Erprobung einer geothermischen Bergwassernutzung am Grenztunnel Füssen

Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen
Brücken- und Ingenieurbau Heft B 198

bast
Bundesanstalt für
Straßenwesen

Erprobung einer geothermischen Bergwassernutzung am Grenztunnel Füssen

von

Christian Moormann, Till Kugler
Institut für Geotechnik (IGS), Universität Stuttgart

Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen
Brücken- und Ingenieurbau Heft B 198

bast
Bundesanstalt für
Straßenwesen

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt fur Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen können direkt bei der Carl Ed. Schunemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Seit 2015 stehen die Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
https://bast.opus.hbz-nrw.de

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 15.0656
Erprobung einer geothermischen Bergwassernutzung am Grenztunnel Füssen

Fachbetreuung:
Tim Hochstein

Referat:
Tunnel- und Grundbau, Tunnelbetrieb, Zivile Sicherheit

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßenwesen
Bruderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion:
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:
MedienMélange:Kommunikation

Druck und Verlag:
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53 | Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293 | ISBN 978-3-95606-778-5 | https://doi.org/10.60850/bericht-b198

Bergisch Gladbach, April 2024

Kurzfassung – Abstract

Erprobung einer geothermischen Bergwassernutzung am Grenztunnel Füssen

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Erprobung einer geothermischen Bergwassernutzung am Grenztunnel Füssen“ wurde die Funktionsweise einer„direkten, passiven geothermischen Freiflächentemperierung“ erprobt, die in den Jahren 2019/20 auf dem Betriebshof der Autobahnmeisterei am Nordportal des Grenztunnels Füssen baulich realisiert wurde. Hierzu wird das Bergwasser des angrenzenden Grenztunnels Füssen durch bifilar verlegte Rohrregister gepumpt. Das Bergwasser erwärmt im Winter die Fahrbahnoberfläche, um diese schnee- und eisfrei zu halten, und kühlt diesen im Sommer ab, um Spurrillenbildung vorzubeugen. Das in diesem Kontext realisierte Technikum ist mit neun Freiflächen ausgestattet, wobei der Fahrbahnaufbau bei sechs Freiflächen aus Asphalt und bei den weiteren drei aus Beton besteht; jeweils eine Beton- und eine Asphaltfläche wurde als Referenzflächen nicht mit Rohrregistern versehen.

Die Testflächen variieren bezüglich der Anordnung der Rohrleitungen hinsichtlich der Tiefenlage, den Rohrachsabständen sowie bezüglich des Deckschichtaufbaus. In jedem Feld wird der Durchfluss, Vor- und Rücklauftemperatur, sowie in Feldmitte, als auch am Rand die Temperatur in zwei Sensorebenen unterhalb und oberhalb der Rohrleitungen gemessen.

Bei direkten, passiven Freiflächenheizungen wird das Wasser direkt ohne Wärmetauscher und -pumpe durch die Rohre gepumpt. Die einzig verstellbare Größe stellt der Volumenstrom dar, welcher die Geschwindigkeit des durchströmenden Wassers bestimmt. Der dimensionslose Wärmeübergangskoeffizient des strömenden Wassers zur Umgebung nimmt mit Anstieg der Geschwindigkeit zu, so dass mehr Wärme übergeben wird.

Im Rahmen des von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) geförderten Forschungsvorhabens „Erprobung einer geothermischen Bergwassernutzung am Grenztunnel Füssen“ wurde das Technikum durch das Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart über zwei Jahre in Winter- und Sommerperioden im Einsatz getestet.

Im Fokus der Forschungsaktivitäten stand die vollständige Erfassung und Analyse der Wärmeströme temperierter Verkehrsflächen und anwendungsorientiert die Entwicklung eines möglichst effizienten und störungsfreien Betriebskonzeptes solcher Anlagen. Das Forschungskonzept für das Technikum Füssen sah vor, wesentliche Parameter der atmosphärischen Wärmeströme messtechnisch zu erfassen, daneben aber die Analyse der Messergebnisse durch numerische Simulationen zu ergänzen, die notwendig sind, um die für die Energiebilanz zur Freiflächentemperierung erforderlichen Wärmeströme, die messtechnisch nicht vollständig erfasst werden können, ergänzend abzubilden und die im weiteren als Übertragungsmodell genutzt werden sollen, um auf der Basis von Parameterstudien Empfehlungen für die Planung und den Betrieb von direkten, passiven geothermischen Flächentemperierungen auch für von dem Standort Füssen abweichende Randbedingungen abzuleiten.

In eine optimierte automatische Anlagensteuerung wurden dabei auch Wetterprognosen integriert. Im Ergebnis wurde eine Implementierungshilfe zum Einsatz von direkten, passiven Freiflächenheizungen zur Schnee- und Eisfreihaltung von Verkehrsflächen an Tunnelportalen formuliert, die einen wesentlichen Beitrag dazu leisten soll, solche nachhaltigen Konzepte zu einer Regelanwendung an Tunnelportalen zu machen.

Zur Bemessung und Auslegung der Anlage wurden alle auf die Freiflächen wirkenden, messbaren und nicht regulierbaren Wärmeströme ermittelt und quantifiziert. Zu allen Wärmeströmen gibt es, sofern alle notwendigen Daten vorliegen, analytische Berechnungsmöglichkeiten. Um das Verhalten der Anlage zu analysieren und um bei numerischen Untersuchungen Szenarien zu untersuchen, deren Randbedingungen klar definiert und messbar sind, wurden Testszenarien entwickelt. Es wurden für den winterlichen Betrieb fünf und den sommerlichen Betrieb zwei Testszenarien definiert, welche eine atypische Steuerung bei außergewöhnlichen Wetterereignissen vorsahen, um darüber hinaus auch die Grenzen der Leistungsfähigkeit der Anlage auszuloten.

Im Testszenario „Schneefall“ trat starker Schneefall ein, sodass zu den ohnehin gemessenen Daten die Dichte, Intensität und Temperatur des Schnees gemessen werden konnte. Die Auswertung weiterer Schneemessungen ergab, dass mit abnehmender Außentemperatur die wärmedämmende Wirkung des Schnees steigt .FEin weiteres Szenario zur Untersuchung der Glätte, sollte Kenntnisse zur Trägheit bzw. Reaktionszeit des Systems liefern, weshalb die Anlage über längere Zeit außer Betrieb genommen wurde, bevor die Anlage dann bei der Ankündigung von Glätte mit adäquater Vorlaufzeit aktiviert wurde.

Um die, das Verhalten der Freiflächenheizung maßgebend beeinflussenden Parameter, zu 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 die schwer durch Messungen ermittelbaren Wärmeströme (z. B. kurzwellige Strahlung) identifizieren und quantifizieren. Die Validierung der Simulation erfolgt anhand der Messdaten, welche in Perioden erfasst wurden, in denen die äußeren atmosphärischen Randbedingungen möglichst präzise bestimmbar sind. Es zeigt sich, dass die numerisch ermittelten und gemessenen Daten gut übereinstimmen. Die Parameterstudien bestätigte u.a. die Beobachtung, dass Kupferleitungen höhere Fahrbahnoberflächentemperaturen induzieren. Ferner wurde eine Aktivierungszeit von 9 Stunden vor Ankündigung eines Wetterereignisses (Glätte etc.) als ausreichend ermittelt, um die Fahrbahnoberflächen auf ein verwertbare Temperaturniveau zu heben. Es wurde auch festgestellt, dass das Abschmelzen von Schnee sehr energieintensiv ist i.e. nicht jeder Schneefall kann unmittelbar abgeschmolzen werden und es bedarf ggf. zusätzlicher Straßenräumung. Die Eisfreihaltung an der Freiflächenoberfläche konnte aber gewährleistet werden, sodass bei starkem Schneefall zwar geräumt werden muss, aber kein Salz zum Auftauen benötigt wird.

Die tatsächlich gemessenen Klimadaten stimmen nicht immer mit der Prognose überein, sodass, um auf der sicheren Seite liegend, bei der automatischen Steuerung sowohl gemessene Daten als auch Wetterprognosen berücksichtigt wurden. Die Programmierung der Steuerung erfolgte mittels eines Python Scripts. Die Fernsteuerung wurde im Winter 2021/22 erfolgreich für den Betrieb der Anlage eingesetzt. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Flächen durchgehend eisfrei gehalten werden konnten. Alle bei Planung, Bemessung und Betrieb gewonnenen Erkenntnisse wurden in eine Implementierungshilfe integriert, welche potenziellen Anwendern die Planung von direkten, passiven Freiflächenheizungen erleichtert.

Das Forschungsvorhaben belegt, dass die an deutschen Straßentunneln anfallende Drainage- bzw. Bergwässer als nachhaltige Energiequelle u. a. für die Temperierung von Betriebsgebäuden und zur Temperierung von Verkehrs- und Betriebsflächen an den Tunnelportalen genutzt werden können. Das Konzept kann bei allen Bestandstunneln, bei denen Tunneldrainagewässer anfallen, grundsätzlich eingesetzt und die Verfahrenstechnik dabei auch nachträglich installiert werden. Die Nutzung von Drainagewässern ist grund-

sätzlich grundlastfähig und kann damit sowohl zur Kühlung, aber auch zum Heizen eingesetzt werden. Die Temperierung von Verkehrsflächen zur Eis- und Schneefreihaltung eine zweite besonders effiziente Nutzung, die es erlaubt, ausgewählte Bereiche vor Tunnelportalen und auf Betriebsflächen im Winter energieeffizient zu beheizen und somit den hier oft besonders aufwändigen Winterdienst (Freihaltung Fluchtwege etc.) und den Taumitteleinsatz vor Tunnelportalen zu reduzieren. Zugleich kann der bauwerksschädigende Eintrag von Streusalz und Chloriden in den Tunnel verringert und hierdurch die Lebensdauer von Tunnelschale und -ausbau verlängert werden.

In Hinsicht auf die Nutzung erneuerbarer Energien im Betrieb von Straßentunneln bieten sich hier innovative Konzepte für die Zukunft, die auch bei Bestandstunneln nachgerüstet werden können.

Testing the use of geothermal mountain water at the Füssen border tunnel

As part of the research project “Testing the use of geothermal mountain water at the Füssen border tunnel”, the functionality of a geothermal, passive open-space heating system was tested, which was implemented in 2019/20 at the motorway maintenance depot. For this purpose, the mountain water from the adjacent Füssen border tunnel is pumped through bifilar pipe registers. The mountain water warms the road surface in winter to keep it free of snow and ice and cools it in summer to prevent rutting. The real-scale test field is equipped with nine open areas, whereby the roadway structure consists of asphalt for six open areas and concrete for the other three; one concrete and one asphalt area were not equipped with pipe registers.

The test areas vary in the arrangement of the pipes in terms of depth, pipe spacing and the surface course structure. In each field, the flow rate, flow and return temperature, as well as the temperature in the centre of the field and at the edge are measured in two sensor levels below and above the pipes.

In the case of direct, passive free-space heating, the water is pumped directly through the pipes without a heat exchanger or pump. The only variable that can be adjusted is the volume flow, which determines the speed of the water flowing through. The dimensionless heat transfer coefficient of the flowing water to the environment increases as the speed increases, so that more heat is transferred.

For the dimensioning and design of the system, all measurable and non-regulable heat flows acting on the open spaces were determined and quantified. Provided all the necessary data is available, there are analytical calculation options for all the heat flows mentioned. Test scenarios were developed in order to understand the behaviour of the system and to investigate scenarios in numerical investigations whose boundary conditions are clearly defined and measurable. Five test scenarios were defined for winter operation and two for summer operation, which provided for a typical control during extraordinary weather events in order to also sound out the limits of the system‘s performance.

In the “snowfall” test scenario, heavy snowfall took place, so the density, intensity and temperature of the snow were measured in addition to the data already measured. The evaluation of further snow measurements showed that the heat-insulating effect of the snow increases with decreasing outside temperature, and that the combination of copper pipe and concrete structure melts the snow fastest. Another scenario for investigating the

slipperiness was to provide knowledge about the inertia or reaction time of the system, which is why the system was taken out of operation for a longer period of time before the system was then activated with adequate lead time when slipperiness was announced.

In order to be able to analyse and classify the parameters that have a decisive influence on the behaviour of the open-air heating system, numerical simulations were carried out with a coupled hydraulic-thermal model. The model simulates the behaviour of the open spaces during the test scenarios and is intended to identify and quantify the heat flows (e.g. short-wave radiation) that are difficult to determine by measurements. The validation of the simulation is carried out on the basis of the measurement data which were recorded in periods in which the external atmospheric boundary conditions can be determined as precisely as possible. It is shown that the numerically determined and measured data agree well. The parameter studies confirmed, among other things, the observation that copper lines induce higher road surface temperatures. Furthermore, an activation time of 9 hours before the announcement of a weather event (icy conditions etc.) was found to be sufficient to raise the road surfaces to a usable temperature level. It was also determined that melting snow is very energy intensive i.e. not every snowfall can be melted immediately and additional road clearing may be required. However, keeping the surface free of ice can be guaranteed, so that in case of heavy snowfall, clearing is necessary, but no salt is needed for thawing.

The measured weather does not always match the forecast, so both data sources were taken into account in the automatic control system. The control system was programmed using a Python script. The remote control was used to operate the system self-sustaining in the winter of 2021/22. It was shown that the areas could be kept free of ice throughout. All the knowledge gained during planning, dimensioning and operation was integrated into an implementation aid, which makes it easier for potential users to plan direct, passive outdoor heating systems.

Summary

Testing the use of geothermal mountain water at the Füssen border tunnel

1. Technikum Füssen

As part of the research project “Testing of a geothermal use of mountain water at the Füssen border tunnel” (FE 15.0656/ 2018/ERB) commissioned by the Federal Ministry of Digital Affairs and Transport (BMDV), represented by the Federal Highway Research Institute (BASt), the functionality of a geothermal, passive open-space heating system was tested. The Technikum “Temperierte Freifläche” (tempered open space), which was structurally realised in 2019/20 at the depot of the motorway maintenance department, uses the thermal energy of the mountain water of the adjacent Füssen border tunnel to temper the open spaces. This is a pilot application for the developed innovative concept of “direct, passive geothermal open-space temperature control”, in which the previously unused tunnel drainage water circulates directly through the pipelines installed in the open space without the use of a heat pump circuit and without the addition of antifreeze. The use of potentially environmentally hazardous coolants in the secondary circuit can thus be dispensed with, which simplifies the process of obtaining water law approval for the plant. In addition, after energy extraction, the drainage water can be discharged into the receiving watercourse without hesitation. The use of such systems makes it possible to heat selected areas in front of tunnel portals and on operating areas in winter in an energy-efficient manner, thus reducing the costly winter maintenance and use of taumite in front of tunnel portals and thus also the entry of chlorides into the tunnel, which damages the structure. The mountain water is pumped through pipe registers that are laid bifilar in the open areas. At low temperatures in the roadway structure, the mountain water releases thermal energy to the roadway structure; at high roadway structure temperatures, thermal energy is supplied to the mountain water. The thermally recycled water is then discharged into a receiving watercourse. The pilot plant at the northern portal of the Füssen border tunnel was equipped with nine fields, whereby the roadway structure of the nine test areas consists of asphalt for six open areas and concrete for the other three test areas; one concrete and one asphalt area were not equipped with pipe registers, see Figure 1. The detailed design of the different test areas differ in the arrangement of the pipelines with regard to depth and pipe axis spacing as well as with

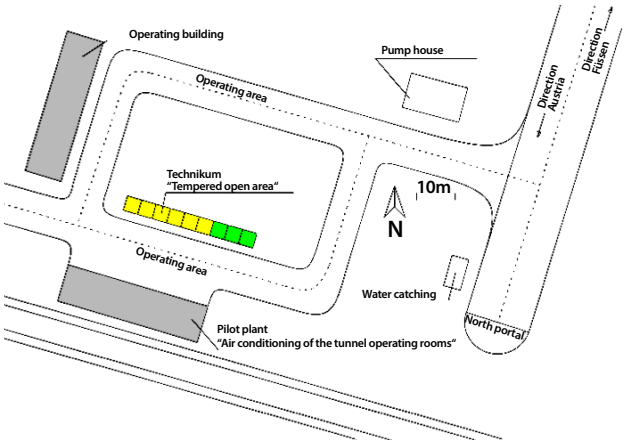


Fig. 1: Arrangement of the open space heating systems made of asphalt (yellow) and concrete (green)

regard to the different surface layer structures, see Figure 2a. In each activated field, the flow rate and the flow and return temperatures are measured inside the pipe registers. Within the pavement structure, the temperature is measured in the centre of the field as well as at the edge of the field with two sensor levels below and above the pipes (Figure 2b). This should enable a direct conclusion to be drawn about the upward and downward heat flows. The sensor levels consist of two sensors that are arranged one above the other with a vertical distance of 4 cm. A total of eight temperature sensors are installed per field.

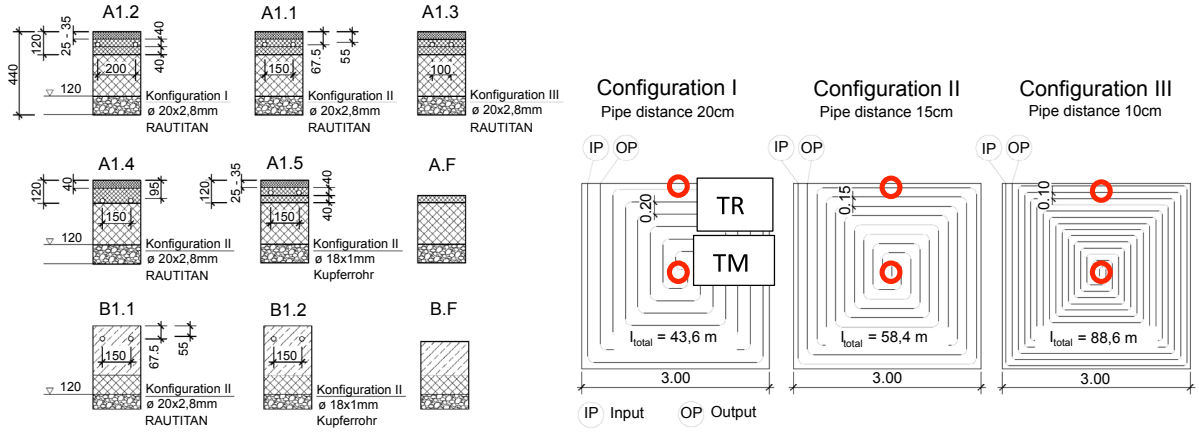


Fig. 2: a. Realised roadway structures, b. Installed pipeline configurations; the temperature sensors are marked in red (TR: temperature sensor edge, TM: temperature sensor centre).

2. Plant control

The aim of the system control is to keep the open areas free of ice and snow. With direct, passive operation of the system, there is no heat pump at all, so that the temperature of the mountain water remains unchanged. Only the volume flow can be adjusted via the pump control. Depending on the volume flow, a laminar or turbulent flow is created in the pipe registers. The dimensionless heat transfer coefficient (Nußelt number) of the flowing water to the environment increases slightly in the laminar range with an increase in the flow rate, but rises sharply with the transition to turbulent flow (von Böckh & Wetzel 2014). For the dimensioning and design of the system, all heat flows acting on the free surfaces that cannot be regulated must be determined and quantified. Based on these values, the heat flux density required to keep the ice and snow free can be determined by means of the energy balance formed at the top of the terrain. The energy balance is composed of all heat flows acting on the road surface (Figure 3) as follows:

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

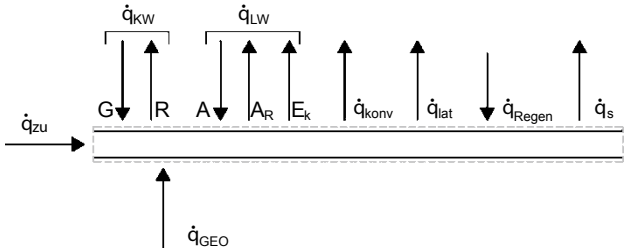


Fig. 3: Energy balance of an open space heating system

Provided all the necessary data are available, there are analytical calculation options for all the above-mentioned heat flows. Data acquisition and transmission are carried out via remote access. Furthermore, a weather station was installed, which measures air pressure,

wind speed, air temperature, rainfall and intensity. A camera was installed for visual control of the system, which can also be accessed remotely.

3. Test scenarios

Within the framework of the test scenarios, the flow through the absorbers was varied, among other things. A decisive criterion here is the dimensionless Reynolds number (Bauer et al. 2018), which is directly dependent on the flow rate of the mountain water through the pipes that can be adjusted via the power control of the circulation pump. The activation time is elementary for the system control, i.e. it must be clarified with what time advance the system must go into operation to prevent snow and slippery road surfaces and extremely high road surface temperatures in summer. For this purpose, different test scenarios were investigated. One was the snow scenario, in which heavy snowfall was forecast, so that the density, intensity, and temperature of the snow were measured in addition to the data already measured. The system was already in operation at the beginning of the test scenario. Figure 4a shows the arrangement of the temperature sensors, two in the middle of the field above the pipe registers and two others in the middle of the field below the pipe registers, as well as the temperature of the roadway structure at the beginning of the test scenario; the efficiency of field B1.2 can already be seen here. The mountain-water-induced heat input is obvious at the level of the pipe registers.

After commissioning the surface temperature control, the first field B1.2 (concrete structure with copper pipes) was completely free of snow and ice after approx. 2 hours, followed by A1.5 (asphalt structure with copper pipes; Figure 4b shows the melting process). An additional temperature measurement on a reference surface showed a ground temperature of -0.3°C for a 10 cm high snow cover, while the temperature on the snow surface was -8.5°C, resulting in a temperature gradient of 8.2 K over a snow height of 10 cm. The evaluation of the snow measurements showed that as the outside temperature decreases, the density of the snow decreases, which increases the thermal insulating effect; consequently, the more thermal energy is required to melt this “lighter” snow. Another scenario to investigate the slipperiness was to provide knowledge about the inertia or reaction time of the system, which is why the system was taken out of operation

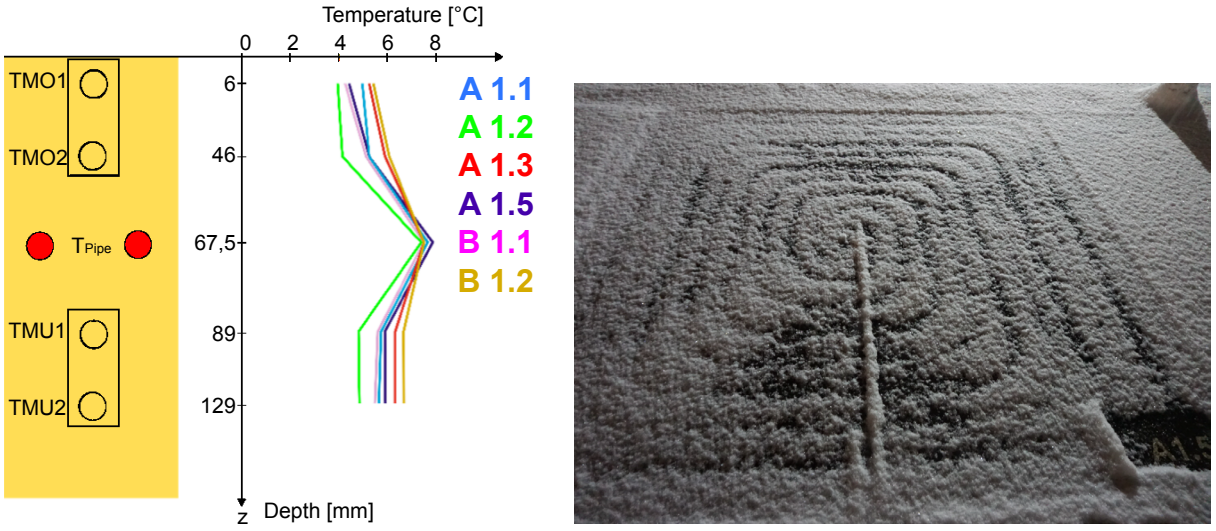


Fig. 4: a) Temperature profile of the outdoor areas during snowfall, b) Melting test field A1.5

for a longer period of time before the system was then activated with adequate lead time when slipperiness was announced, see Figure 5.

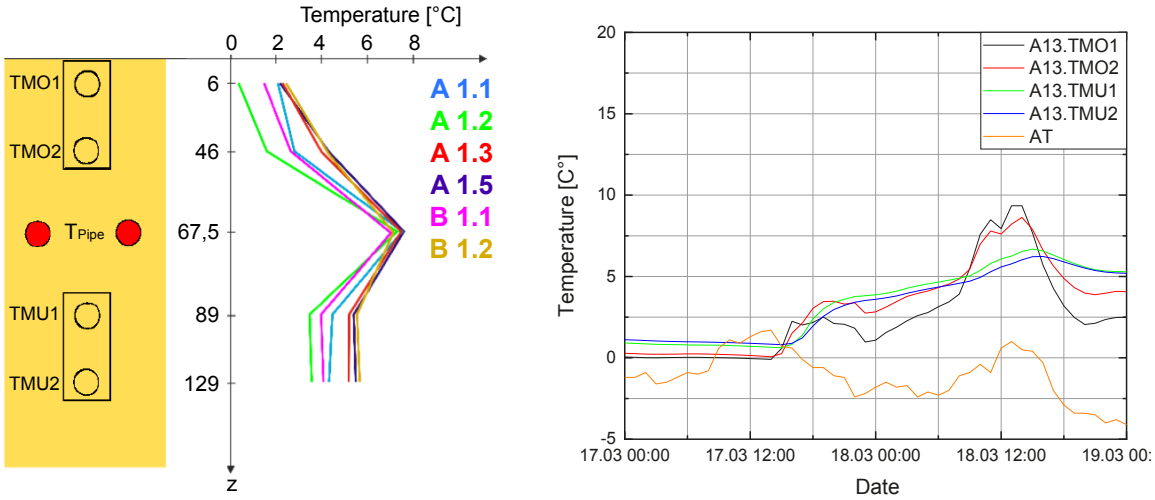


Fig. 5: a. Temperature curve of the outdoor areas during cold start; b. Temperature curve in field A1.3

4. Numerical investigations

In order to be able to analyse and classify the parameters that significantly influence the behaviour of the open space heating, numerical simulations were carried out with a coupled hydraulic-thermal model. The model simulates the behaviour of the open spaces during the test scenarios and is intended to contribute to identifying the heat flows (e.g. short-wave radiation, convection) that cannot be determined in the heat balance according to equation (1) or can only be determined with difficulty by measurements. The model, which was created with the simulation software Comsol (see Figure 6), has a base area of 3 m x 3 m and a depth of 1 m. The material properties of the model are determined by the model. The material properties of the structure and the pipes correspond to the installed roadway configurations. The validation of the simulation takes place in periods in which the external atmospheric boundary conditions can be determined as precisely as possible. In the following case, a turbulent flow in November 2020 was selected. The simulated flow rate corresponds to the flow rate measured during this period, see Figure 7.

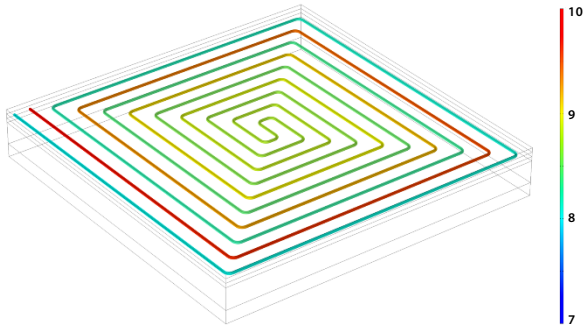


Fig. 6: Numeric simulation model [°C]

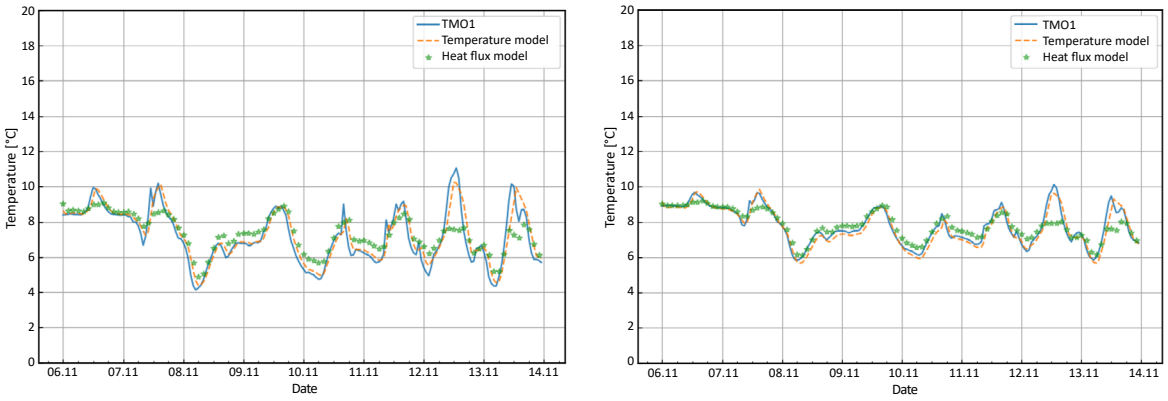


Fig. 7: Temperature curve of the free areas during cold start and the temperature curve in field A1.3

5. Parameter study

With the numerical model validated in this way, parameter studies were carried out, which were used to investigate the parameters that significantly influence the open-air temperature control. The influence of the pipe material and the installation depth of the pipe configurations was shown as an example. It can be seen (Figure 8) that copper pipes supply thermal energy to the road surface more effectively; on the right, it can be seen that the heat flow directed towards the road surface decreases with increasing installation depth of the pipe configurations.

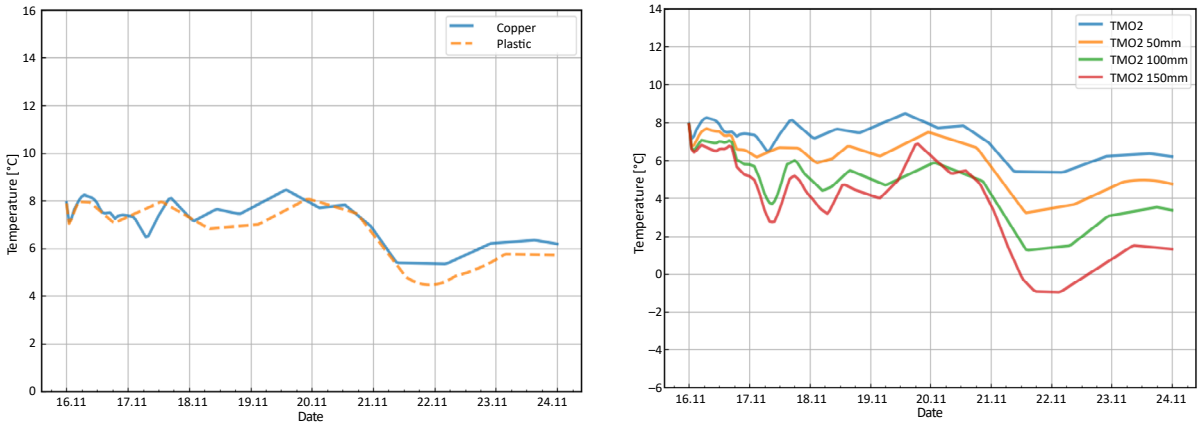


Fig. 8: Parameter study: a. Variation of the pipe material, b. Variation of the insertion depth

6. Conclusion

The measurements carried out at the pilot plant as part of the research project prove that the innovative concept of direct, passive open-air temperature control is suitable for keeping traffic areas at tunnel portals free of ice. In addition to keeping ice free and reducing snow in winter, the service life of the traffic areas can be positively influenced by cooling in summer. As a favourable side effect, the reduction in the temperature of the mountain water means that the prescribed limit temperatures can be complied with when discharging into the receiving water. Furthermore, it can be deduced that the combination of concrete roadway and pipe registers made of copper pipes with a shallow installation depth most effectively transports the thermal energy of the mountain water towards the roadway surface. However, other configurations are possible. After activation, it takes about 5 to 6 hours for the road surface to warm up enough to keep the surfaces free of ice during a snowfall of medium intensity. It was also recognised that the locally measured weather does not always correspond to the weather forecast, but

also that not only the locally measured temperature values should be used to determine the road condition. These findings were incorporated into an automatic system control, which takes into account both locally measured weather data and weather forecasts from the DWD. The remote control, which was developed using the Python programming software, was successfully used to operate the system in winter 2021/22. In order to make it easier for potential users to implement the developed concept in terms of planning and dimensioning, an implementation aid was also created that contains guidelines and recommendations for the planning, construction and operation of a “direct, passive geothermal open-space energy supply” fed by tunnel drainage and also explains how potential obstacles can be overcome.

Inhalt

1 Einleitung 15

1.1 Geothermie 15

1.2 Geothermisches Potenzial deutscher Straßentunnel 15

1.3 Technikum „Temperierte Freifläche“ am Nordportal des Grenztunnels Füssen 17

1.4 Detailbeschreibung Technikum Füssen 18

1.5 Temperierung von Verkehrsflächen: Energiebilanz 20

2 Struktur der Projektbearbeitung 24

3 Überprüfen der Messtechnik, Einfahren und Überprüfen der Anlage 25

3.1 Einarbeitung und Überprüfung der Funktionalität 25

3.2 Messung der Klimarandbedingungen 26

3.3 Kamerainstallation 26

3.4 Validierung der Messergebnisse 27

3.5 Ablagerungen 33

4 Betrieb der Anlage und Auswertung 36

4.1 Laminare und turbulente Durchströmung 36

4.2 Glätteereignis mit Trägheitsuntersuchung 37

4.3 Schneeszenario 44

4.4 Auswertung des winterlichen Betriebs 48

4.5 Auswertung der Wärmeströme 49

4.6 Sommerszenarien 52

4.7 Auswertung der Sommerszenarien 55

4.8 Messung der nach oben gerichteten Wärmestromdichten 55

5 Energiebilanzierung 57

6 Numerische Simulation 60

6.1 Entwicklung des numerischen Simulationsmodells 61
6.2 Validierung des numerischen Simulationsmodells 62
6.3 Parameterstudie 65

7 Anlagenregelung: Entwicklung und Umsetzung 75

7.1 Anlagenregelung 75
7.2 Ausspülen 76
7.3 Selbstaktivierung 76
7.4 Schlussfolgerung 77

8 Entwurfsplanung: Anwendung der Implementierungshilfe 78

8.1 Geothermisches Potenzial 78
8.2 Bauliche Ausführung der Freiflächen 79
8.3 Wasserfassung 79
8.4 Rücklauf 79

9 Zusammenfassung 80

10 Ausblick 82

Literatur 83

Bilder 85

Tabellen 88

Die Anhänge zum Bericht sind im elektronischen BASt-Archiv ELBA unter **https://bast.opus.hbz-nrw.de** abrufbar.

1 Einleitung

1.1 Geothermie

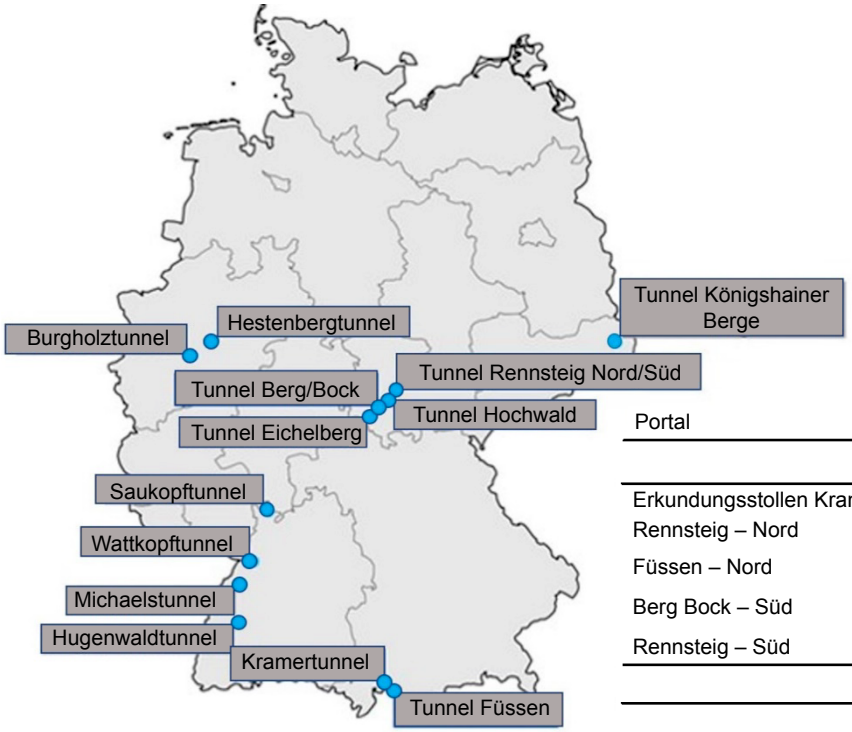
Geothermische Energie oder Erdwärme bezeichnet die im Erdboden gespeicherte Wärmeenergie, deren Quellen im oberflächennahen Bereich hauptsächlich die solare Wärmeenergie und mit zunehmender Tiefe hauptsächlich der terrestrische Wärmestrom ist. Der terrestrische Wärmestrom ist ein Produkt von radioaktiven Zerfallsprozessen im Erdinnern und der Restwärme der Erdentstehung [2]. Zur Unterscheidung der Wärmequellen hat sich die Unterteilung in oberflächennahe Geothermie bis 400 m Tiefe unterhalb der Geländeoberfläche und tiefer Geothermie ab Tiefen > 400 m durchgesetzt. Tunnelgeothermieanlagen fallen demnach der oberflächennahen Geothermie zu [8] und können aufgrund ihrer großen erd- und tunnelluftberührenden Oberfläche einen sichtbaren Beitrag zu regenerativen Energiekonzepten leisten[1].

Zur Gewinnung der thermischen Energie aus Tunnelgeothermieanlagen werden zwei Verfahren eingesetzt: Das hydrogeothermische und das absobertechnologische Verfahren. Bei absorbertechnologischen Anwendungen wird der Primärkreislauf durch Wärmeübertrager (z. B. mäandrierend, bifilar angeordnete Absorberrohre) in Bauteilen des Tunnelbauwerks, bevorzugt in der Tunnelschale, gebildet. Die Rohrleitungen werden von einem Absorberfluid durchströmt, dass die Wärme der Tunnelluft und des Baugrunds aufnimmt und dem Wärmepumpenkreislauf zuführt. Hydrogeothermische Verfahren hingegen nutzen direkt die Wärmeenergie des aus der Bergwasserdrainage austretenden Wassers. Während das absorbertechnologische Verfahren als geschlossenes System arbeitet, ist das hydrogeothermische Verfahren ein offenes System, da das Drainagewasser nach der Energieextraktion in eine Vorflut übergeben wird. Die durch hydrogeothermische Verfahren extrahierte Energie ist ein Nebenprodukt der aus tunnelstatischer Sicht erforderlichen Drainage zum Abbau des auf die Tunnelschale wirkenden Wasserdrucks. Ein großer Vorteil der hydrogeothermischen Tunnelanlagen im Vergleich zu den absorbertechnologischen Anwendungen ist die Möglichkeit der nachträglichen Nachrüstung eines Bestandtunnels. Bei dem hydrogeothermischen Verfahren ist die mögliche Energieextraktion eine Funktion der Drainagewassertemperatur, der Schüttung sowie der realisierbaren Wiedereinleittemperatur. In Abhängigkeit von der Überdeckung eines Tunnels liefert eine Bergwasserdrainage oft eine über das Jahr hin weitgehend konstant hohe Temperatur, die für alpine Basistunnel in der Größenordnung von 24 °C [8] oder auch noch deutlich darüber [10] liegen kann. Das bisherige Einsatzgebiet hydrogeothermischer Nutzungen in der Tunnelgeothermie wurde daher meist im alpinen Raum mit seinen typischen hydrogeologischen und morphologischen Verhältnissen gesehen. Tunnelhydrogeothermische Anlagen existierten vornehmlich in der Schweiz [11]. Aktuell sind in der Schweiz sieben geothermische Anlagen mit einer jährlichen Gesamtwärmeleistung von ca. 5.300 MWh/Jahr in Betrieb. Eine weitere Möglichkeit der thermischen Nutzung des Bergdrainagewassers stellt die Aquakultur dar. Das Bergwasser des Gotthard-Basistunnels tritt am Nordportal mit einer Schüttung von 150-400 l/s und einer Temperatur von 14 °C bis 16 °C aus dem Tunnel [12]. Seit 2019 wird das anfallende Bergwasser genutzt, um die größte schweizerische Fischzucht „Basis 57“ mit Frischwasser zu versorgen und zu beheizen.

1.2 Geothermisches Potenzial deutscher Straßentunnel

Eine Vorstudie [13] der Bundesanstalt für Straßenwesen zeigt, dass nicht nur alpine Straßen- und Eisenbahntunnel für den Einsatz hydrogeothermischer Verfahren bei Tunneln in-

frage kommen. In dieser Vorstudie wurden die Drainagewasserschüttungen an 15 Portalen deutscher Straßentunnel hinsichtlich ihres hydrogeothermischen Potenzials untersucht und bewertet. Unter der Annahme einer für Wärmepumpen üblichen Temperaturspreizung auf der Seite des Primärkreislaufes von 4 K ergaben sich für die fünf ergiebigsten Tunnelportale die in Bild 1-1 dargestellten Wärmeleistungen.



Portal	Wärmeleistung [kW_{th}]
Erkundungsstollen Kramer – Nord	773
Rennsteig – Nord	489
Füssen – Nord	261
Berg Bock – Süd	185
Rennsteig – Süd	177
Summe:	1.885

Bild 1-1: Wärmeleistungen der Bergwasserdrainageschüttung an ausgesuchten deutschen Straßentunneln [13]

Hierauf aufbauend wurden vom Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart (IGS) im Auftrag der BASt Detailuntersuchungen an drei Portalen deutscher Straßentunnel, dem Nord- und Südportal des Tunnels Rennsteig (Thüringen) sowie dem Nordportal des Grenztunnels Füssen (Bayern), durchgeführt [Moormann & Buhmann 2017]. Neben unterschiedlichen Anwendungen wie der Klimatisierung der Tunnelbetriebsräume, der Klimatisierung externer Gebäude mittels erdverlegter Fernwärmeleitung oder der Beheizung von Aquakulturen wurde das energetische Potenzial einer hydrogeothermischen Tunnelanlage zum Betrieb von Flächentemperierungen zur Eis- und Schneefreihaltung von Fahrbahnoberflächen an den einzelnen Tunnelportalen untersucht.

Die Untersuchungen identifizierten das Nordportal des Grenztunnels Füssen besonders geeignet zur Erprobung der Temperierung von Freiflächen mittels eines direkten, passiven hydrogeothermischen Verfahrens. Den Abschluss der Untersuchung bildete die Entwurfsplanung für ein Technikum „Temperierte Freifläche“, das auf dem Betriebsgelände des Nordportals des Grenztunnels Füssen in den Jahren 2019/20 errichtet wurde (Bild 1-2).

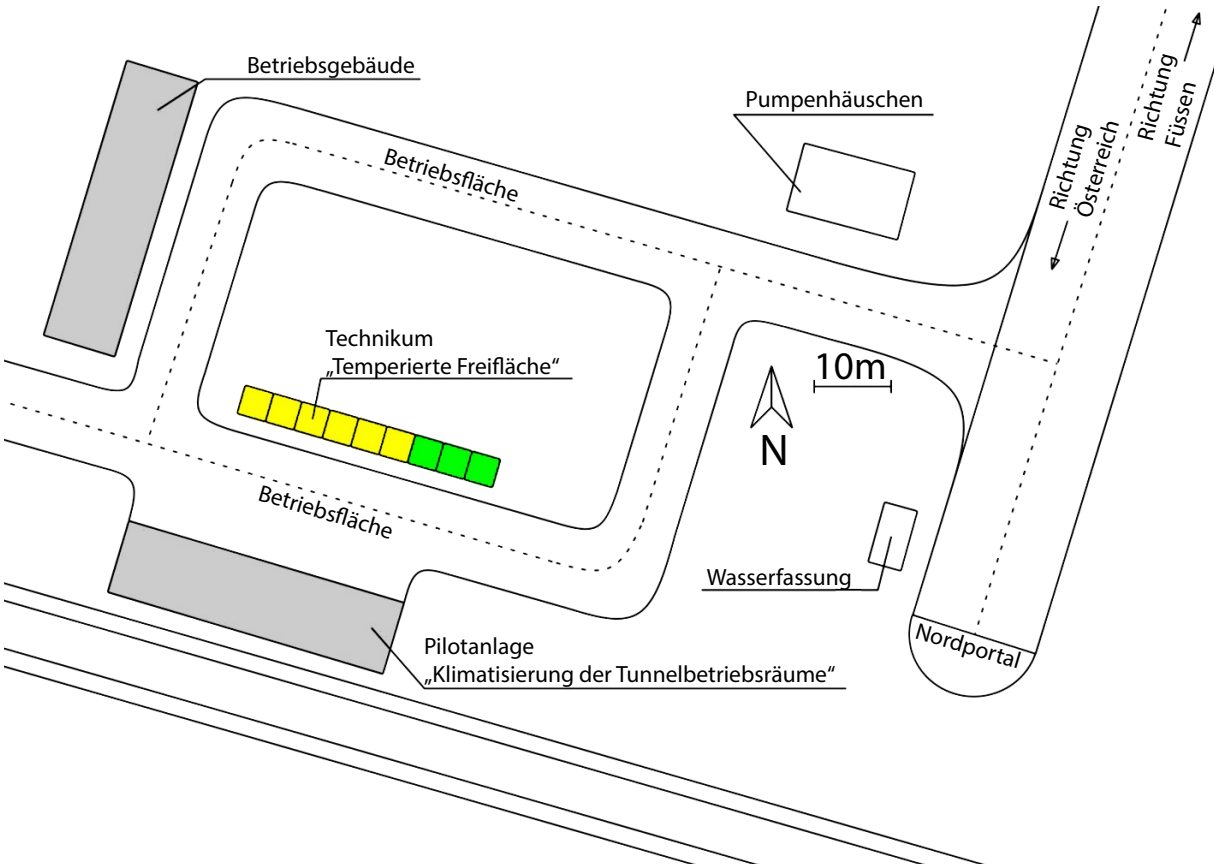


Bild 1-2: Tunnelportal Grenztunnel Füssen: Die gelb markierten Flächen besitzen einen Fahrbahnaufbau aus Asphalt, die grün markierten einen Aufbau aus Beton (Technikum Füssen)

1.3 Technikum „Temperierte Freifläche“ am Nordportal des Grenztunnels Füssen

Bei dem Technikum „Temperierte Freifläche“ handelt es sich um eine Pilotanwendung für das in [7] entwickelte Konzept einer „direkten, passiven geothermischen Freiflächentemperierung“ mittels des bisher ungenutzten Bergwasserdrainagewassers. Hierbei zirkuliert das Wasser aus der Bergwasserdrainage direkt und ohne den Einsatz eines Wärmepumpenkreislaufs durch die in der Freifläche installierten Rohrleitungen. Auf den Einsatz von potenziell umweltgefährdenden Kühlmitteln im Sekundärkreislauf kann verzichtet werden, wodurch sich die Erteilung einer wasserrechtlichen Genehmigung der Anlage vereinfacht. Nach erfolgter Energieextraktion kann das Drainagewasser bedenkenlos der Vorflut übergeben werden. Die hohe thermische Leistung des Drainagewassers an dem Standort Füssen lässt zudem eine Klimatisierung der Tunnelbetriebsgebäude zu. Die Pilotanwendung am Grenztunnel Füssen soll somit belegen, dass die direkte Nutzung des bei dränierten Straßentunneln anfallenden Bergwassers eine besonders nachhaltige und energieeffiziente Nutzung von natürlichen Ressourcen darstellt.

Der Dimensionierung des Technikums Füssen gingen hydraulische und hydrochemische Untersuchungen voraus [7]. Bei Auswertung der Messdaten der Bergwasserdrainageschüttungen an der West- und Ostulme wurde eine minimale Drainagewassermenge beider Drainagewasserfassungen zu 11,0 l/s sowie eine minimale bzw. maximale Temperatur des Drainagewasser von 8,3 °C bzw. 10,5 °C festgestellt. Nach [15] muss die Übergabetemperatur des Drainagewassers in die Vorflut zwischen 5 °C und 20 °C liegen. Bei Ausschöpfung dieser Grenzwerte beläuft sich das rechnerische geothermische Potenzial für den Heizfall

zu 152 kW und für einen Kühlfall zu 438 kW. In [16] wird die zur Eis- und Schneefreihaltung der Fahrbahnoberflächen erforderliche Wärmestromdichte mit 400 W/m² angegeben. Dieser Wert wurde bei einer numerischen Simulation der Wärmetransportvorgänge innerhalb der Freiflächen mit der Software Comsol Multiphysics unter Berücksichtigung der lokalen klimatischen Verhältnisse bestätigt. Bei der installierten Pumpenleistung können somit rechnerisch 40 Felder mit einer Fläche von 9 m² die erforderliche Wärmestromdichte von 400 W/m² bereitstellen.

1.4 Detailbeschreibung Technikum Füssen

Das Technikum am nördlichen Portal des Grenztunnels Füssen wurde mit neun Feldern ausgestattet, wobei der Fahrbahnaufbau der neun Testflächen bei sechs Freiflächen aus Asphalt (A) und bei den weiteren drei Testflächen aus Beton (B) besteht; jeweils eine Beton- und eine Asphaltfläche wurde nicht mit Rohrregistern (F) versehen. Bild 1-3 zeigt die Detailausbildung der unterschiedlichen Testflächen, die sich bezüglich der Anordnung der

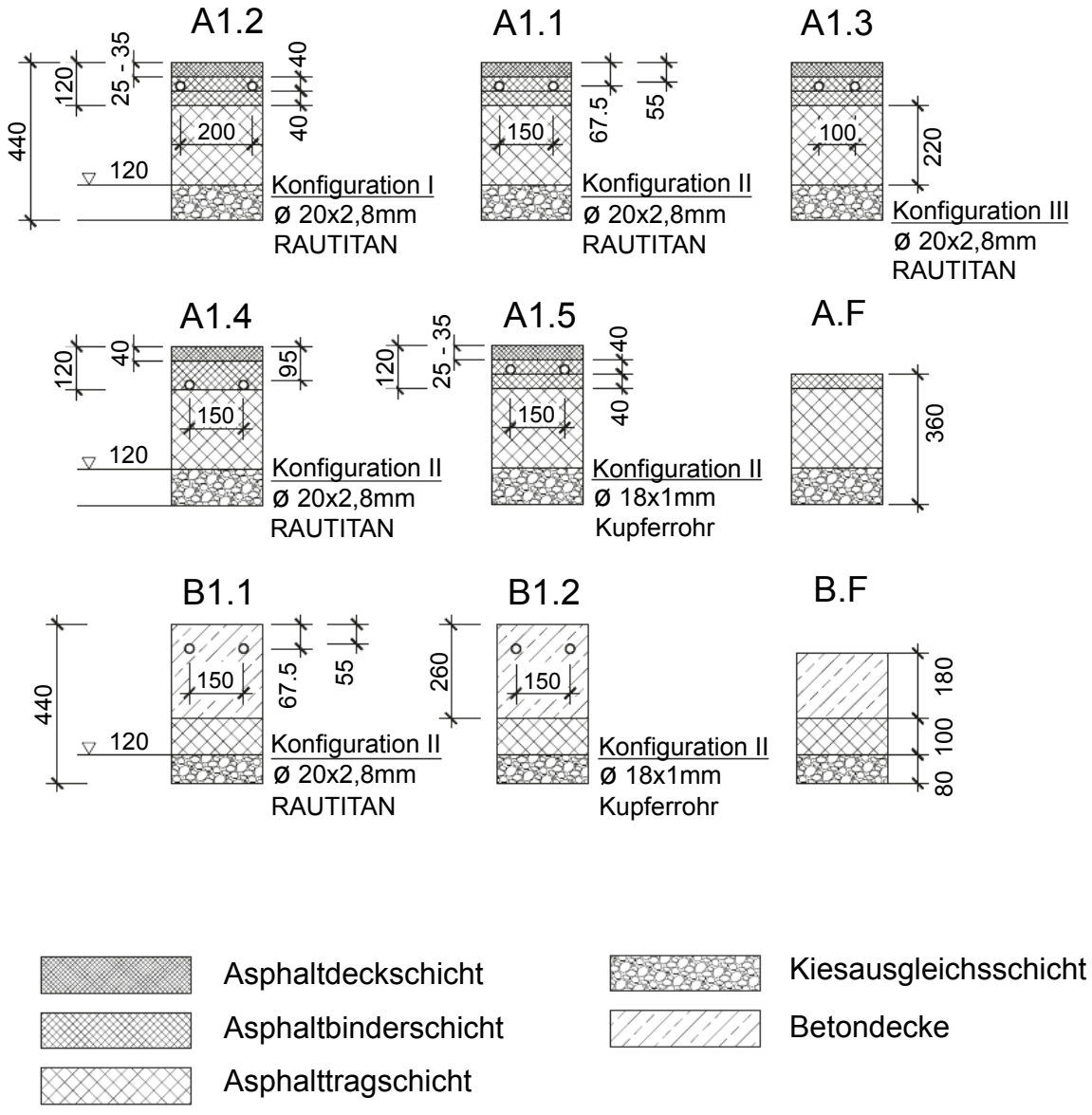


Bild 1-3: Aufbau der temperierten Testflächen (Technikum Füssen)

Rohrleitungen in Tiefenlage und Rohrachsabstand sowie bezüglich der unterschiedlichen Deckschichtaufbauten unterscheiden. In Feld A1.4 ist das Rohrregister in 95 mm Tiefe und in allen anderen Feldern in einer Tiefe von 67,5 mm unter Fahrbahnoberfläche verlegt. Der Untergrund aller Freiflächen besteht aus einer 120 mm dicken Kiesausgleichschicht, hierauf aufbauend folgt bei den Asphaltfeldern eine 200 mm und bei den Betonfeldern eine 100 mm dicke Asphalttragschicht. Darüberliegend ist bei den Asphaltfeldern eine ca. 90 mm hohe Asphaltbinderschicht verbaut, in welche die Rohrregister eingebaut wurden. Bei den Betonfeldern folgt auf die Asphalttragschicht eine 260 mm starke Betonschicht, welche den Aufbau zur Oberkante hin abschließt. Die Asphaltfelder besitzen an der Fahrbahnoberfläche noch eine Asphaltdeckschicht von 25 bis 35 mm Dicke. Der verwendete Gussasphalt wurde händisch verbaut und nicht wie im Straßenbau üblich mittels eines Asphaltfertigers, um zu vermeiden, dass die Rohre beschädigt werden. Die Verwendung eines Asphaltfertigers wurde während der Bauphase getestet und als ungeeignet befunden.

Ferner wurden drei unterschiedliche Rohrkonfigurationen bifilar verbaut, welche sich im Schenkelabstand und somit auch in der Gesamtlänge unterscheiden (Bild 1-4).

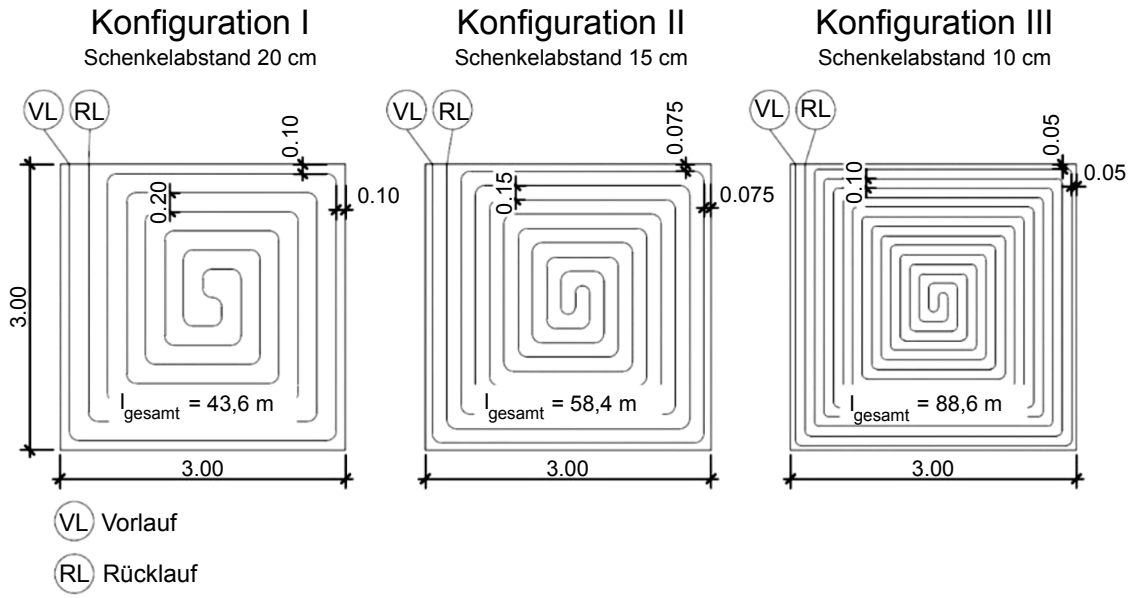


Bild 1-4: Verbaute Rohrleitungskonfigurationen

In jedem aktivierten Feld werden innerhalb der Rohrregister der Durchfluss sowie die Vor- und Rücklauftemperatur gemessen. Innerhalb des Fahrbahnaufbaus wird in Feldmitte als auch am Rand des Feldes die Temperatur in zwei Sensorebenen unterhalb und oberhalb der Rohrleitungen gemessen, siehe Bild 3-4 und Bild 3-5. Hierdurch soll ein direkter Rückschluss auf die aufwärts und abwärts gerichteten Wärmeströme möglich werden. Die Sensorebenen bestehen aus zwei Sensoren, die mit einem vertikalen Abstand von 4 cm übereinander angeordnet sind. Insgesamt sind pro Feld acht Temperatursensoren verbaut.

Der installierte Mechanismus sieht vor, das Drainagewasser in einem Absetzbecken zu fassen, von dem aus dem Wasser in ein Pumpenhäuschen geführt und von dort über eine Versorgungsleitung zu den einzelnen Feldern gepumpt wird. Jedes Rohrregister ist einzeln mit einer Vorlaufleitung an der Versorgungsleitung angeschlossen.

Über eine Rücklaufleitung wird das thermisch verwendete Wasser aller Felder wieder gesammelt und in die Vorflut, ein Flora- und Fauna-Habitat, eingeleitet. Zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit der Anlage wurden an den Vor- und Rückläufen Temperatursensoren

und an den Vorläufen zusätzlich Messgeber für den Volumenstrom angebracht. Aus diesen Parametern lässt sich ermitteln, wie viel thermische Energie dem Drainagewasser entzogen wurde. Die Übergabe zwischen der Versorgungsleitung und der Vorlaufleitung der Rohrkonfigurationen ist mit Absperrhähnen ausgerüstet, um den Durchfluss zu einzelnen Feldern zu regulieren.

Im Laufe des Projektes wird die Durchströmung der Testfelder stark variiert. Eine Umwälzpumpe allein könnte nur mit einem reduzierten Wirkungsgrad alle geplanten Durchflussraten bewältigen, weshalb zusätzlich eine zweite Umwälzpumpe im Pumpenhäuschen installiert wurde. Ein vor Ort eingerichteter Computer, auf den per Fernsteuerung zugegriffen werden kann, steuert die Pumpenleistung und liest die Messdaten aus. Die Fernsteuerung erfolgt über das Mobilfunknetz, sodass von überall mittels eines VPN-Zuganges auf den Computer zugegriffen werden kann.

1.5 Temperierung von Verkehrsflächen: Energiebilanz

Entscheidend für eine zutreffende Planung und Bemessung von Freiflächenheizungen zur Schnee- und Eisfreihaltung von Fahrbahnoberflächen ist eine vollständige energetische Bilanzierung der Wärmeströme (Energiebilanz) an der Fahrflächenoberkante. Die Oberflächentemperatur der Erde wird durch ein Gleichgewicht zwischen den Wärmetransportmechanismen an der Geländeoberfläche und dem geothermischen Wärmefluss bestimmt. Die Wärmekapazität des Untergrundes ist hierbei 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, wie erwähnt, Tiefen bis 400 m unter der Geländeoberkante erschlossen. Die Temperaturen von Grundwasser und Boden betragen für diesen Tiefenbereich +8 °C bis +25 °C. Für die Bemessung von Anlagen zur Flächentemperierung ist relevant, ob die zur Eis- und Schneefreihaltung erforderliche Wärmeenergie für die Dimensionierung von Freiflächenheizungen für den Spitzenlastfall, d. h. die im jährlichen Verlauf maximal auftretende Energieabgabe, ausgelegt werden soll, oder aber, ob an wenigen Tagen im Jahr mit Spitzenlastfall auch ein ergänzender Winterdienst vorgesehen werden kann. Die Basis der Ermittlung der erforderlichen Wärmestromdichte bildet eine Energiebilanz, die im Bereich des einzubauenden Wärmeübertragers (Rohrleitungen im Freiflächenaufbau) aufzustellen ist, siehe Bild 1-5.

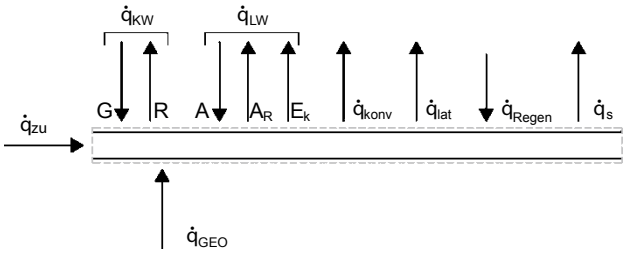


Bild 1-5: Energiebilanz einer Freiflächentemperierung

Die Energiebilanz für den betrachteten Wärmeübertrager wird wie folgt formuliert:

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

Dabei sind folgende Wärmeströme zu berücksichtigen:

- 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.

  Der Einfluss der Erdwärme ist bei einer Freiflächenheizung gegenüber den anderen an der Energiebilanz beteiligten Wärmeströmen verhältnismäßig gering, da die Wärmetauscher sehr oberflächennah liegen.

- Kurzwelliger Wärmestrom $\dot{q}_{KW}$

  Die Oberflächentemperatur der Sonne beträgt ca. 6.000 K. Das ist der Grund, warum die energiereichste Strahlung als für den Menschen sichtbares Licht mit einer Wellenlänge von λ = 0,45 µm 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 Streuungsvorgänge. Die auf die Erde auftreffende Globalstrahlung G setzt sich aus der direkten Strahlung I und der diffusen Strahlung D zusammen:

  $$G = I + D \tag{2}$$

- Langwelliger 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 zum Teil 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 für einen schwarzen Strahler σ, dem Emissionsgrad ε, der Oberflächentemperatur T_{sf}, und einer kleinen gegenüber einer unendlich großen Fläche folgt in allgemeiner Form der Wärmestrom zu:

  $$\dot{q}_{LW} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot {T_{sf}}^4 \tag{3}$$

  mit:

  ε Emissionsgrad [-]

  σ Stefan-Boltzmann-Konstante für schwarze Strahler [W/(m²K⁴]

  T_{sf} Oberflächentemperatur [K]

- Konvektiver Wärmestrom $\dot{q}_{konv}$

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

  $$\dot{q}_{konv} = \alpha \cdot \left(\vartheta_{air} - \vartheta_{sf}\right) \tag{4}$$

mit:

α Wärmeübergangskoeffizient W/(m²K)

ϑ_{air} Lufttemperatur [°C]

ϑ_{sf} Oberflächentemperatur [°C]

Der Wärmeübergangskoeffizient α beschreibt hierbei die Wärmeübertragungsmechanismen in der Grenzschicht zwischen dem überströmten Festkörper (Geländeoberfläche) und dem strömenden Fluid (bewegte Luft).

- 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:

$$\dot{q}_{lat} = \alpha_{SA} \cdot \frac{0{,}622 \cdot L}{p \cdot c_{p,L}} \cdot (p_d - p_s) \quad (5)$$

  mit:

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

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

  p_d Partialdampfdruck der Luft

  p_s Sättigungsdampfdruck des Schnees

  α_{SA} Wärmeübergangskoeffizient für latenten Wärmetransport

  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 Potenzial 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:

$$\dot{q}_{Regen} = i_R \cdot c_w \cdot (\vartheta_R - \vartheta_S) \quad (6)$$

  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 häufig eine Verdichtung der Schneedecke, nicht jedoch eine Reduzierung der Schneemenge.

- 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:

  $$\dot{q}_s = i_S \cdot \rho_S \cdot L_S + m \cdot c_{p,w} \cdot \Delta\vartheta \qquad (7)$$

  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)

  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 Struktur der Projektbearbeitung

Die Bearbeitung des Projektes erfolgt in Arbeitspaketen, welche die in der Ausschreibung spezifizierten Ziele und Ansätze sowie die jeweiligen Bearbeitungsansätze wiederspiegeln. Hierfür wurden die folgenden Arbeitspakete definiert:

AP 1: Überprüfung des Technikums im Hinblick auf Funktionalität, Validierung – gegebenenfalls auch Kalibrierung – der eingebauten Messgeber durch Probebetrieb;

AP 2: Betrieb der geothermischen Pilotanlage sowie Auswertung und Interpretation der Messdaten in Abhängigkeit von den klimatischen Randbedingungen;

AP 3: Entwicklung eines Regelkonzeptes für eine optimierte Steuerung der geothermischen Pilotanlage;

AP 4: Numerische Simulation ausgewählter Betriebsphasen auf Grundlage der Messdaten und vollständige Bilanzierung der Wärmeströme („Energiebilanz“);

AP 5: Numerische Parameterstudie zur Übertragung der Erkenntnisse auf vom Standort Füssen abweichende Randbedingungen;

AP 6: Ausarbeitung einer Implementierungshilfe: „Empfehlungen für Planung, Bemessung und Betrieb von direkten, passiven Freiflächenheizungen zur Schnee- und Eisfreihaltung von Fahrbahnoberflächen unter Einsatz tunnelgeothermischer Systeme“ für Anwender mit Empfehlungen zu Fahrbahnaufbau, Rohrleitungssystem, Steuerung (Durchflussraten, Intervall- oder Dauerbetrieb etc.) in Abhängigkeit von Schüttungsrate und Vorlauftemperatur der Bergwasserdrainage sowie klimatischen Randbedingungen;

AP 7: Anwendung der Implementierungshilfe und Erstellung einer Entwurfsplanung für eine Flächentemperierung der Fahrbahnen der BAB A7 vor dem nördlichen Portal des Grenztunnels Füssen.

3 Überprüfen der Messtechnik, Einfahren und Überprüfen der Anlage

Die Phase I umfasste die Überprüfung des Technikums in Hinblick auf Funktionalität sowie die Validierung und teilweise Kalibrierung der eingebauten Messgeber durch einen Probebetrieb. Ferner waren die Beschaffung und der Aufbau der Wetterstation Teil der ersten Phase.

3.1 Einarbeitung und Überprüfung der Funktionalität

Das IGS erhielt am 04.12.2020 im Rahmen eines Ortstermins seitens der Firma, welche die Anlagensteuerung erstellte eine Einweisung in die Steuerung und die messtechnische Überwachung der Anlage des Technikums.

In einem ersten Schritt stand in der Folge vor allem der Verständnisgewinn für die Anlage im Fokus. Es erfolgte eine Einarbeitung in die Fernsteuerung des Technikums und die Durchführung einiger Untersuchungen bei sich ändernden Randbedingungen. In diesem Zusammenhang wurde am 04.12.2020 die Funktionsfähigkeit des Havarieszenarios vor Ort und via Fernsteuerung erfolgreich getestet. Die Steuerung besitzt eine integrierte Sicherung, die das Havarieszenario für alle Felder starten lässt, sobald in einem Feld der untere der beiden obenliegenden Sensoren unter eine gewählte Temperatur (hier: 2 °C) fällt, siehe Bild 3-4. Diese Sicherung kann nur vor Ort ausgesetzt oder abgeändert werden.

Das in der Herstellungsphase entwickelte Havarieszenario soll verhindern, dass bei Stromausfall oder anderen Havarien, welche zum Ausfall des Pumpenbetriebs führen können, Wasser in den Leitungen stehen bleibt. Das Wasser könnte bei kalten Außentemperaturen gefrieren und durch die Volumenzunahme des Eises wären Beschädigungen der Rohrleitungen und Apparaturen möglich. Um diesem Szenario präventiv zu begegnen, wurde ein Konzept entwickelt, das vorsieht, in einem solchen Fall das Bergwasser mittels Druckluft aus den Leitungen zu blasen. Das Pumpenhäuschen verfügt zu diesem Zweck über einen Druckluftkompressor und zwei Drucklufttanks. Sobald die Pumpen außer Betrieb gehen, unabhängig davon ob dies aktiv gesteuert wurde, startet das Havarieszeanrio. Hierbei werden zuerst alle Kugelhähne geschlossen und das Ventil des Lufttanks geöffnet und somit in der Zulaufleitung ein hoher Druck erzeugt. Nun öffnen sich der Reihe nach jeder Kugelhahn einzeln für 20 Sekunden und schließt danach wieder. i. e. jedes Feld wird einzeln ausgeblasen. Nach diesem ersten Durchblasen aller Felder steht die Anlage 20 Minuten still. Die Ruhezeit wird notwendig, da beim Durchblasen die Luft ab einem bestimmten Punkt über das Wasser hinwegbläst und das Wasser zudem an der inneren Oberfläche der Rohrleitungen anhaftet. Während der Ruhephase fließt das Wasser wieder zur tiefsten Stelle der Rohrkonfigurationen und füllt wieder den ganzen Querschnitt der Rohre aus. Nach 20 Minuten wird das Wasser nun wieder so lange als „Pfropfen“ ausgeblasen, bis die Luft wieder über das Wasser hinweg bläst. Dieser Vorgang wird siebenmal wiederholt. In einem Versuchslauf wurde offensichtlich, dass ab der siebten Wiederholung nur noch eine kaum messbare Menge Wasser ausgeblasen wird. Nach diesem Ausblasvorgang kann nun von entleerten Leitungen ausgegangen werden, bzw. das verbliebene Wasser hat genug Raum, um sich beim Gefrierprozess ungehindert auszudehnen.

3.2 Messung der Klimarandbedingungen

Die Klimarandbedingungen werden über eine vor Ort installierte Wetterstation gemessen. Hierfür wurde vom IGS eine digitale Wetterstation (Bresser WLAN Profi Wetter Center 6 in 1) angeschafft und am 04.12.2020 in unmittelbarer Nähe zu den Testfeldern aufgestellt, siehe Bild 3-1. Der Wetterdatenabruf erfolgt digital über die frei zugängliche Plattform Wunderground (**https://www.wunderground.com/**) und kann jederzeit unter dem Stationsnamen „IFSSEN9“ abgerufen werden. Die Kalibrierung der Wetterstation erfolgte am Institut in Stuttgart.

Ebenfalls wurde ein Zugang zum Straßenvorhersagesystem SWIS des Deutschen Wetterdienstes angeschafft, sodass jederzeit auf die Daten der Glättemeldeanlage (P933) in 300 m Entfernung des Technikums zugegriffen werden kann.



Bild 3-1: Vor Ort installierte Wetterstation

3.3 Kamerainstallation

Zur Überwachung der Testfelder wurde von der Autobahnmeisterei Südbayern eine Kamera installiert. Die Aufnahmen sind aus datenschutzrechtlichen Gründen jedoch nicht live abrufbar, sondern werden in 10 Tages-Intervallen von der Autobahnmeisterei gesichert. Wie in der Betreuergruppensitzung am 11.12.2020 beschlossen, wurde daher zusätzlich eine Kamera (Reolink Go) installiert, auf die live zugegriffen werden kann, siehe Bild 3-2. Die Datenübertragung erfolgt über das Mobilfunknetz, die Stromversorgung ist durch ein externes Solarmodul sichergestellt.



Bild 3-2: Zusätzliche vom IGS angebrachte Kamera

3.4 Validierung der Messergebnisse

Die verbauten Temperatursensoren wurden vor Einbau durch einen Mitarbeiter des IGS kalibriert und validiert. Fehlerhafte Messungen können nach Einbau nur noch das Resultat eines fehlerhaften Einbaus der Sensoren oder einer Beschädigung sein. Der Sensoreinbau wurde protokolliert und in einer Fotodokumentation festgehalten, anhand derer sich Rückschlüsse auf eventuelle Abweichungen oder Fehler identifizieren lassen. Während des Einbaus wurden keine offensichtlichen Beschädigungen der Sensoren festgestellt. In den folgenden Tabellen (Tabelle 1, Tabelle 2) sind die Sollwerte der Tiefenlage und die dazu tatsächlich gemessenen Lage der Sensoren dokumentiert. Das Koordinatensystem, welchem dem Einbau zugrunde liegt, ist in dem unteren linken Eck der Freiflächen angeordnet. Die z-Koordinate ist nach unten hin als positiv definiert.

Es wurden bezüglich der IST-Lage der eingebauten Temperatursensoren in der Horizontalen Abweichungen von bis zu 49 mm und in der Vertikalen bis zu 7 mm vom Soll-Wert festgestellt. Der Zeileneintrag „Pos.“ gibt die Position der Messsensoren an (M: Feldmitte, R: Feldrand), vgl. Bild 3-5. Diese Abweichungen werden in der Auswertung der Messergebnisse berücksichtigt.

Das Funktionsprinzip der Anlage sieht vor, dass die Rohrregister vom Drainagewasser durchströmt werden und somit die Oberflächentemperatur entweder abgesenkt oder angehoben wird. Ist die Oberflächentemperatur niedrig und die Anlage in Betrieb, resultiert im Fahrbahnaufbau hieraus ein nach oben gerichteter Temperaturgradient. Bei hohen Oberflächentemperaturen ist demnach mit einem entgegengesetzten Temperaturgradient zu rechnen. In Bild 3-4 ist der schematische Aufbau einer Messstelle dargestellt, alle vier Sensoren sind vertikal direkt übereinander eingebaut, zwei Sensoren sind oberhalb der Absorberleitungen verbaut und zwei unterhalb. Die Anordnung erlaubt es, den Temperaturgradienten und dessen Richtung zu ermitteln. Diese Konfiguration ist sowohl in Feldmitte als auch im Rand des Testfeldes verbaut, siehe Bild 3-5.

[mm]		dx			dy			dz		
Feld	Pos.	Soll	Ist	Abweichung	Soll	Ist	Abweichung	Soll	Ist	Abweichung
	M	1500	1500	0	1580	1565	15	80	80	0
A1.1	R	1570	1558	-12	2730	2729	1	80	80	0
	M	1500	1485	0	1450	1445	-5	80	80	0
A1.2	R	1600	1580	-20	2930	2930	0	80	80	0
	M	1500	1485	0	1550	1550	0	80	80	0
A1.3	R	1550	1540	10	2900	2900	0	80	80	0
	M	1500	1494	6	1580	1580	0	80	80	0
A1.4	R	1570	1550	0	2730	2730	0	80	80	0
	M	1500	1506	0	1580	1579	1	80	80	0
A1.5	R	1570	1559	11	2730	2730	0	80	80	0
	M	1500	1483	17	1580	1581	-1	80	80	0
B1.1	R	1570	1545	25	2730	2730	0	80	80	0
	M	1500	1488	12	1580	1580	0	80	80	0
B1.2	R	1570	1557	13	2730	2730	0	80	80	0

Tab. 1: Vermessung Sensorebene I (Untere Lage)

[mm]		dx			dy			dz		
Feld	Pos.	Soll	Ist	Abweichung	Soll	Ist	Abweichung	Soll	Ist	Abweichung
	M	1500	1500	0	1580	1585	5	3	3	0
A1.1	R	1570	1568	-2	2730	2736	6	3	3	0
	M	1500	1485	-15	1450	1505	55	3	3	0
A1.2	R	1600	1595	-5	2930	2924	-6	3	3	0
	M	1500	1485	-15	1550	1574	24	3	3	0
A1.3	R	1550	1547	-3	2900	2877	-23	3	3	0
	M	1500	1490	-10	1580	1595	15	3	3	0
A1.4	R	1570	1550	-20	2730	2748	18	3	3	0
	M	1500	1506	6	1580	1592	12	3	3	0
A1.5	R	1570	1568	-2	2730	2726	-4	3	3	0
	M	1500	1485	-15	1580	1561	-19	3	3	0
B1.1	R	1570	1545	-25	2730	2779	49	3	3	0
	M	1500	1505	5	1580	1580	0	3	3	0
B1.2	R	1570	1571	1	2730	2751	21	3	3	0

Tab. 2: Vermessung Sensorlage II (Obere Lage)

Das Funktionsprinzip der Anlage sieht vor, dass die Rohrregister vom Drainagewasser durchströmt werden und somit die Oberflächentemperatur entweder abgesenkt oder angehoben wird. Ist die Oberflächentemperatur niedrig und die Anlage in Betrieb, resultiert im Fahrbahnaufbau hieraus ein nach oben gerichteter Temperaturgradient. Bei hohen Oberflächentemperaturen ist demnach mit einem entgegengesetzten Temperaturgradient zu rechnen. In Bild 3-4 ist der schematische Aufbau einer Messstelle dargestellt, alle vier Sensoren sind vertikal direkt übereinander eingebaut, zwei Sensoren sind oberhalb der Absorberleitungen verbaut und zwei unterhalb. Die Anordnung erlaubt es, den Temperatur-

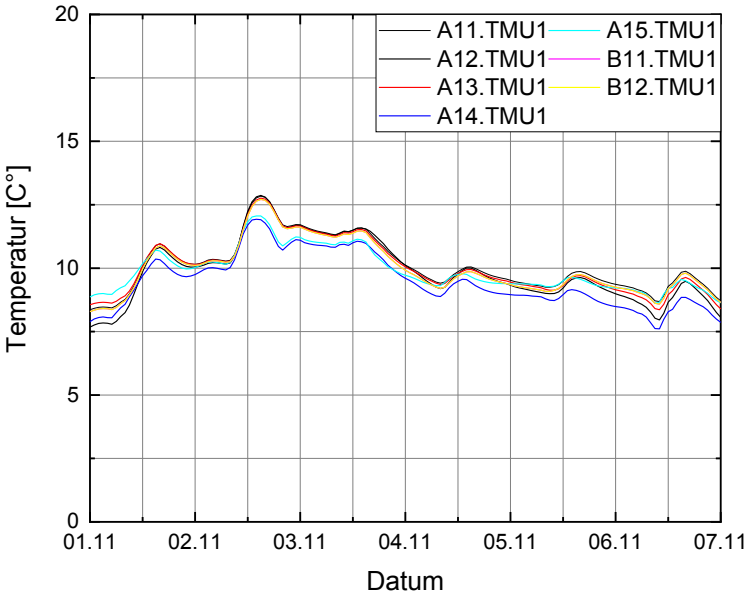


Bild 3-3: Temperaturmessung der obersten Lage unterhalb der Rohrregister

gradienten und dessen Richtung zu ermitteln. Diese Konfiguration ist sowohl in Feldmitte als auch im Rand des Testfeldes verbaut, siehe Bild 3-5.

Die Überprüfung der Funktionsfähigkeit der eingebauten Temperatursensoren wurde in der ersten Phase durch den Vergleich der Messwerte der auf gleicher Höhe befindlichen Temperatursensoren aller Testfelder durchgeführt, d. h. bei inaktiver Durchströmung müssen die Sensoren z. B. die unterste Sensorlage in allen Testfeldern annähernd die gleiche Temperatur messen. In Bild 3-3 sind beispielsweise die gemessenen Temperaturen der TMU1-Sensoren (vgl. Bild 3-4) während der Testphase ohne Durchströmung aufgezeigt. Es zeigt sich ein annähernd gleicher Temperaturverlauf, was ein Indikator, dafür ist, dass eine ernsthafte Beschädigung einer der Sensoren auszuschließen ist. Der beschriebene Abgleich der gemessenen Temperaturen wurde für alle Temperatursensoren erfolgreich durchgeführt. Des Weiteren muss sich mit zunehmender Tiefe die von der Geländeoberkante induzierte Temperaturamplitude abschwächen, d. h. je tiefer der Temperatursensor verbaut wurde, desto weniger volatil dürfen die dort gemessenen Daten sein. In Bild 3-6 ist exemplarisch eine Temperaturmessung des Testfeldes A1.3 dargestellt. Die in der Legende angegebenen Bezeichnungen stellen Abkürzungen für die Lage der Sensoren dar (T = Temperatursensor, M = Feldmitte, R = Feldrand, O = Obere Sensorlage, U = Untere Sensorlage, 1 = Oberer Sensor der Sensorlage, 2 = Unterer Sensor der Sensorlage).

Die gemessenen Temperaturen am Rand und in Feldmitte sind annähernd gleich und die Temperaturmessungen werden mit zunehmender Tiefe persistenter. Die gemessenen Daten bestätigen folglich die aufgestellten Validierungskriterien, darüber hinaus wurden gemäß Fotodokumentation die Sensoren beim Einbau nicht beschädigt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Werte der Messsensoren verlässlich sind. Die anderen Testfelder wurden mit derselben Herangehensweise ebenfalls positiv validiert.

Die Messungen der Durchströmungssensoren wurden ebenfalls auf Plausibilität hin untersucht. Die Durchströmung aller Testfelder wird an der Pumpe eingestellt und in jedem Feld einzeln gemessen. Sind die aufsummierten Durchströmungen der einzelnen Testfelder und der an der Pumpe eingestellte Volumenstrom identisch, kann von zutreffend gemessenen Werten ausgegangen werden. In dieser Hinsicht wurden an der Pumpe unterschiedliche

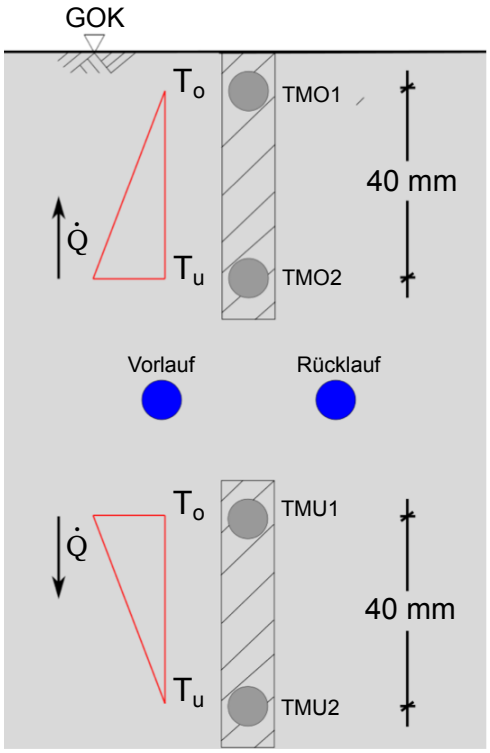


Bild 3-4: Schnitt B-B: Lage der Sensoren innerhalb des Fahrbahnaufbaus

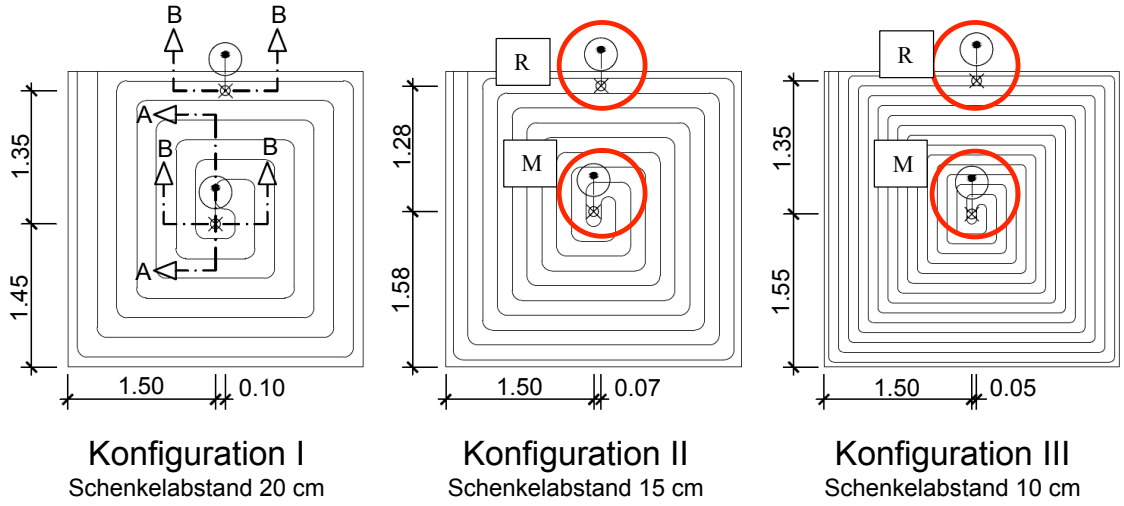


Bild 3-5: Draufsicht: Lage der Sensoren im Testfeld (Rote Markierung)

Durchströmungsgrößen eingestellt. Der Wärmeübergang zwischen dem strömenden Fluid und der umgebenen Wand ist nicht nur vom Temperaturgradienten, sondern auch vom Strömungszustand des Fluids abhängig. Der Strömungszustand eines Fluids wird über den Wert der Reynoldszahl ermittelt. Bis zu einer Reynoldszahl von 2.300 ist in einer Rohrströmung mit einer laminaren Strömung zu rechnen, zwischen 2.300 und 3.000 wird die laminare Strömung instabil und ab 3.000 ist mit einer turbulenten Strömung zu rechnen. Umgerechnet auf die Pumpenleistung bedeutet dies einen laminaren Strömungszustand bei ca. 0,18 l/s, einen leicht turbulenten bei ca. 0,4 l/s und einen hoch turbulenten bei 1,0 l/s, siehe Bild 3-7 bis Bild 3-9. Die Strömungszustände beeinflussen darüber hinaus die Reibungsverluste zwischen Fluid und Rohrwand, sowie zwischen den einzelnen Fluidteilchen. Durch Abänderung der Strömungsverhältnisse kann das Verhalten der Anlage besser

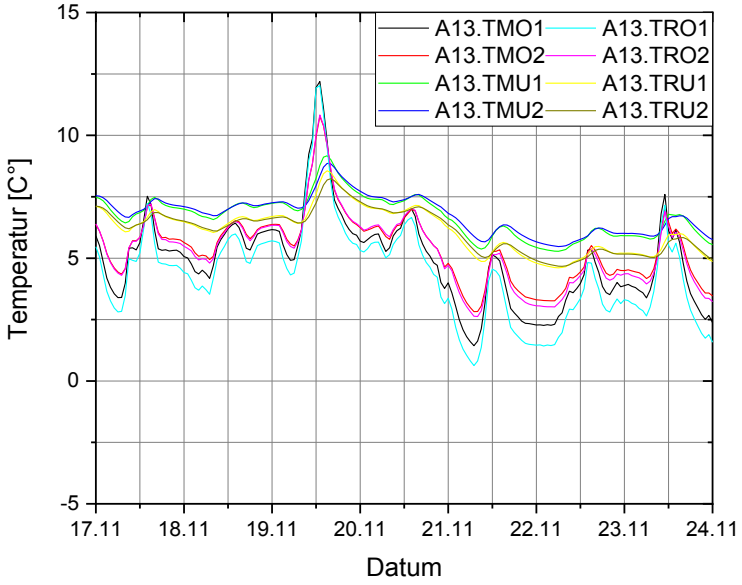


Bild 3-6: Temperaturmessungen in den Sensoren oberhalb und unterhalb der Rohrkonfiguration, am Testfeld A13

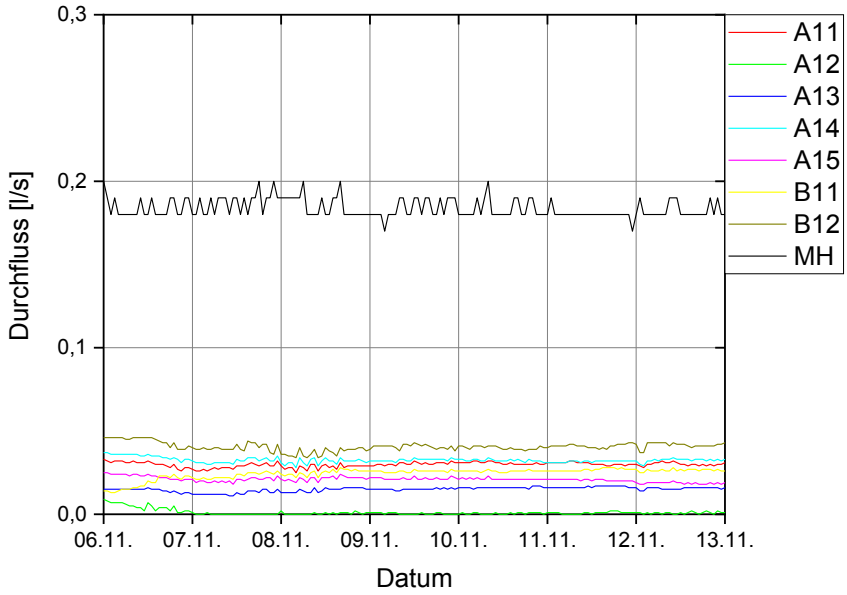


Bild 3-7: Laminare Durchströmung der Testfelder im November 2020, (MH = Summe aller Durchflüsse)

beurteilt werden. Die eingestellte Gesamtdurchströmung und die in jedem Feld einzeln gemessene und anschließend aufsummierte Gesamtdurchströmung waren annähernd identisch, weshalb hier ebenfalls von einer Funktionstauglichkeit der Durchströmungsmessgerber und zutreffenden Messwerten ausgegangen werden kann. Wenn die Pumpe außer Betrieb und die Gesamtdurchströmung folglich 0 l/s ist, messen einige Durchströmungssensoren eine Durchströmung. Der Grund hierfür ist laut ausführender Firma, dass die Sensoren ausschließlich zur Messung von Wasserströmen konzipiert seien, so dass der Luftkontakt der Sensoren fehlerhafte Ergebnisse liefere. Die Strömungsmessungen der Sensoren bei einer inaktiven Pumpe sind demnach zu ignorieren.

Bei den Durchflussmessern handelt es sich um magnetisch induktive Durchflussmesser, welche den Hall-Effekt nutzen, i. e. an das Rohr wird äußerlich ein senkrecht zur Fließrichtung wirkendes Magnetfeld aufgebracht. Die sich im Wasser befindenden Ladungsträger

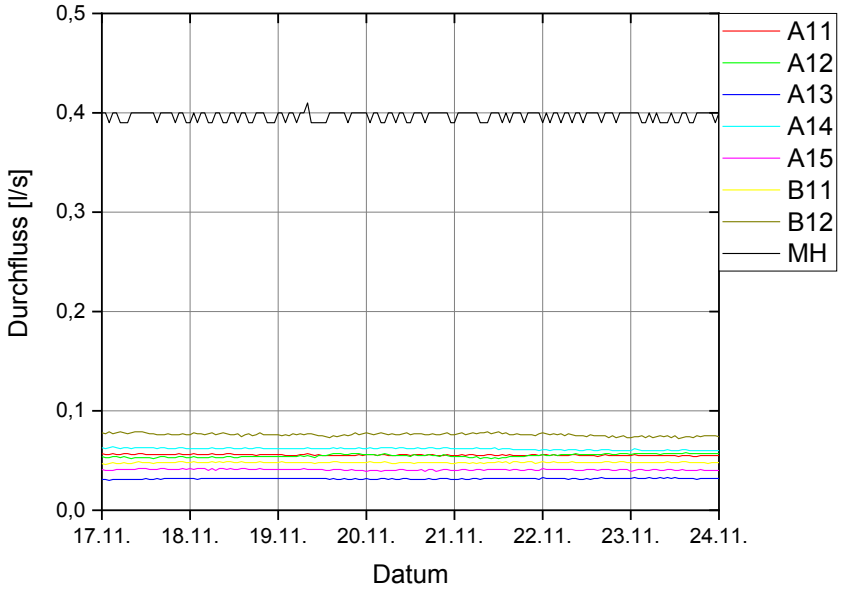


Bild 3-8: Turbulente Durchströmung aller Testfelder 2020, (MH = Summe aller Durchflüsse)

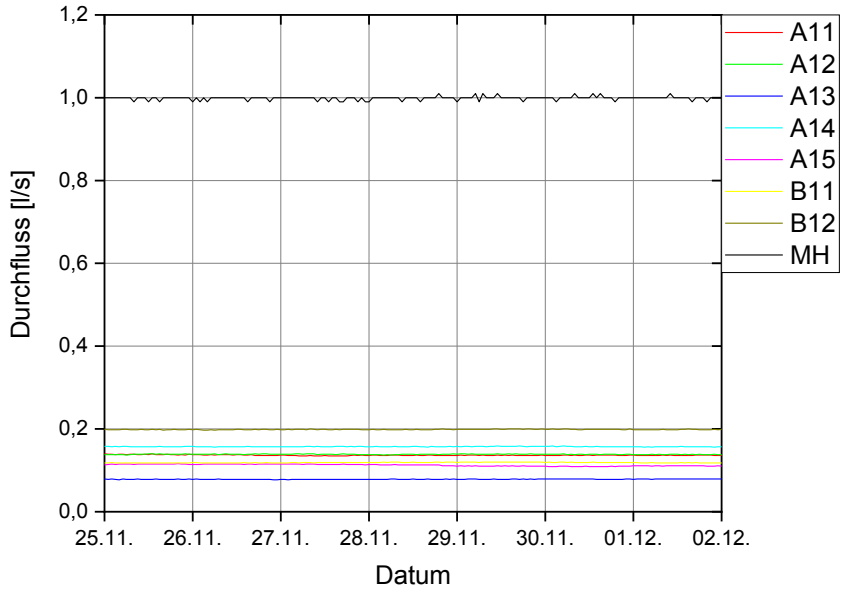


Bild 3-9: Hochturbulente Durchströmung der Testfelder 2020, (MH = Summe aller Durchflüsse)

werden hierdurch seitlich abgelenkt, wodurch die senkrecht angeordneten Messelektroden eine Ladungstrennung und folglich eine Spannung messen können. Diese Spannung ist direkt proportional zur Strömungsgeschwindigkeit der Ladung bzw. dem transportierenden Medium und kann daher zur Strömungsmessung herangezogen werden. Da nicht nur Wasser, sondern auch Luft Ladungsträger für Ionen oder geladene Teilchen sein kann, kann die Messvorrichtung schwer zwischen Luft und Wasser unterscheiden.

3.5 Ablagerungen

In der Vorhabensbeschreibung war vorgesehen, dass alle Felder mit dem gleichen Volumenstrom beaufschlagt werden. Hierfür ist ein sogenannter hydraulischer Abgleich durchzuführen, welcher notwendig ist, um in einem verzweigten hydraulischen System bestimmte Volumenströme einzustellen. Wenn der Volumenstrom in einem der Testfelder zu gering ist, wird der Durchfluss der anderen Testfelder gezielt gedrosselt, um einen Ausgleich zu erreichen. Die Anlage in Füssen verfügt hierfür über einen Sammelschacht in dem die Rückflüsse aller Testfelder jeweils eine Heizkörper-Rücklaufverschraubung durchfliesen und anschließend in einer Sammelleitung münden. Die Rücklaufverschraubung besitzt eine Reguliervorrichtung und einen Durchflussmesser, die Volumenströme können hier also gedrosselt oder vergrößert werden. Mehrmals wurde an den Rücklaufverschraubungen die Durchströmung aller Testfelder händisch aneinander angeglichen. Nach einiger Zeit war jedoch eine zeitvariante Änderung der Durchströmungsraten zu beobachten, wobei einige Felder eine ansteigende und andere Felder abfallende Durchflussraten zeigten. Anfänglich wurde versucht, diese Abweichungen durch Nachjustieren zu korrigieren; es stellte sich zeitnah jedoch wieder dieselbe ungleichmäßige Durchströmungsverteilung ein – bis hin zu dem Zustand, dass einige Felder schließlich gar nicht mehr durchströmt wurden und andere umso mehr, siehe Bild 3-10. Die Ursache der gleichzeitigen Zu- und Abnahme der Durchströmungen, liegt in der konstant gehaltenen Pumpenleistung zugrunde, i. e. nimmt der Volumenstrom bei einem Feld aufgrund von Verstopfungen ab, muss dieser Differenzbetrag (abzüglich der Verluste durch Druckzunahme) nun durch andere weniger belastete Rohrregister kompensiert werden. Die Durchströmungsventile wurden daraufhin vollständig geöffnet, um einer eventuellen Beschädigung zuvor zu kommen. Die Abnahme der Durchströmung war nicht abrupt, sondern verlief zeitlich verzögert, was auf eine sukzessive Verstopfung der Rücklaufverschraubung schließen lässt.

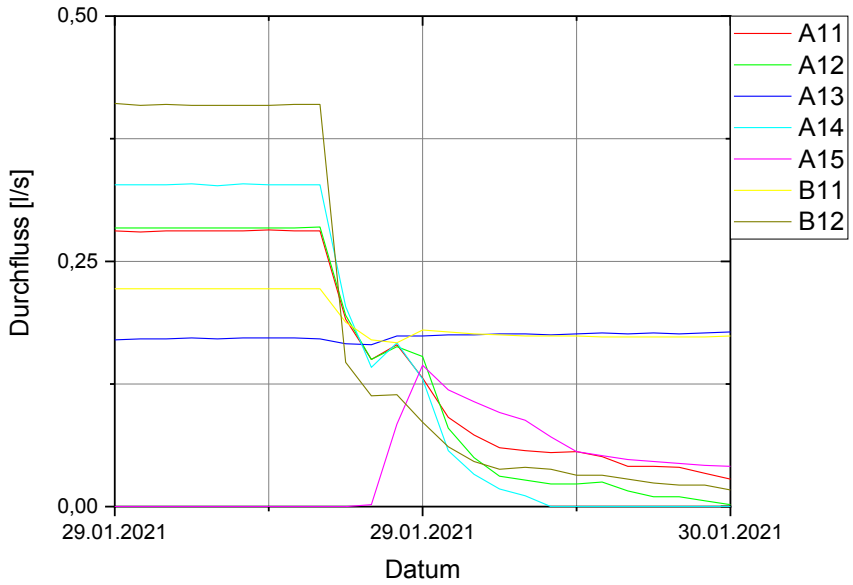


Bild 3-10: Versuch eines hydraulischen Abgleichs (Durchströmungsziel des Abgleichs war 0,2 l/s)

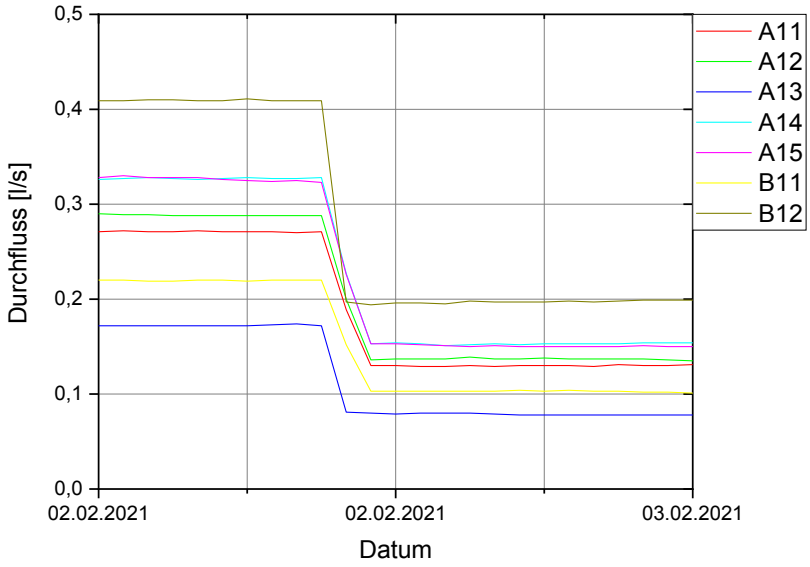


Bild 3-11: Modifizierter hydraulischer Abgleich



Bild 3-12: Wasserprobe des Vor- und Rücklaufs (von links nach rechts), am Boden hat sich die Sedimentfracht bzw. die Ausfällungen abgesetzt.

Aus diesem Grund wurden Wasserproben an der Sammelleitung des Rücklaufes genommen, siehe Bild 3-12. Es ist ersichtlich, dass die Sedimentfracht des Drainagewassers nicht vollständig durch die vorgeschalteten Sammelbecken entfernt wird und ein Verstopfen der Rücklaufverschraubung unter Aufrechterhaltung einer über alle Felder gleich großen Durchströmung unabwendbar ist. In Rücksprache mit der Firma, die die Hydraulik der Anlage ausgeführt hat, wurde festgelegt, dass das Ventil nur noch bis 30 % des maximalen Durchflussquerschnitts gedrosselt werden darf, um einer Verstopfung der Rücklaufverschraubung vorzubeugen. Darüber hinaus würde eine weitere Reduzierung des Querschnitts an der Rücklaufverschraubung das Havarieszenario beeinträchtigen, da das vollständige Ausblasen der Rohre durch die Querschnittsverengung beeinträchtigt sein könnte. Der unter diesen Einschränkungen durchgeführte hydraulische Abgleich sieht vor, dass die Testfelder, die ohne Regulierung schon ähnliche Durchströmungswerte aufweisen, auf eine identische Durchströmungswert angeglichen werden, siehe Bild 3-11. Diese Anpassung darf demzufolge den durchströmten Querschnitt nicht mehr als 30 % reduzieren. Ferner ist zu berücksichtigen, dass bei Anpassung, i. e. einer Querschnittsverengung am Rücklaufventil einer einzelnen Durchströmung bei gleichbleibender Pumpleistung der Gesamtvolumenstrom abnimmt und die Durchströmung der weiteren Rohrkonfigurationen sich anpassen.

Um zu untersuchen, an welchen Stellen im System sich Sedimente ablagern, wurden Wasserproben am Bergwasserkontrollschacht (Probe I), an dem das Wasser beider Ulmen gesammelt wird, vor dem Pumpenhaus (Probe II), nach dem Pumpenhaus bzw. vor Durchströmung der Testfelder (Probe III), sowie nach der Durchströmung der Testfelder (Probe IV) entnommen. Das Wasser wurde anschließend 48 h lang bei ca. 120 °C verdampft, sodass nur noch Fest- und Schwebstoffe übrigblieben. Die Ergebnisse (siehe Tabelle 3) sind zwar nicht eindeutig und Messungenauigkeiten können nicht ausgeschlossen werden, aber es ist dennoch tendenziell eine Abnahme der Gesamtfrachtkonzentration nach Durchströmung der Rohrregister erkennbar, was die Vermutung der Bildung von Ablagerungen in den Rohrregistern bzw. im Absperrventil bekräftigt. Bei der Bewertung der Gesamtfracht ist die Differenz ausschlaggebend und nicht der absolute Wert an Sedimentationsfracht.

Entnahmestelle	**Abdampfrückstand [g pro 1 kg Wasser]**
Bergwasserkontrollschacht	3,7
vor Pumpenhaus	3,6
vor Rohrregister	3,7
nach Rohrregister	3,5

Tab. 3: Abdampfrückstand im Bergwasser

4 Betrieb der Anlage und Auswertung

Grundlage für die Auslegung und Dimensionierung einer Flächentemperierung bildet die Kenntnis über die an der Geländeoberkante wirkenden Wärmeströme. Da sich die Wärmeströme nicht vollständig aus den Wetterdaten und durch empirische Formeln ermitteln lassen, werden zusätzlich numerische Untersuchungen durchgeführt. Um die klimatischen Randbedingungen weitestgehend einzugrenzen, wurden Testszenarien definiert, siehe Tabelle 4.

Testszenarien Winterperiode (2020/2021)	
Testszenario A	konstanter laminarer Strömungszustand
Testszenario B	konstanter turbulenter Strömungszustand
Testszenario C	Untersuchung zur Trägheit des Systems
Testszenario D	Testbetrieb während eines Schneefallereignisses
Testszenario E	Testbetrieb während eines Glätteereignisses

Tab. 4: Testszenarien Winterperiode 2020/21

4.1 Laminare und turbulente Durchströmung

Die Messwerte der Durchströmung der Testszenarien A und B sind bereits in den Bildern 3-7 bis 3-9 dokumentiert. In den Bildern 4-1 und 4-2 sind exemplarisch die Temperaturmessungen im Feldaufbau des Testfeldes A1.3 bei laminarer (Testszenario A), turbulenter und hochturbulenter (Testszenario B) Durchströmung sowie die Außentemperatur ausgewertet. Die Außentemperatur ist in den Diagrammen mit der Abkürzung AT dargestellt. Es zeigt sich, wie mit Zunahme der Durchströmung (Strömungszustand wechselt von laminar zu turbulent) die gemessenen Temperaturen des Fahrbahnaufbaus unabhängiger von der gemessenen Außentemperatur wird. Insbesondere die nahe an den Rohrregister befindlichen Temperatursensoren besitzen eine zunehmend konstante Temperatur. Zwei

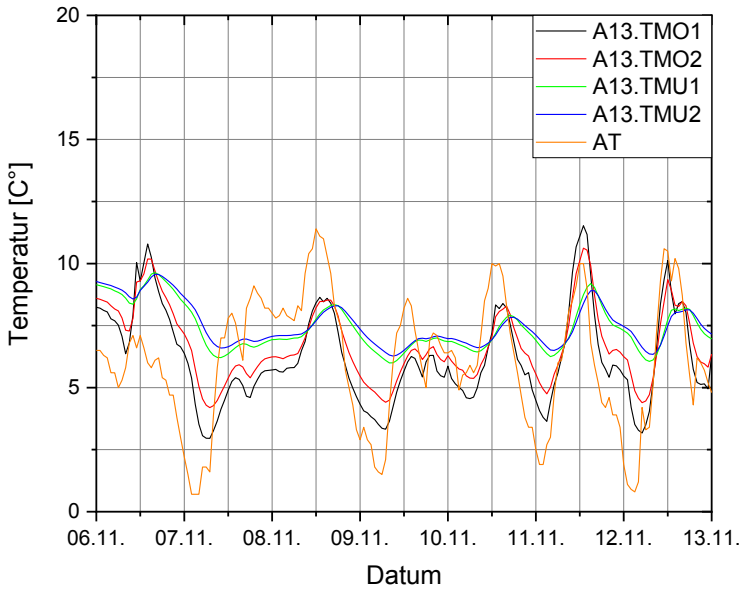


Bild 4-1: Temperaturmessungen des Testfeldes A1.3 und der Außentemperatur (AT) bei laminarer Durchströmung

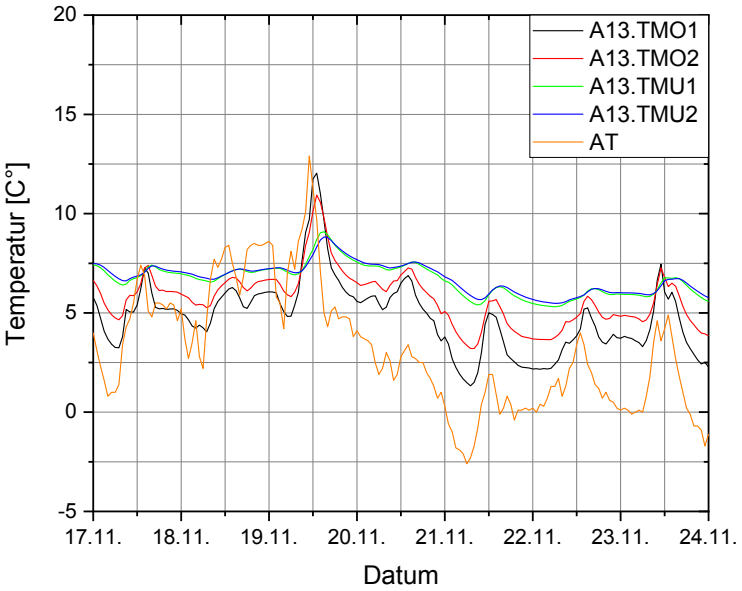


Bild 4-2: Temperaturmessungen des Testfeldes A1.3 und der Außentemperatur (AT) bei turbulenter Durchströmung

Faktoren sind verantwortlich für dieses Verhalten. Mit Zunahme der Pumpenleistung durchströmt das Wasser die Rohrkonfigurationen in einer kürzeren Zeitspanne, d. h. das Drainagewasser kühlt nicht so schnell und nicht so stark aus, folglich ist der Temperaturgradient zwischen dem umgebenen Fahrbahnaufbau und dem Drainagewasser höher als bei geringerer Durchströmung. Die Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit führt zu einer Zunahme des dimensionslosen Wärmeübergangskoeffizienten (Nußeltzahl), was wiederum den Wärmeübergang zwischen Drainagewasser und umgebenen Fahrbahnaufbau erheblich verbessert. Nachteilig ist jedoch die Zunahme der notwendigen Pumpenleistung, da mit dem Übergang von laminar zu turbulent der Rohrreibungskoeffizient massiv zunimmt und nur durch Zunahme der Pumpenleistung kompensiert werden kann.

4.2 Glätteereignis mit Trägheitsuntersuchung

Im Testszenario Glätteereignis soll die Trägheit des Systems untersucht werden. Hierfür wurde ein Termin mit möglichst niedriger Umgebungstemperatur gesucht. Die Anlage muss zu diesem Termin längere Zeit inaktiv gewesen sein, um ein möglichst unbeeinflusstes Temperaturregime im Boden zu generieren. Sobald die im Boden verbauten Temperatursensoren eine Temperatur unterhalb eines vorgegebenen Schwellenwertes messen, startet das Havarieszenario selbstständig und bläst die Rohrregister aus oder die Anlage lässt sich – sofern inaktiv – gar nicht erst starten. Der erste Schritt dieses Testszenarios musste daher die Inaktivierung des Havarieszenarios sein. Da keine genaue Kenntnis über das Verhalten der Anlage bei Bodenfrost besteht und eine eventuelle Schädigung der Anlage durch Eisbildung in den Rohren vermieden werden sollte, wurde entschieden, das Szenario bei verhältnismäßig moderaten Temperaturen durchzuführen.

Für die Nacht vom 17. auf den 18.03.2021 gab die Wettervorhersage des Deutschen Wetterdienstes (SWIS) eine Glättewarnung aus. Um ein ungestörtes Temperaturregime im Boden zu erreichen, wurde die Anlage schon mehr als eine Woche zuvor abgeschaltet. Die von den Sensoren im Boden gemessenen Temperaturen waren teilweise unterhalb des Nullpunktes. Zum Aktivieren der Anlage war somit eine händische Inaktivierung der

Frostsicherung vor Ort notwendig. Unerwartet wurde kurzfristig zusätzlich Schnee angekündigt, das Szenario konnte daher nicht exakt so wie in der Vorhabensbeschreibung beschrieben durchgeführt werden. Die Testfelder waren zu Beginn des Testszenarios zugeschneit, siehe Bild 4-3. In einem ersten Schritt wurde folglich der Schnee händisch von den Testfeldern entfernt, siehe Bild 4-4. Ab 19:30 Uhr war Glätte gemeldet, weshalb die Anlage zwei Stunden zuvor (17:30 Uhr) mit einer Durchströmungsrate von 1 l/s gestartet wurde. Die Messwerte von A1.5, B1.1, B1.2 vor Aktivierung der Anlage sind die bereits erwähnten Messfehler, die infolge inaktiver Durchströmung auftreten, aber bedingt durch den Sachverhalt, dass die Pumpe inaktiv war, können diese wie erläutert ignoriert werden. Um 18:45 Uhr stellte sich Schneefall ein, der bis 00:00 Uhr teils stärker teils schwächer war. Ab 21:15 Uhr konnte auf einzelnen Feldern das Auftauen der Schneeschicht beobachtet werden, als erstes beim Feld B1.2. Ab 23:00 Uhr war der Schneefall so stark, dass die schon aufgetauten Felder wieder zugeschneit wurden (siehe Bild 4-5 bis Bild 4-12), weshalb die Durchströmung auf 1,5 l/s erhöht wurde. Um 00:00 Uhr wurde auf dem Feld B1.2 eine Schneehöhe von 0,5 cm gemessen und auf der Referenzfläche A.F eine Schneehöhe von 4 cm. Die Temperaturverteilung, die sich während des Szenarios im Fahrbahnaufbau eingestellt hat, ist in Bild 4-14 zu sehen. Die Temperaturen der Vor- und Rückläufe während des Szenarios sind in Bild 4-15 zu sehen.



Bild 4-3: Zugeschneite Felder zu Beginn des Trägheitsszenario



Bild 4-4: Freigeräumte Flächen



Bild 4-5: Zugeschneites Testfeld A1.2 um 23:00 Uhr, während Trägheitsszenario



Bild 4-6: Zugeschneites Testfeld A1.1 um 23:00 Uhr, während Trägheitsszenario



Bild 4-7: Zugeschneites Testfeld A1.3 um 23:00 Uhr, während Trägheitsszenario



Bild 4-8: Zugeschneites Testfeld A1.4 um 23:00 Uhr, während Trägheitsszenario



Bild 4-9: Zugeschneites Testfeld A1.5 um 23:00 Uhr, während Trägheitsszenario



Bild 4-10: Zugeschneites Testfeld A.F um 23:00 Uhr, während Trägheitsszenario



Bild 4-11: Zugeschneites Testfeld B1.1 um 23:00 Uhr, während Trägheitsszenario



Bild 4-12: Zugeschneites Testfeld B1.2 um 23:00 Uhr, während Trägheitsszenario

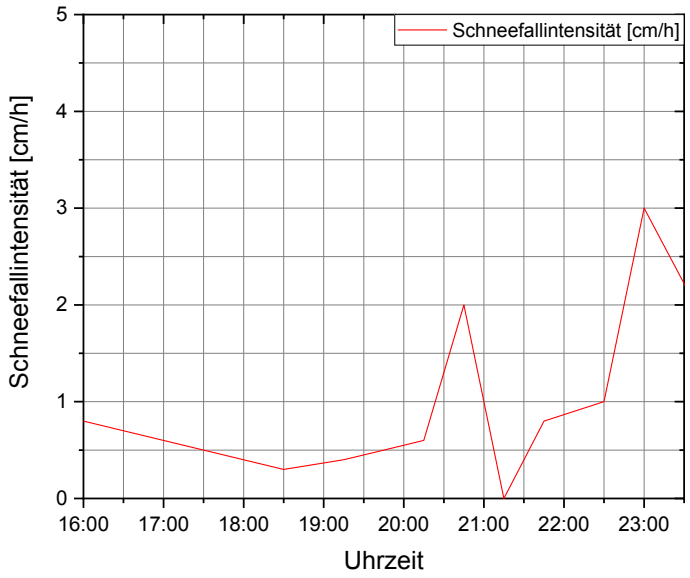


Bild 4-13: Schneefallintensität, 17.03.2021

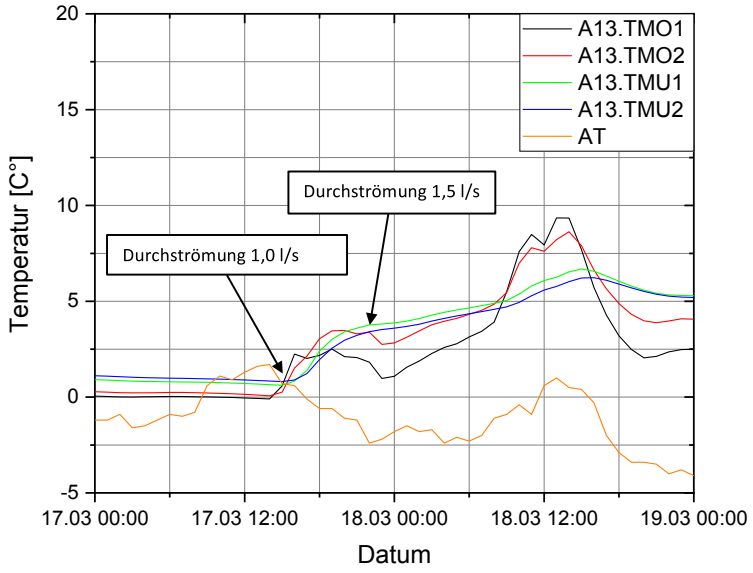


Bild 4-14: Temperaturmessungen über die Tiefe im Feld A1.3

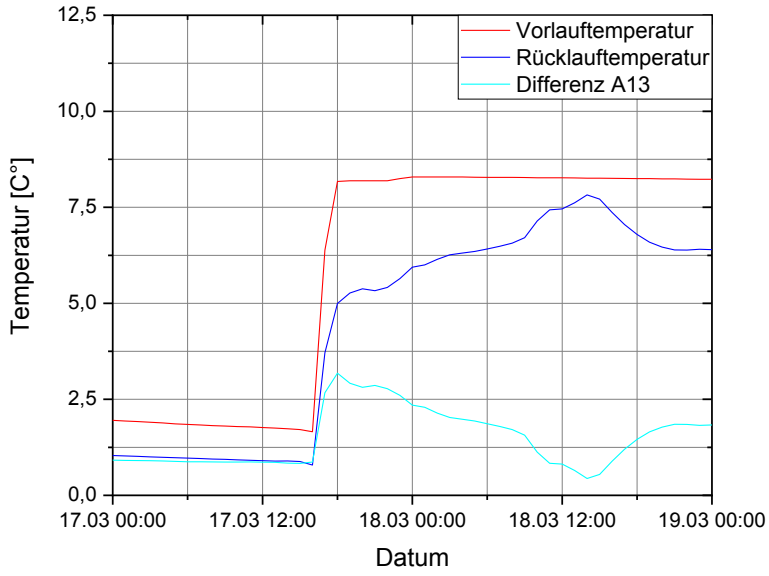


Bild 4-15: Temperatur des Vor- und Rücklaufs im Feld A1.3

4.3 Schneeszenario

Der Testbetrieb während eines Schneebetriebs wurde in der Nacht vom 10.02. auf den 11.02.2021 durchgeführt. Laut Wetterdienst war in dieser Nacht mit Schneefall zu rechnen. Die Anlage war zuvor in Betrieb und wurde mit einer Gesamtdurchströmung von 1,5 l/s beaufschlagt. Das Messkonzept umfasste die Messung der Schneemenge pro Zeit, Schneedichte, Schneetemperatur und Außentemperatur. Die Messungen wurden am 10.02.2021 um 11:30 Uhr vormittags begonnen und bis 19:00 Uhr fortgeführt, siehe Bild 4-19. Um 19:00 Uhr wurde die Anlage ausgeblasen, wobei alle Felder stets schneefrei waren, siehe Bild 4-16. Am Morgen des 11.02.2021 wurde die Anlage um 8:50 Uhr mit einer Durchströmung von 1,5 l/s wieder in Betrieb genommen, siehe Bild 4-20 und

Bild 4-21. Alle Felder waren zu diesem Zeitpunkt mit einer durchschnittlichen 10 cm dicken Schneeschicht bedeckt und es schneite auch an diesem Tag wieder, siehe Bild 4-19. Um

10:30 Uhr wies das Feld B1.2 erste abgetaute Stellen auf, siehe Bild 4-17 und Bild 4-18. Um 10:50 Uhr war das Feld B1.2 auch das erste komplett schneefreie Feld, ihm folgten das Feld A1.5 um 11:30 Uhr und das Feld B1.1 um 12:00 Uhr. Die im Testfeld gemessenen Temperaturen sind in Bild 4-22 zu sehen, die Temperaturmessungen des Vor- und Rücklaufs über die Zeitperiode sind in Bild 4-23 aufgezeigt.



Bild 4-16: Schneefallszenario, 10.02.2021 19:00 Uhr, alle Testfelder sind schneefrei



Bild 4-17: Schneefallszenario, 11.02.2021 10:30 Uhr, Felder A1.1 bis A1.5 noch nicht schneefrei



Bild 4-18: Schneefallszenario, 11.02.2021 10:30 Uhr, Feld B1.2 fast schneefrei

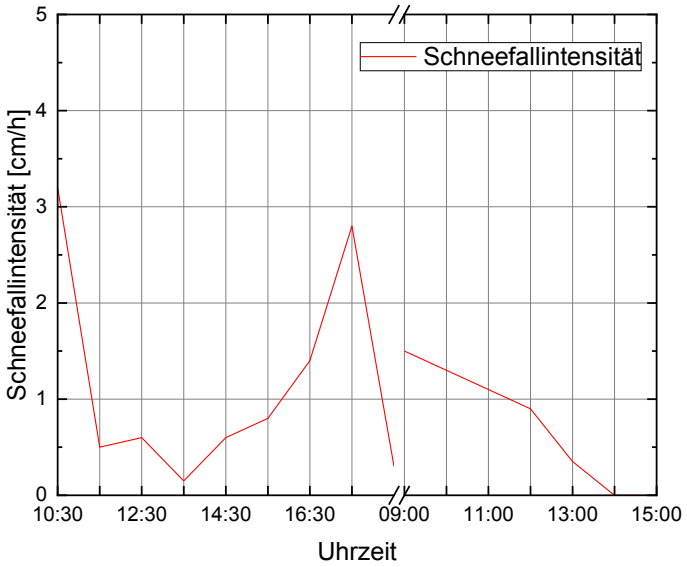


Bild 4-19: Schneefallintensität, 10.02.2021 und 11.02.2021

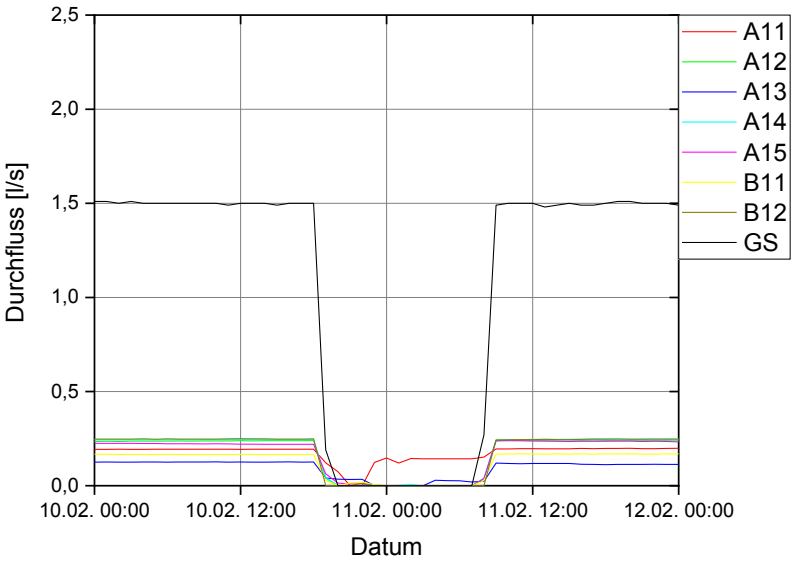


Bild 4-20: Schneeszenario vom 10.-11.02.2021, Durchfluss der Testfelder mit Angabe der Gesamtdurchströmung (GS) von 1,5 l/s.

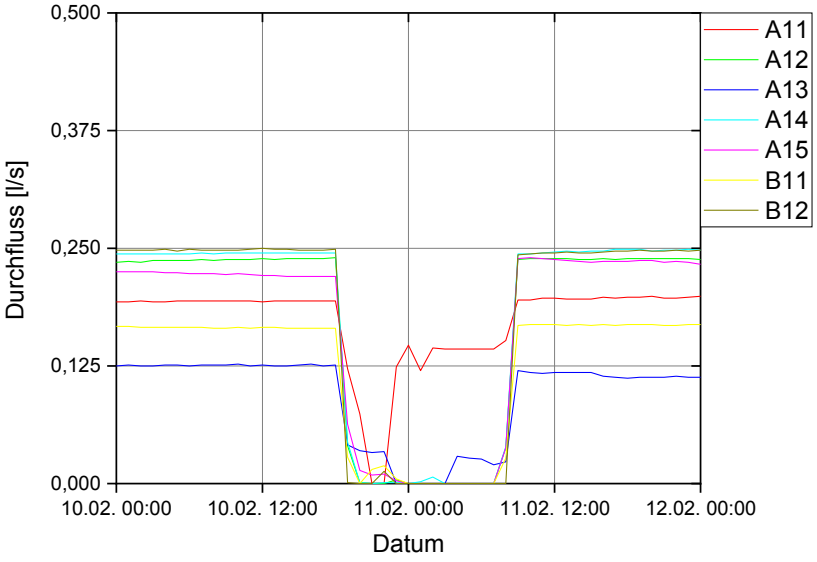


Bild 4-21: Schneeszenario vom 10.-11.02.2021, Durchfluss der Testfelder bei einem Gesamtdurchfluss von 1,5 l/s. (Ausschlag von A11 ist ein Messartefakt).

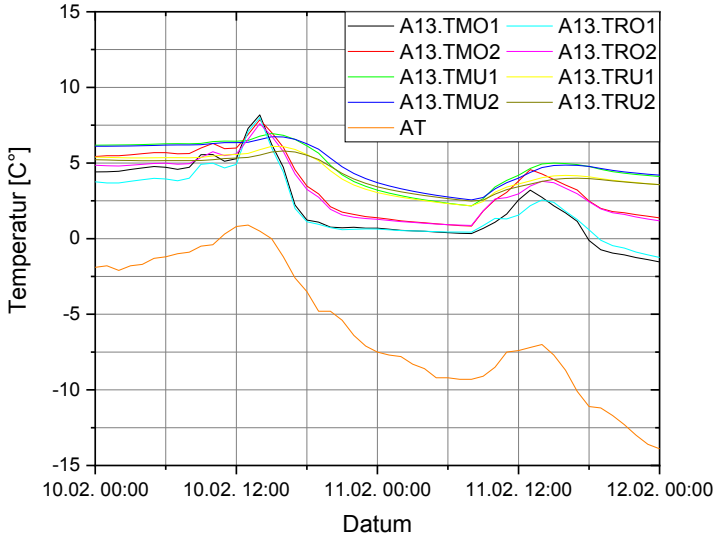


Bild 4-22: Schneeszenario 10-11.02.2021, Temperatur über die Tiefe im Feld A1.3

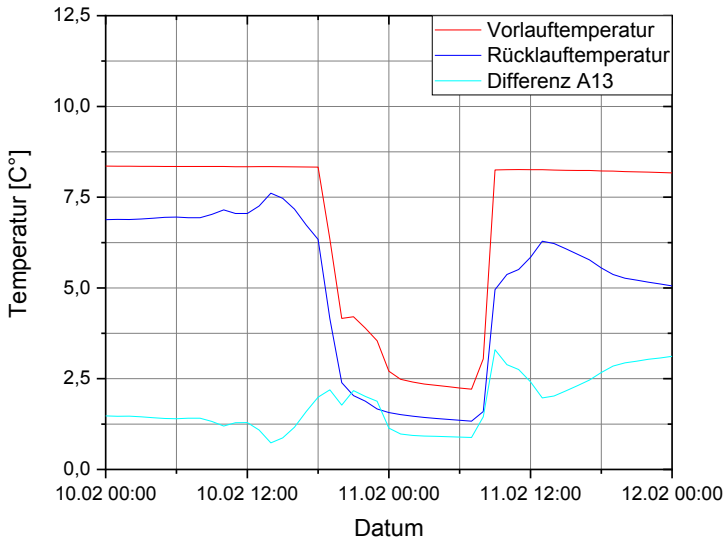


Bild 4-23: Schneeszenario 10-11.02.2021, Vor- und Rücklauftemperatur im Feld A1.3

4.4 Auswertung des winterlichen Betriebs

Der winterliche Betrieb der Anlage weist die Funktionsfähigkeit des Konzepts der hydrothermalen Freiflächenheizung nach. Die durchgeführten Untersuchungen lassen erkennen, dass die Effektivität der einzelnen Testfelder variiert. Das Testfeld B1.2, bestehend aus einem Betonaufbau und in einem mittleren Abstand verlegten Kupferleitungen benötigte zum Aufschmelzen der 10 cm dicken Schneedecke zwei Stunden und war somit am schnellsten; ebenso war das Testfeld B1.2 beim Abschmelzen des Schneefalls am effektivsten. Das Testfeld A1.2 war am wenigsten effektiv und war nicht in der Lage, die Schneedecke tagsüber innerhalb 9 Stunden komplett abzuschmelzen; tagsüber unterstützte die kurzwellige Sonnenstrahlung den Abschmelzprozess zusätzlich. Beim Kaltstart der Anlage zeigte sich, dass das Testfeld A1.4 am wenigsten effektiv beim Abschmelzen des Schneefalls war und nicht in der Lage war, eine Schneefallintensität von 2,5 cm/h abzuschmelzen. Diese Ergebnisse zeigten ebenfalls, dass zur Erwärmung des oberen Fahrbahnaufbaus um 5 K ca. 5 bis 6 Stunden benötigt werden, bei gleichzeitigem Schneefall reduziert sich die Leistung.

Um ein Einfrieren des Wassers in den Rohrregistern zu vermeiden, darf die Temperatur der Rohrregister nicht unter dem Gefrierpunkt liegen. Diese beiden Kriterien bilden die Grundlage der selbstregelnden Anlagensteuerung.

Wie in Bild 4-21 ersichtlich war die Durchströmung während des Schneeszenarios als auch während des Glätteszenarios nicht in allen Feldern gleich hoch. Die Durchströmung der Testfelder A1.2, A1.4, A1.5 und B1.2 waren fast identisch bei 0,25 l/s, die der Testfelder A1.1, B1.1 sowie A1.3 hingegen deutlich niedriger. Hierbei ist festzustellen, dass das Feld B1.2 das effektivste und das Feld A1.2 das ineffektivste Feld hinsichtlich des oberflächlichen Abschmelzens des Schnees waren, obwohl beider Felder annähernd mit dem gleichen Volumenstrom durchströmt wurden. Diese Leistungsdifferenzen ist folglich nur auf die unterschiedliche Ausgestaltung der Freiflächen zurückzuführen und lassen Rückschlüsse auf die Effizienz der unterschiedlichen Konfigurationen zu. Ferner hatte das Testfeld A1.3 trotz der vergleichsweisen geringen Durchströmung eine kürzere Schmelzdauer aufzuweisen, als das volldurchströmte Testfeld A1.2. Das bedeutet, dass manche Felder trotz hoher Durchströmungsraten geringere Schmelzleistungen generieren als Felder mit geringeren Durchströmungsraten, was sich durch die unterschiedliche Ausgestaltung der Rohrkonfigurationen erklären lässt.

4.5 Auswertung der Wärmeströme

Die im Fahrbahnaufbau wirksamen Wärmeströme können über die Messung der Vor- und Rücklauftemperaturen sowie des Volumenstroms ermittelt werden.

$$\dot{Q}_{Drain} = \dot{V} \cdot c_p \cdot \rho \cdot \Delta\vartheta \tag{8}$$

Dabei ist:

$\dot{Q}_{Drain}$ Wärmestrom [W]

$\dot{V}$ Volumenstrom [l/s]

$c_p \cdot \rho$ Volumetrische spezifische Wärmekapazität des Drainagewassers [kJ/(m³K)]

$\Delta\vartheta$ Temperaturspreizung des Wassers nach thermischer Energieextraktion [K]

In Abhängigkeit vom Volumenstrom kann sich in dem Rohrregister eine laminare oder eine turbulente Strömung ausbilden, wobei der Wärmeübergangskoeffizient des strömenden Wassers zur Umgebung im laminaren Bereich mit Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit leicht ansteigt, während beim Übergang von laminarer zur turbulenten Strömung der Wärmeübergangskoeffizient stark anwächst [14]. Durch Anpassen des Volumenstroms ist es somit möglich, den durch das Drainagewasser induzierten Wärmestrom anzupassen.

Eine weitere Möglichkeit der Ermittlung der Wärmeströme bietet die Messung der Temperaturdifferenzen der im Fahrbahnaufbau installierten Temperatursensoren.

$$\dot{Q}_{Sensoren} = A \cdot \lambda \cdot \frac{(T_o - T_u)}{d} \tag{9}$$

A Fläche des Testfeldes [9 m²]

λ Wärmeleitfähigkeit des Fahrbahnaufbaus [W/mK]

d Abstand zwischen den Sensoren [m]

$T_o - T_u$ Temperaturdifferenz zwischen zwei Sensoren [K]

Die Temperatursensoren liegen in Zweierpaaren oberhalb (TMO1 und TMO2) und unterhalb (TMU1 und TMU2) der Rohrregister. Der aus dem Drainagewasser resultierende Wärmestrom beeinflusst das Temperaturfeld des umgebenden Fahrbahnaufbaus. Der Wärmestrom ist sowohl oberhalb als auch unterhalb der Rohrregister positiv definiert, wenn dieser in Richtung der Geländeoberkante fließt. Ist das Drainagewasser wärmer als der umgebene Fahrbahnaufbau, so strömt der Wärmestrom unterhalb des Rohrregisters nach unten und ist dann im Sinne der vorgenannten Definition negativ, oberhalb der Rohrkonfiguration setzt ein Wärmestrom in Richtung der Geländeoberkante ein und ist gemäß Definition dann positiv, siehe Bild 4-24. Die Differenz beider Wärmeströme stellt somit den durch das Drainagewasser induzierten Wärmestrom dar. Ist die Differenz positiv, so beheizt das Drainagewasser den Fahrbahnaufbau, ist die Differenz negativ, so kühlt diese den Fahrbahnaufbau.

$$\dot{Q}_{Sensoren} = \dot{Q}_{Sensoren_oberhalb} - \dot{Q}_{Sensoren_oberhalb} \quad (10)$$

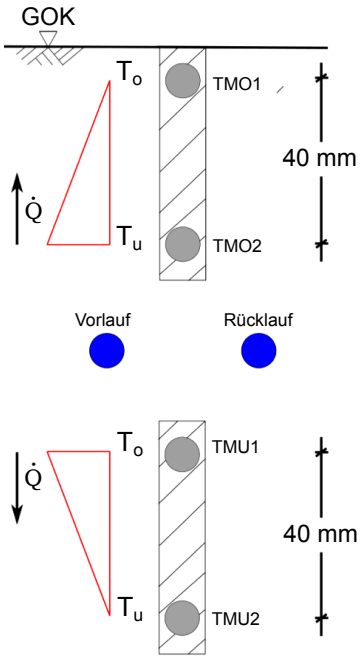


Bild 4-24: Fahrbahnaufbau mit den wirkenden Wärmeströmen bei Heizen der Fahrbahnaufbaus

In Bild 4-25 sind die für das Glätteszenario ermittelte Wärmestromdichten des Testfelds A1.1 dargestellt (Auswertung für die weiteren Felder im Anhang I). Bis zum Anschalten der Anlage war der durch die Differenz aus Vor- und Rücklauftemperatur ermittelte Wärmestrom gleich Null und der Wärmestrom der auf Basis der Temperatursensordaten gebildet wurde, ungleich Null, was auf die unterschiedlichen Höhen der Sensoren zurückzuführen ist. Die oberen Sensoren stehen durch ihre unmittelbare Nähe zur Geländeoberkante in Kontakt mit den thermischen Einflüssen der Geländeoberfläche. Die Wärmestromdichte, die aus den Vor- und Rücklauftemperaturen gebildet wurde, nimmt erst stark zu, nimmt dann aber negative Werte an und wird schließlich wieder positiv. Es zeigt sich eine zeitliche Verschiebung des Wärmestroms aus dem Drainagewasser, welcher erst phasenverschoben bei den Temperatursensoren des Aufbaus gemessen wird. Die negativen Werte des Wärmestroms – Abkühlung des Fahrbahnaufbaus- rühren von der Erwärmung des Fahrbahnaufbaus tagsüber her.

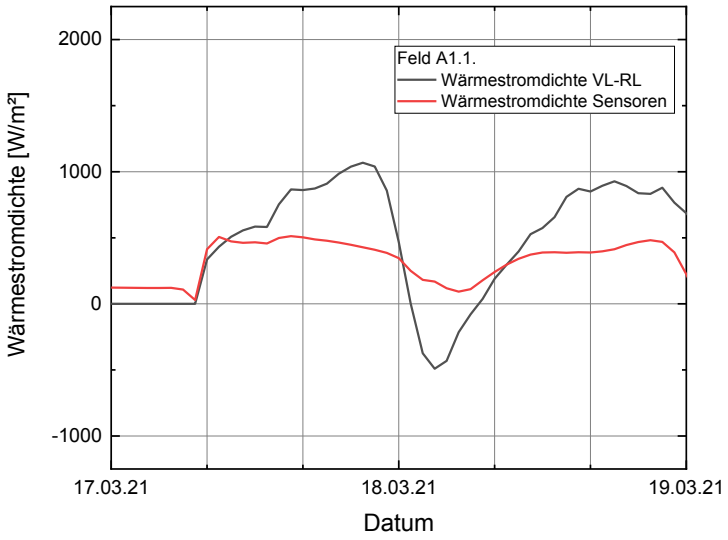


Bild 4-25: Die Wärmestromdichten des Feldes A1.1 während des Glätteszenarios

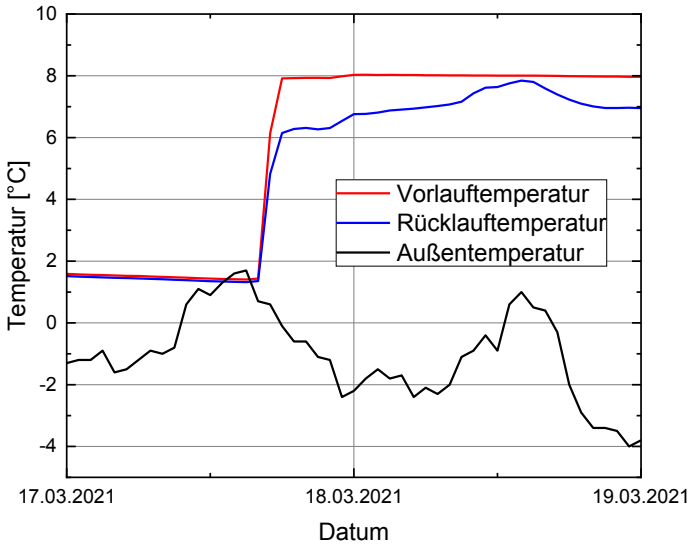


Bild 4-26: Vor-, Rück-, und Außentemperatur des Testfeldes A1.1

Die Werte der aus Vor- und Rücklauf ermittelten Wärmestromdichte sind betragsmäßig größer als die aus den Temperatursensoren ermittelten Wärmestromdichten. Der Wärmestrom verteilt sich rotationssymmetrisch um das Rohr; die direkt oberhalb und unterhalb der Rohrkonfigurationen angebrachten Sensoren messen aber nur den vertikal auf die Sensorbreite wirkenden Wärmestrom; der Wärmestrom, der sich nicht vertikal, sondern seitlich aus dem Rohr verteilt, kann durch dieses Messschema nicht gemessen werden. Der aus der Differenz von Vor- und Rücklauftemperatur ermittelte Wärmestrom unterscheidet sich dementsprechend von denen aus den Temperatursensoren ermittelten Wärmeströmen.

4.6 Sommerszenarien

Testszenarien Sommerperiode (2020/2021)	
Testszenario F	Untersuchung zur Trägheit des Systems
Testszenario G	Testbetrieb während einer Hitzeperiode

Tab. 5: Testszenarien Sommerperiode 2020/21

Das Ziel des sommerlichen Betriebes war es, das thermische Verhalten des Fahrbahnaufbaus bei Kühlung zu untersuchen. Es wurden zwei Szenarien konzipiert, um einerseits die Trägheit des Systems (Kaltstart) als auch einen sommerlichen Regelbetrieb der Anlage zu untersuchen. Die sommerliche Abkühlung der Testfelder soll eine eventuelle Spurrillenbildung vorbeugen. Um die Trägheit des Systems zu untersuchen, wurden alle Felder im Zeitraum vom 12.07.2021 bis zum 19.07.2021, nachdem es eine Woche still stand, mit einem Volumenstrom von 1 l/s beaufschlagt, siehe Bild 4-29 und Bild 4-30. Zum Vergleich sind die gemessenen Temperaturdaten des Testfeldes A1.1 und B1.2 ohne Durchströmung eine Woche zuvor in Bild 4-27 und Bild 4-28 dargestellt. In den Zeiträumen zwischen dem 20.07.2021 und 26.07.2021 sowie zwischen dem 29.07.2021 und dem 04.08.2021 wurde untersucht, wie sich die Anlage im Regelbetrieb während einer Hitzeperiode verhält.

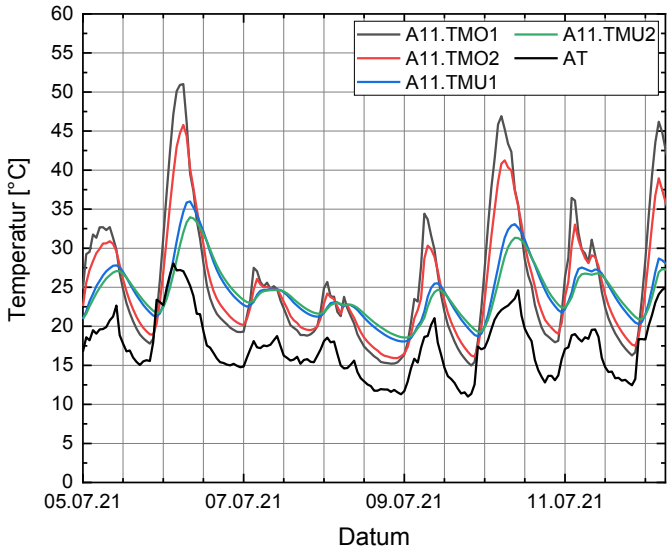


Bild 4-27: Temperaturverläufe des Testfeldes A1.1 ohne Durchströmung

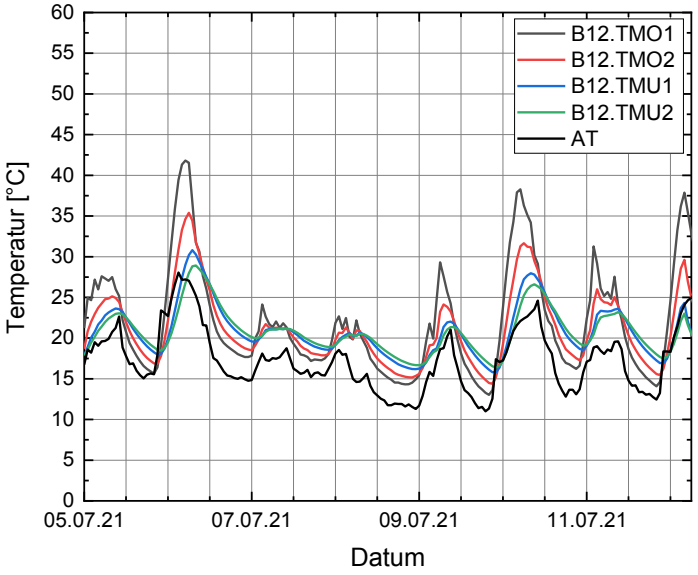


Bild 4-28: Temperaturverläufe des Testfeldes B1.2 ohne Durchströmung

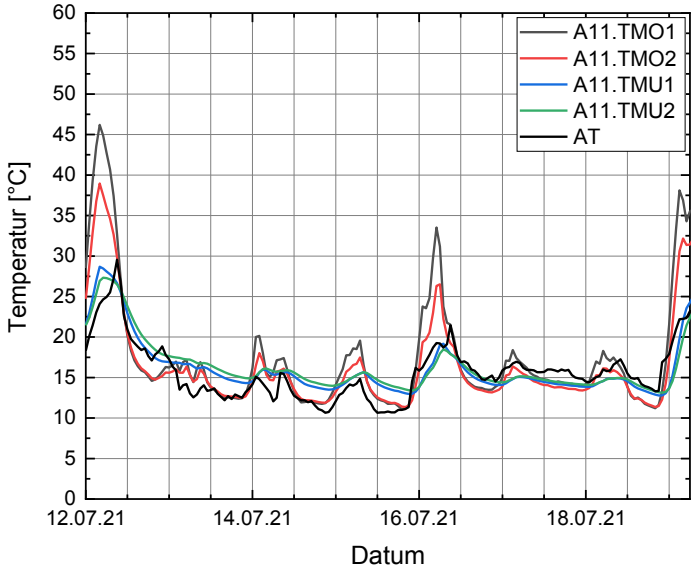


Bild 4-29: Temperaturverläufe des Testfeldes A1.1 während der Trägheitsuntersuchung

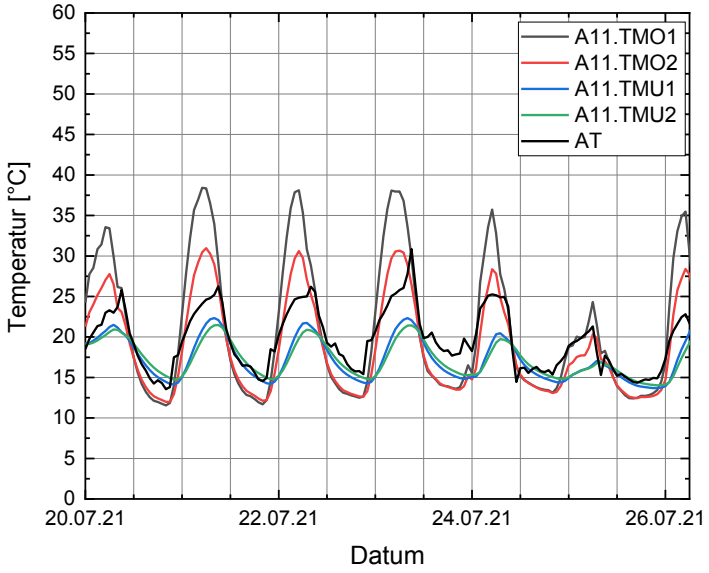


Bild 4-30: Temperaturverläufe des Testfeldes A1.1 während des ersten Regelbetriebs

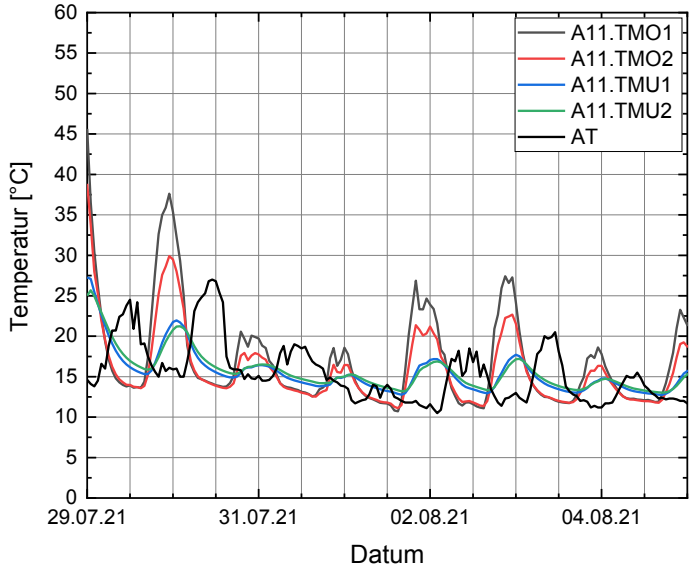


Bild 4-31: Temperaturverläufe des Testfeldes A1.1 während des zweiten Regelbetriebs

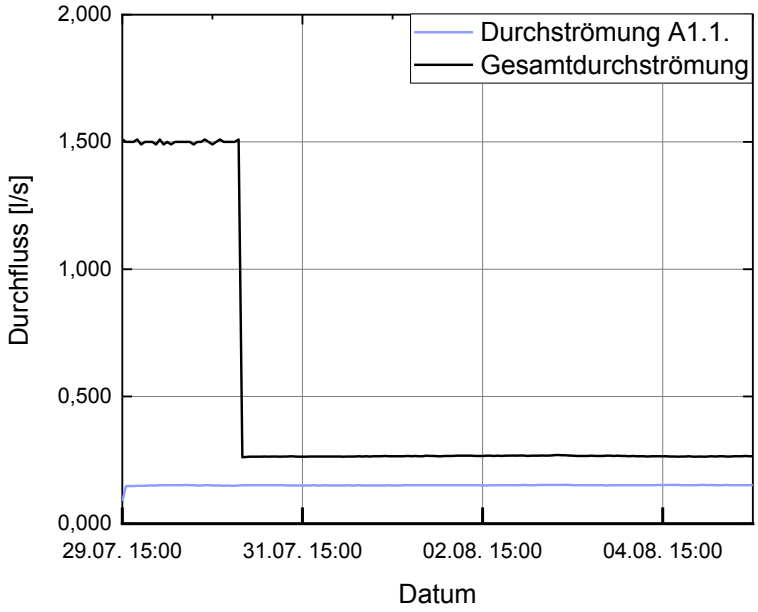


Bild 4-32: Die Durchströmung des Testfeldes A1.1 während des zweiten Regelbetriebs

4.7 Auswertung der Sommerszenarien

Es zeigt sich, dass die obere Sensorlage in Testfeld A1.1 bei inaktiver Durchströmung Temperaturen von über 50 °C annehmen kann, obwohl die Außentemperatur zu diesem Zeitpunkt erst eine Temperatur von ca. 16 °C besitzt, das Testfeld B1.2 kommt auf maximal 45 °C. Auch ist zu erkennen, dass die Temperaturdifferenzen zwischen der oberen und der unteren Sensorlage bei Testfeld A1.1 größer sind als bei Testfeld B1.2.

Die Ursache liegt in den unterschiedlichen Materialien des Fahrbahnaufbaus, Testfeld A.1.1 besitzt einen Fahrbahnaufbau aus schwarzem Asphalt, das Testfeld B1.2 einen Fahrbahnaufbau aus Beton. Die Emissionsgrade der verwendeten Baumaterialien (Asphalt 0,97, Beton 0,93) sind entscheidend beim Wärmeeintrag infolge des langwelligen Wärmestroms (siehe Gl. 3). Die Wärmeleitfähigkeit beträgt jedoch bei Beton 2,1 W/mK bei Asphalt 0,7 W/mK. Die Testflächen aus Asphalt erwärmen sich aufgrund des hohen Emissionsgrad an der Oberfläche schneller und stärker, die thermische Energie benötigt jedoch aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Asphalts mehr Zeit, um in den Fahrbahnaufbau einzudringen, bei den Testflächen aus Beton verhält es sich vice versa, d. h. die Oberflächen erhitzen sich nicht ganz so stark, der Wärmeeintrag in den Boden erfolgt jedoch rascher.

Bei Einsetzen des Volumenstroms in den Rohrkonfigurationen wird ersichtlich, dass die Oberflächentemperatur nicht mehr über 40 °C steigt. Die Phasenverschiebung zwischen dem Peak der Oberflächentemperatur und dem Peak der Außentemperatur (vgl. Bild 4-30, Bild 4-31) zeigt, dass die hohen Oberflächentemperaturen der Fahrbahnoberflächen nicht allein aus der Außentemperatur sondern primär aus den Strahlungseinträgen resultieren.

4.8 Messung der nach oben gerichteten Wärmestromdichten

Nachfolgend ist der nach oben gerichtete Wärmestrom für den Winter 2020/2021 dargestellt. Es zeigt sich, dass im beim Heizen der Freifläche ein Wärmestromdichte von -200 W/m² nicht überschritten wurde. In dem Zeitintervall von Mitte Februar bis Mitte

März war die Anlage außer Betrieb und dennoch wurde aufgrund der thermischen Trägheit des Systems Wärmestromdichten gemessen (siehe Bild 4-33).

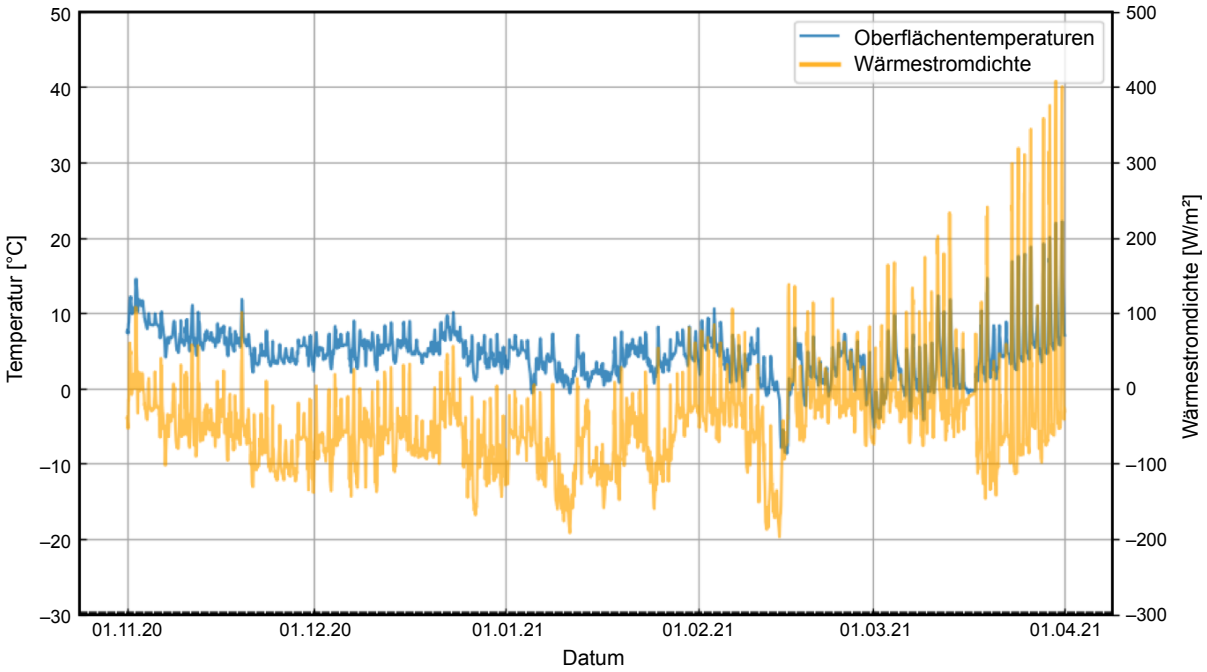


Bild 4-33: Wärmestromdichte und Oberflächentemperatur des Testfeldes B1.2 im Winter 2020/2021

Die sommerliche Messung im Jahr 2021 des nach oben gerichteten Wärmestroms im Testfeld B1.2, zeigt Betragsmäßig höhere Wärmestromdichten auf. Die Ursache sind die sommerlich hohen Temperaturen. Durch die nächtliche Abkühlung sind auch hier negative Wärmestromdichten zu erkennen. Der höchste Wert der nach oben gerichteten Wärmestromdichte betrug ca. 540 W/m² (siehe Bild 4-34).

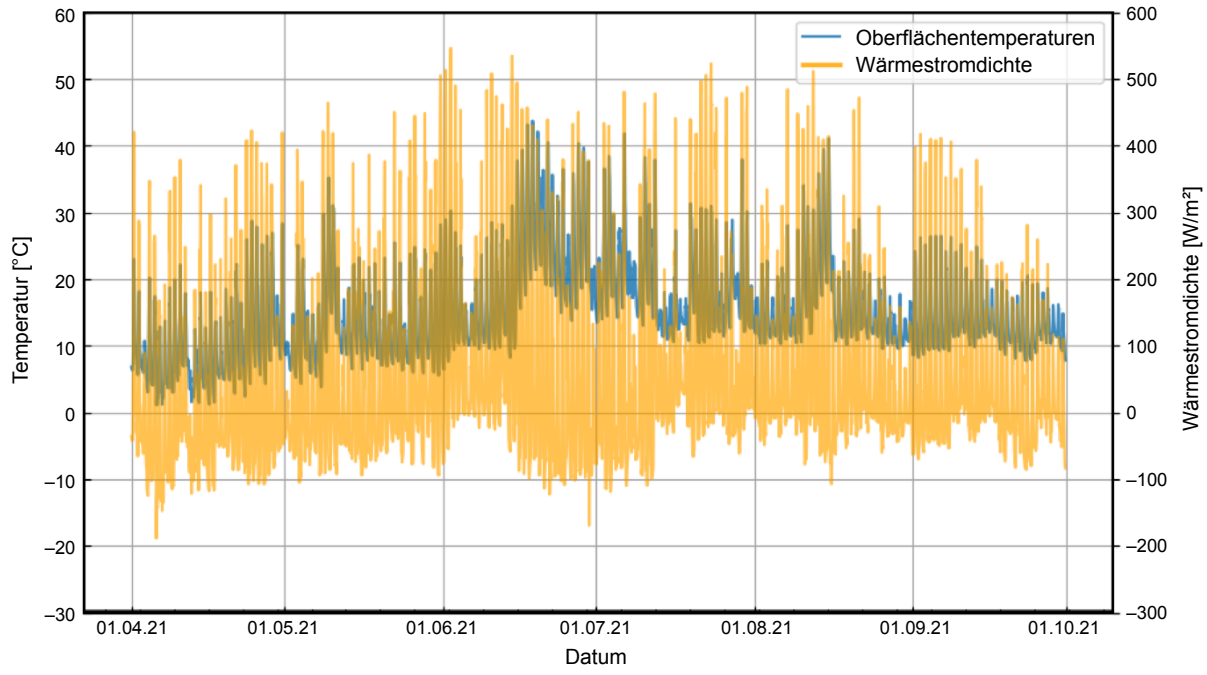


Bild 4-34: Wärmestromdichte und Oberflächentemperatur des Testfeldes B1.2 im Sommer 2021

5 Energiebilanzierung

Wie bereits in Kapitel 1.4 beschrieben, ist es das Ziel, alle an der Geländeoberfläche wirkenden Wärmeströme zu erfassen und bei der Steuerung der Anlage zu berücksichtigen. Die atmosphärischen Wärmeströme sowie der geothermische Wärmestrom sind unbeeinflussbar; der Wärmestrom, welcher durch das Drainagewasser in den Fahrbahnaufbau eingebracht wird, ist hingegen durch die Regelung des Volumenstroms beeinflussbar. Entscheidend für die Regelung der Anlage ist das thermische Gleichgewicht an der Geländeoberfläche, auf die die in Kapitel 3 beschriebenen wirkenden Wärmeströme wirken.

Die Energiebilanz wird für ein worst-case Szenario ausgelegt, d. h. die veränderlichen und positiv wirkenden Wärmeströme (Wärmeströme infolge Regen, kurzwelliger Strahlung) werden bei der Berechnung vernachlässigt. Der Geothermische Tiefenstrom wird aufgrund seines minimalen Einflusses ebenfalls ignoriert. Darüber hinaus ist es mit der zur Verfügung stehenden Messausrüstung nicht möglich, die kurzwellige Strahlung (Direkte Sonnenstrahlung) zu erfassen. Dementsprechend weichen die Wärmestromdichten, die tagsüber gemessen werden, von den Wärmestromdichten, die nicht direkt, sondern durch Auswerten der atmosphärischen Wetterdaten ermittelt werden, ab. Um den tatsächlich an der Geländeoberfläche wirkenden Wärmestrom zu messen, wären Temperaturmessgeber in der Fahrbahnoberfläche notwendig gewesen sowie Pyrgeometer zur Messung der langwelligen Strahlung und Pyranometer zur Messung der kurzwelligen Strahlung. Die Anschaffung dieser Sensoren und Messgeber hätten jedoch den finanziellen Rahmen des Forschungsvorhabens überschritten, weshalb zu einem die vereinfachte Annahme getroffen wurde, dass der zwischen den oberen Sensoren wirkenden Wärmestrom identisch ist mit dem an der Geländeoberfläche wirkende Wärmestrom. Zum anderen wurden die vereinfachenden Formeln für die Radiation aus Kapitel 3 genommen, weshalb Abweichung unvermeidlich sind.

Die Darstellung der Energiebilanz erfolgt stringent zur Gleichung 11: zur Ermittlung der Energiebilanz, auf der rechten Seite wird die Wärmestromdichten der Fahrbahnoberfläche ermittelt, auf der linken Seite der Gleichung werden die im Fahrbahnaufbau notwendig wirkenden Wärmestromdichten ermittelt.

$$\dot{q}_{zu} = \pm\dot{q}_{KW} \pm \dot{q}_{LW} + \dot{q}_{konv} + \dot{q}_{lat} - \dot{q}_{regen} + \dot{q}_{s} - \dot{q}_{GEO} \tag{11}$$

Der Wärmestrom, der durch das Drainagewasser in den Fahrbahnaufbau eingebracht wird, liegt bis zu 85 – 95 mm unterhalb der Geländeoberfläche. Hierdurch bedingt benötigt der Wärmestrom eine gewisse Zeit, bis er an der Geländeoberfläche wirksam wird. Die Wärmeleitfähigkeit ist der entscheidende Faktor bei der zur Erwärmung des Fahrbahnaufbaus notwendigen Zeit. Die Testfelder B1.1 und B1.2 besitzen einen Fahrbahnaufbau aus Beton, die Testfelder A1.1 bis A1.5 einen Fahrbahnaufbau aus Asphalt. Die Wärmeleitfähigkeit des Betons ist dreimal höher als die von Asphalt (siehe Tabelle 6). Bei Asphaltfahrbahnen benötigt ein Energieeintrag dementsprechend länger bis er an der Fahrbahnoberfläche bemerkbar wird. Der Emissionsgrad von Asphalt ist höher als der von Beton, was zu einer

	Kupfer	**Kunststoff**	**Beton**	**Asphalt**
Wärmekapazität [kJ/(kgK)]	0,385	1,3-2,1	0,88	0,92
Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	401	0,2-0,3	2,1	0,7
Dichte [kg/m³]	8960	2300	2300	1900-2100
Emmissionsgrad [-]			0,93	0,97

Tab. 6: Physikalische Eigenschaften der verbauten Materialien

schnelleren Erwärmung der Fahrbahnoberfläche infolge Strahlungseinwirkung führt, siehe Tabelle 6. In Bild 5-1 und Bild 5-2 sind die Energiebilanzen zum 05.02.2021 einmal von Feld A1.1 und einmal von Feld B1.2 visualisiert. Die Wärmestromdichte „Fahrbahn“ entspricht und wird durch die Aufsummierung der auf die Fahrbahn einwirkenden Wärmestromdichten nach Gleichung (11) bestimmt. Die Wärmestromdichte „Sensoren“ bezeichnet den konduktiven Wärmestrom zwischen den Sensoren unter- und oberhalb der Rohrregister und werden gemäß dem in Kapitel 4.5 dargestellten Verfahren bestimmt. Die analytisch ermittelten Wärmeströme des Betonfeldes weichen entgegen der Wärmeströme des Asphaltfeldes nachts nur gering von den in den oberen Sensoren (TMO1 oder TRO1) gemessenen Wärmeströmen ab. Abweichungen sind aufgrund der nicht berücksichtigten kurzwelligen Wärmeströme tagsüber zu erwarten, die Wärmeströme aus Geothermie und Regen sind ebenfalls nicht berücksichtigt. Ausschließlich die Strahlung die direkt von der Sonne auf die Erde strahlt ist kurzwellig, sobald diese durch Wolken scheint, ist die Strahlung diffus bzw. und nicht mehr kurzwellig, d. h. bei Schneefall und Regen ist nicht mit kurzwelliger Strahlung zu rechnen.

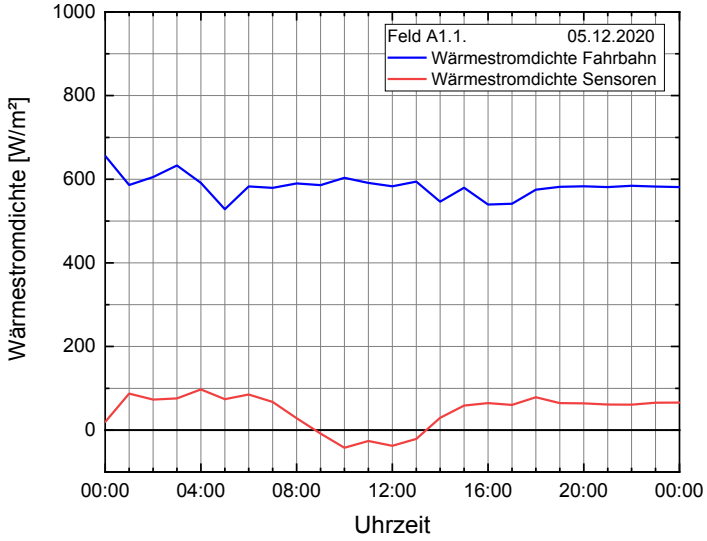


Bild 5-1: Energiebilanz des Asphaltfeldes A1.1 am 05.12.2020

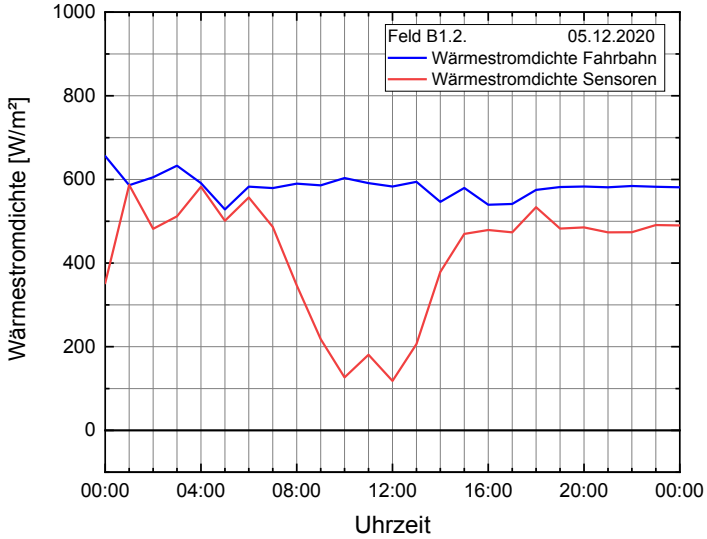


Bild 5-2: Energiebilanz des Betonfeldes B1.2 am 05.12.2020

Die Abweichungen zwischen dem Beton und dem Asphaltfeld rühren von dessen in Vergleich zum Beton hoher Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität her, die Sensoren in den oberen Lagen messen demzufolge zeitlich verschobene und durch die an der Geländeoberfläche wirkende Werte. Des Weiteren wird mit der vorhandenen Messausrüstung keine kurzwellige und langwellige Strahlung gemessen. Die langwellige Strahlung wird durch analytische Formeln, welche die Bewölkung berücksichtigen, ermittelt. Da in Füssen keine Wetterstation mit der notwendigen Ausrüstung zur Ermittlung der Bewölkung vorhanden ist, wird auf Daten aus Kempten zurückgegriffen, welche von den Bewölkungsdaten in Füssen abweichen können. Die Energiebilanzen der Testszenarien und aller Testfelder sind im Anhang I dargestellt, auch wurden die Energiebilanzen eines Sommertages (01.06.2021) dargestellt, welche den Einfluss der kurzwelligen Strahlung zeigt. Die unmittelbar von der Sonne emittierte Strahlung besitzt aufgrund der hohen Sonnenoberflächentemperatur (vgl. Plancksches Strahlungsgesetz) eine kurze Periodenlänge, diese Strahlung erwärmt sowohl die Atmosphäre als auch die Erdoberfläche. Die reflektierende Strahlung, welche dann von der Erdoberfläche aus emittiert wird, ist aufgrund der niedrigen Erdoberflächentemperatur langwellig (Infrarotbereich). Die Wärmeströme, welche mittels der oberflächlich installierten Sensoren gemessen wurden, nehmen erkennbar mit dem Verlauf der Sonne über den Tag zu und ab, i. e. die Wärmeströme sind nachts konstant und mittags am höchsten. Dieser Wärmeeintrag ist, da keine anderen zusätzlichen Wärmeströme ersichtlich waren, ausschließlich auf die kurzwellige Strahlung der Sonne zurückzuführen.

6 Numerische Simulation

In der numerischen Untersuchung wurden alle sieben Freiflächen mittels der Simulationssoftware „Comsol“ modelliert, siehe Bild 6-1 und Bild 6-2. Sinn der numerischen Back-up Analyse ist es, die nur schwer analytisch ermittelbaren Wärmeströme, v. a. die langwellige Strahlung) numerisch zu ermitteln. Im ersten Schritt wurde die Geometrie erstellt, welcher dann Materialeigenschaften zugewiesen wurden. Anschließend wurden die hydrothermischen Randbedingungen in das Modell eingepflegt. Zur Validierung des erstellten Modells wurden die numerisch ermittelten Werte den in den Freiflächen gemessenen Werten

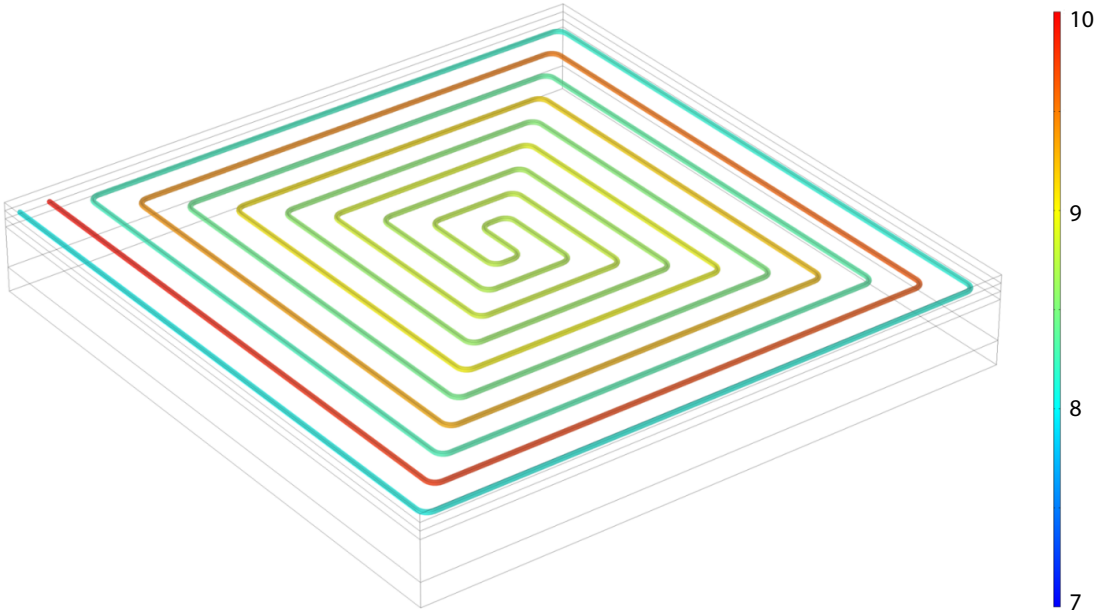


Bild 6-1: Simulierte Freiflächentemperierung

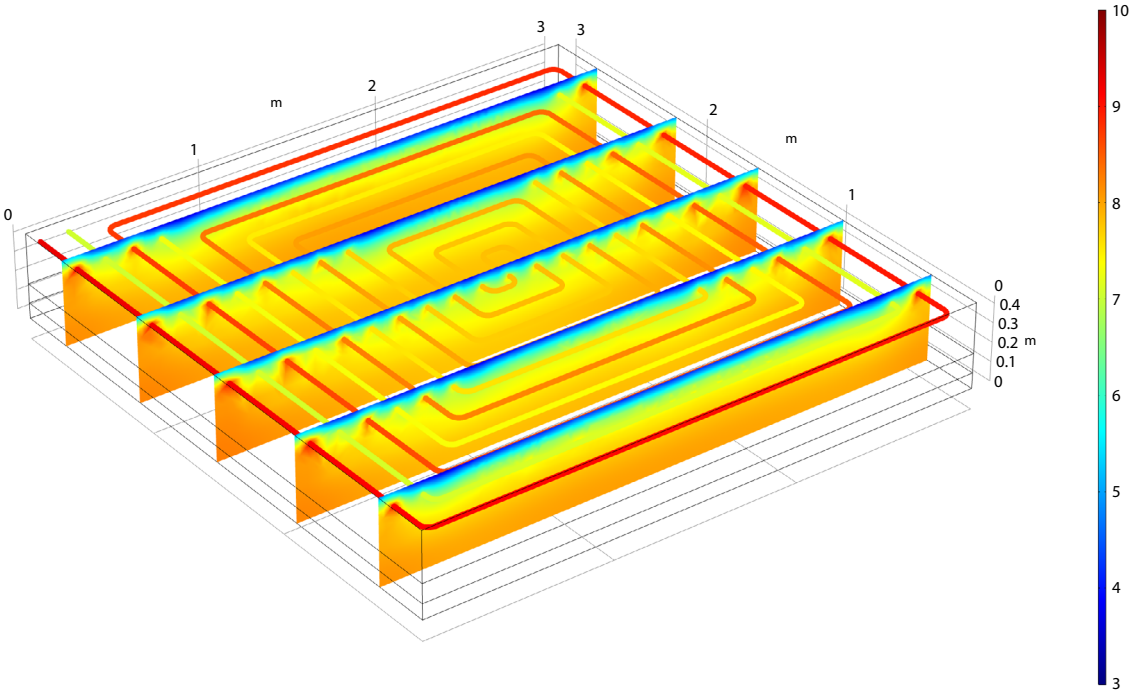


Bild 6-2: Temperaturverteilung während des Glätteszenarios

gegenübergestellt und eine hohe Übereinstimmung festgestellt. Anhand dieses validierten Modells wurden sodann Parameterstudien durchgeführt, um die Wirkungsgröße der zur Auslegung der Freiflächenheizungen maßgeblich beeinflussenden Parameter festzustellen, sodass eine Auslegung der Freiflächenheizung an anderen Standorten mit anderen räumlichen und klimatischen Begebenheiten optimal durchgeführt werden kann.

6.1 Entwicklung des numerischen Simulationsmodells

Es wurden alle sieben Testfelder mit ihren unterschiedlichen Ausgestaltungen als numerische Modelle simuliert. Die einzelnen Ausgestaltungen (Geometrie und Materialien) der Freiflächen sind den Detailbeschreibungen (siehe Kapitel 1.4) zu entnehmen. Die thermischen Eigenschaften der verwendeten Materialien sind der Tabelle 6 zu entnehmen. Die real wirkenden hydrothermischen Prozesse sind im Modell in Randbedingungen zu überführen und können entweder als Temperaturrandbedingung (Dirichlet-Randbedingung) oder als Wärmestromrandbedingung (Neumann-Randbedingung) aufgebracht werden. Für die Temperaturrandbedingungen werden die diskret in der Freiflächenheizung gemessene Daten unmittelbar im Modell angewendet, hierzu zählt die Temperaturmessungen innerhalb der Rohrkonfigurationen. Die Wärmestromrandbedingungen werden durch Anwendung von gemessenen Daten in analytischen Formeln ermittelt.

Wie in Kapitel 1.5 erläutert, wirken an der Geländeoberfläche die Summe der lang- und kurzwelligen Strahlung, der konvektive und latente Wärmestrom und die Wärmeströme infolge von Regen- und Schneeereignissen. Die Wärmeströme werden mithilfe der in Kapitel 1.5 aufgeführten analytischen Gleichungen unter Verwendung der am Standort installierten Wetterstation sowie durch Daten des DWD und der Anlagensteuerung berechnet. Der geothermische Wärmestrom wird mit 5 mW/m² berücksichtigt.

Die Modellierung der Rohrströmung wurde bei Comsol mit der Impulsgleichung (12) und Kontinuitätsgleichung (13) modelliert.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla u = -\nabla P - f_D \frac{\rho}{2 d_h} u|u| + F \tag{12}$$

und

$$\frac{\partial A\rho}{\partial t} + \nabla \cdot (A\rho u) = 0 \tag{13}$$

Hierbei ist:

u durchschnittliche Geschwindigkeit über den Querschnitt $[m/s]$

ρ Dichte $[kg/m^3]$

P Druck $[Pa]$

f_D Darcy Reibungsfaktor [dimensionslos]

F volumenbezogene Kraft $[N/m^3]$

d_h mittlerer hydraulischer Durchmesser $[m]$

Die Modellierung des konduktiven Wärmestroms in den Feststoffen wird in jedem Knoten einzeln nach folgender Wärmegleichung (14) gelöst.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q \tag{14}$$

mit

ρ Dichte $[kg/m^3]$

C_p Kapazität bei konstantem Druck $[kJ/(\mathrm{kg{\cdot}m})]$

u Geschwindigkeitsfeld $[m/s]$

Die thermische Leitfähigkeit in Gleichung (15) beschreibt die Beziehung zwischen dem Wärmestromvektor und dem Temperaturgradienten, welcher sich aus dem Fourier's Gesetz der Wärmeleitung ergibt.

$$q = -k\nabla T \tag{15}$$

mit

q Wärmestromdichte $[\mathrm{W/m^2}]$

k thermische Leitfähigkeit $[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{mK}}]$

∇T Temperaturgradient [K]

6.2 Validierung des numerischen Simulationsmodells

Die Validierung des numerischen Modells erfolgt anhand der drei Szenarien laminare, turbulente und hochturbulente Durchströmung. Alle drei Testszenarien fanden nach dem 01.11.2020 statt, sodass die Testfelder nicht mehr direkt von der Sonne beschienen werden konnten, sondern immer im Schatten des Bergrückens des Falkensteinkamms lagen, die hierfür durchgeführte Analyse des Sonnenstandes ist in Bild 6-3 dargestellt. Durch diesen Zusammenhang konnte die kurzwellige Strahlung während der Testszenarien vernachlässigt werden.

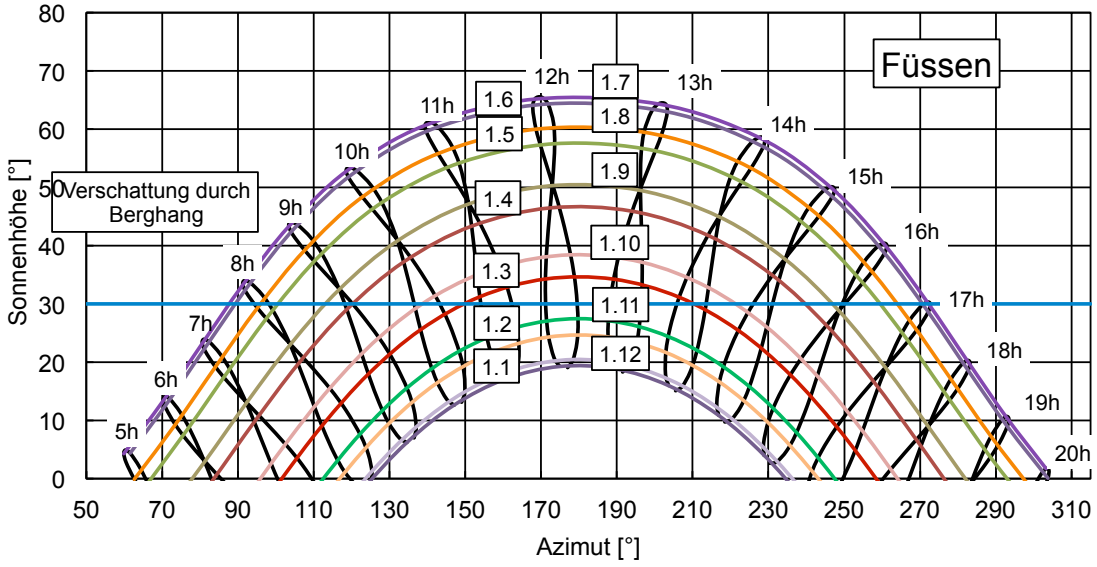


Bild 6-3: Sonnenverlauf über das Jahr für den Standort Füssen

Alle Modelle wurden mit zwei verschiedenen Methoden simuliert, wobei in der ersten der Wärmestrom als Randbedingung an der Oberfläche und in der zweiten stattdessen die Oberflächentemperatur (in TMO1 gemessene Temperatur) als Randbedingung verwendet wurde. In Bild 6-4 bis Bild 6-7 sind für eine laminare Durchströmung die Sensoren in Flächenmitte des Testfeldes B1.2 die real gemessenen Werte mit den numerischen ermittelten Werten dargestellt. Die Bilder zeigen, dass die Modellergebnisse gut mit den aufgezeichneten Temperaturdaten übereinstimmen, wobei das Wärmestrommodell etwas ungenauer ist als das Temperaturmodell, was darauf zurückzuführen ist, dass die Wärmeströme analytisch berechnet wurden, wobei die Daten der am Standort installierten Wetterstation und die DWD-Daten verwendet wurden. Die Wetterstation befand sich in 1,5 m Höhe und kann daher nicht exakt die Temperatur und Windgeschwindigkeit knapp über der Oberfläche der Freifläche messen, deren Werte für die Ermittlung des konvektiven Wärmestroms elementar sind. In Anhang II sind die Validierungen für alle Testfelder und Strömungszustand in Diagrammen dargestellt.

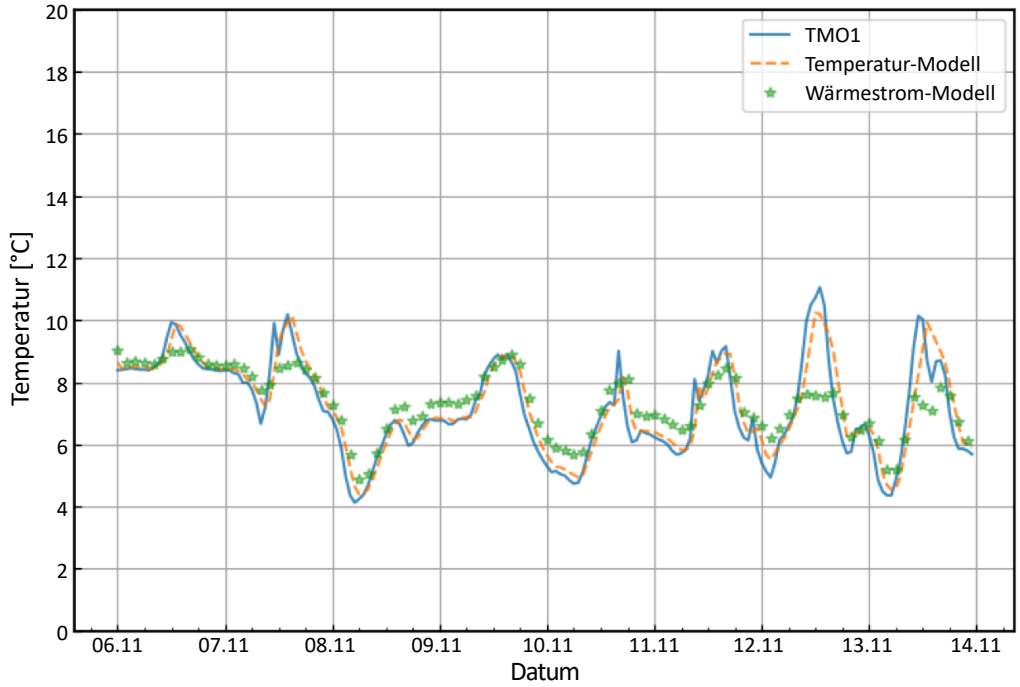


Bild 6-4: Messwerte und numerisch ermittelte Werte in TMO1

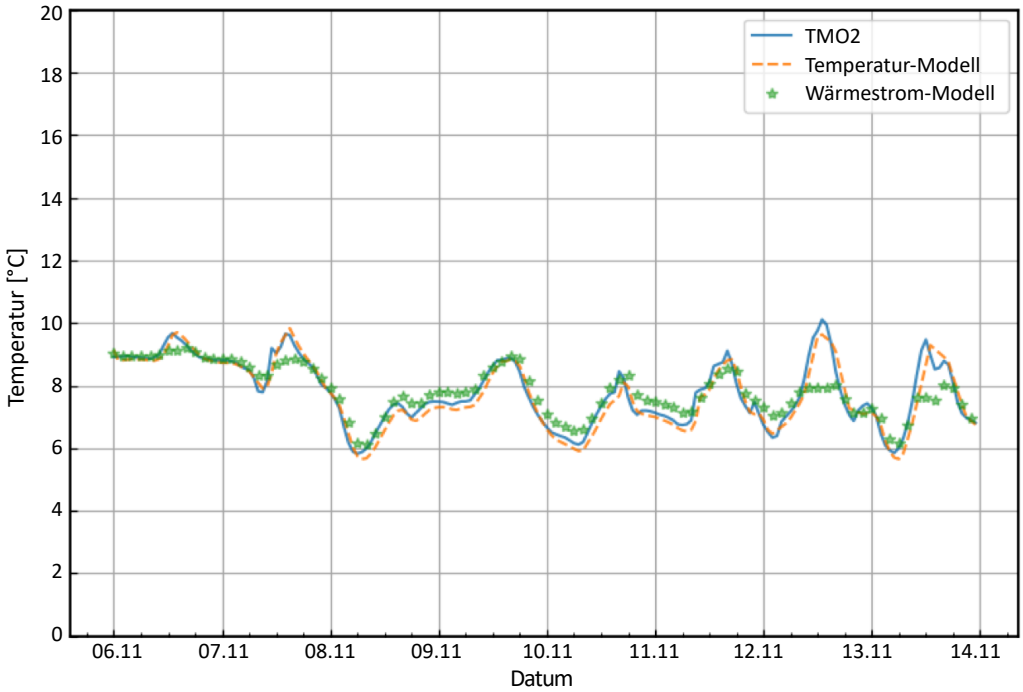


Bild 6-5: Messwerte und numerisch ermittelte Werte in TMO2

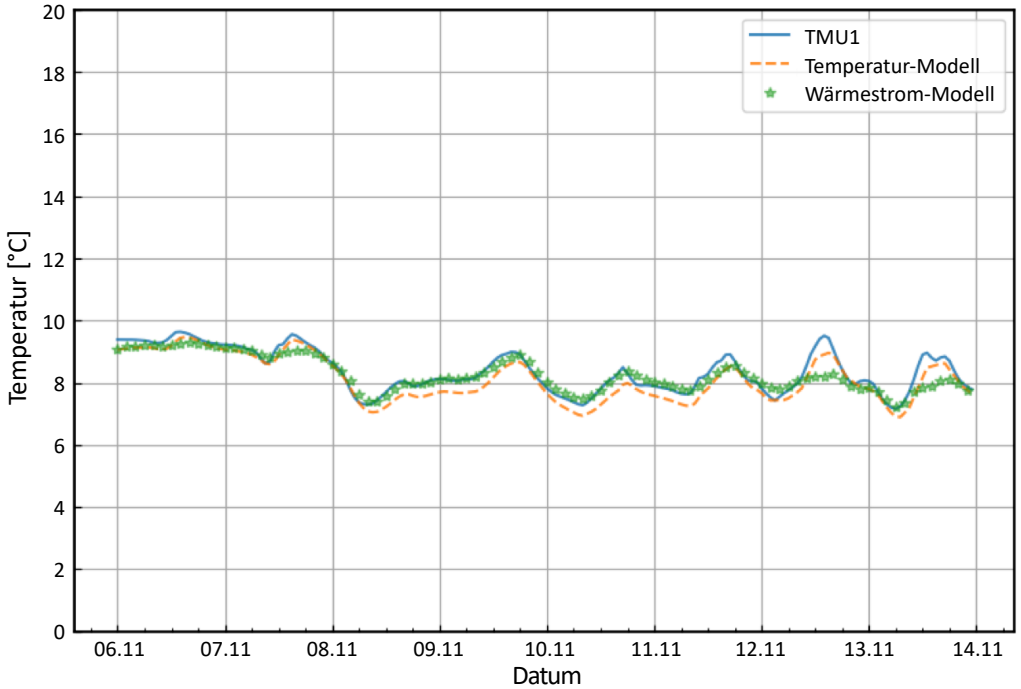


Bild 6-6: Messwerte und numerisch ermittelte Werte in TMU1

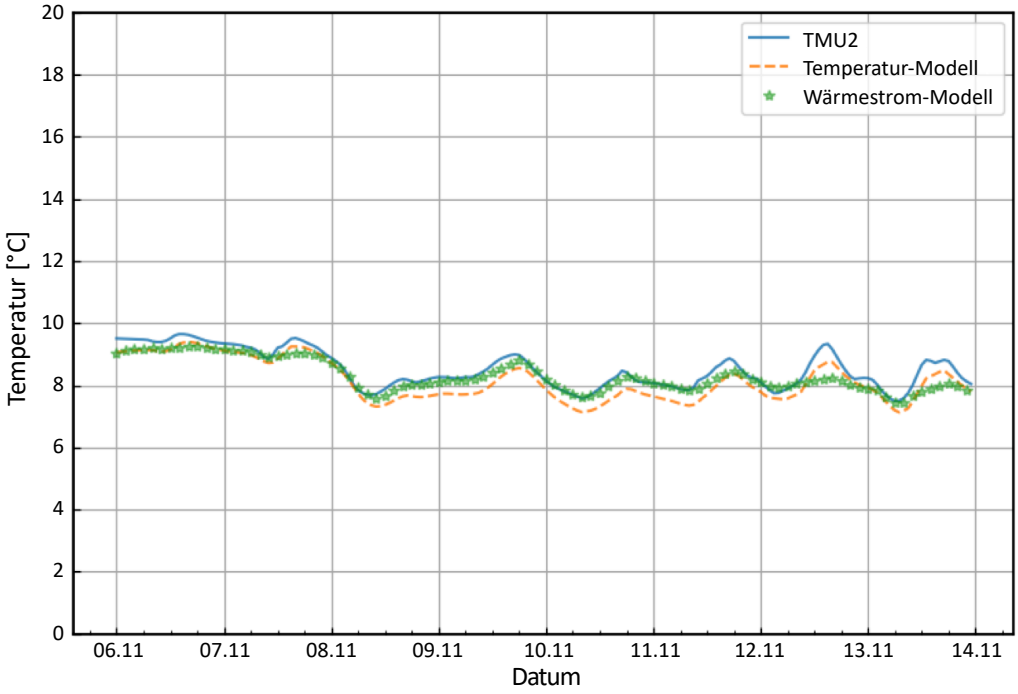


Bild 6-7: Messwerte und numerisch ermittelte Werte in TMU2

6.3 Parameterstudie

Das numerische Modell ist validiert und kann daher zu Parameterstudien herangezogen werden.

Durch die Variation der Parameter kann die Wirkungsgröße der unterschiedlichen Parameter bei der Freiflächentemperierung festgestellt werden. Diese Kenntnis bildet die Basis bei der optimierten Auslegung zukünftiger Freiflächen. Folgende Parameter wurden hinsichtlich ihres Einflusses auf die Temperatur im Fahrbahnaufbau hin untersucht:

- Rohrmaterial

Bei den Testszenarien „Glätteszenario“ und „Schneeszenario“ zeigte sich bereits, dass das Feld B1.2 (Betonaufbau und Kupferleitungen) am effektivsten war. Durch die numerische Parameterstudie wurde diese Beobachtungen nun numerisch unterbaut. In Bild 6-8 ist die numerisch ermittelte als auch gemessene Wärmestromdichte der Testfelder aufgetragen, die durch das Drainagewasser in den Fahrbahnaufbau eingetragen wird. Der gemessene Wärmestrom liegt hier zwischen +100 und -130 W/m². In Bild 6-9 bis Bild 6-11 ist die Oberflächentemperatur in Abhängigkeit zum verwendeten Rohrmaterial dargestellt es wird ersichtlich, dass die Verwendung von Kupfer anstatt Kunststoff als Rohrmaterial einen höheren Wärmeeintrag in den Fahrbahnaufbau bewirkt. Anmerkung: Sensor TMO1 befindet sich nur 3 mm unter der Oberfläche, weshalb die Umgebungstemperatur dessen Messwerte massiv beeinflusst und folglich bei der Variation der Materialparameter keine Veränderungen ersichtlich wurden. Die Ergebnisse für TMO1 werden daher hier nicht gezeigt, sondern sind im Anhang zu finden.

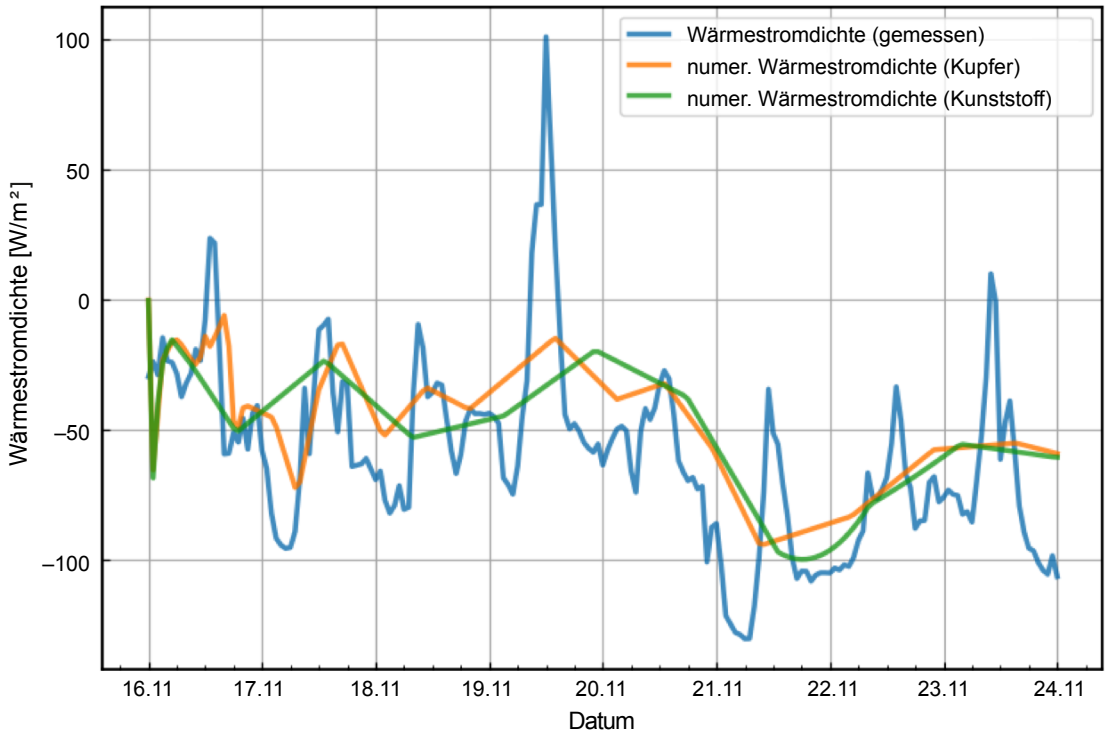


Bild 6-8: Freifläche B1.2: Die Wärmestromdichten nach Rohrmaterial

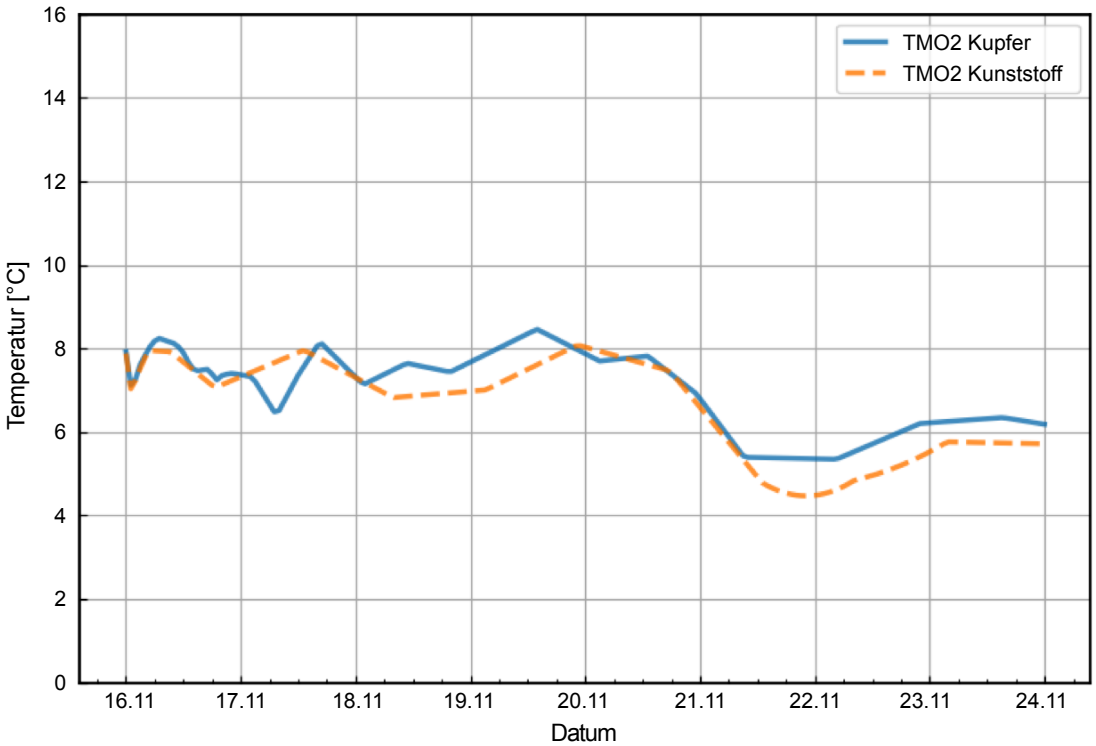


Bild 6-9: Gegenüberstellung von Kupfer- und Kunststoffrohren im Sensor TMO2

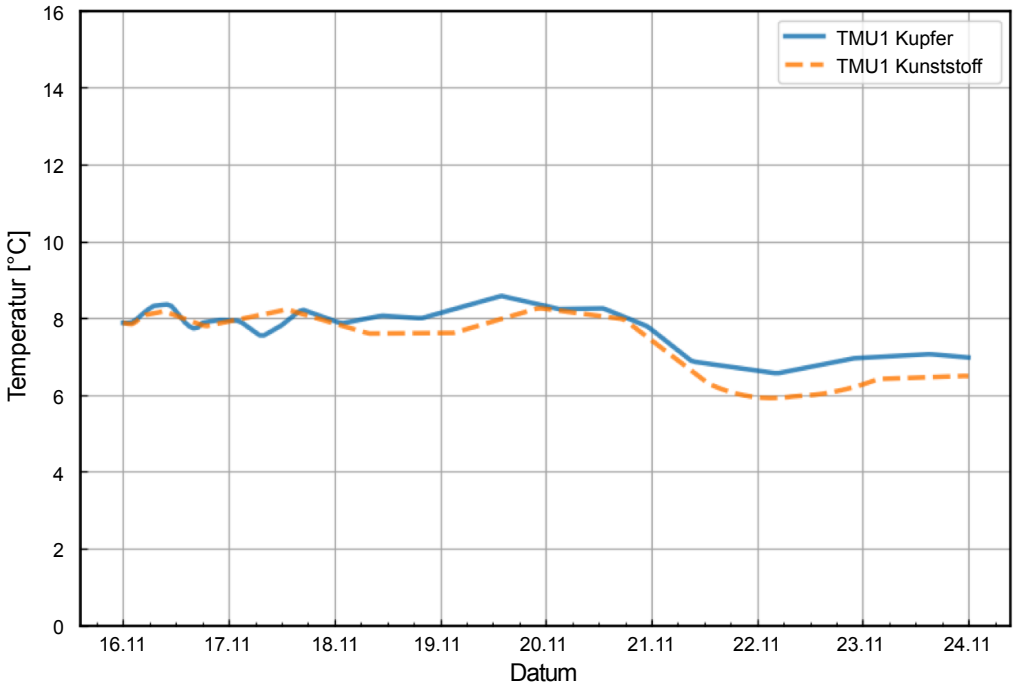


Bild 6-10: Gegenüberstellung von Kupfer- und Kunststoffrohren im Sensor TMU1

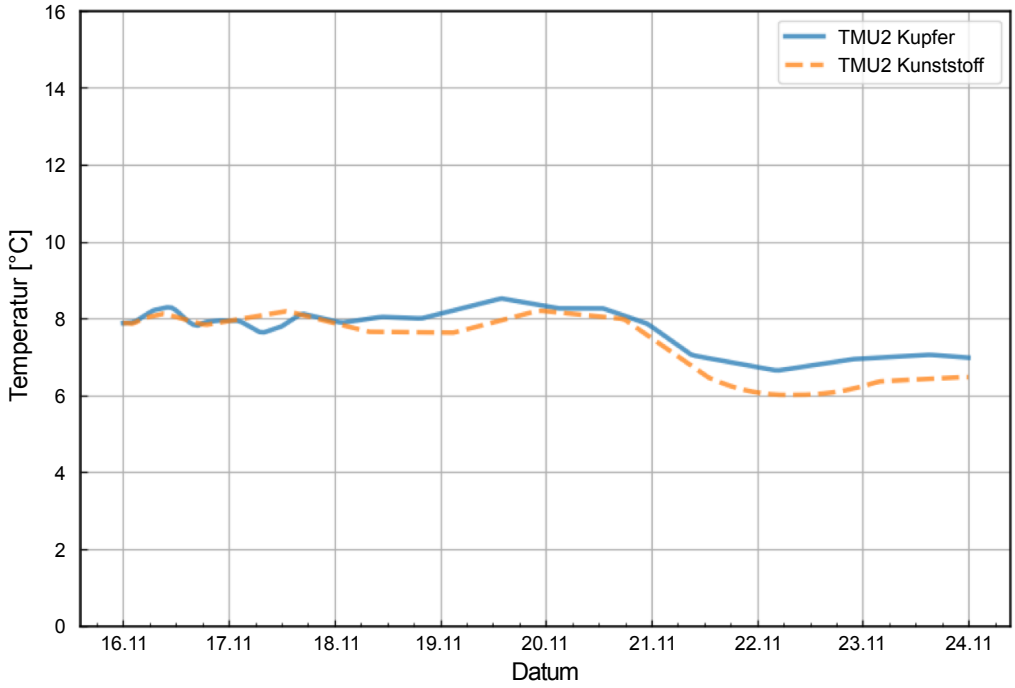


Bild 6-11: Gegenüberstellung von Kupfer- und Kunststoffrohren im Sensor TMU2

- Einbautiefe der Rohrregister

Die Tiefenlage der Rohrregister hat einen direkten Einfluss auf die Temperaturentwicklung im Fahrbahnaufbau. In den folgenden Bild 6-12 bis Bild 6-15 sind die simulierten Temperaturen in den jeweiligen Temperatursensoren dargestellt. Die Temperatursensoren sind fix in ihren Höhenlagen belassen worden (siehe Bild 3-4). Für die Rohregister wurden Einbautiefen von 50 mm, 100 mm und 150 mm unterhalb der ursprünglichen Einbautiefe eingebaut. Es zeigt sich deutlich, dass mit zunehmender Tiefenlage der Rohrregister die Temperatur an der Oberfläche abnimmt. Durch die Wärmeeinleitung in einer größeren Tiefe nimmt der Wärmefluss zur Geländeoberkante hin ab. Das Volumen des Fahrbahnaufbaus nimmt mit zunehmendem Abstand zwischen Rohrregister und Fahrbahnoberfläche zu. Um dieses größere Volumen auf das gleiche Temperaturniveau wie das eines kleineren Volumenkörper zu heben, würde mehr thermische Energie erforderlich werden, welche aber nicht vorhanden ist, weshalb das Temperaturniveau innerhalb des Fahrbahnaufbaus und somit auch an der Oberfläche deutlich geringer ist.

In Bild 6-16 ist die nach oben gerichtete Wärmestromdichte dargestellt. Da die Sensoren bei dieser Untersuchung an die Rohrregister gekoppelt sind und nicht an die Geländeoberkante sind die Ergebnisse nahezu identisch.

Zusammenfassend empfiehlt sich, um möglichst hohe Oberflächentemperaturen zu generieren, ein möglichst oberflächennaher Einbau der Rohrregister.

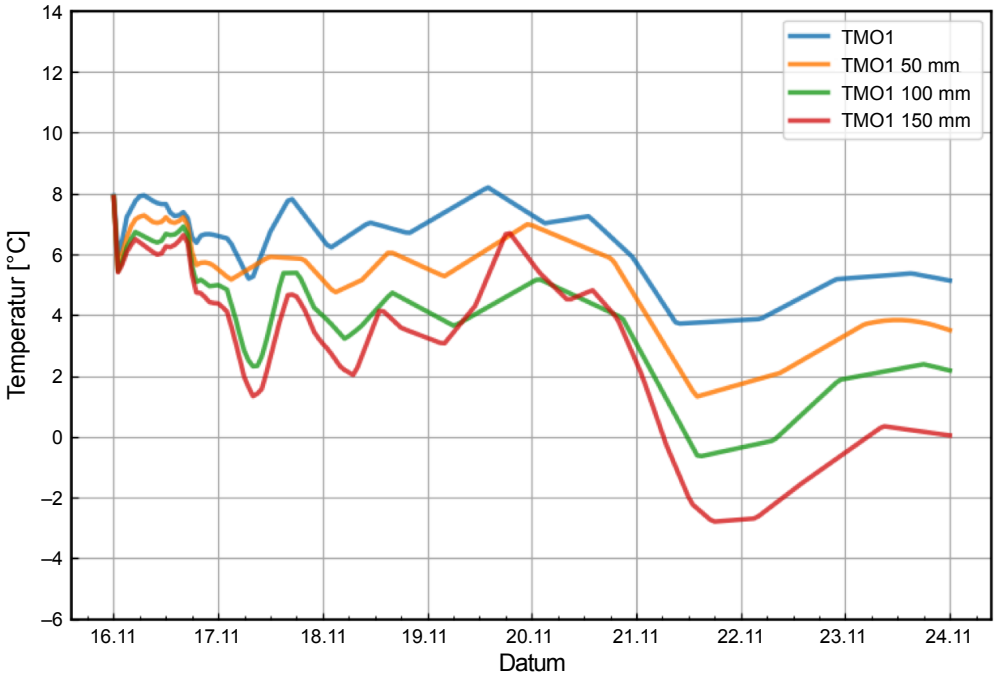


Bild 6-12: Simulierte Temperaturen in TMO1 bei Höhevariation der Rohrregister

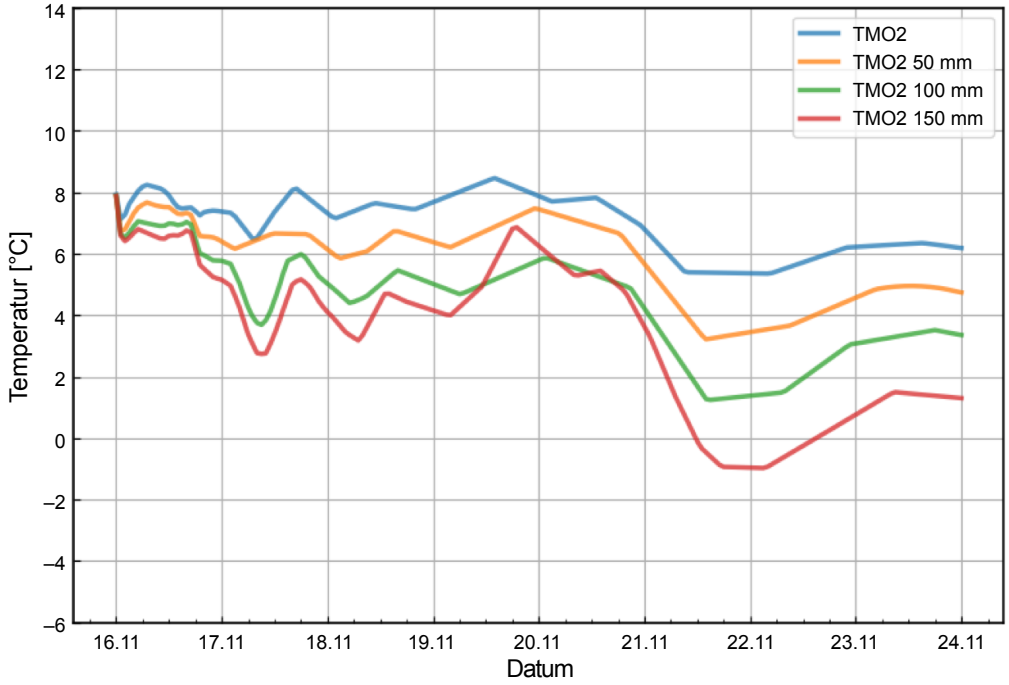


Bild 6-13: Simulierte Temperaturen in TMO2 bei Höhevariation der Rohrregister

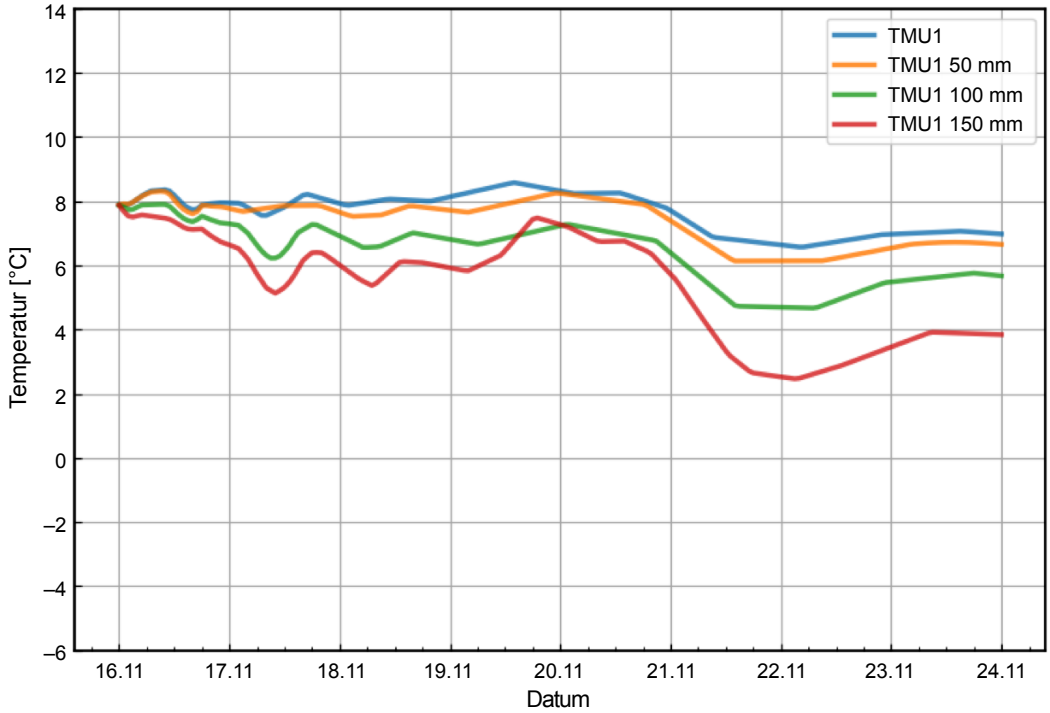


Bild 6-14: Simulierte Temperaturen in TMU1 bei Höhevariation der Rohrregister

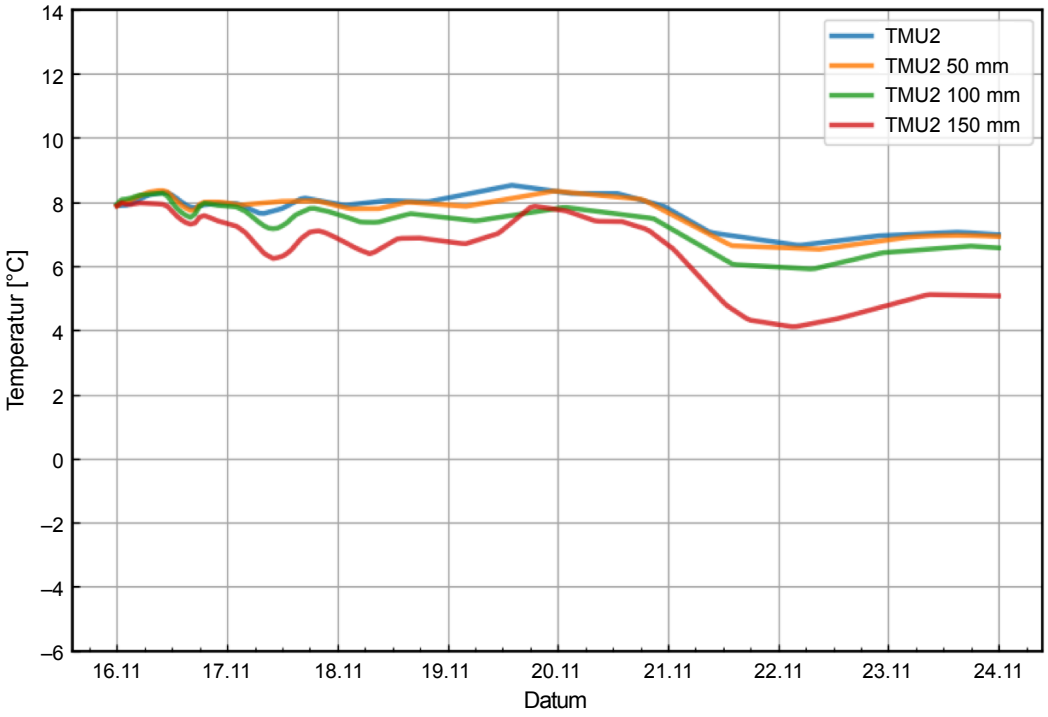


Bild 6-15: Simulierte Temperaturen in TMU2 bei Höhevariation der Rohrregister

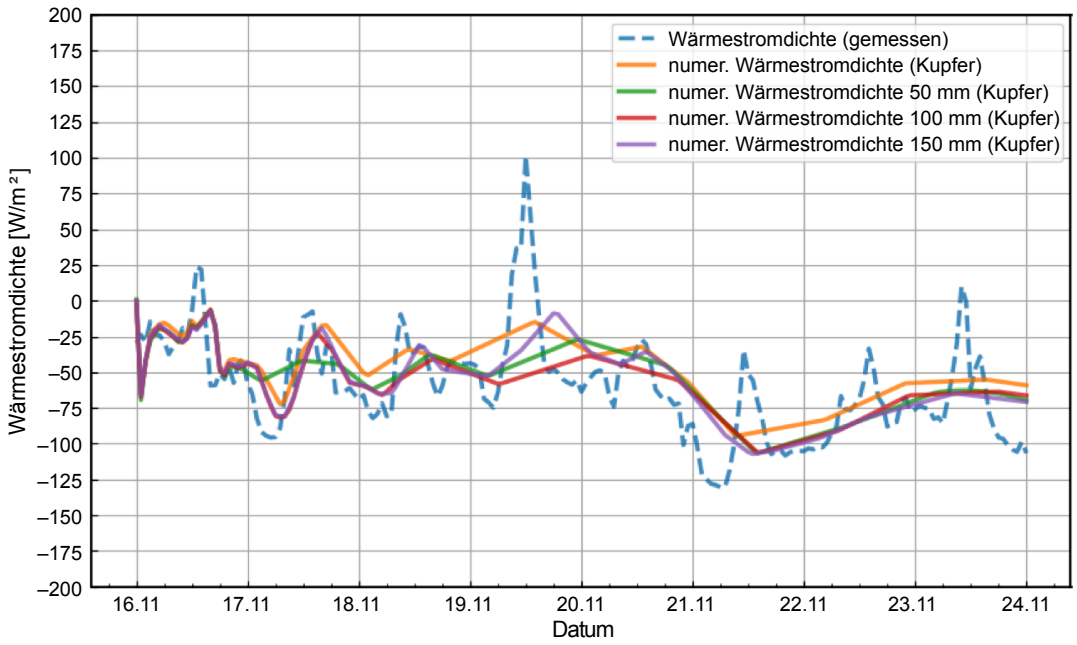


Bild 6-16: Nach oben gerichtete Wärmestromdichte bei unterschiedlicher Verlegetiefe

- Größe der Freiflächenheizung

Die bisher untersuchten Testfelder haben alle einen Grundriss von 3 m x 3 m. Jede dieser Freiflächenheizungen benötigt eine eigene steuerbare Absperrvorrichtung und Sensoren. Weshalb es vorteilhaft wäre, wenn eine größere Fläche nur mit einer Absperrvorrichtung samt Sensoren versorgt werden könnte. In den nachfolgenden Diagrammen wird eine Freifläche mit den Maßen 6 m x 6 m mit einer Freifläche mit den Maßen 3 m x 3 m verglichen. Es ist offensichtlich, dass die Leistung mit Zunahme der Größe der Freifläche abnimmt (siehe Bild 6-17). Bei Verdopplung der Seitenlängen vervierfacht sich der Flächeninhalt der

Freiflächen und somit auch die verbaute Rohrlänge. Die einbringbare thermische Energie ist direkt proportional zum Volumenstrom und der Wassertemperatur. Die Wassertemperatur nimmt aber mit zunehmender Rohrlänge ab, weshalb das thermische Potenzial mit Länge des Rohres auch abnimmt. Eine Vergrößerung der Freiflächen ist daher nur mit einer Kombination aus Vergrößerung des Rohrdurchmessers und Erhöhung der Pumpenrate energetisch sinnvoll.

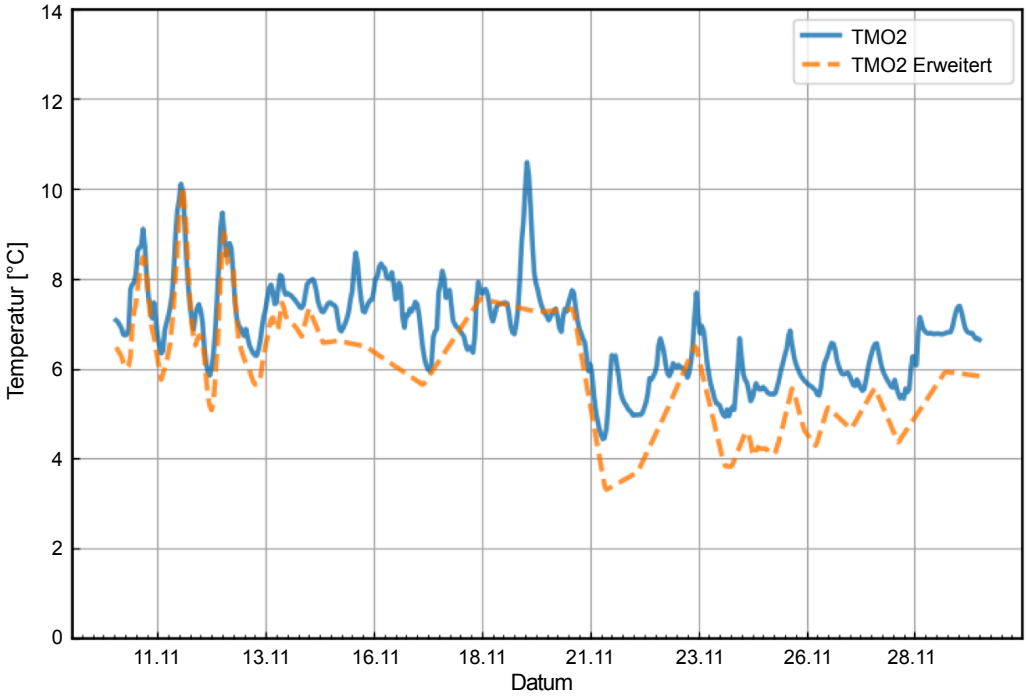


Bild 6-17: Temperatur bei bisheriger Flächengröße und erweiterter Größe in Feldmitte

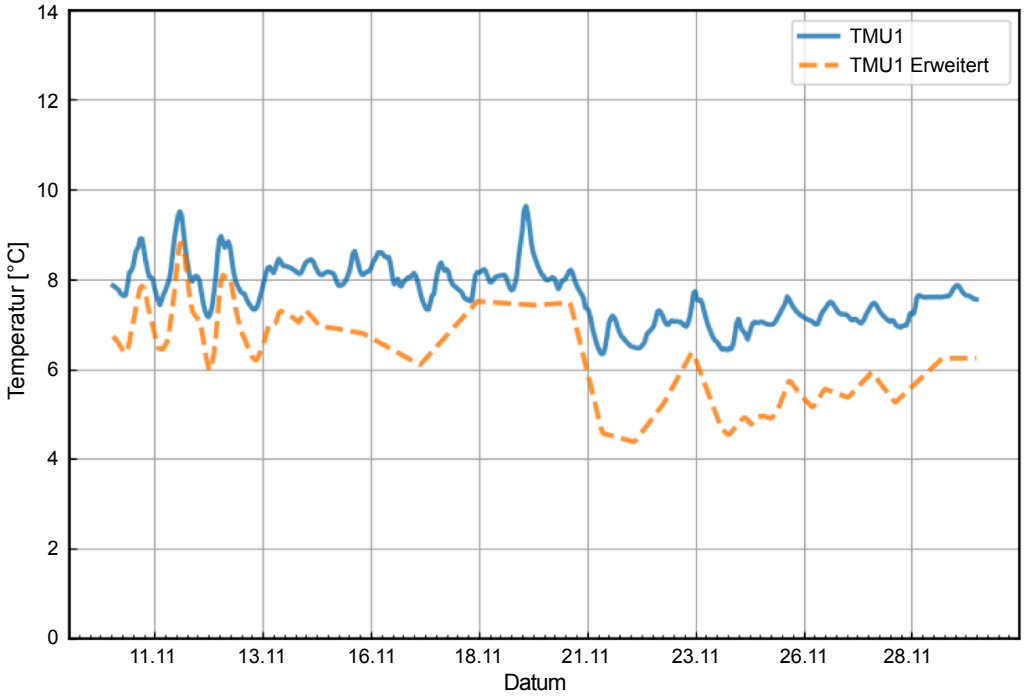


Bild 6-18: Temperatur bei bisheriger Flächengröße und erweiterter Größe in TMU1

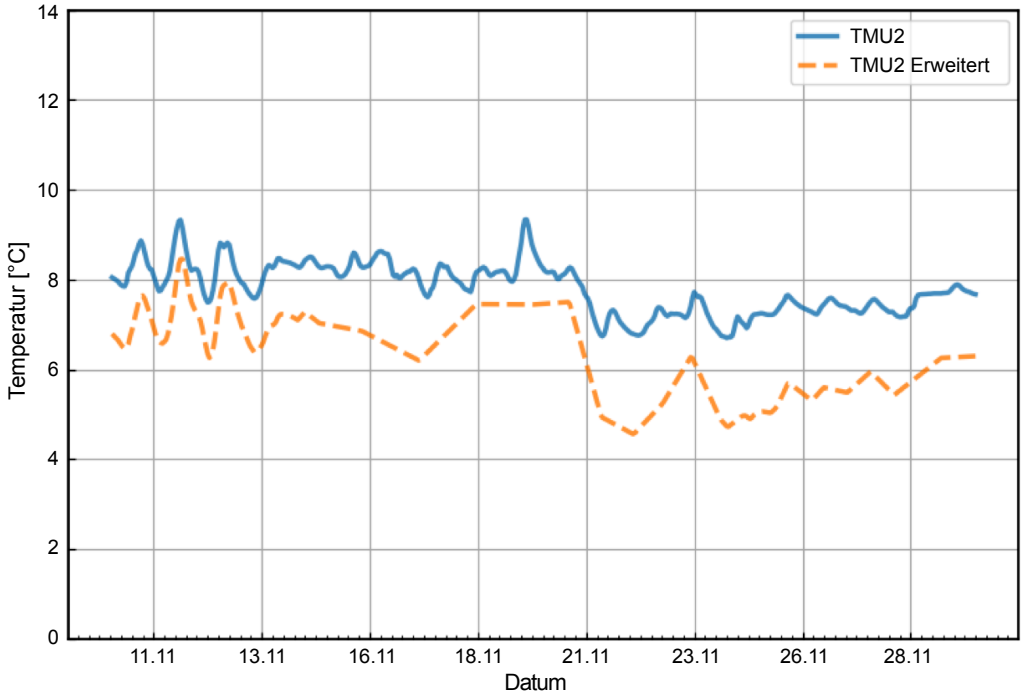


Bild 6-19: Temperatur bei bisheriger Flächengröße und erweiterter Größe in TMU2

- Variation des Schenkelabstandes

Insgesamt wurden drei unterschiedliche Rohrkonfigurationen mit unterschiedlichen Schenkelabstand und folglich unterschiedlicher Rohrlänge (siehe Tabelle 7) untersucht.

Konfiguration	Schenkelabstand [cm]	Rohrlänge [m]
I	20	43,6
II	15	58,4
III	10	88,6

Tab. 7: Untersuchte Rohrkonfigurationen

Es zeigt sich, dass der Wärmeeintrag deutlich vom Strömungszustand des Bergwassers abhängt, i. e. in der laminaren Durchströmung generiert die Konfiguration II die höchste Oberflächentemperatur (siehe Bild 6-20), in der turbulenten Durchströmung ist die Konfiguration II effizienter als die Konfiguration III (siehe Bild 6-21). In der hochturbulenten Durchströmung sind die Konfigurationen II und III ungefähr gleichauf (siehe Bild 6-22). Mit einer Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit geht jedoch auch die Zunahme der Rohrreibung und Bedarf an Pumpenenergie einher, diese Tatsache und der geringere Materialverbrauch und Einbauaufwand sind weitere Vorteile der Verwendung der Konfiguration II anstelle der Konfiguration III.

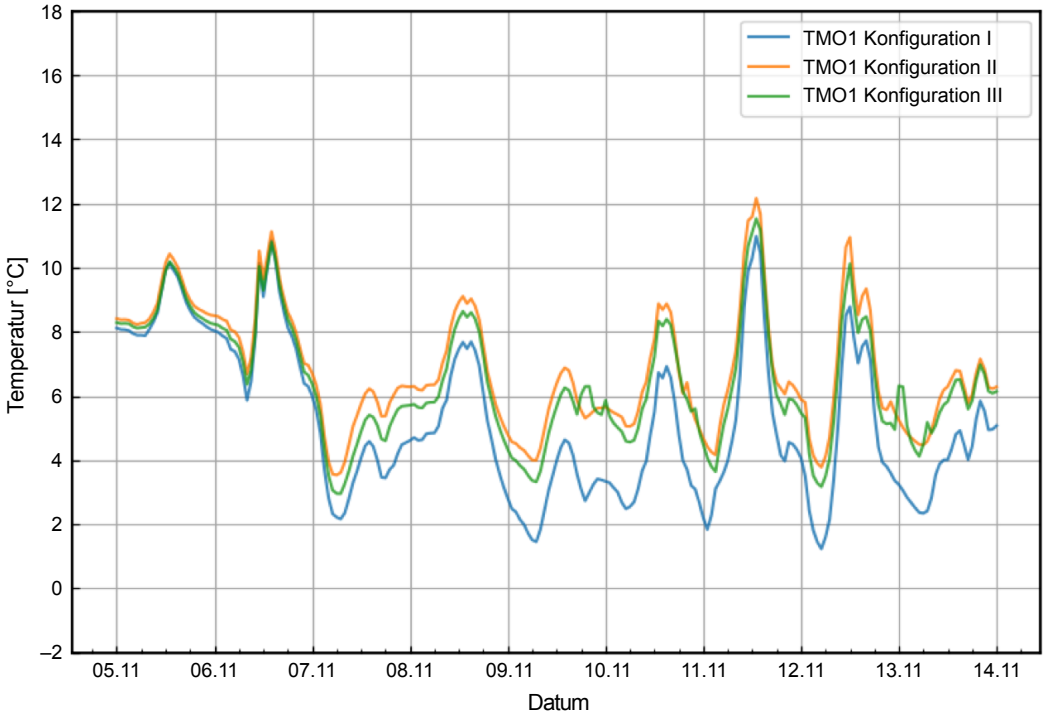


Bild 6-20: Temperatur des Sensors TMO1 bei Variation der Schenkelabstände im laminaren Zustand

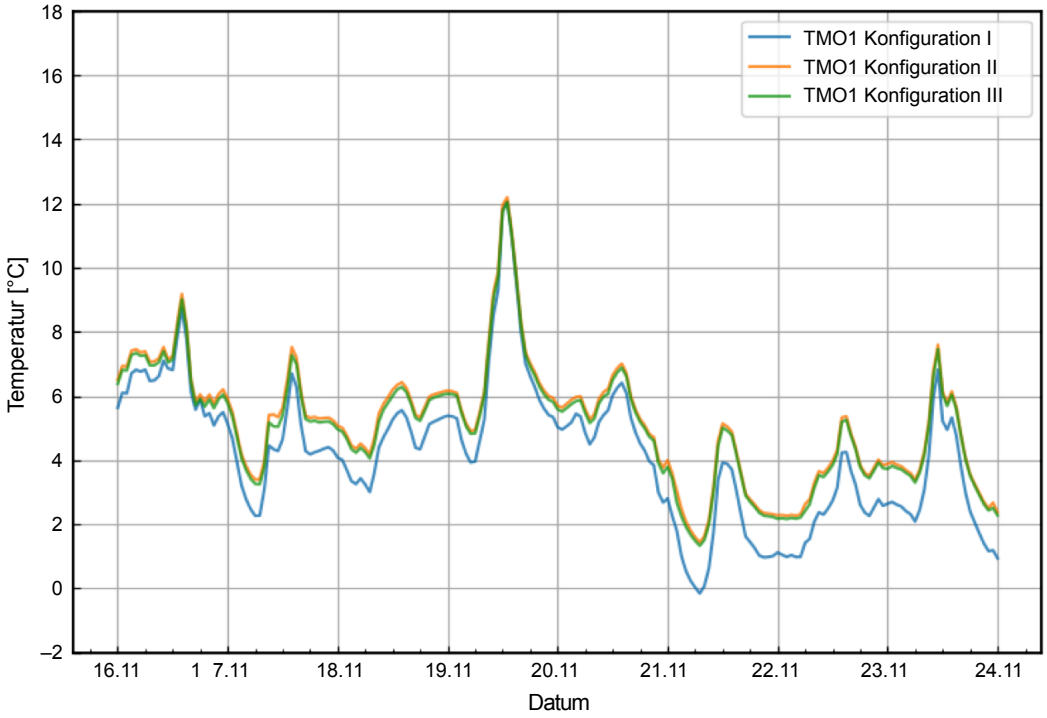


Bild 6-21: Temperatur des Sensors TMO1 bei Variation der Schenkelabstände im turbulenten Zustand

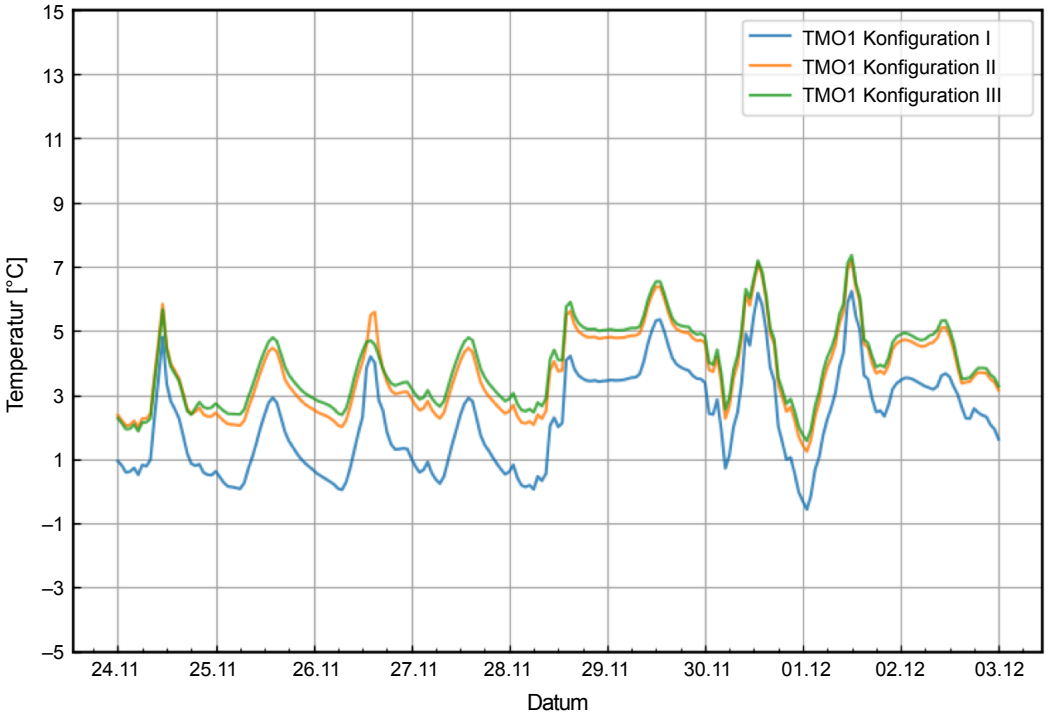


Bild 6-22: Temperatur des Sensors TMO1 bei Variation der Schenkelabstände im hochturbulenten Zustand

7 Anlagenregelung: Entwicklung und Umsetzung

7.1 Anlagenregelung

Die Straßenwettervorhersage des Deutschen Wetterdienstes (SWIS) veröffentlicht stündlich neue Wetterwarnungen, die darüber informieren, zu welcher Stunde innerhalb der nächsten 24 Stunden mit Glatteis, Schnee, Reif oder überfrierender Nässe zu rechnen ist. Sobald die Vorhersage angibt, dass in neun Stunden mit einer der Frostvariationen zu rechnen ist, wird die Anlage mit einer Durchströmung von 1,5 l/s beaufschlagt. Diese Festsetzung resultiert aus der Durchführung des Schnee- und Glätteszenarios, bei ersteren gelang es 10 cm Schnee innerhalb von ca. 2 Stunden bei einer Außentemperatur von durchschnittlich -8 bis -9 °C abzuschmelzen, Beim Glätteszenario war es jedoch nicht möglich bei einer Außentemperatur von -2 °C und freien Feldern den unmittelbar fallenden Schnee abzuschmelzen. Die Aktivierungszeit wurde, einen Sicherheitspuffer berücksichtigend, auf neun Stunden angesetzt. Diese Aktivierung liegt der in Füssen implementierten Fernsteuerung zugrunde. Der winterliche Regelbetrieb sieht im Normalfall eine Durchströmung von 1,0 l/s vor, hierdurch wird verhindert, dass die Anlage durch die Frostsicherung aus dem Betrieb genommen werden muss. Etwaige fehlerhafte Wettervorhersagen bzw. standortspezifische Wetterextrema werden durch Beibehaltung der Frostsicherung abgesichert. Forstsicherung bedeutet, dass sobald die Temperatur in einem der unteren der oberhalb der Rohregister liegenden Sensoren unter 0 °C fällt, das Havarieszenario gestartet wird. Die Frostsicherung veranlasst das Ausblasen der Felder, sodass einer Eisbildung in den Rohren vorgebeugt wird. Ist die Anlage nachdem sie aufgrund der Frostsicherung außer Betrieb genommen worden ist, wieder betriebsbereit, d. h. besitzen alle Sensoren des Fahrbahnaufbaus eine Temperatur über +2 °C, kann dennoch nicht ausgeschlossen werden, dass sich in den Kurvenradien der Rohre letzte Vereisungen befinden, weshalb im Winter ein Dauerbetrieb von 1 l/s vorgesehen ist. Dieser Dauerbetrieb sorgt für eine konstant hohe Temperaturverteilung in Fahrbahnaufbau, sodass ein Einfrieren des Wasser in den Leitungen und eventuelle Schädigungen an den Rohren vorgebeugt wird. Fällt die Rücklauftemperatur aufgrund der Witterungsverhältnisse unter 2 °C wird die Anlage, um Frostschäden zu vermeiden, ebenfalls ausgeblasen.

Bei sommerlichen Hitzeperioden ist ebenfalls die Wettervorhersage die Grundlage der Steuerung: Sobald Temperaturen oberhalb 25 °C vorhergesagt werden, soll die Anlage eine Stunde vor Sonnenaufgang zur Kühlung gestartet werden. Wenn trotz dieser Durchströmung im Fahrbahnaufbau über 30 °C erreicht werden, ist die Durchströmung auf 1,5 l/s zu erhöhen. Die sommerlichen Szenarien (vgl. Bild 4-30) zeigen, dass die strahlungsinduzierten Wärmeströme für die Erwärmung der Oberfläche im großen Maße verantwortlich sind. Die Sonneneinstrahlungsleistung ist jedoch nur schwer vorherzusagen, weshalb die vorhegesagte Außentemperatur als regelnder Parameter verwendet wird.

Die Fernsteuerung erfolgt über ein Skript, welches mit der Programmiersprache Python geschrieben wurde. Dieses Skript läuft permanent auf einem Rechner der Universität Stuttgart und verknüpft die Straßenwettervorhersage des DWD mit der Fernsteuerung der Anlage und löst eine Durchströmung der Anlage mit 1,5 l/s aus, sobald die erwähnten Parameter überschritten bzw. unterschritten werden.

7.2 Ausspülen

Wie bereits in Kapitel 3.4 erwähnt lagern sich in den Rohrregistern bzw. Armaturen Sedimente bzw. Ausfällungen aus dem Bergwasser ab. Wenn bei gleichbleibender Durchströmungsrate der Rohrdruck zunimmt, kann hier auf ein Zusetzen der Leitungen durch Ablagerungen etc. geschlossen werden. Um diese Ablagerungen aus den Rohrleitungen zu entfernen sind Spülungsdurchgänge durchzuführen, i. e. bei laufendem Betrieb werden die Rücklaufventile einzelner Felder verengt bzw. geschlossen, sodass sich der Volumenstrom in den anderen Testfeldern erhöht. Die durch diese Erhöhung des Volumenstroms bzw. Strömungsgeschwindigkeit induzierte Erhöhung der Wandschubspannungen innerhalb der Rohre löst stellenweise die Ablagerungen ab. Bei Wiederöffnung aller Rücklaufventile ist sodann eine Abnahme des Rohrdrucks zu verzeichnen. Der Rohrdruck ist zwar immer noch höher als zu Beginn der Messungen aber dennoch geringer als zuvor.

7.3 Selbstaktivierung

Zu Beginn des Jahres 2022 wurde die Fernsteuerung der Anlagenregelung in Betrieb genommen. In der Nacht vom 31.03.2022 zum 01.04.2022 wurde um 00:00 Uhr vom DWD eine Schneevorhersage für 9:00 Uhr herausgegeben. Die Regelung der Anlage erhöhte deswegen selbstständig die Gesamtdurchströmung von 1,0 l/s auf 1,5 l/s, das Feld B1.2 wird folglich mit einem dem in Bild 7-1 aufgezeigten Volumenstrom durchströmt. Am 04.04.2022 wurde um 4:00 Uhr morgens die Durchströmung wieder auf 1 l/s reduziert, da in den nächsten 9 Stunden laut DWD nicht mit Frost oder ähnlichem zu rechnen war.

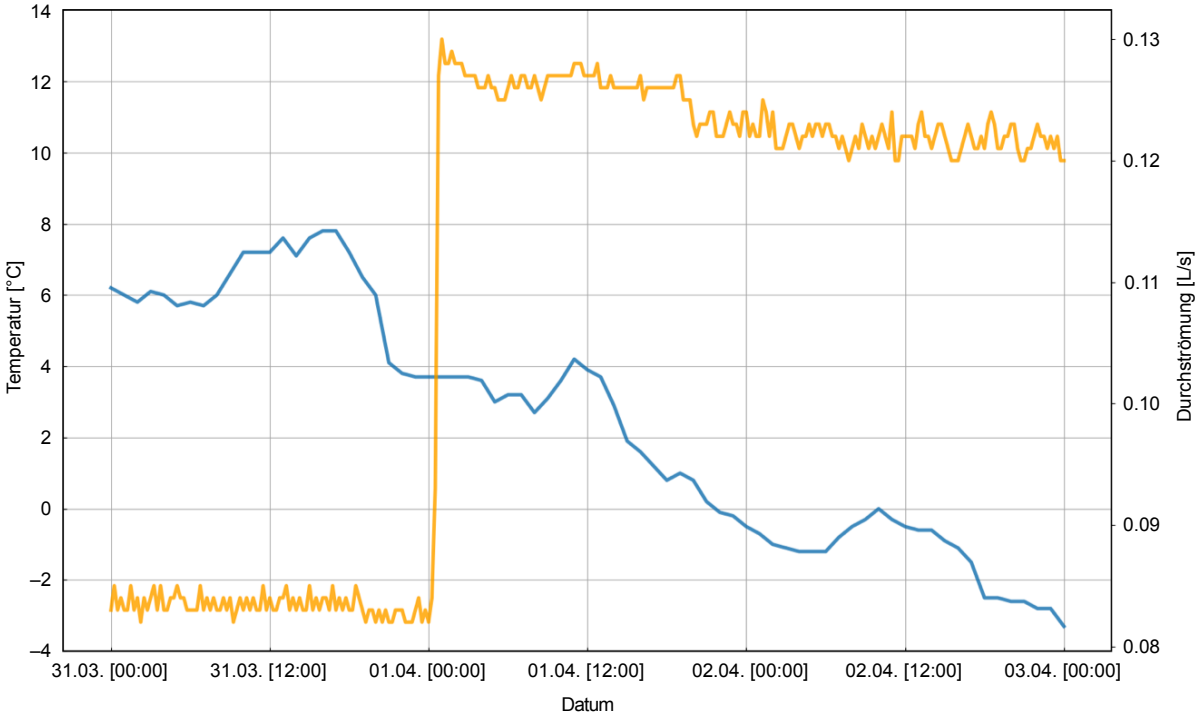


Bild 7-1: Außentemperatur und selbstaktivierte Rohrströmung in Feld B1.2

7.4 Schlussfolgerung

Es zeigt sich, dass die Anlage mittels Wettervorhersage und Temperaturmessung selbstständig und zuverlässig gesteuert werden kann. Die Steuerung bedarf eines geringen Wartungsaufwands, d. h. es sollte regelmäßig geprüft werden, ob Updates, Stromausfälle oder sonstiges die Arbeit des Skripts angehalten hat. Die Verwendung der frei zugänglichen Programmiersoftware Python erlaubt es, das Skript ggf. selbstständig ohne großen Aufwand anzupassen.

8 Entwurfsplanung: Anwendung der Implementierungshilfe

8.1 Geothermisches Potenzial

In der Entwurfsplanung wird eine Freiflächenheizung für die Bundesautobahn A7 im Bereich des Nordportals des Grenztunnels konzipiert. Die Entwurfsplanung soll zeigen, inwiefern eine Freiflächentemperierung realisiert werden kann. Anlage II zeigt einen Entwurfsplan für eine Erweiterung der Freiflächenheizung für das Nordportal des Grenztunnels Füssen.

Das geothermische Potenzial des Nordportals des Grenztunnels Füssen wurde bereits in [7] ermittelt. Hier ergab sich für den Heizfall ein thermisches Potenzial zu 152 kW und für den Kühlfall ein thermisches Potenzial zu -438 kW. Aufgrund von thermischen Leitungsverlusten wird die Leistung bei der Auslegung um 10 % reduziert. Um Eis- und Schneefreihaltung zu garantieren, ist eine Leistungsdichte von 400 W/m² anzunehmen, womit bis zu 38 Freiflächenheizungen mit einer Grundfläche von 3 m x 3 m beheizt werden können.

Vorhandene Heizleistung:	152 kW = 152 000 W
Abminderung um 10 %:	152 000 * 0,9 = 136 800 W
Aktivierbare Fläche:	136 800 W/400 W/m² = 342 m²
Anzahl der Freiflächen bei 9 m² Grundfläche:	342 m²/9 m² = 38 Freiflächen

Die Leistungsdichte des nach oben gerichteten Wärmestroms von 400 W/m² ist [16] als Empfehlung entnommen. Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass in der in den anderthalb Jahren Untersuchung der Wert im Heizfall nie eine zur Fahrbahn hin gerichtete Wärmeleistung von über 200 W/m² erreichte. Die Freiflächenheizung induziert nicht nur einen nach oben gerichteten, sondern auch einen nach unten gerichteten Wärmestrom, welcher hauptsächlich von der Temperatur des Fahrbahnaufbaus unterhalb der Rohrregister abhängt. War die Anlage längere Zeit außer Betrieb, kann der Fahrbahnaufbau ausgekühlt sein und der nach unten gerichtete Wärmestrom ähnliche Werte aufweisen wieder nach oben gerichtete Wärmestrom. Unter der Annahme, dass der Wärmestrom sowohl nach unten als auch nach oben gerichtet eine Leistung von bis zu 200 W/m² annehmen kann, werden die Wärmeströme zu 400 W/m² addiert. Ferner ist zu berücksichtigen, dass die Wärmeleistung anders als bei Gas- bzw. Elektroheizungen nicht geregelt werden kann. Die Wärmeleistung ergibt sich durch den Temperaturgradient zwischen dem Bergwasser in den Rohrregistern und der Oberflächentemperatur. Bei niedrigen Oberflächentemperaturen wird folglich nur eine kleine Wärmeleistung und bei niedrigen eine große Wärmeleistung generiert. Die 400 W/m² sind folglich nur als Auslegungswert zu verstehen.

Darüber hinaus ergibt sich die thermische Leistungsfähigkeit der Rohrregister aus der Temperaturdifferenz zwischen gegebener Vorlauftemperatur der Freiflächen und der minimal zulässigen Rücklauftemperatur, welche gemäß [15] auf 5 °C festgelegt wird. Diese Temperatur wird aber nur kurz nach Beginn einer Durchströmung erreicht, nach einer gewissen Durchströmungsdauer ist die Rohrkonfiguration und der Nahbereich um die Rohrregister bereits so erwärmt, dass das Bergwasser sich beim Durchströmen der Leitungen nicht mehr so stark abkühlt und die Rücklauftemperatur folglich deutlich über 5 °C liegt.

8.2 Bauliche Ausführung der Freiflächen

Die bestehenden Fahrbahnen am Grenztunnel Füssen bestehen aus Asphalt, weshalb es sich aus arbeitspraktischen Gesichtspunkten anbietet, die Freiflächen ebenfalls aus Asphalt herzustellen. Andererseits wird bei der Instandsetzung von Straßenoberflächen innerhalb von Tunneln vermehrt auf Beton gesetzt, die hellere Oberfläche des Betons soll den Tunnel an sich heller und somit sicherer für die Verkehrsteilnehmer machen. Beide Ausführungsszenarien können aber problemlos angewandt werden. Sofern Handlungsspielraum besteht, ist jedoch ein Fahrbahnaufbau aus Beton zu bevorzugen.

Der Freiflächenaufbau erfolgt analog zum Testfeld B1.2, auf eine Kiesausgleichschicht ist eine Asphalttragschicht mit einer Höhe von 10 cm aufzutragen. Hierauf ist eine ca. 20 cm hohe Beton- oder Asphalttragschicht zu gießen, auf die dann die Kupferleitungen anzubringen sind, die Mächtigkeit des Betonaufbaus kann ggf. geringer ausfallen. Die Kupferleitungen sind in ca. 65 mm Tiefe einzubauen. Nach dem Einbau der Kupferleitungen ist hierauf noch Beton oder Asphalt mit einer Höhe von ca. 65 mm einzubauen. Die Rohrkonfigurationen bestehen aus Kupferrohren mit einem Innendurchmesser von 18 mm und einer Wanddicke von 1 mm. Die Rohrleitungen sind mit einem Schenkelabstand von 15 cm zwischen den Rohrleitungen zu verbauen. Die Rohrleitungen sind mittels Dübelhaken an der Beton- oder Asphaltschicht zu befestigen. Zur Sicherstellung der Frostsicherheit sind in Feldmitte Sensoren oberhalb der Rohrkonfigurationen zu verbauen. Hierfür ist mit einer Betonsäge ein Schlitz in Feldmitte einzusägen. In diesen Schlitz sind zwei Sensoren mit einem Abstand von 4 cm einzudrücken und mit kaltflüssigen Bitumen zu vergießen.

8.3 Wasserfassung

Die bisherige Wasserfassung samt Messwehr kann beibehalten werden. Jedoch ist ein übliches großräumiges Absenkbecken (Volumen ca. 30 m³) in der Nähe des Pumpenhäuschens vorzusehen. Aus dem Absenkbecken ist das Bergwasser mittels eines Saugrohres in den bestehenden Pumpensumpf unterhalb der Pumpen zu befördern. Das Saugrohr ist um einen Feinpartikelfilter zu ergänzen. Es ist eine Pumpe zu verwenden, die die Strömungsrichtung umkehren kann, um den Feinpartikelfilter regelmäßig zu reinigen. Wenn die Strömungsrichtung nicht umkehrbar ist, sind zwei Bypässe mit regelbaren Drei-Wege-Ventile vorzusehen.

8.4 Rücklauf

Die Rücklaufleitungen von bis zu 10 Feldern werden in einem Sammelschacht gebündelt. Am Übergang der Rücklaufleitungen zur Sammelleitung sind regelbare Absperrhähne vorzusehen. Die Absperrhähne sind zur Durchführung des Havarieszenarios zwingend notwendig.

9 Zusammenfassung

Mithilfe des am Nordportal des Grenztunnels Füssen realisierten Technikums konnte durch die messtechnische Begleitung und Bewertung des Betriebs im Zeitraum 11/2020 bis 03/2022 nachgewiesen werden, dass das Konzept der passiven, direkten, geothermischen Freiflächenheizung zur Eis- und Schneefreihaltung von Straßenoberflächen geeignet ist. Es konnte gezeigt werden, dass die Eis- und Glättefreihaltung unter den in Füssen maßgebenden Klimabedingungen durch die Freiflächenheizungen gewährleistet werden kann. Unter atypischen Extrembelastungen, d. h. bei einem künstlich erzeugten Szenario in der die Anlage trotz oberflächlicher Glätte in Betrieb genommen wurde, konnten sogar Leistungen von über 1000 W/m² aus der Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur erreicht werden (Bild 4-25). Ferner konnte festgestellt werden, dass das Anlagenkonzept in der Lage ist, Eisbildung im Winter nicht nur vorzubeugen sondern auch bestehende Glatteisschichten auf dem Fahrbahnaufbau abzuschmelzen. Beim Schneeszenario konnte zudem festgestellt werden, dass die Anlage im Stande ist innerhalb von 2 Stunden 10 cm Schnee abzuschmelzen. Bei sehr starkem Schneefall konnte auch beobachtet werden, dass der gefallene Schnee nicht unmittelbar abgeschmolzen werden konnte, sondern zunächst teilweise liegen blieb und zeitverzögert abgeschmolzen wurde. In solchen Ausnahmesituationen ist ggf. zusätzlich noch eine maschinelle Straßenräumung durchzuführen. Bei allen Testszenarien wurde jedoch ersichtlich, dass die beheizten Fahrbahnoberflächen – anders als die nicht mit Rohrleitungen bestückten Freiflächen – stets eisfrei gehalten werden konnten.

Bei sommerlichem Betrieb konnte festgestellt werden, dass die Freiflächen die Oberflächentemperatur um mehr als 10 K abgekühlt werden können, sodass Spurrillenbildung effektiv vorgebeugt werden kann. Die Rücklauftemperatur überstieg hierbei nicht die maximal vorgegebene Temperatur von 20 °C und war somit mit den für die Wiedereinleitung in die Vorflut relevanten Umweltauflagen im Einklang. Die Temperaturspreizungen zwischen Bergwassertemperatur und maximaler Rücklauftemperatur ist deutlich höher, weshalb die Bemessung nach dem winterlichen Ereignis ausreicht, um die sommerlichen Verhältnisse zu bewerkstelligen.

In der Laufzeit des gegenständlichen Forschungsvorhabens wurden im Winter (2020/21) nur zwei winterliche Extremszenarien, bei denen die Anlage willentlich außer Betrieb genommen wurde und um Schäden zu vermeiden hierbei besonderer Beobachtung bedurfte, durchgeführt. Dabei wurde die Schnee- und Eisfreihaltung mittels der Freiflächentemperierung getestet, die Bemessungsleistung der Freiflächen konnte hierdurch jedoch nicht final versuchstechnisch ermittelt werden. Es zeigt sich aber, dass die angegebene Bemessungsleistung von 400 W/m² ausreicht, um die Anlage effektiv zu betreiben. Um die exakte Bemessungsleistung der verschiedenen Freiflächen zu ermitteln, ist eine Fortsetzung des messtechnisch begleiteten Betriebs notwendig.

Die Anlagensteuerung wurde mittels der Programmiersprache Python entwickelt und agiert selbstständig. Die Steuerung berücksichtigt hierbei lokale Wettermessungen sowie Wetterprognosen und erhöht in Situationen, in denen mit Glatteisbildung oder Schneefall zu rechnen ist, die Durchströmung selbstständig. Die Funktionalität der Steuerung wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nachgewiesen; der automatische Betrieb sollte aber in weiteren messtechnisch begleiteten Winterperioden untersucht und bewertet werden.

Weiterer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der potenziellen Querschnittsreduktion der Anlage infolge Ablagerungen. Es wurde im Rahmen des Forschungsprojektes erste

Untersuchungen des Glührückstandes durchgeführt und Tendenzen auf Ablagerungen festgestellt. Auch wurden bereits Verfahren entwickelt und erfolgreich erprobt, welche eine Reduktion der Ablagerungen innerhalb der Rohrregister bewirken.

10 Ausblick

Der Klimawandel und die politische Zeitenwende fordern, um die energetische Versorgungssicherheit zu gewährleisten, einen Wandel in der Bewertung der Energiequellen. Der Maßstab kann nicht mehr ausschließlich monetär sein, sondern muss um die von äußeren Umständen unabhängige Versorgungssicherheit erweitert werden. Energetische Unabhängigkeit wird durch die Reduktion von Energieimporten gewonnen, welche nur durch Energieeinsparungen und Verwendung lokal verfügbarer Energieträger gelingt.

Freiflächenheizungen welche bei Tiefgarageneinfahrten, Feuerwehrzufahrten sowie bei Betriebshöfen von Bauhöfen Verwendung finden, werden zurzeit hauptsächlich thermoelektrisch oder mittels Gasverbrennung betrieben. Die notwendigen Heizleistungen werden bei 100 bis 300 Betriebsstunden mit 200 bis 400 W/m² bei Freiflächen und 300 bis 500 W/m² bei freistehenden Treppenstufen beziffert [24]. Dies bedeutet, dass für einen Quadratmeter Freiflächenheizung durchschnittlich 60 kWh thermische Energie pro Jahr verbraucht werden. Die hierdurch emittierten CO_2-Äquivalente und verursachten Kosten könnten durch die Verwendung direkter, passiver Freiflächenheizungen eingespart werden.

Das entwickelte Konzept der direkten, passiven Freiflächenheizung ist hierbei nicht an die thermische Energiequelle des Bergwassers gebunden, sondern kann auch mit weiteren thermohydraulischen Energiequellen u. a. Grundwasserbrunnen kombiniert werden. Sofern keine wasserrechtlichen Entnahmegenehmigungen vorliegen bzw. keine thermohydraulischen Energiequellen verfügbar sind, kann das Konzept der geothermischen Freiflächenheizung durch den Einsatz von Wärmetauschern zwischen der thermischen Energiequelle und dem die Rohrregister durchströmenden Wassers dennoch verwendet werden, z. B. in der Kombination Erdwärmesonde und Rohrregister. In diesem Fall ist auch nicht mit Ablagerungen innerhalb der Rohrregister zu rechnen.

Geothermische Energiequellen sind grundlastfähig, lokal verfügbar, regenerierbar und eignen sich daher optimal bei Freiflächenheizungen. Bei der Tunnelgeothermie im Speziellen liegt der Vorteil bei der Nutzung eines Nebenprodukts der aus tunnelstatischer Sicht per se erforderlichen Bergwasserdrainage. Ist in der unmittelbaren Umgebung von Tunneln (z. B. Eisenbahntunneln) keine Freiflächentemperierung notwendig, kann die thermische Energie u. a. auch bei Wärmenetzen und Fischzuchten verwendet werden. Das Bergwasser des Grenztunnels Füssen wird nicht nur zur Temperierung der Freiflächen, sondern auch erfolgreich zur Temperierung der dortigen Betriebsgebäude genutzt. Die Kombination von Freiflächentemperierungen der Tunnelportalbereiche und Betriebsflächen mit der thermischen Klimatisierung der Tunnelbetriebsräume ist ein sinnvolles und funktionales Nutzerkonzept für anfallendes Bergdrainagewasser.

Die erfolgreich durchgeführt sommerliche Kühlung der Fahrbahnoberfläche hat die Temperatur der Asphaltoberfläche um mehr als 10 K abgekühlt und somit einer Erweichung und hieraus resultierenden Bildung von Spurrillen oder gar Blow-ups vorgebeugt. Die hieraus resultierende Lebensdauerverlängerung des Fahrbahnaufbaus schlägt sich auch positiv in der Umweltbilanz der Freiflächenheizung nieder.

Aufbauend auf den positiven Erfahrungen die mit der Erprobung der geothermischen passiven Freiflächentemperierung bei dem baulich realisierten Technikum am Nordportal des Grenztunnels Füssen gemacht wurden, wurde eine Implementierungshilfe und als Vorleistung für eine weitere mögliche Anwendung eine Entwurfsplanung für das Nordportal des Grenztunnels Füssens erstellt.

Literatur

[1] Schneider, M., (2013): Zur energetischen Nutzung von Tunnelbauwerken – Messungen und numerische Berechnungen am Beispiel Fasanenhoftunnel, Mitteilungen des Instituts für Geotechnik der Universität Stuttgart, Heft 68.

[2] Buhmann, P., (2019): Energetisches Potenzial geschlossener Tunnelgeothermiesysteme, Mitteilungen des Instituts für Geotechnik der Universität Stuttgart, Heft 73.

[3] Däumling, T., Doobe, G., Domrose, J. (2012): Streusalzmonitoring 2007 – 2011. Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt der Hanse Stadt Hamburg.

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

[5] Feldmann, M., Döring, B., Hellberg, J., Kuhnhenne, M., Pak, M. (2012): Vermeidung von Glatteisbildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: B, Brücken- und Ingenieurbau B 87. Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven.

[6] Hanschke, T., Kühl, J., Freund, R., Mackert, K. (2009): Die Geothermische Brücke Berkenthin. Bautechnik 86, 11, 729-732,

[7] Moormann, C., Buhmann, P. (2017): Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 141.

[8] Moormann, C. (2014): Tunnelgeothermie: Technische und Ökonomische Perspektiven für regenerative Energiekonzepte im Tunnelbau/Tunnel-Geothermics: Technical and economical perspectives for renewable energy strategies using tunnels. Vorträge der 33. Baugrundtagung, Berlin, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Essen, 235-243,

[9] Rybach, L, (2015): Innovative energyrelated use of shallow and deep groundwaters – Examples from China and Switzerland. Central European Geology 58, 1-2, 100-113.

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

[11] Schweizerischen Vereinigung für Geothermie SVG (2008): Tunnelgeothermie – Eine nutzenswerte Energiequelle im Land der Tunnels. Neuchatel.

[12] Aquakultur (2021): **https://\www. basis57.ch**. Letzter Zugriff am 01.02.2021.

[13] Blosfeld, J., Rönnau, I. (2014): Wärmeenergie aus dränierten Bergwässern von Straßentunneln. Bundesanstalt für Straßenwesen. (unveröffentlicht).

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

[15] VDI – Verein Deutscher Ingenieure (2010): Thermische Nutzung des Untergrunds, Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte ICS 27.010. Beuth Verlag GmbH, Berlin ICS 27.010, VDI 4340 Blatt 1.

[16] Richter, T. (2009): Verwendung von Erdwärme zur Schnee- und Eisfreihaltung von Freiflächen. Berichte des Institutes für Bauphysik der Leibniz Universität Hannover 2. Fraunhofer IRB-Verl., Stuttgart.

[17] Buhmann, P., Moormann, C. (2017): Webbasierte Simulationsanwendungen zur Wirtschaftlichkeitsuntersuchung von thermisch aktivierten Tunneln: Berechnungsrandbedingungen, Sensitivitätsanalyse, Ergebnisse von Parameterstudien, Empfehlungen. STUVA-Tagung 2017 – Internationales Forum für Tunnel und Infrastruktur in Stuttgart, 6. bis 8. Dezember 2017, Forschung + Praxis 49, Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2017, 427-432.

[18] Trenberth, E., Fassullo, J., Kiehl, J. (2009): Earth's global energy budget. American Meteorological Society, 311-324.

[19] Bundesamt für Naturschutz (2014): FFH-VP-Info: Fachinformationssystem zur FFH Verträglichkeitsprüfung. Bundesamt für Naturschutz. Leipzig.

[20] Bayerisches Landesamt für Umwelt: Merkblatt Nr. 4.5/18 Beurteilung von Wärmeeinleitungen, Referat 68. 2013

[21] Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (2013): Grundlagen für die Beurteilung von Kühlwassereinleitungen in Gewässer. Kulturbuch-Verlag, Berlin.

[22] Herschel, A. (2016): Prüfbericht zu Auftrag 61531882. Eurofins Umwelt GmbH, Jena.

[23] DIN V 18599-10 (2018): Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung. Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

[24] Grimm, Axel (2020): Sicher durch den Winter. Bundesbaublatt, Gütersloh.

Bilder

Bild 1-1: Wärmeleistungen der Bergwasserdrainageschüttung an ausgesuchten deutschen Straßentunneln [13] ... 16

Bild 1-2: Tunnelportal Grenztunnel Füssen: Die gelb markierten Flächen besitzen einen Fahrbahnaufbau aus Asphalt, die grün markierten einen Aufbau aus Beton (Technikum Füssen) ... 17

Bild 1-3: Aufbau der temperierten Testflächen (Technikum Füssen) ... 18

Bild 1-4: Verbaute Rohrleitungskonfigurationen ... 19

Bild 1-5: Energiebilanz einer Freiflächentemperierung ... 20

Bild 3-1: Vor Ort installierte Wetterstation ... 26

Bild 3-2: Zusätzliche vom IGS angebrachte Kamera ... 27

Bild 3-3: Temperaturmessung der obersten Lage unterhalb der Rohrregister ... 29

Bild 3-4: Schnitt B-B: Lage der Sensoren innerhalb des Fahrbahnaufbaus ... 30

Bild 3-5: Draufsicht: Lage der Sensoren im Testfeld (Rote Markierung) ... 30

Bild 3-6: Temperaturmessungen in den Sensoren oberhalb und unterhalb der Rohrkonfiguration, am Testfeld A13 ... 31

Bild 3-7: Laminare Durchströmung der Testfelder im November 2020, (MH = Summe aller Durchflüsse) ... 31

Bild 3-8: Turbulente Durchströmung aller Testfelder 2020, (MH = Summe aller Durchflüsse) ... 32

Bild 3-9: Hochturbulente Durchströmung der Testfelder 2020, (MH = Summe aller Durchflüsse) ... 32

Bild 3-10: Versuch eines hydraulischen Abgleichs (Durchströmungsziel des Abgleichs war 0,2 l/s) ... 33

Bild 3-11: Modifizierter hydraulischer Abgleich ... 34

Bild 3-12: Wasserprobe des Vor- und Rücklaufs (von links nach rechts), am Boden hat sich die Sedimentfracht bzw. die Ausfällungen abgesetzt. ... 34

Bild 4-1: Temperaturmessungen des Testfeldes A1.3 und der Außentemperatur (AT) bei laminarer Durchströmung ... 36

Bild 4-2: Temperaturmessungen des Testfeldes A1.3 und der Außentemperatur (AT) bei turbulenter Durchströmung ... 37

Bild 4-3: Zugeschneite Felder zu Beginn des Trägheitsszenario ... 38

Bild 4-4: Freigeräumte Flächen ... 39

Bild 4-5: Zugeschneites Testfeld A1.2 um 23:00 Uhr, während Trägheitsszenario ... 39

Bild 4-6: Zugeschneites Testfeld A1.1 um 23:00 Uhr, während Trägheitsszenario ... 40

Bild 4-7: Zugeschneites Testfeld A1.3 um 23:00 Uhr, während Trägheitsszenario ... 40

Bild 4-8: Zugeschneites Testfeld A1.4 um 23:00 Uhr, während Trägheitsszenario 41
Bild 4-9: Zugeschneites Testfeld A1.5 um 23:00 Uhr, während Trägheitsszenario 41
Bild 4-10: Zugeschneites Testfeld A.F um 23:00 Uhr, während Trägheitsszenario 42
Bild 4-11: Zugeschneites Testfeld B1.1 um 23:00 Uhr, während Trägheitsszenario 42
Bild 4-12: Zugeschneites Testfeld B1.2 um 23:00 Uhr, während Trägheitsszenario 43
Bild 4-13: Schneefallintensität, 17.03.2021 43
Bild 4-14: Temperaturmessungen über die Tiefe im Feld A1.3 44
Bild 4-15: Temperatur des Vor- und Rücklaufs im Feld A1.3 44
Bild 4-16: Schneefallszenario, 10.02.2021 19:00 Uhr, alle Testfelder sind schneefrei 45
Bild 4-17: Schneefallszenario, 11.02.2021 10:30 Uhr, Felder A1.1 bis A1.5 noch nicht schneefrei 45
Bild 4-18: Schneefallszenario, 11.02.2021 10:30 Uhr, Feld B1.2 fast schneefrei..... 46
Bild 4-19: Schneefallintensität, 10.02.2021 und 11.02.2021 46
Bild 4-20: Schneeszenario vom 10.-11.02.2021, Durchfluss der Testfelder mit Angabe der Gesamtdurchströmung (GS) von 1,5 l/s. 47
Bild 4-21: Schneeszenario vom 10.-11.02.2021, Durchfluss der Testfelder bei einem Gesamtdurchfluss von 1,5 l/s. (Ausschlag von A11 ist ein Messartefakt)..... 47
Bild 4-22: Schneeszenario 10-11.02.2021, Temperatur über die Tiefe im Feld A1.3 48
Bild 4-23: Schneeszenario 10-11.02.2021, Vor- und Rücklauftemperatur im Feld A1.3 48
Bild 4-24: Fahrbahnaufbau mit den wirkenden Wärmeströmen bei Heizen der Fahrbahnaufbaus 50
Bild 4-25: Die Wärmestromdichten des Feldes A1.1 während des Glätteszenarios 51
Bild 4-26: Vor-, Rück-, und Außentemperatur des Testfeldes A1.1 51
Bild 4-27: Temperaturverläufe des Testfeldes A1.1 ohne Durchströmung 52
Bild 4-28: Temperaturverläufe des Testfeldes B1.2 ohne Durchströmung..... 53
Bild 4-29: Temperaturverläufe des Testfeldes A1.1 während der Trägheitsuntersuchung .. 53
Bild 4-30: Temperaturverläufe des Testfeldes A1.1 während des ersten Regelbetriebs 54
Bild 4-31: Temperaturverläufe des Testfeldes A1.1 während des zweiten Regelbetriebs .. 54
Bild 4-32: Die Durchströmung des Testfeldes A1.1 während des zweiten Regelbetriebs ... 55
Bild 4-33: Wärmestromdichte und Oberflächentemperatur des Testfeldes B1.2 im Winter 2020/2021 56
Bild 4-34: Wärmestromdichte und Oberflächentemperatur des Testfeldes B1.2 im Sommer 2021 56
Bild 5-1: Energiebilanz des Asphaltfeldes A1.1 am 05.12.2020 58
Bild 5-2: Energiebilanz des Betonfeldes B1.2 am 05.12.2020..... 58

Bild 6-1: Simulierte Freiflächentemperierung 60
Bild 6-2: Temperaturverteilung während des Glätteszenarios..... 60
Bild 6-3: Sonnenverlauf über das Jahr für den Standort Füssen..... 62
Bild 6-4: Messwerte und numerisch ermittelte Werte in TMO1 63
Bild 6-5: Messwerte und numerisch ermittelte Werte in TMO2 64
Bild 6-6: Messwerte und numerisch ermittelte Werte in TMU1 64
Bild 6-7: Messwerte und numerisch ermittelte Werte in TMU2 65
Bild 6-8: Freifläche B1.2: Die Wärmestromdichten nach Rohrmaterial..... 66
Bild 6-9: Gegenüberstellung von Kupfer- und Kunststoffrohren im Sensor TMO2 66
Bild 6-10: Gegenüberstellung von Kupfer- und Kunststoffrohren im Sensor TMU1 67
Bild 6-11: Gegenüberstellung von Kupfer- und Kunststoffrohren im Sensor TMU2 67
Bild 6-12: Simulierte Temperaturen in TMO1 bei Höhevariation der Rohrregister 68
Bild 6-13: Simulierte Temperaturen in TMO2 bei Höhevariation der Rohrregister 69
Bild 6-14: Simulierte Temperaturen in TMU1 bei Höhevariation der Rohrregister 69
Bild 6-15: Simulierte Temperaturen in TMU2 bei Höhevariation der Rohrregister 70
Bild 6-16: Nach oben gerichtete Wärmestromdichte bei unterschiedlicher Verlegetiefe .. 70
Bild 6-17: Temperatur bei bisheriger Flächengröße und erweiterter Größe in Feldmitte .. 71
Bild 6-18: Temperatur bei bisheriger Flächengröße und erweiterter Größe in TMU1..... 71
Bild 6-19: Temperatur bei bisheriger Flächengröße und erweiterter Größe in TMU2..... 72
Bild 6-20: Temperatur des Sensors TMO1 bei Variation der Schenkelabstände im laminaren Zustand..... 73
Bild 6-21: Temperatur des Sensors TMO1 bei Variation der Schenkelabstände im turbulenten Zustand..... 73
Bild 6-22: Temperatur des Sensors TMO1 bei Variation der Schenkelabstände im hochturbulenten Zustand..... 74
Bild 7-1: Außentemperatur und selbstaktivierte Rohrströmung in Feld B1.2..... 76

Tabellen

Tab. 1: Vermessung Sensorebene I (Untere Lage) 28
Tab. 2: Vermessung Sensorlage II (Obere Lage) 28
Tab. 3: Abdampfrückstand im Bergwasser 35
Tab. 4: Testszenarien Winterperiode 2020/21 36
Tab. 5: Testszenarien Sommerperiode 2020/21 52
Tab. 6: Physikalische Eigenschaften der verbauten Materialien 57
Tab. 7: Untersuchte Rohrkonfigurationen 72

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen
Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2022

B 174: Kunststoffabdichtungen unter Brückenbelägen
Dudenhöfer, Rückert
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 175: Statische Vergleichsberechnung von gemauerten Gewölbebrücken zur Validierung des Entwurfs der neuen Nachrechnungsrichtlinie (Mauerwerk)
Purtak, Möbius
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 176: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Asphalt in geringen Abmessungen – Belagsdehnfugen
Staeck € 15,00

B 177: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten
Freundt, Böning, Fischer, Lau
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 178: Intelligente Brücke – Reallabor Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn
Windmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 179: Erarbeitung eines vereinfachten Nachweisformats für die Erdbebenbemessung von Brückenbauwerken in Deutschland
Bauer, Gündel, Ries, Karius, Honerboom, Haug
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 180: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen – Einzelgabionen mit Steinfüllung
Schreck, Decker, Wawrzyniak
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 181: Querkraftbemessung von Brückenfahrbahnplatten
Maurer, Wentzek, Hegger, Adam, Rombach, Harter, Zilch, Tecusan
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 182: Building Information Modeling (BIM) im Brückenbau
Seitner, Probst, Borrmann, Vilgertshofer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 183: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln – Überprüfung der Annahmen und Parameter für Risikoanalysen
Kohl, Kammerer, Heger, Mayer, Brennberger, Zulauf, Locher € 18,00

B 184: Methodik und Prototyp für eine optimierte Planung von Ertüchtigung und/oder Ersatz wichtiger Brücken
Kindl, Stadler, Walther, Bornmann, Freitag
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 185: Bauwerksprüfung mittels 3D-Bauwerksmodellen und erweiterter/virtueller Realität
Hill, Bahlau, Butenhof, Degener, Klein, Kukushkin, Riedlinger, Oppermann, Lambracht, Mertens
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

2023

B 186: Integration der Handlungsanweisungen Spannungsrisskorrosion und Koppelfugen in die Nachrechnungsrichtlinie
Zilch, Kriechbaum, Maurer, Heinrich, Weiher, Runtemund
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 187: Verstärkung des Deckblechs orthotroper Fahrbahnplatten durch Aufkleben von Stahlblechen
Friedrich € 18,00

B 188: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Untersuchungsprogramm
Butz, Rill, Freundt, Böning, Werner, Fischer, Lau
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 189: Weiterentwicklung der Nachrechnungsrichtlinie – Validierung erweiterter Nachweisformate zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit bestehender Spannbetonbrücken
Fischer, Thoma, Hegger, Schmidt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 190: Potenziale von Monitoringdaten in einem Lebenszyklusmanagement für Brücken
Morgenthal, Rau, Hallermann, Schellenberg, Martín-Sanz, Schubert, Kübler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 191: Building Information Modeling (BIM) im Tunnelbau
Thewes, Vollmann, Wahl, König, Stepien, Riepe, Weißbrod
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 192: Optimierung und Weiterentwicklung von Handlungshilfen zur Resilienzbewertung der Verkehrsinfrastruktur
Lindström, Zulauf, Rothenfluh, Bruns, Brunner, Roth, Caminada, Graf, Dahl
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 193: Konzepte für das Datenmanagement der Intelligenten Brücke
Empelmann, Javidmehr, Rathgen, Hellenbrand, Ulbricht, Wagner, Kessel, Sietas
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 194: Möglichkeiten und Grenzen der zukünftigen Anwendung von ZfP-Verfahren an Brücken- und Tunnelbauwerken
Taffe, Vonk
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 195: Zukunftssicherheit der Ermüdungslastmodelle nach DIN EN 1991-2
Geißler, Kraus, Freundt, Böning
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

2024

B 196: Zukünftige Einwicklung eines Tools für ein indikatorengestütztes, verkehrsträgerübergreifendes Lebenszyklusmanagement von Infrastrukturbauwerken
Hajdin, Schiffmann, Blumenfeld, Tanasić
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 197: Erfahrungssammlung Monitoring für Brückenbauwerke – Dokumentation 2021
Novák, Stein, Farouk, Thomas, Reinhard, Zeller, Koster
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 198: Erprobung einer geothermischen Bergwassernutzung am Grenztunnel Füssen
Moormann, Kugler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen · Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-778-5
https://doi.org/10.60850/bericht-b198

www.bast.de