbei konnte die grundsätzliche Eignung des Konzeptes zum Einsatz als Wärmeübertrager im Asphaltaufbau nachgewiesen werden. Empfohlen werden nach [12] großmaßstäbliche Versuche sowohl in bautechnischer, als auch wirtschaftlicher Hinsicht. In einem Expertengespräch „Stahlbrückenbau - Lärmgeminderte Brückenbeläge“ [13] wurden Hinweise zum Anschluss offenporiger Asphaltsschichten an die Entwässerung gegeben. Auch existieren bereits Systemlösungen von Entwässerungsrinnenherstellern (z.B. ACO) zur Anbindung von offenporigen Asphalten an ein Entwässerungssystem.

2.2 Energiebilanz an der Fahrflächenoberkante

Die Oberflächentemperatur der Erde wird durch ein Gleichgewicht zwischen der einstrahlenden Sonnenenergie, der Wärmeabstrahlung ins Weltall und dem geothermischen Wärmefluss bestimmt. Das Wärmetransportvermögen des Untergrundes ist maßgebend für dessen Nutzung als Wärmequelle beziehungsweise den Einsatz des Untergrundes als Speichermedium. Mit zunehmender Tiefe steigt die Temperatur im Untergrund an und die Einflüsse aus Sonneneinstrahlung und Wärmeabstrahlung an der Erdoberfläche nehmen ab. Im Bereich der sogenannten oberflächennahen Geothermie werden Tiefen bis 400 m unter der Geländeoberkante erschlossen. Die Temperaturen von Grundwasser und Boden betragen für diesen Tiefenbereich +8°C bis +25°C.

Die zur Eis- und Schneefreihaltung erforderliche Wärmeenergie ist für die Dimensionierung von Freiflächenheizungen für den Spitzenlastfall, d.h. die im jährlichen Verlauf maximal auftretende Energieabgabe, auszulegen. Die Basis der Ermittlung der erforderlichen Wärmestromdichte \dot{q}_{zu} bildet eine Energiebilanz, die im Bereich des einzubauenden Wärmeübertragers (Rohrleitungen im Freiflächenaufbau) aufzustellen ist:

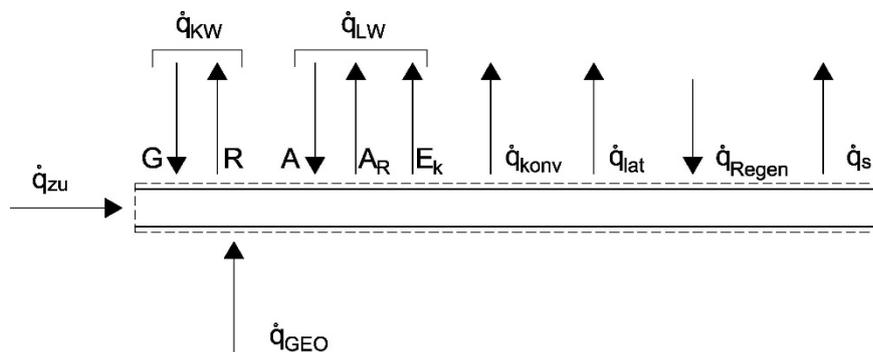


Abbildung 5: Energiebilanz Freiflächenheizung

Die Energiebilanz für den betrachteten Wärmeübertrager wird wie folgt formuliert:

$$\dot{q}_{zu} = \pm \dot{q}_{KW} \pm \dot{q}_{LW} + \dot{q}_{konv} + \dot{q}_{lat} - \dot{q}_{regen} + \dot{q}_s - \dot{q}_{GEO} \quad (1)$$

Geothermischer Tiefenstrom \dot{q}_{GEO}

Als geothermischer Tiefenstrom wird der Wärmestrom aus dem Erdinneren bezeichnet, der das Resultat des Zerfalls von langlebigen Nukliden im Erdmantel ist. Die jährliche Gesamtleistung der Erde beträgt ca. 27,5 Terrawatt, was einer örtlichen Wärmestromdichte von ca.

50 mW/m² entspricht. Aufgrund von Temperaturanomalien wie z.B. Hot Spots oder dergleichen kann dieser Wert lokal erheblich abweichen.

Der Einfluss der Erdwärme ist bei einer Freiflächenheizung gegenüber den anderen an der Energiebilanz beteiligten Wärmeströmen verhältnismäßig gering.

Kurzweiliger Wärmestrom \dot{q}_{KW}

Die Oberflächentemperatur der Sonne beträgt ca. 6000 K. Das ist der Grund, warum die energiereichste Strahlung als für den Menschen sichtbares Licht mit einer Wellenlänge von $\lambda = 0,45 \mu\text{m}$ ausgestrahlt wird. Außerhalb der Erdatmosphäre unterliegt diese solare Einstrahlung nur geringen jahreszeitlichen Schwankungen. Beim Durchgang der Strahlung durch die Atmosphäre erfolgt eine Schwächung der Strahlungsintensität durch Absorptions- und Streuvorgänge. Die auf die Erde auftreffende Globalstrahlung G setzt sich aus der direkten Strahlung I und der diffusen Strahlung D zusammen:

$$G = I + D \quad (2)$$

Die Testreferenzjahre des DWD [14] geben nur die Globalstrahlung an, so dass die direkten und die diffusen Anteile entsprechend der zu betrachtenden Flächen und deren Orientierung zu bestimmen sind.

Bei der Betrachtung von Anlagen zur Eis- und Schneefreihaltung können Wärmeströme infolge kurzweiliger Strahlung bei der Ermittlung der erforderlichen Wärmestromdichte \dot{q}_{zu} auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt werden. Bei der Betrachtung eines worst-case Szenarios zum Zeitpunkt des Betriebs einer Freiflächenheizung muss entweder mit einem bewölkten Himmel gerechnet oder ein Schneefall und Eisbildung in den Nachtstunden betrachtet werden.

Aus diesem Grund wird für die Auslegung des Wärmeübertragers zur Temperierung der Freiflächen auf eine Berücksichtigung der Wärmestromdichte \dot{q}_{KW} auf der sicheren Seite verzichtet.

Langweiliger Wärmestrom \dot{q}_{LW}

Jeder Körper, der eine Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes aufweist, steht mit anderen Körpern in seinem Sichtfeld in einem Strahlungsaustausch. Die Intensität und der Wellenlängenbereich der emittierten Strahlung eines Körpers sind von seiner Oberflächenbeschaffenheit und seiner Oberflächentemperatur abhängig.

Trifft elektromagnetische Strahlung auf einen Körper, so wird diese z.T. absorbiert, teilweise reflektiert und bei transparenten Bauteilen transmittiert. Diese Bauteileigenschaften bestimmen zusammen mit der Bauteiloberflächentemperatur und dem geometrischen Sichtverhältnis der im Strahlungsaustausch stehenden Bauteile den wirkenden Wärmestrom. Mittels der Stefan-Boltzmann-Konstanten σ für einen schwarzen Strahler, dem Emissionsgrad ε , der Oberflächentemperatur T_{surface} , und einer kleinen gegenüber einer unendlich großen Fläche in allgemeiner Form folgt der Wärmestrom zu:

$$\dot{q}_{LW} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{\text{surface}}^4 \quad (3)$$

Die langwellige Strahlungsbilanz bzw. die langwellige Wärmestromdichte \dot{q}_{LW} setzt sich konkret aus der Intensität der atmosphärischen Gegenstrahlung A , der reflektierten atmosphärischen Gegenstrahlung A_R und der Strahlungsflussdichte E_k der gesamten langwelligen Ausstrahlung zusammen:

$$\dot{q}_{LW} = A + A_R + E_k \quad (4)$$

Die atmosphärische Gegenstrahlung A ergibt sich mit einem Emissionsgrad des bedeckten Himmels ε_c zu:

$$A = \varepsilon_c \cdot \sigma \cdot T_{\text{surface}}^4 \quad (5)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_0 + (1 - \varepsilon_0) \cdot \frac{N}{8} \cdot 0,8 \quad (6)$$

Hierbei ist ε_c der Emissionsgrad des nicht bedeckten Himmels und N der Gesamtbedeckungsgrad.

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 = & 0,711 + 0,0056 \cdot \theta_s + 7,3 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_s^2 \\ & + 0,013 \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot t}{24}\right) + 12 \cdot 10^{-5} \cdot (p_x - 1000) \end{aligned} \quad (7)$$

Hierbei ist θ_s die Taupunkttemperatur in °C, t die Zeit am Tag in h und p_x der Luftdruck am Beobachtungsort in hPa.

Die Taupunkttemperatur θ_s ist eine Funktion der Lufttemperatur θ_{Air} und der relativen Luftfeuchtigkeit φ .

$$p_s = 611 \cdot \exp \left[\frac{a + b \cdot \theta_{Air} + c \cdot \theta_{Air}^2 + d \cdot \theta_{Air}^3 + e \cdot \theta_{Air}^4}{\theta_{Air}^3 + e \cdot \theta_{Air}^4} \right] \quad (8)$$

mit:

$$a = 1,91275 \cdot 10^{-4} \quad b = 7,25800 \cdot 10^{-2}$$

$$c = -2,9390 \cdot 10^{-4} \quad d = 9,84100 \cdot 10^{-7}$$

$$e = -1,9200 \cdot 10^{-9}$$

$$\theta_s = a + b \cdot \ln(p_d) + c \cdot \ln(p_d)^2 + d \cdot \ln(p_d)^3 + e \cdot \ln(p_d)^4 \quad (9)$$

mit:

$$a = -63,16113 \quad b = 5,36859$$

$$c = 0,973587 \quad d = -0,0738636$$

$$e = 0,00481832$$

$$p_d = p_s \cdot \varphi$$

$$A_R = (1 - \varepsilon) \cdot A \cdot \sin^2 \left(\frac{\gamma_F}{2} \right) \quad (10)$$

Die Emissionsgrade ε für im Projekt wesentliche Baustoffe und sonstige Oberflächen sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Oberfläche	Referenztemperatur	Emissionsgrad ε
	[°C]	[-]
Beton	25	0,93
Asphalt	20	0,97
Schnee	0	0,94

Tabelle 1: Emissionsgrade

Der Faktor γ_f beschreibt die Neigung der Fläche gegenüber der Horizontalen in [Grad]. Die Ortsbegehungen haben ergeben, dass alle potentiell zu beheizenden Flächen mit vernachlässigbaren Abweichungen als horizontale Flächen berücksichtigt werden können.

$$E_K = \varepsilon_K \cdot \sigma \cdot T_{surface}^4 \quad (11)$$

Hierbei ist ε_K der langwellige Emissionsgrad der zu betrachtenden Erdoberfläche gemäß Tabelle 1.

Konvektiver Wärmestrom \dot{q}_{konv}

Am Übergang der Geländeoberfläche zur Atmosphäre findet Wärmeübertragung infolge Konvektion statt. Die Wärmestromdichte wird über den folgenden Zusammenhang ermittelt:

$$\dot{q}_{konv} = \alpha \cdot (g_{air} - g_{surface}) \quad (12)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient α beschreibt hierbei die Wärmeübertragungsmechanismen in der Grenzschicht zwischen dem überströmten Festkörper (Geländeoberfläche) und dem strömenden Fluid (bewegte Luft). Für den Übergang Schnee/Atmosphäre ergibt sich der Wärmeübergangskoeffizient α_{SA} in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit v_w in 2 m über der Schneefläche zu:

$$\alpha_{SA} = 3,0 + 3,6 \cdot v_w^{0,7} \quad (13)$$

Für den Übergang Asphalt/Atmosphäre ergibt sich der Wärmeübergangskoeffizient α_{AA} abhängig von der Windgeschwindigkeit direkt über der Asphaltfläche zu:

$$\alpha_{AA} = 1,8 + 4,1 \cdot v_w \quad [\text{für } v_w \leq 5,0 \text{ m/s}] \quad (14)$$

Hohe Windgeschwindigkeiten bewirken hohe Verlustwärmeströme. Nach Auswertung der mittleren Windgeschwindigkeiten v_{10} in $z_{10} = 10$ m über Grund für die Portale Rennsteig Nord und Füssen Nord können diese im langjährigen Mittel mit $v_{10} = 3,5$ m/s für den Tunnel Füssen und $v_{10} = 3,7$ m/s für den Tunnel Rennsteig angegeben werden. Um die beschriebenen Korrelationen zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten α verwenden zu können, sind die angegebenen Windgeschwindigkeiten auf die Windgeschwindigkeiten v_w der entsprechenden Höhen z_w über Grund über den folgenden Zusammenhang umzurechnen:

$$v_w = v_{10} \cdot \frac{\log z_w - \log z_0}{\log z_{10} - \log z_0} \quad (15)$$

Auf der Basis einer im Rahmen der Vorplanung durchgeführten Variationsrechnung ist der Wärmeübergangskoeffizient α_{SA} immer geringfügig höher als der Wärmeübergangskoeffizient α_{AA} . Aus diesem Grund wird für den konvektiven Wärmestrom der Wärmeübergang von einer schneebedeckten Fläche zur strömenden Luft berücksichtigt.

Latenter Wärmestrom \dot{q}_{lat}

An einer mit der Umgebungsluft in Kontakt stehenden schneebedeckten Fläche wirken Wärmeströme infolge Verdunstung oder Kondensation. Diese lassen sich mittels der DALTON'schen Verdunstungsformel wie folgt berechnen:

$$\dot{q}_{lat} = \alpha_{SA} \cdot \frac{0,622 \cdot L}{p \cdot c_{p,L}} \cdot (p_d - p_s) \quad (16)$$

mit:

L Umwandlungswärme für Wasser bei 0°C: 2500 kJ/kg

$c_{p,L}$ spezifische Wärmekapazität der Luft: 1,005 kJ/kgK

p_d und p_s

α_{SA}

Eine Verdunstung an der Schneefläche tritt auf, wenn der Partialdampfdruck p_d der Luft kleiner als der Dampfdruck p_s der Schneefläche ist. In diesem Fall ist in der Gesamtbilanz ein zusätzlicher Wärmestrom zu berücksichtigen, der das zur Verfügung stehende geothermische Potential reduziert.

Wärmestrom durch Regenereignis \dot{q}_{Regen}

Der in der Gesamtenergiebilanz eingebrachte Wärmestrom durch Regen \dot{q}_{Regen} kann über den folgenden Zusammenhang ermittelt werden:

$$\dot{q}_{Regen} = i_R \cdot c_w \cdot (\vartheta_R - \vartheta_S) \quad (17)$$

mit:

i_R Regenintensität [mm/h]

c_w spezifische Wärmekapazität des Wassers: 4,186 kJ/kgK

ϑ_R Temperatur des Niederschlags [°C]

ϑ_S Temperatur des Schnees [°C]

Der Einfluss eines Regenereignisses auf das Abschmelzen einer Schneedecke wird häufig überschätzt. Vielmehr erfolgt durch den Niederschlag eine Verdichtung der Schneedecke, nicht jedoch eine Reduzierung der Schneemenge. Auf der sicheren Seite liegend wird der in

der Gesamtbilanz positiv wirkende Wärmestrom durch Regen zur Beurteilung der Eis- und Schneefreihaltung vernachlässigt.

Schmelzenergie \dot{q}_s

Für den Fall, dass sich auf den Betriebsflächen im Bereich der Tunnelportale bereits eine Schneedecke gebildet hat, ist zum Abschmelzen der Schneedecke Schmelzenergie gemäß der nachfolgenden Beziehung aufzubringen:

$$\dot{q}_s = i_s \cdot \rho_s \cdot L_s + m \cdot c_{p,w} \cdot \Delta \vartheta \quad (18)$$

mit:

i_s Schneefallintensität [cm/h]

ρ_s Schneerohdichte [kg/m³]

L_s Umwandlungswärme von Schnee zu Wasser: 335 KJ/kg

m Wasseräquivalent, das bei gegebener Schneefallintensität auf die Umwandlungstemperatur (0°C) erwärmt werden muss [kg/(m²·h)]

$c_{p,w}$ spezifische Wärmekapazität für Wasser bei 0°C: 4210 J/(kg·K)

$\Delta \vartheta$ Temperaturunterschied bezogen auf Schneetemperatur [K]

Die aufzuwendende Schmelzenergie ist in starkem Maße vom Betrieb der Freiflächenheizung abhängig. Wichtig ist in diesem Zusammenhang der Zeitpunkt, an dem die Anlage vorlaufend zum Niederschlagsereignis angefahren wird.

2.3 Klimadaten am Standort Füssen

Die Grundlage zur Ermittlung des Energiebedarfs am Tunnel Füssen sind die Klimadaten der Wetterstation 1550 – Garmisch-Partenkirchen, das ca. 31 km vom Nordportal des Tunnels Füssen entfernt liegt. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde auf folgende Daten dieser Wetterstation zurückgegriffen:

- Minimale Lufttemperatur in 2 m über der Geländeoberkante [°C]
- Relative Luftfeuchtigkeit [%]
- Luftdruck [hPa]
- Bedeckungsgrad [-]
- Windgeschwindigkeit [m/s]

- Niederschlagshöhe [mm]
- Art des Niederschlags [-]

Aus den vorhandenen Messdaten wurden folgende Daten abgeleitet:

- Emmissionsgrad [-]
- Sättigungsdampfdruck [hPa]
- Partialdruck [Pa]

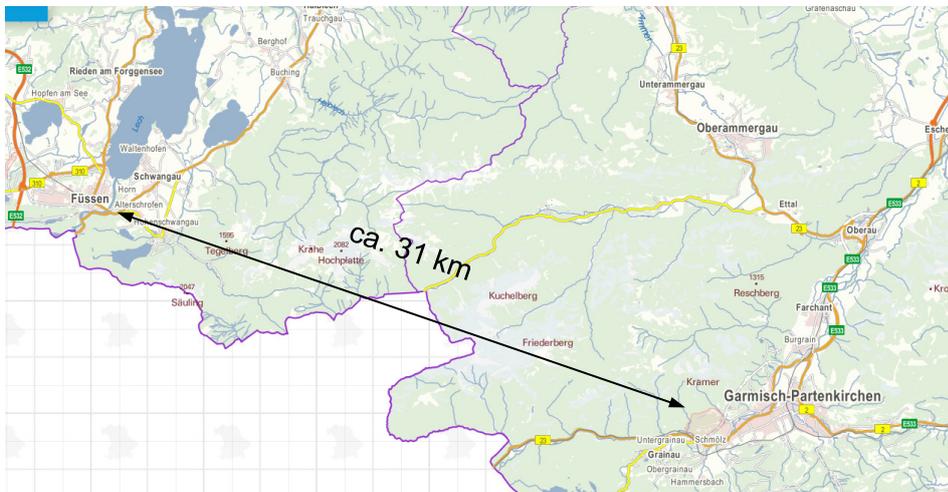


Abbildung 6: Lage Wetterstation 1550 - Garmisch-Partenkirchen [<https://geoportal.bayern.de/bayernatlas>]

Das Diagramm in Abbildung 7 zeigt den ermittelten Heizwärmeenergiebedarf auf der Basis der Gleichung (1).

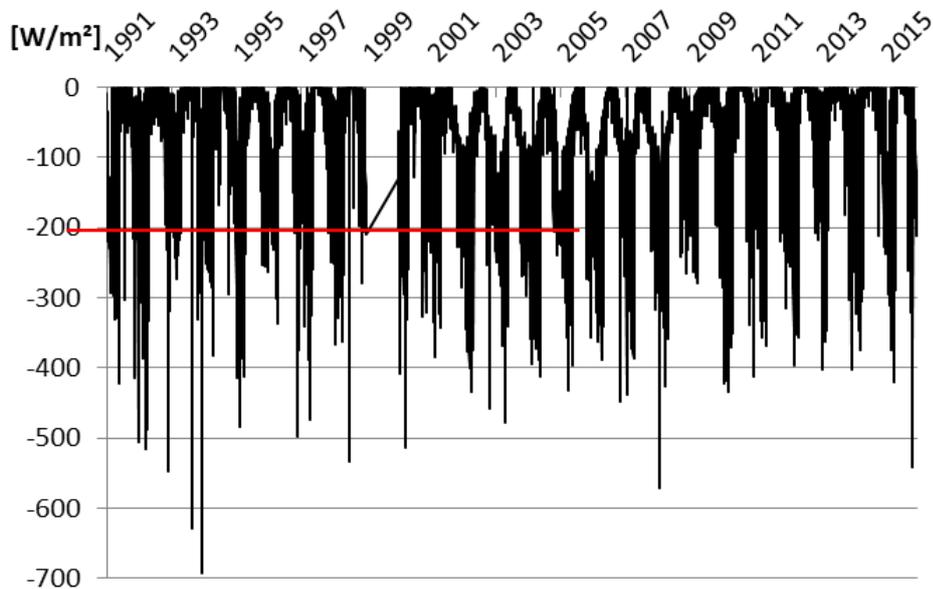


Abbildung 7: Energiebedarf Freiflächenheizung Tunnel Füssen

Der aus den Stationsdaten der Klimastation Garmisch-Partenkirchen hergeleitete Heizwärmeenergiebedarf zum Betrieb einer Freiflächentemperierung am Tunnel Füssen deckt sich zu großen Teilen mit der der Literatur [11] zu entnehmenden erforderlichen Wärmestromdichte zur Eis- und Schneefreihaltung von ca. 400 W/m^2 . Bei der Ermittlung der erforderlichen Wärmestromdichten wurden keine Wärmespeichereffekte im Untergrund oder die Historie der Entwicklung der Untergrundtemperaturen berücksichtigt. Es kann also davon ausgegangen werden, dass unter der Auslegung des Wärmeübertragers zur Temperierung von Freiflächen auf der Basis einer Wärmestromdichte von 400 W/m^2 eine ganzjährige Eis- und Schneefreiheit gewährleistet werden kann. Einschränkend ist in diesem Zusammenhang die Lage der ausgewerteten Klimastation zum Nordportal des Tunnels Füssen zu bewerten. Durch die Entfernung von ca. 31 km können die lokalen klimatischen Bedingungen am Tunnel Füssen von den Bedingungen an der Klimastation Garmisch-Partenkirchen abweichen.

2.4 Prognoseszenarien

Die Grundlage für die Prognose erforderlicher Wärmestromdichten, also der Sollgrößenverlauf des Regelkreises, bilden die Messdaten der Klimastation am Tunnelportal Füssen Nord zusammen mit dem Straßenzustands- und Wetterinformations-System (SWIS). Durch die BAST wurde mit [15] ein Modell zur Glättewarnung im Straßenwinterdienst entwickelt, das es ermöglichen soll, Trendrechnungen für kurze Zeiträume unter Berücksichtigung der gemessenen Klimadaten durchzuführen. Dieses Modell ist in Abbildung 8 dargestellt. Die Untersuchungen

in [15] haben gezeigt, dass die Wetterberichte des Straßenzustands- und Wetterinformationssystems SWIS keine kleinräumige Prognose eines Glätteereignisses zulassen. Für den Entwurf der Regelung wird daher zunächst vereinfachend vorgegeben, dass die Oberflächentemperatur zu keinem Zeitpunkt 0°C unterschreiten soll.

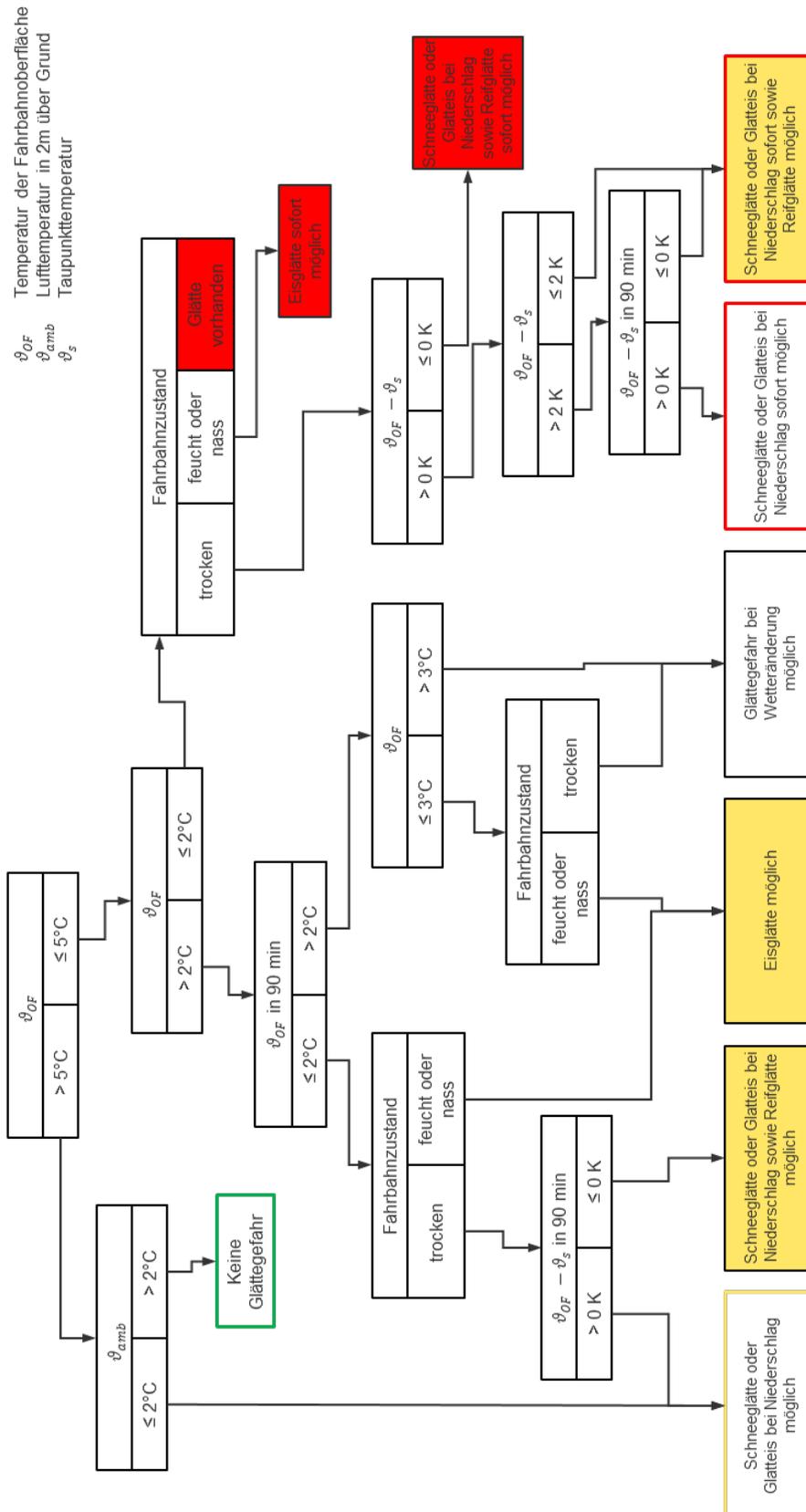


Abbildung 8: Modell zur Glättewarnung im Straßenwinterdienst (übernommen aus [15])

3 Numerisches Simulationsmodell

Die Grundlage für die Entwicklung von Regelungsstrategien zur Eis- und Schneefreihaltung bildet ein dreidimensionales numerisches Berechnungsmodell, das neben dem Fahrflächenaufbau und den unterlagernden Baugrundsichten als Wärmeübertrager ein mäandrierendes Rohrregister beinhaltet (siehe Abbildung 9).

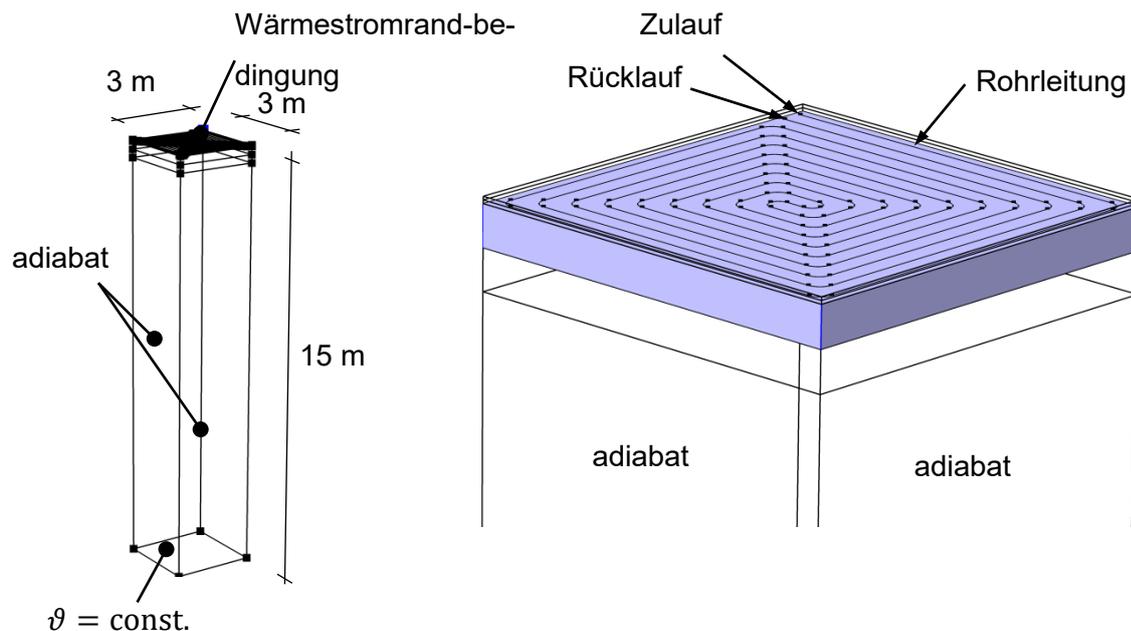


Abbildung 9: Isometrische Darstellung des dreidimensionalen Berechnungsmodells zur Entwicklung von Regelungsstrategien zur Eis- und Schneefreihaltung

Das Berechnungsmodell wird durch eine Grundrissfläche von 9 m² gebildet, die in den oberen Schichten den Fahrbahnaufbau aus Asphalt, in den darunterliegenden Schichten den gewachsenen Boden repräsentiert. Die Grundrissfläche des Systems wurde auf der Basis von Voruntersuchungen aus der Optimierung von Wärmeübertragungseffizienz und Druckverlust gewählt. Die Modelltiefe spiegelt die solare Speicherzone des Erdreichs wieder, die im Allgemeinen mit einer Ausdehnung von ca. 15 m angenommen werden kann. Innerhalb dieses Bereiches stellen sich jahreszeitlich veränderlichen Untergrundtemperaturen ein, die ca. um die mittlere Oberflächentemperatur schwanken (vgl. Abbildung 9). An der Geländeoberfläche wird eine Wärmestromrandbedingung gemäß Kapitel 2.2 berücksichtigt. In horizontaler Richtung wird davon ausgegangen, dass unendliche viele Systeme zur Schnee- und Eisfreihaltung an das Basissystem von 9 m² anschließen, sodass die Seitenflächen des Berechnungsmodells adiabatisch abgebildet sind. An der Unterseite des Modells wird, um ein wohldefiniertes Problem

zu erreichen, eine Temperaturrandbedingung in der Größe der mittleren jahreszeitlichen Oberflächentemperatur zum Ansatz gebracht.

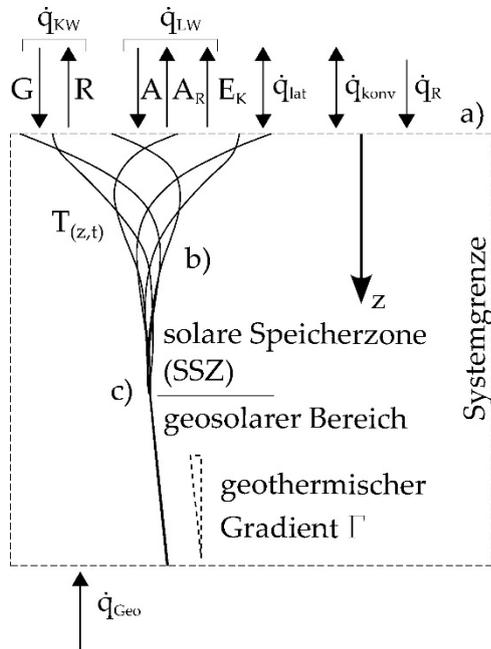


Abbildung 10: Jahreszeitliche Temperaturentwicklung (b) in der solaren Speicherzone unter dem Einfluss der Wärmetransportvorgänge an der Geländeoberfläche (a). (c): Übergang zum geosolaren Bereich.

3.1 Beschreibung der Wärmetransportvorgänge

Innerhalb der Berechnungsdomains, die den Boden sowie die Fahrbahnaufbau repräsentieren, wird ausschließlich Wärmetransport durch Wärmeleitung nach Gleichung (19) berücksichtigt.

$$\left(\rho c_p\right)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \left(-\lambda_{eff} \cdot \nabla T\right) = \dot{Q} \quad (19)$$

Hierbei werden sämtliche Baustoffe und Böden als Mehrphasensysteme bestehend aus einer festen und einer fluiden Phase beschrieben, deren effektive Wärmekapazität sich nach Gleichung (20) berechnet.

$$\left(\rho_f c_{p,f}\right)_{eff} = \vartheta_s \rho_s c_{p,s} + \vartheta_f \rho_f c_{p,f} \quad (20)$$

Der Ansatz der effektiven Wärmeleitfähigkeit basiert auf tabellierten Werten aus [16].

Mit dem hier gewählten Modellierungsansatz ist die Berücksichtigung von advektiven Wärmetransport im Boden, z.B. hervorgerufen durch eine Grundwasserströmung, nicht möglich.

Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass in den relevanten Bodentiefen bis ca. 1,0 m unter der Geländeoberkante keine Grundwasserbewegungen stattfinden.

Der Wärmetransport innerhalb der Rohrleitungen erfolgt durch einen eindimensionalen Ansatz nach Gleichung (21).

$$\rho_a A c_{p,a} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho A c_{p,a} u_T \nabla T = \nabla \cdot A \lambda_a \nabla T + f_D \frac{\rho_a A}{2 d_h} |u_T|^3 + \dot{Q}_{wall} \quad (21)$$

Hierin beschreibt der Term \dot{Q}_{wall} einen Austauschterm, mit dem die eindimensional abgebildeten Rohrleitungen in die dreidimensionale Berechnungsdomain eingekoppelt werden. Hierzu wird der Wärmeübergang vom Fluid zum Rohr, der Wärmetransport durch die Rohrwandung sowie der Wärmeübergang vom Rohr auf den Boden quasistationär auf der Basis von bekannten Nußelt-Korrelationen ermittelt und über den Temperaturgradienten zwischen der Fluidtemperatur T und der Temperatur der dreidimensionalen Domain T_{geo} zum einem Gesamtwärmestrom normal zur Rohrachse faktorisiert.

$$\dot{Q}_{wall} = (\alpha \cdot PE)_{eff} \cdot (T_{geo} - T) \quad (22)$$

$$(\alpha \cdot PE)_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{PE_{int} \cdot \alpha_{int}} + \frac{s}{\lambda_{conc} \cdot (PE_{int} - PE_{ext})/2} + \frac{1}{PE_{ext} \cdot \alpha_{ext}}} \quad (23)$$

$$PE_{int} = 2\pi r_{int}, \quad PE_{ext} = 2\pi r_{ext} \quad (24)$$

$$\alpha_{int} = Nu \frac{\lambda_a}{d_h} \quad (25)$$

$$Nu \begin{cases} 3,66 & \text{für laminare Strömungsverhältnisse} \\ \frac{(f_D/8) \cdot (Re - 1000) Pr}{1 + 12,7 \cdot (f_D/8)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)} & \text{für } 3000 < Re < 6 \cdot 10^6 \text{ und } 0,5 < Pr < 2000 \end{cases} \quad (26)$$

3.2 Beschreibung des Simulationsablaufs

Zunächst wurden transiente Simulationen des Systems zur Eis- und Schneefreihaltung über eine Simulationsdauer von 11.000 h auf stündlicher Basis durchgeführt. Die Simulationszeit berücksichtigt eine erforderliche Einschwingzeit des Berechnungsmodells. So startet die Berechnung im Januar und endet im Monat März des darauffolgenden Jahres. Hierdurch wird gewährleistet, dass eine gesamte Winterperiode mittels eines vollständig thermisch eingeschwungenen Systems abgebildet wird.

An der Geländeoberkante werden die unterschiedlichen Wärmetransportvorgänge in ihrer zeitlichen Varianz aufgeprägt bzw. als Ergebnis einer programminternen Routine berücksichtigt.

Die Randbedingungen für die durchströmten Rohrleitungen bilden ein über die Simulationsdauer konstanter Massenstrom sowie eine konstante Fluideintrittstemperatur, die der Bergwassertemperatur am Tunnel Füßen entspricht. Hierzu wurde eine minimale Temperatur von 8 °C berücksichtigt. Der Ansatz eines konstanten Volumenstroms stellt eine „best-case“ Betrachtung dar, bei der durch das System zur Eis- und Schneefreihaltung während der gesamten Winterperiode das Fluid kontinuierlich zirkuliert. In einer Parameteruntersuchung wurde das Simulationsmodell für unterschiedliche Volumenströme gemäß Tabelle 2 untersucht.

Volumenstrom	Re	v	$\vartheta_{OF,min}$	Unterschreitung 0°C
[l/h]	[-]	[m/s]	[°C]	[h]
250	220	0,21	-1,76	39
500	4.830	0,42	-0,77	8
1.000	9.670	0,85	-0,25	2
2.000	19.340	1,70	0,10	0

Tabelle 2: Parameteruntersuchung Freiflächentemperierung

Hierbei zeigte sich, dass unter der hier durchgeführten „best-case“ Betrachtung bei einem Volumenstrom von 250 l/h in 39 h der Winterperiode eine Oberflächentemperatur der Fahrbahn von 0°C unterschritten wird und eine minimale Oberflächentemperatur von -1,76 °C auftritt. Unter der Berücksichtigung eines Volumenstroms von 2000 l/h ist dagegen zu jeder Zeit eine ausreichende Schnee- und Eisfreiheit gegeben.

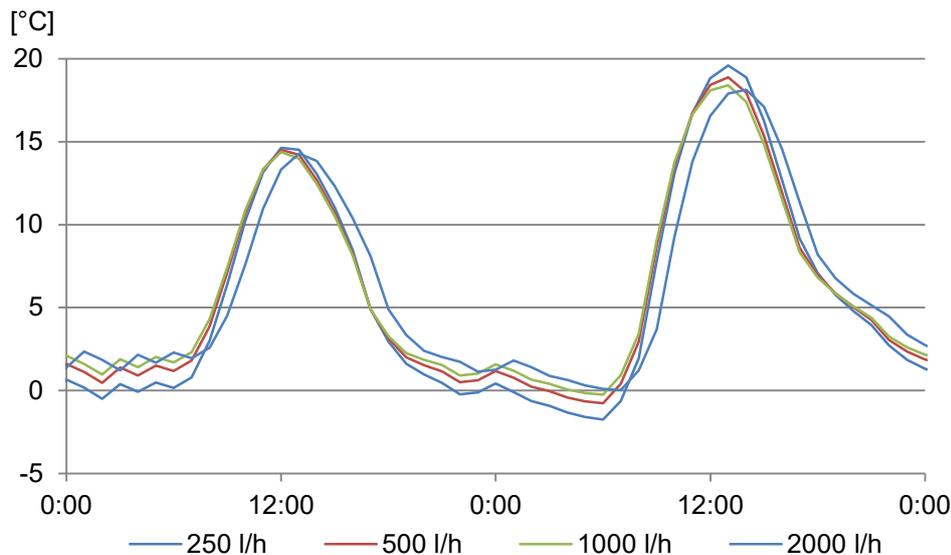


Abbildung 11: Exemplarische Darstellung der Oberflächentemperaturen zur Zeit der rechnerisch tiefsten Temperatur im Monat Februar

Die Abbildung 10 zeigt exemplarisch den Verlauf der rechnerisch ermittelten Oberflächentemperatur für den Zeitraum der niedrigsten Oberflächentemperatur in der Nacht vom 24. auf den 25. Februar.

4 Regelung der Oberflächentemperatur

Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben wurde, ist eine Eis- und Schneefreihaltung der Fahrbahnoberfläche unter den betrachteten Randbedingungen grundsätzlich möglich. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass für einen Volumenstrom von 2000 l/h eine Oberflächentemperatur ermittelt wurde, welche während der gesamten Winterperiode über 0 °C liegt.

Es ist jedoch nicht sinnvoll, die Anlage immer auf diese Art zu betreiben. Der Betrieb der Pumpen für die Förderung des Tunneldrainagewassers benötigt elektrische Energie, weshalb es aus Energieeffizienzgründen wünschenswert ist, die Eis- und Schneefreihaltung mit einem möglichst kleinen Volumenstrom und somit auch mit einem möglichst kleinen Energieverbrauch zu realisieren. Außerdem wird bei einem kontinuierlichen Betrieb die Oberfläche teilweise unerwünscht gekühlt, da die Wassertemperatur auch an kalten Tagen zur Mittagszeit unter der Oberflächentemperatur liegt, wie Abbildung 10 zeigt. Dies führt umgekehrt zu einem höheren Heizbedarf in der Nacht, da die in der Mittagszeit eingebrachte Wärme dem Boden

vom Wärmeübertrager teilweise wieder entzogen wird. Auch wenn dieser Effekt nicht besonders stark ausgeprägt ist, ist ein konstanter Volumenstrom aus diesem Grund ebenfalls nachteilig.

4.1 Regelungsaufgabe

Aus den genannten Gründen erscheint es sinnvoll, die Oberflächentemperatur durch Anpassung des Volumenstroms zu regeln. Die Regelungsaufgabe besteht darin, dass eine gewisse Mindesttemperatur, bei der eine Eis- und Schneefreiheit mit einem ausreichenden Sicherheitsabstand, z.B. für Messgenauigkeiten, garantiert ist, nicht unterschritten wird. Dabei soll die Regelung nur die Erwärmung der Oberfläche übernehmen. Eine Kühlung der Fahrbahnoberfläche an heißen Tagen könnte zwar ebenfalls regelungstechnisch implementiert werden, dieser Aspekt wurde aber im Rahmen dieses Projekts nicht weiter betrachtet. Außerdem soll die Regelung aus Energieeffizienzgründen zu einem möglichst kleinen Wasserverbrauch führen.

Aufgrund der Tatsache, dass das dynamische Verhalten der Oberflächentemperatur sehr träge ist und das numerische Simulationsmodell mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde arbeitet, kann die Dynamik der Pumpe sowie ihrer Regelung vernachlässigt werden. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass der vom Regler ermittelte Sollwert für den Volumenstrom unverzögert von der Pumpe umgesetzt wird. Die Durchflussregelung ist folglich nicht Bestandteil des Regelungskonzepts.

Für die Entwicklung des Regelungskonzepts wird davon ausgegangen, dass die tatsächliche Oberflächentemperatur genau gemessen werden kann. Die Wärmeströme stehen dem Regler jedoch nicht als Messwerte zur Verfügung. Darüber hinaus wird, wie oben, von einer konstanten Temperatur des Drainagewassers von 8 °C ausgegangen. Außerdem wird angenommen, dass ein Volumenstrom von 0 bis zu 2000 l/h möglich ist, der stufenlos eingestellt werden kann. Abbildung 11 zeigt das grundsätzliche Schema des Regelkreises als Blockschaltbild.

4.2 Reglerentwurfmodell

Das in Kapitel 3 vorgestellte numerische Simulationsmodell eignet sich aufgrund seiner hohen Modellordnung nicht für den Entwurf eines Reglers. Wie in der Regelungstechnik üblich, wird ein vereinfachtes Modell hergeleitet, auf dessen Basis ein Regelungskonzept erstellt und eine geeignete Parametrierung vorgenommen wird.

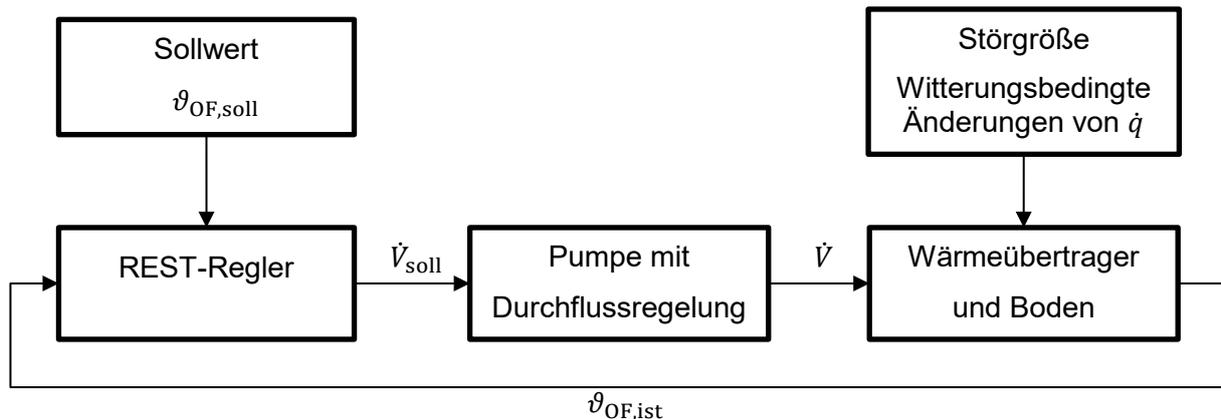


Abbildung 12: Regelungsschema für die Eis- und Schneefreihaltung

Die hohe Modellordnung des numerischen Simulationsmodells ergibt sich im Wesentlichen aus der Tatsache, dass ein räumlich verteiltes Wärmeleitungsproblem räumlich diskretisiert wurde. Je feiner die Diskretisierung ist, desto höher ist die resultierende Modellordnung. Das grundlegende Ein-Ausgangsverhalten eines Systems kann jedoch üblicherweise mit einem Modell niedrigerer Ordnung angenähert werden. Wie die Erfahrung zeigt, ist dies insbesondere bei Wärmeleitungsproblemen sehr häufig gut möglich. Dies ist auch bei dem vorliegenden numerischen Simulationsmodell der Fall.

Eine gängige Vorgehensweise besteht darin, das ursprüngliche Modell um einen Arbeitspunkt zu linearisieren und eine zugehörige Zustandsraumdarstellung zu gewinnen. Diese bildet die Dynamik um einen gewählten Arbeitspunkt x_{AP} und u_{AP} in der Form

$$\begin{aligned} E\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (27)$$

ab. Dabei enthält der Zustandsvektor x alle Zustände des Systems, was für das betrachtete Problem im Wesentlichen die Temperaturen der einzelnen Volumenelemente sind. Der Eingangsvektor u enthält die Eingangsgrößen des Systems. Dies sind für das gegebene System der Volumenstrom und die von außen vorgegebene Wärmestromdichte bzw. die externen Größen, aus denen sich die Wärmestromdichte ergibt.

Die Linearisierung kann grundsätzlich, wenn das Originalmodell in Form von differenzierbaren gewöhnlichen nichtlinearen Differentialgleichungen vorliegt, analytisch durchgeführt werden. Ist dies, wie hier, nicht der Fall, kann eine numerische Linearisierung durchgeführt werden. Allerdings ergibt die Linearisierung zunächst eine Systembeschreibung mit der gleichen Ordnung wie das nichtlineare Modell.

Das für die Erstellung und Berechnung des numerischen Simulationsmodells verwendete Softwaretool COMSOL Multiphysics ermöglicht grundsätzlich die Berechnung eines linearen Zustandsraummodells in der Form (27) mittels der Funktion „StateSpace“. Um die Berechnung überhaupt erfolgreich durchführen zu können, musste jedoch die Diskretisierung vergrößert werden, da sonst der Arbeitsspeicher nicht ausreicht. Trotzdem ergab sich immer noch eine Systemordnung von über 22.800 Zuständen. Damit belegt allein die Systemmatrix A unter Annahme von doppelter Genauigkeit (8 Byte pro Element) über 4 GB Arbeitsspeicher. Eine noch gröbere Diskretisierung kam nicht in Frage, da darunter die Genauigkeit des nichtlinearen Modells zu sehr leiden würde.

Die üblichen Verfahren für den Entwurf von Regelungen sind mit einem System, das eine so hohe Ordnung hat, nicht anwendbar. Es ist deshalb notwendig, das gegebene Modell hoher Ordnung mittels einem Modell deutlich niedrigerer Ordnung möglichst gut anzunähern.

Dies ist möglich mittels verschiedener Verfahren der Modellreduktion. Diese Verfahren unterscheiden sich in Bezug auf den Fokus, welches Verhalten möglichst genau abgebildet bzw. welches Fehlermaß minimiert werden soll. Beispielsweise wird bei der modalen Ordnungsreduktion das System durch eine geeignete Transformation in Diagonalf orm überführt. Es werden dann diejenigen Moden mit kleinem Beitrag zum Gesamtsystemverhalten entfernt. So können insbesondere für schwingungsfähige Systeme die wesentlichen Schwingungskomponenten (Moden) gut im reduzierten Modell abgebildet werden.

Die modale Ordnungsreduktion ist, wie andere Verfahren zur Modellreduktion, Stand der Technik [17]. In der Matlab Control System Toolbox sind entsprechende Funktionen verfügbar [18]. Die implementierten Verfahren sind jedoch nicht geeignet, um Systeme sehr hoher Ordnung (> 1.000) zu reduzieren, da die benötigten Matrixoperationen auf Matrizen der oben erwähnten Größenordnung sehr viel Rechenzeit und Speicherplatz benötigen. Aus diesem Grund sind fast alle Funktionen der Matlab Control System Toolbox für das linearisierte Modell nicht einsetzbar.

Allerdings sind fast alle Einträge der Systemmatrix A gleich Null, so dass eine Darstellung als dünnbesetzte Matrix deutliche Vorteile bietet. Die Open-Source-Toolbox sssMOR (*sparse state-space Model Order Reduction*) [19] enthält Funktionen für die Verarbeitung von solchen dünnbesetzten Zustandsraummodellen und insbesondere für deren Ordnungsreduktion. Mit Hilfe der Toolbox war es möglich, das aus COMSOL Multiphysics erhaltene Zustandsraummodell ohne großen Fehler auf eine Systemordnung unter 10 zu reduzieren. Bei der Analyse des resultierenden Modells stellte sich jedoch heraus, dass es nicht möglich war, mit diesem

Modell ein ähnliches Verhalten wie mit dem Originalmodell in COMSOL Multiphysics zu erzielen. Vermutlich liegt die Ursache in einer nicht korrekt gewählten Option oder in falschen Vorgaben für die Funktion „StateSpace“ in COMSOL Multiphysics. Aufgrund der sehr knappen Dokumentation dieser Funktion konnte dieses Schnittstellenproblem trotz mehrfacher Iteration zwischen den beteiligten Projektpartnern bisher leider nicht gelöst werden.

Da ein direkter Export des Modells nicht möglich war, musste für das Projekt eine alternative Vorgehensweise gefunden werden. Dazu wurden mit dem im Kapitel 3 beschriebenen detaillierten numerischen Modell Simulationen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Simulationen wurden dann als Messdaten für eine Modellierung mittels Methoden der dynamischen Systemidentifikation [20] genutzt. Hierzu wurde das Simulationsmodell zunächst einer Einschwingphase unterzogen, bis sich quasistationäre thermische Verhältnisse einstellten. Im Anschluss daran wurde sprunghaft zum Zeitpunkt $t = 500$ h zum einen der Volumenstrom von 250 l/h auf 150 l/h reduziert (vgl. Abbildung 12), in einer zweiten Berechnung die Wärmestromdichte an der Geländeoberfläche von 250 W/m² auf 0 W/m² reduziert (vgl. Abbildung 13).

Diese Sprungantworten wurden genutzt, um jeweils eine lineare Übertragungsfunktion zu bestimmen, mit der das Ein-/Ausgangsverhalten möglichst genau abgebildet werden kann. Dazu muss zunächst die Anzahl der Pol- und Nullstellen der Übertragungsfunktion vorgegeben werden. Die entsprechenden Koeffizienten werden dann als unbekannte Parameter aufgefasst. Es wird daraufhin ein Gleichungssystem aufgebaut, welches die Differenz zwischen den aus den Eingangsdaten mittels der Übertragungsfunktion Ausgangsgrößen des Modells sowie der vorliegenden Ausgangsgrößen darstellt. Es wird dann ein Optimierungsproblem gelöst, welches die Parameter der Übertragungsfunktion so bestimmt, dass die Differenz im quadratischen Sinne minimiert wird.

Bereits mit einer Übertragungsfunktion mit drei Polstellen und zwei Nullstellen kann eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Modell und Daten erreicht werden. Die berechnete Übertragungsfunktion für Änderungen des Volumenstroms lautet

$$G_V(s) = \frac{0,0008798 s^2 + 0,0001067 s + 8,474 \cdot 10^{-7}}{s^3 + 0,6109 s^2 + 0,05295 s + 0,0003674}. \quad (28)$$

Abbildung 14 zeigt mittels eines direkten Vergleichs zwischen Modell und Ausgangsdaten, dass das dynamische Verhalten mit sehr hoher Genauigkeit abgebildet werden konnte.

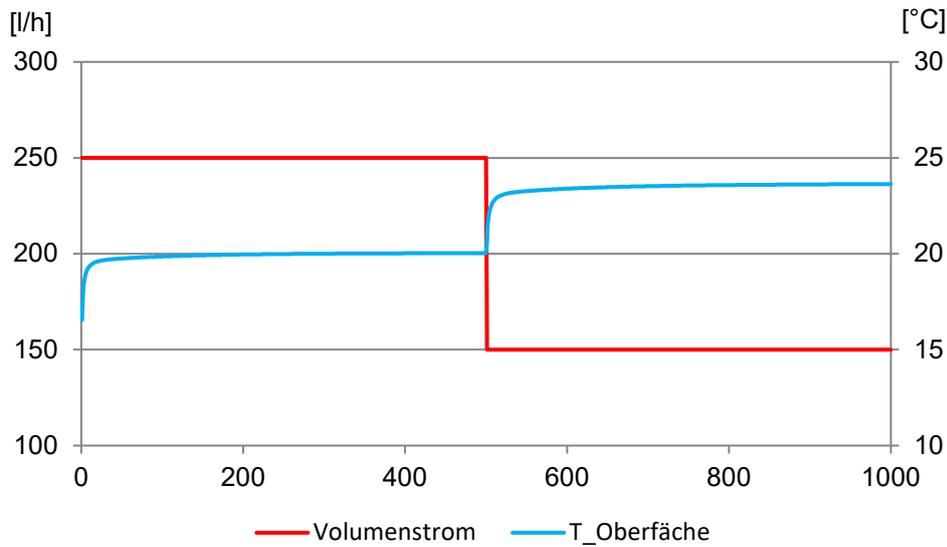


Abbildung 13: Sprungantwort der Oberflächentemperatur nach Änderung des Volumenstroms innerhalb der Rohrleitungen (konstante Wärmestromdichte an der Geländeoberfläche $\dot{q} = 250 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$)

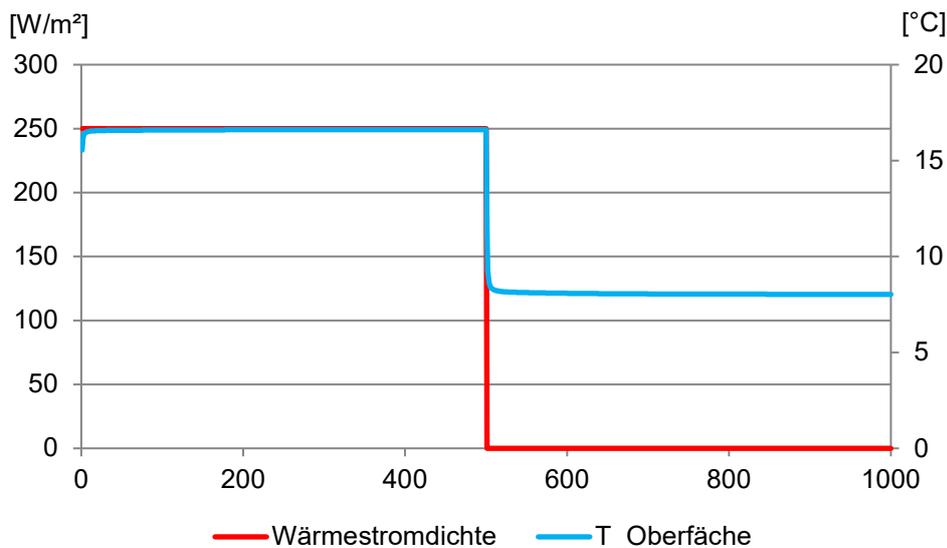


Abbildung 14: Sprungantwort der Oberflächentemperatur nach Änderung der Wärmestromdichte an der Geländeoberfläche (konstanter Volumenstrom $\dot{V} = 1000 \frac{\text{l}}{\text{h}}$)

Die berechnete Übertragungsfunktion für Änderungen des Wärmestroms lautet

$$G_q(s) = \frac{0,03457 s^2 + 0,005368 s + 4,701 \cdot 10^{-5}}{s^3 + 1,22 s^2 + 0,1604 s + 0,001368} \quad (29)$$

Auch hier gibt die Übertragungsfunktion die Dynamik sehr gut wieder, wie Abbildung 15 zeigt.

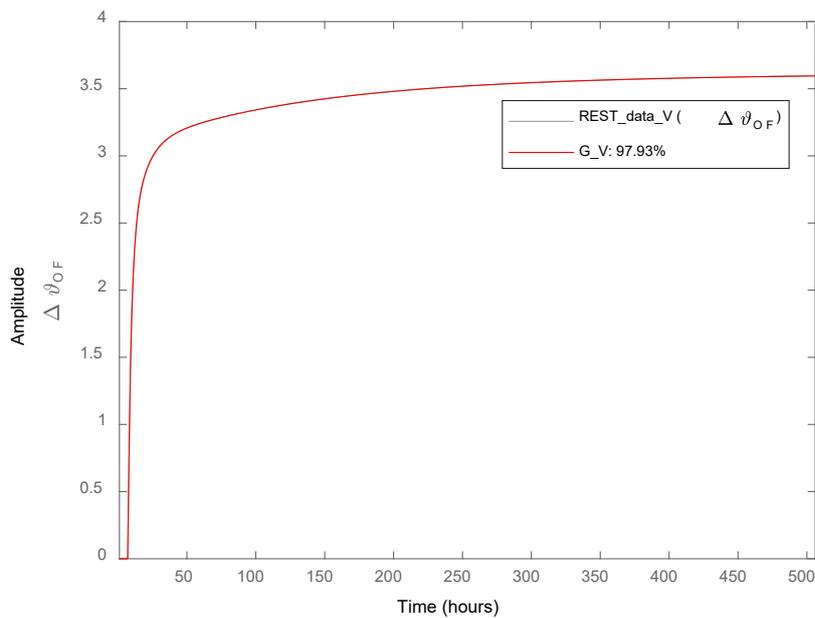


Abbildung 15: Vergleich zwischen dem Verlauf der Oberflächentemperatur des Sprungversuchs in Abbildung 12 und der Antwort der identifizierten Übertragungsfunktion $G_V(s)$ auf den Verlauf des Volumensstroms im gleichen Sprungversuch. Dargestellt sind die Änderungen bezogen auf den Arbeitspunkt $\vartheta_{OF} = 20 \text{ °C}$, und $\dot{V} = 250 \frac{\text{l}}{\text{h}}$.

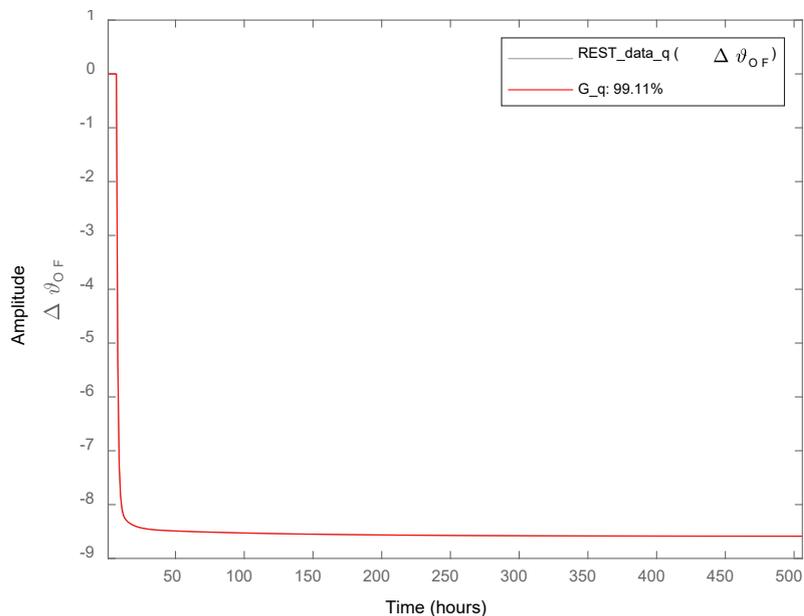


Abbildung 16: Vergleich zwischen dem Verlauf der Oberflächentemperatur des Sprungversuchs in Abbildung 13 und der Antwort der identifizierten Übertragungsfunktion $G_q(s)$ auf den Verlauf der Wärmestromdichte im gleichen Sprungversuch. Dargestellt sind die Änderungen bezogen auf den Arbeitspunkt $\vartheta_{OF} = 16,6 \text{ °C}$, und $\dot{q} = 250 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

Die sehr hohe Approximationsgüte darf jedoch nicht darüber hinweg täuschen, dass ein Reglerentwurf nur auf Basis der linearen Übertragungsfunktionen (28) und (29) noch nicht möglich ist. Der Grund dafür ist, dass die Regelstrecke stark nichtlinear ist: Während die Oberflächentemperatur im oben dargestellten Sprungversuch nach einer Absenkung des Volumenstroms steigt, wäre bei kalter Witterung das Gegenteil der Fall. In einem solchen Fall wäre die Wassertemperatur höher als die Oberflächentemperatur. Entsprechend würde eine Absenkung des Volumenstroms zu einer Absenkung der Temperatur führen.

Die stationäre Verstärkung zwischen Ein- und Ausgang ändert sich folglich in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen in einem großen Bereich, der auch einen Vorzeichenwechsel einschließt.

Aus den Sprungantworten kann die Abhängigkeit der Verstärkung nur punktuell überprüft werden. Bei $\dot{q} = 250 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ ergeben sich stationär die in Tabelle 3 angegebenen Verstärkungsfaktoren. Auch hieraus wird die starke Änderung ersichtlich, da sich die Verstärkung für beide stationäre Betriebspunkte um fast eine Größenordnung unterscheidet.

Volumenstrom	Stationäre Oberflächentemperatur	Verstärkung bezogen auf Arbeitspunkt 20 °C ; 250 l/h
150 l/h	23,63 °C	-0,0363 K/(l/h)
1000 l/h	16,614 °C	-0.0045 K/(l/h)

Tabelle 3: Verstärkungsfaktoren für verschiedene stationäre Zustände

Diese Änderung der Verstärkung muss beim Reglerentwurf berücksichtigt werden. Dies wird besonders klar, wenn man das Modell mit einem Volumenstrom von 1000 l/h simuliert, ohne einen Temperatureinfluss zu berücksichtigen. Es würde sich dann eine Oberflächentemperatur von -7°C ergeben.

Um den temperaturabhängigen Einfluss auf die Verstärkung qualitativ und mit möglichst geringer Komplexität im Modell abzubilden, wurde folgender heuristisch bestimmter Modifikationsfaktor für die Verstärkung gewählt:

$$K_{\vartheta}(\vartheta_{\text{OF}}) = \frac{\vartheta_{\text{Wasser}} - \vartheta_{\text{OF}}}{\vartheta_{\text{Wasser}} - \vartheta_{\text{AP}}} \quad (30)$$

mit dem Arbeitspunkt $\vartheta_{\text{AP}} = 20 \text{ °C}$ und $\vartheta_{\text{Wasser}} = 8 \text{ °C}$.

Die Eingangsgrößen wurden vor der Systemidentifikation mit diesem Modifikationsfaktor beaufschlagt. Es ergibt sich ein modifizierter Volumenstrom $\dot{V}_{\text{m}} = K_{\vartheta} \dot{V}$, wobei durch die Wahl von

K_ϑ gilt, dass $K_\vartheta(\vartheta_{AP}) = 1$ und somit $\dot{V}_{m,AP} = \dot{V}_{AP}$. Die Folge ist, dass der Betrag der Verstärkung bei geringerer Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Wasser zurückgeht. Mit dem Modifikationsfaktor wird außerdem erreicht, dass sich bei einer Oberflächentemperatur von 8 °C unabhängig vom Volumenstrom immer die Verstärkung 0 ergibt.

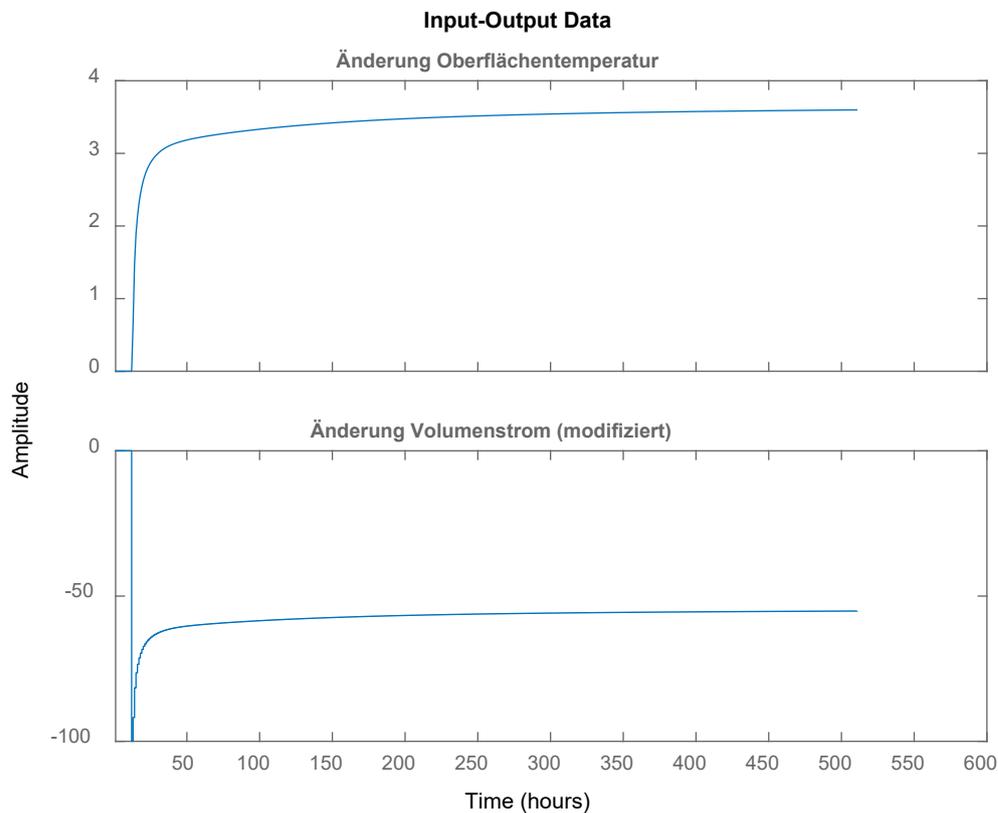


Abbildung 17: Modifizierte Daten für den Sprungversuch mit \dot{V} . Durch den Modifikationsfaktor K_ϑ sind die Eingangsdaten nicht mehr sprunghaft, sondern weisen eine Temperaturabhängigkeit auf.

Die Systemidentifikation wird nun mit den modifizierten Daten, die in Abbildung 16 dargestellt sind, erneut durchgeführt. Es ergibt sich eine ähnlich gute Übereinstimmung des Ausgangsverlaufs wie in Abbildung 14, nun allerdings mit einer anderen Übertragungsfunktion:

$$G_{Vm}(s) = \frac{-0,009424 s^2 - 0,001189 s - 9,529 \cdot 10^{-6}}{s^3 + 0,3678 s^2 + 0,02446 s + 0,0001454}$$

Dieses Modell wird nun noch um den Einfluss des Wärmestroms ergänzt. Dieser Einfluss stellt die Störgröße dar, welche im Bedarfsfall vom Regler ausgeglichen werden muss. Es ist daher für den Reglerentwurf nicht entscheidend, dass die Verstärkungsfaktoren in Bezug auf \dot{q} exakt sind. Vielmehr sind witterungsabhängig sehr unterschiedliche Verläufe denkbar. Es wird daher

im nächsten Abschnitt untersucht, inwiefern das gewählte Regelkonzept in der Lage ist, Änderungen einer synthetisch vorgegebenen Wärmestromdichte mit einer saisonalen und tageszeitabhängigen Dynamik auszuregeln.

Insgesamt ergibt sich das in Abbildung 17 dargestellte Reglerentwurfsmodell. Bei Vorgabe eines konstanten Volumenstroms von 150 l/h ergibt sich – aufgrund der mit den Daten dieses Sprungversuchs durchgeführten Identifikation – exakt die in Tabelle 3 angegebene stationäre Temperatur. Für 1000 l/h ergibt sich dagegen eine stationäre Oberflächentemperatur von 12,94 °C. Dies ist niedriger als die in Tabelle 3 angegebenen 16,6 °C, d.h. die tatsächliche Verstärkung ist vom Betrag her kleiner als im Modell. Dieser Fehler wird zunächst in Kauf genommen. Weiter unten wird im Rahmen einer Robustheitsuntersuchung geprüft, ob er möglicherweise einen negativen Effekt auf die Funktionalität der Regelung hat.

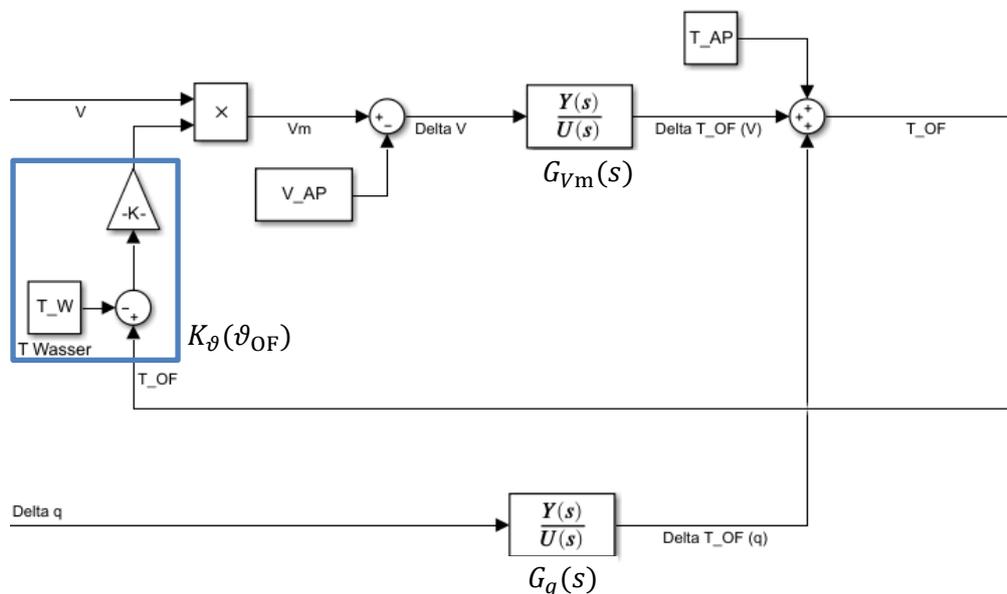


Abbildung 18: Reglerentwurfsmodell mit temperaturabhängigem Modifikationsfaktor

4.3 Regelungskonzept

Die Regelstrecke hat hohe Zeitkonstanten und ist mit einer Begrenzung der Stellgröße versehen. Der minimale Durchfluss beträgt 0 l/h, außerdem ist der Durchfluss auch nach oben begrenzt. Diese Grenze wird hier mit 2000 l/h angenommen.

PI-Regler stellen die bekannteste und am häufigsten eingesetzte Art der Regelung dar. Allerdings sind sie für Systeme mit hohen Zeitkonstanten schwierig einzustellen und in Bezug auf Stellgrößenbeschränkung ohne weitere Maßnahmen problematisch. Ein Regelkonzept aus der Prozessindustrie, welches gleichzeitig sowohl sehr einfach implementierbar als auch für

die genannten Herausforderungen sehr gut geeignet ist, ist die sogenannte *Predictive Functional Control (PFC)*. Auf die Hintergründe wird hier nicht näher eingegangen, weitere Details zur PFC können [21] entnommen werden. Eine geeignete PFC-Implementierung für die Eis- und Schneefreihaltung ist in Abbildung 19 dargestellt. Diese Implementierung eignet sich bewusst nur für das Erwärmen der Geländeoberfläche. Wenn die Oberflächentemperatur unter dem Sollwert liegt, ergibt sich ein positiver Volumenstrom. Liegt sie jedoch darüber, ergibt sich durch das Begrenzungsglied ein Volumenstrom von 0.

Für Sollwerte über der Wassertemperatur ist das Konzept in der gezeigten Form nicht geeignet, da es nicht zu einem stabilen Systemverhalten führt. Es kann allerdings leicht so erweitert werden, dass auch eine Kühlung bei hohen Temperaturen möglich ist.

Die Funktionalität des Reglers soll anhand einer Variation des Wärmestroms \dot{q} für das Entwurfsmodell überprüft und seine Parametrierung (K_R und T_R) optimiert werden. Dazu wird ein synthetischer Verlauf für \dot{q} über einen Zeitraum von einem Jahr vorgegeben, der sowohl einen saisonalen Verlauf als auch einen tageszeitabhängigen Verlauf aufweist. Bei einem Volumenstrom von 0 l/h ergibt sich im Modell der in Abbildung 19 gezeigte Temperaturverlauf.

Für eine geeignet gewählte Reglerparametrierung ergibt sich der in Abbildung 20 gezeigte Verlauf. Es ist gut zu erkennen, dass der Regler zu Beginn der kalten Jahreszeit den Volumenstrom erhöht, wobei dies zunächst nur in den (synthetischen) Nachtzeiten der Fall ist. Dies ist im Detail erkennbar in Abbildung 21. Wenn erforderlich, wird der Volumenstrom auch tagsüber nicht Null, wie der Ausschnitt in Abbildung 22 zeigt. Der Regler ist dabei in der Lage, die Temperatur jederzeit im positiven Bereich zu halten. Stabilitätsprobleme treten nicht auf.

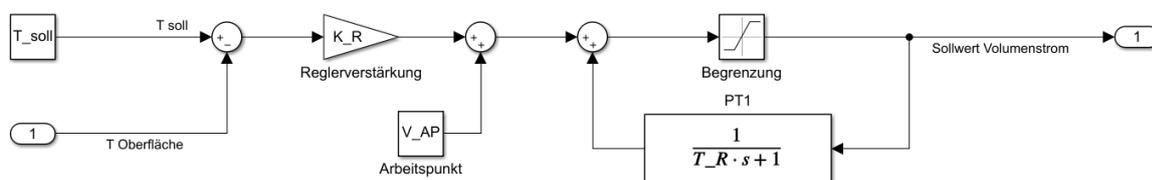


Abbildung 19: Predictive Functional Control für REST

Schließlich wurde eine Robustheitsuntersuchung durchgeführt, um zu prüfen, ob das Regelungskonzept sensitiv ist in Bezug auf den Einfluss möglicher Fehler in der Modellierung. Dazu wurde zunächst die Verstärkung der Übertragungsfunktion $G_{V_m}(s)$ halbiert. Das zugehörige Simulationsergebnis ist in Abbildung 23 dargestellt. Aufgrund der niedrigeren Verstärkung hat der Wasserstrom nun eine geringere Auswirkung auf der Temperatur. Die Regelung stellt deshalb einen höheren Volumenstrom ein. Es ist aber zu erkennen, dass der Regler die Aufgabe noch erfüllen kann, auch wenn der Volumenstrom an die Begrenzung kommt. Ob diese Begrenzung tatsächlich problematisch ist, kann nur mit dem detaillierten Modell, das einen realistischen Verlauf für die Wärmestromdichte erzeugen kann, bewertet werden. Auch eine Verdopplung der Verstärkung führt nicht zu Problemen mit dem Verhalten der Regelung, wie Abbildung 23 zeigt.

Es treten sowohl bei einer Vergrößerung als auch einer Verkleinerung der Verstärkung - auch bei Erreichen der positiven Begrenzung für den Volumenstrom – keine Stabilitätsprobleme auf, weshalb das Regelkonzept als ausreichend robust eingestuft werden kann. Eine genauere Überprüfung des Regelkonzeptes sollte jedoch am detaillierten numerischen Simulationsmodell durchgeführt werden.

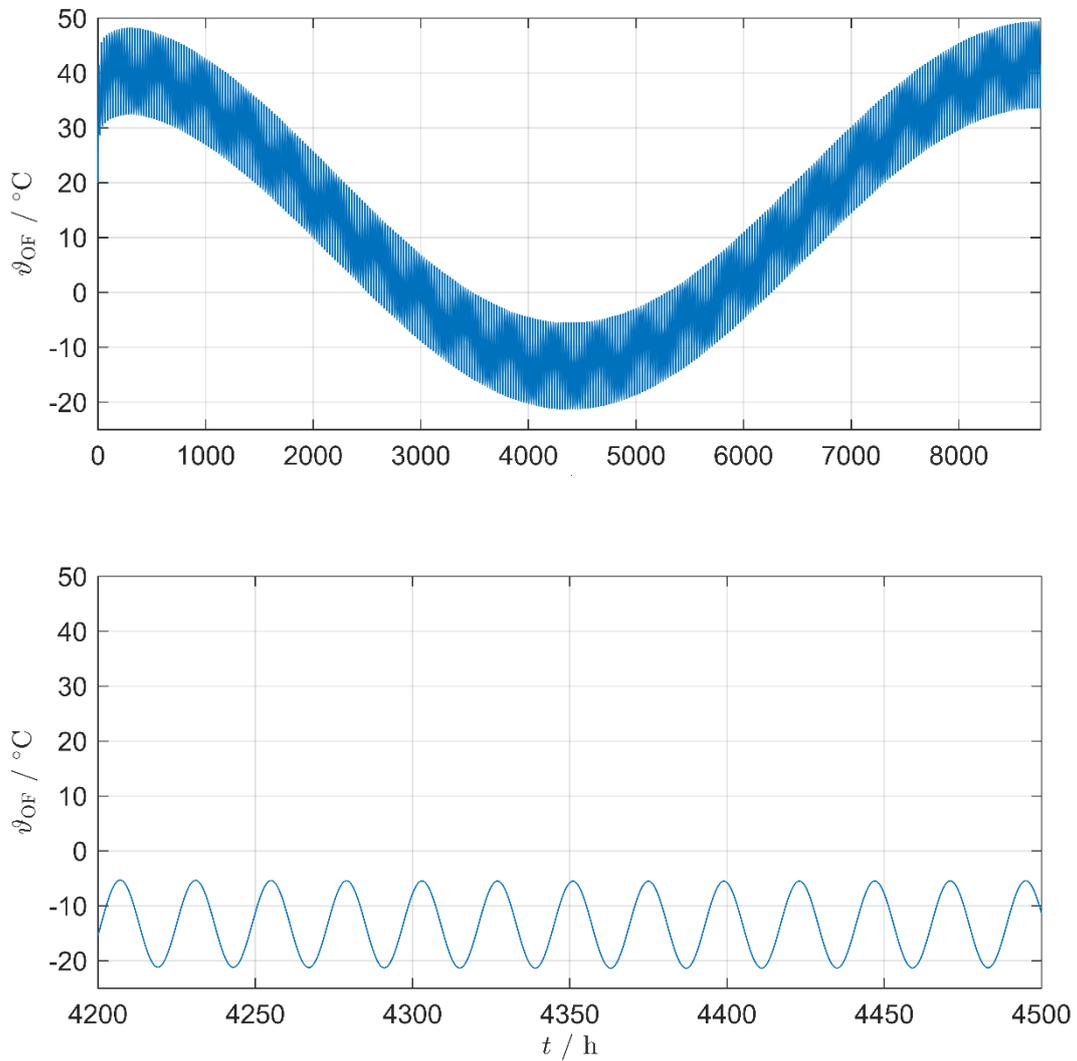


Abbildung 20: Temperaturverlauf für das synthetische Profil für \dot{q} bei $\dot{V} = 0 \frac{1}{\text{h}}$, unten ein Ausschnitt über 100 h.

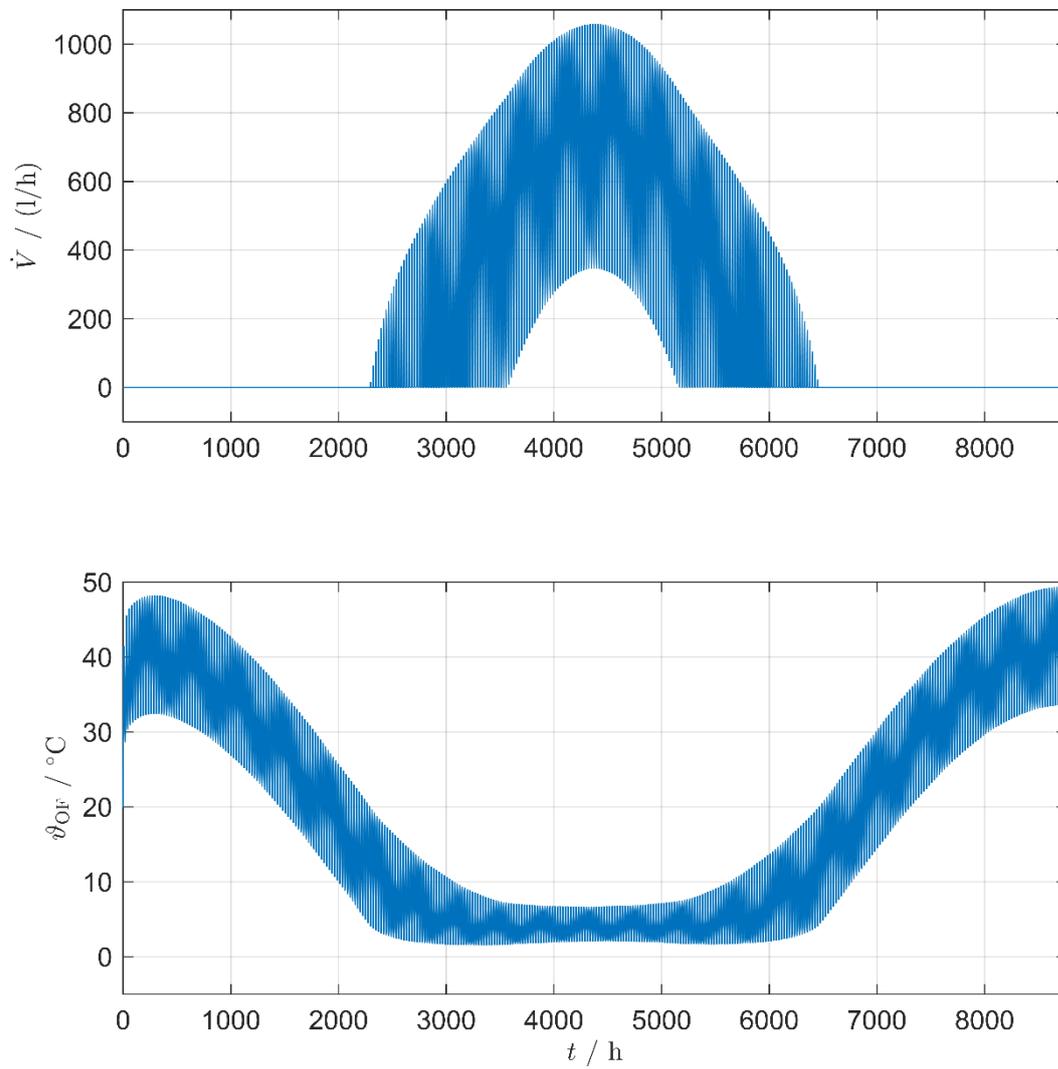


Abbildung 21: Temperaturverlauf für das synthetische Profil für \dot{q} mit PFC-Regler.

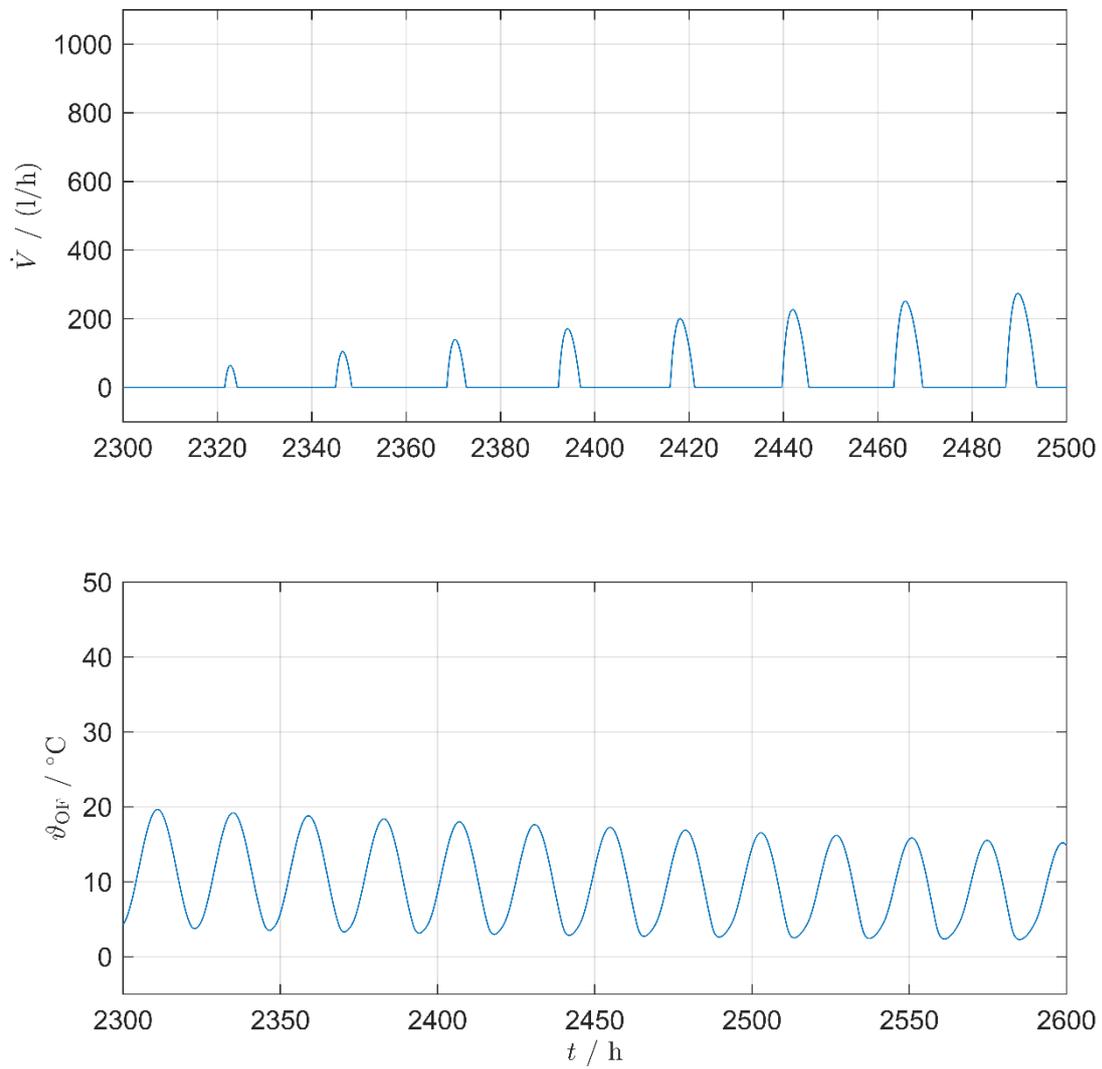


Abbildung 22: Temperaturverlauf für das synthetische Profil für \dot{q} mit PFC-Regler, Ausschnitt 1

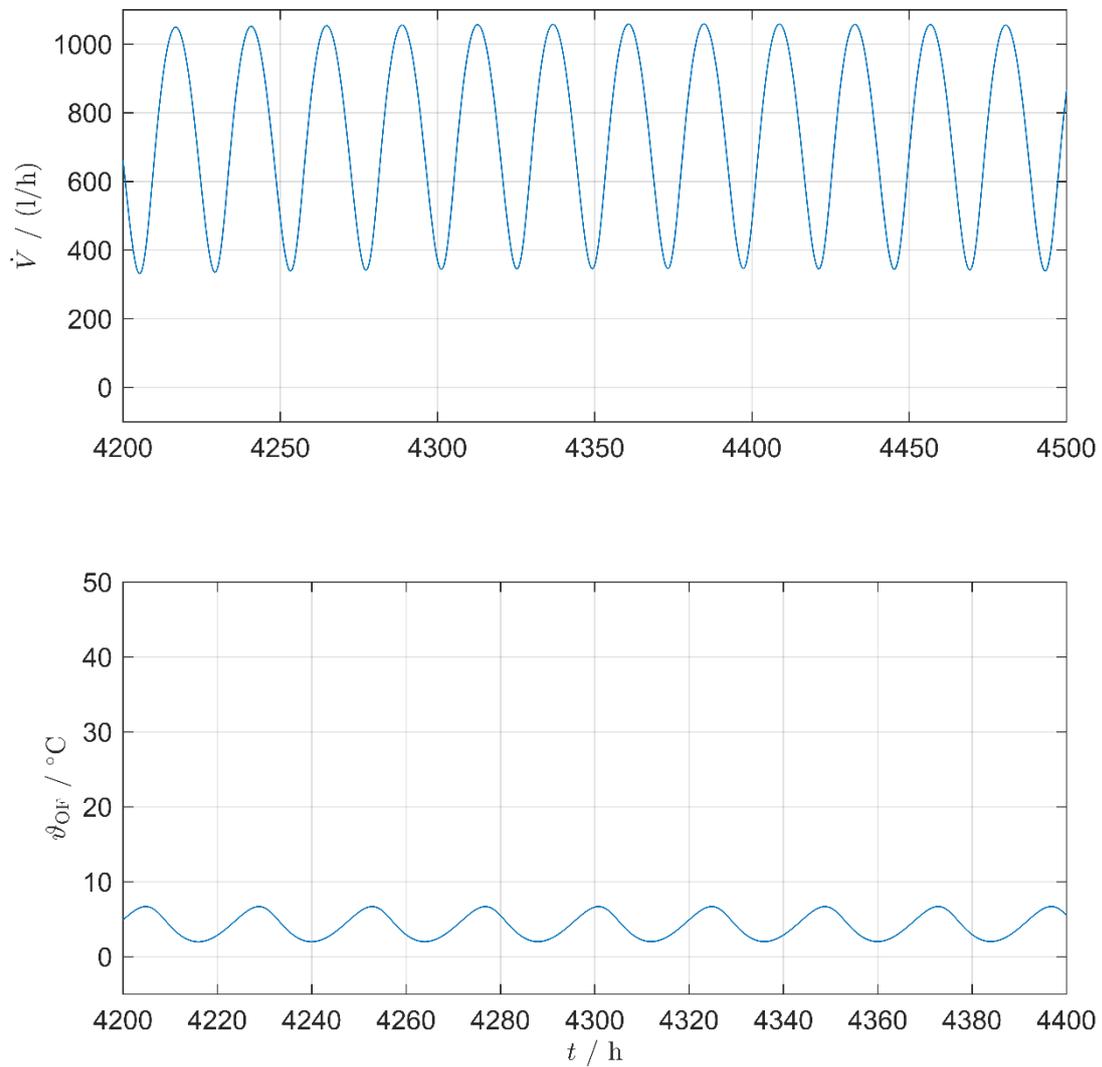


Abbildung 23: Temperaturverlauf für das synthetische Profil für \dot{q} mit PFC-Regler, Ausschnitt 2

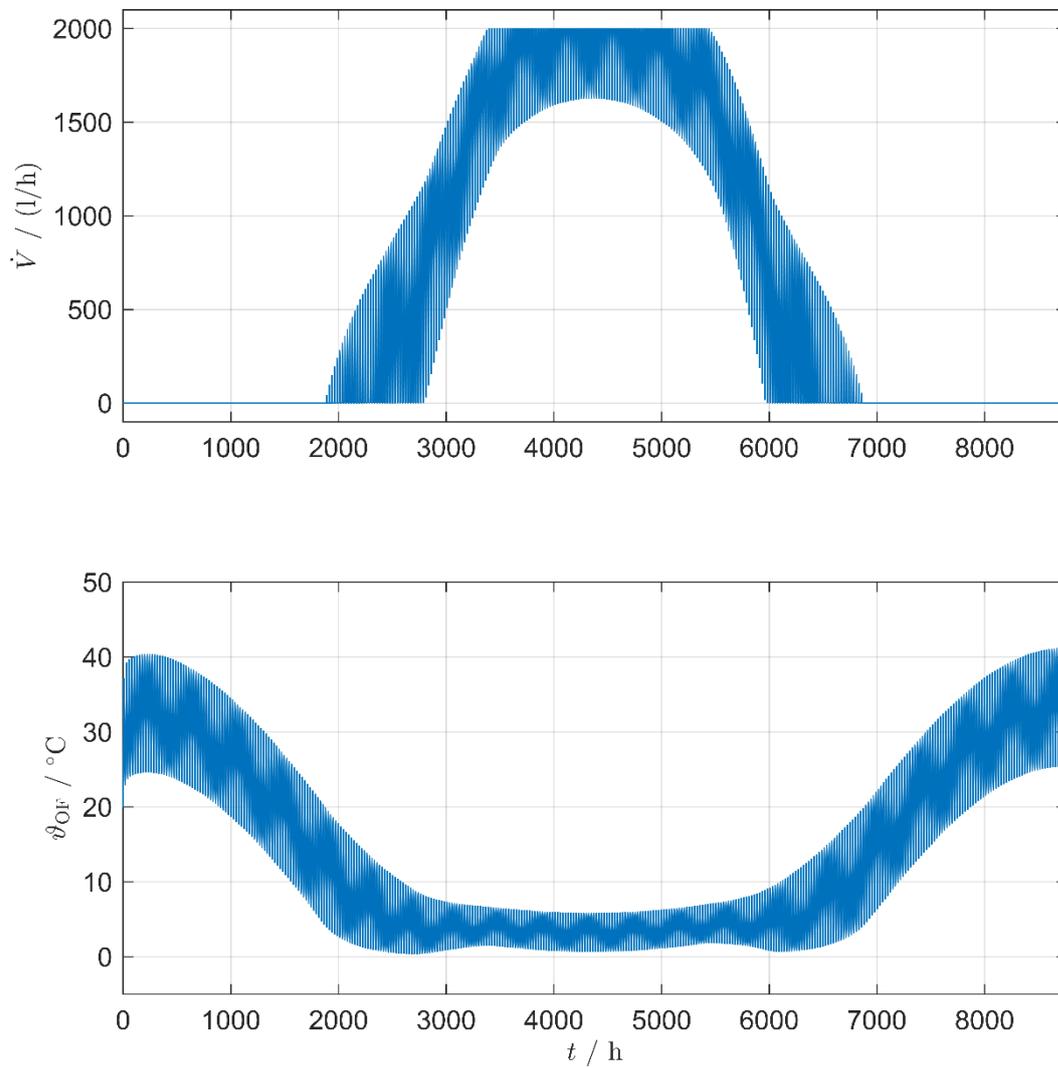


Abbildung 24: Temperaturverlauf für das synthetische Profil für \dot{q} mit PFC-Regler und um 50% reduzierter Verstärkung des Modells.

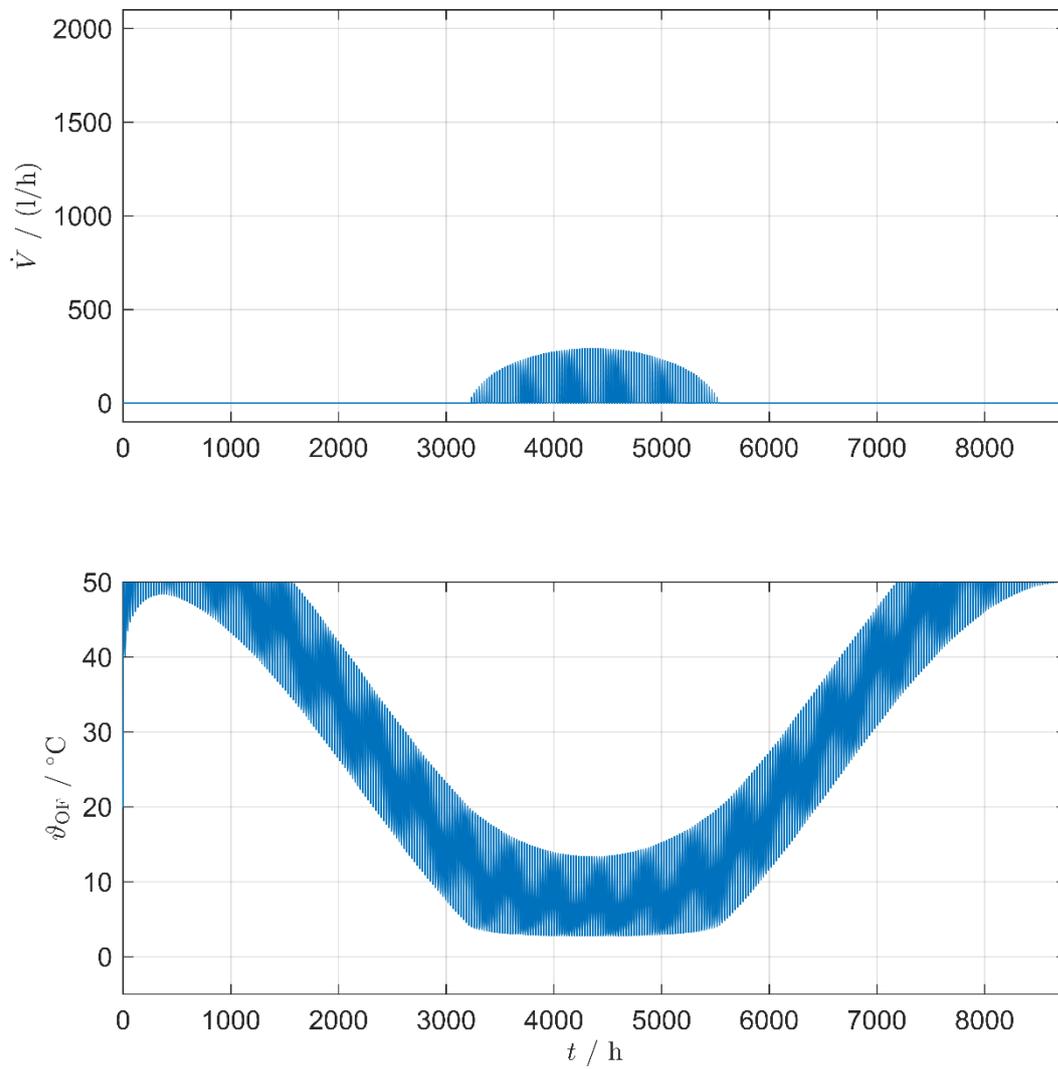


Abbildung 25: Temperaturverlauf für das synthetische Profil für \dot{q} mit PFC-Regler und um 100% erhöhter Verstärkung des Modells.

5 Fazit und Ausblick

In diesem Projekt wurde die Eis- und Schneefreihaltung von Freiflächen in der Nähe von Tunnelportalen durch die thermische Nutzung des Tunneldrainagewassers untersucht. Mittels einer detaillierten Modellierung konnte das dynamische Verhalten basierend auf historischen Wetterdaten simuliert werden. In diesem Zusammenhang konnte gezeigt werden, dass es unter den getroffenen Annahmen grundsätzlich möglich ist, die Eis- und Schneefreihaltung der Oberfläche mittels eines Wärmeübertragers, der von Drainagewasser durchströmt wird, zu erreichen.

Auf der Grundlage des detaillierten numerischen Modells konnte über die Erzeugung von Sprungantworten ein Reglerentwurfmodell erstellt werden. Dieses wurde für den Entwurf eines Reglers genutzt, welcher in der Simulation in der Lage war, den Volumenstrom bei Bedarf so zu regeln, dass eine ausreichende Temperaturerhöhung erreicht wird, während bei wärmeren Temperaturen der Volumenstrom zurückgenommen wird.

Auf der Grundlage der Projektergebnisse sollte das entwickelte Regelkonzept mit dem detaillierten Simulationsmodell verknüpft und ggf. optimiert werden. Aufgrund der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Schwierigkeiten mit der Schnittstelle zwischen der verwendeten Softwaretools war dies im Rahmen des Projekts zeitlich nicht mehr möglich.

Bei einer erfolgreichen Erprobung des Regelkonzepts in der Simulation bietet es sich an, sowohl das Modell als auch das Regelkonzept im Rahmen eines Feldversuchs experimentell zu erproben. Hier sind noch weitere Aspekte zu berücksichtigen, wie beispielsweise eine rechtzeitige Entleerung des Wärmeübertragers bei sehr kalter Witterung, wenn das verfügbare Drainagewasser nicht ausreicht, um das Auffrieren der Rohre des Wärmeübertragers zu verhindern.

Darüber hinaus könnten weitere Regelkonzepte untersucht werden. Insbesondere könnte es sich anbieten, kurzfristige Wetterinformationen zur Prädiktion zu nutzen. Das in diesem Projekt entwickelte Konzept reagiert nur auf die Temperaturmessung verwendet aber keine anderen Informationen. Eine Prädiktion könnte eine bessere Regelqualität erreichen, indem der Volumenstrom bereits beim Unterschreiten der Wassertemperatur erhöht wird, jedoch nur in dem Fall, wenn dies für die Eis- und Schneefreihaltung voraussichtlich erforderlich sein wird.

Abschließend danken die Autoren dem Zentrum für Energieforschung Stuttgart für die Finanzierung dieses interdisziplinären Forschungsprojekts.

6 Literatur

- [1] H. Grafmüller *et al.*, „Temperierte Strasse - Machbarkeitsstudie: Schlussbericht FE-Nr. 09.0174/2011/HRB“, 2012.
- [2] M. Keller, R. Mender und N. Schudel, „Wärme aus dem Berg: Projekt Tunnel-Geothermie des Bundesamtes für Energiewirtschaft“, *Schweizer Ingenieur und Architekt*, Jg. 1996, Nr. 14, <http://dx.doi.org/10.5169/seals-78943>, 1996.
- [3] Schweizerischen Vereinigung für Geothermie SVG, *Tunnelgeothermie Eine nutzenswerte Energiequelle im Land der Tunnels*. Neuchatel, 2008.
- [4] J. Blossfeld und I. Rönnau, *Wärmeenergie aus dränierten Bergwässern von Straßentunneln (unveröffentlicht)*. Bergisch Gladbach, 2014.
- [5] C. Moormann und P. Buhmann, *Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln*. Bergisch Gladbach, 2017.
- [6] P. Buhmann, J. Blossfeld und C. Moormann, „Geothermische Bergwassernutzung Hydrogeothermische Verfahren an deutschen Straßentunneln“ in *Fachsektionstage Geotechnik: Interdisziplinäres Forum*, Würzburg, 2017, S. 46–51.
- [7] T. Hanschke, J.-U. Kühl, R. Freund und K.-U. Mackert, „Die Geothermische Brücke Berkenthin“, *Bautechnik*, Jg. 86, Nr. 11, S. 729–732, 2009.
- [8] M. Eilers, „Glättevermeidung durch die Nutzung von Geothermie“, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, Neue Entwicklungen im Stahlbrückenbau, Okt. 2008.
- [9] J. Feldmann *et al.*, „Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie: Heft B 87“, Bergisch Gladbach, Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen : B, Brücken- und Ingenieurbau Heft B 87.
- [10] I. Kayane, „Groundwater use for snow melting on the road“ (English), *GeoJournal*, Jg. 4, Nr. 2, S. 173–181, <http://dx.doi.org/10.1007/BF00160744>, 1980.
- [11] T. Richter, *Verwendung von Erdwärme zur Schnee- und Eisfreihaltung von Freiflächen*. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verl., 2009.
- [12] A. Schacht, M. Munk, C. Busen und M. Oeser, „Synthetisch gebundene offenporige Zwischenschichten zur gezielten Temperierung von Straßen im Winter“, *Bautechnik*, Jg. 91, Nr. 7, S. 466–471, 2014.
- [13] M. Eilers, „Lärmgeminderte Brückenbeläge“, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, Expertengespräch Stahlbrückenbau, Sep. 2011.
- [14] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, *Hydrologische Atlas von Deutschland*.

- [15] H. Badelt und J. Breitenstein, *Modell zur Glättewarnung im Straßenwinterdienst: [Bericht zum Forschungsprojekt AP 99 652]*. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW, Verl. für Neue Wiss, 2005.
- [16] *VDI-Wärmeatlas*, 10. Aufl. Berlin: Springer, 2006.
- [17] A. C. Antoulas, *Approximation of large-scale dynamical systems*. Philadelphia, Pa: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM 3600 Market Street Floor 6 Philadelphia PA 19104), 2005.
- [18] Mathworks, *MatLab Control System Toolbox Documentation - Model Reduction*. [Online] Verfügbar unter: https://de.mathworks.com/help/control/model-simplification-1.html?s_tid=CRUX_lftnav. Zugriff am: 29. August 2019.
- [19] A. Castagnotto, M. C. Varona, L. Jeschek und B. Lohmann, „sss & sssMOR: Analysis and reduction of large-scale dynamic systems in MATLAB“, *at - Automatisierungstechnik*, Jg. 65, Nr. 2, 2017.
- [20] L. Ljung, *System identification: Theory for the user*, 2. Aufl. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 2012.