

Temperierte Straße

Untersuchungen zur Realisierung
eines Demonstrators
auf dem duraBAST

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 132

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a 3D appearance as if it's floating above a surface.

Temperierte Straße

Untersuchungen zur Realisierung eines Demonstrators auf dem duraBAST

von

Markus Oeser
Nicolás Carreño
Lukas Renken
Dirk Kemper

RWTH Aachen
Institut für Straßenwesen

Reinhold Kneer
Matthias Höfler
Faruk Al-Sibai

RWTH Aachen
Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung

Rainer Hess
Samah Gouya

Durth Roos Consulting GmbH
Bonn

Jörg zu Dohna
Christopher Steins

geoKOAX GmbH
Gräfelfing

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 132

bast

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 für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

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

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 05.0196/2016/ARB:
Temperierte Straße – Untersuchungen zur Realisation eines Demonstrators auf dem duraBASt

Fachbetreuung
Gudrun Golkowski

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

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 0943-9323
ISBN 978-3-95606-449-4

Bergisch Gladbach, Mai 2019

Kurzfassung – Abstract

Temperierte Straße – Untersuchungen zur Realisation eines Demonstrators auf dem duraBASt

Während der Winterzeit sind die Verkehrssicherheit und der Verkehrsfluss auf Straßen und Gehwegen aufgrund auftretender Glätte erheblich beeinträchtigt. Herkömmliche Methoden, wie der Einsatz von Tausalzen, sind nicht zuletzt wegen ihrer Schäden an der Umwelt, den Fahrzeugen und dem Straßenkörper nur bedingt zukunftsträchtig.

Die Erfahrungen aus früheren Projekten, sowie die Kenntnisse der beteiligten Projektpartner halfen bei der Modellierung, der Definition und dem Test unterschiedlicher Konstruktionsparameter von fünf verschiedenen Varianten in einer Teststrecke. Diese verfolgt das Ziel, im Sommer Wärmeenergie aus einer wasserdurchströmten Zwischenschicht des Straßenkörpers zu gewinnen, welche in geothermalem Wärmespeichern aufbewahrt und im Winter zur Temperierung der Straße genutzt wird.

Im Zuge dessen wurden für den Aufbau des Straßenkörpers zwei Varianten unter Verwendung von Rohrleitungssystemen, sowie drei Varianten mit einem Einbau einer Polyurethan-gebundenen, durchströmten Zwischenschicht entwickelt, durch welche jeweils Wasser fließt. Dabei wurde sowohl die Korngröße als auch die Schichtdicke der Zwischenschicht variiert, um die Menge und die Fließgeschwindigkeit des Wassers zu kontrollieren.

Die anschließende Untersuchung widmete sich der Definition von Eigenschaften, welche den maximalen, thermischen Gewinn jeder Variante versprochen. Dazu standen Informationen einer nahegelegenen Wetterstation, sowie die vorher definierten Schichtparameter zur Verfügung. Hierauf folgte die Analyse und Bestimmung verschiedener Eigenschaften der Wärmespeicher.

Daraus resultierend erfolgte die Darlegung eines Gesamtsystems, in dem jeder Teil (Wärmepumpen, Ventile etc.) detailliert konstruiert und dimensioniert wurde. Schließlich wurde ein Überwachungsmodell zur genauen Beobachtung der Teststrecke beschrieben um diese nach deren Erbauung zu beaufsichtigen.

Dieses Forschungsprojekt legt die Informationen dar, welche zum Bau einer maßstabsgetreuen Demonstrationsstrecke einer temperierten Straße auf dem Testgelände der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) erforderlich sind.

Tempered road system – Investigation for the construction of a test track on the duraBASt

During the winter, traffic safety and traffic flow on roads and sidewalks are often affected due to harsh weather conditions like ice and snow. Common solutions, like deicing salts, are not sustainable since they have a negative impact on the environment, vehicles and roads.

Experience gained from former projects combined with the experience from the project partners were used to test, model and define the parameters for the construction of five different test track variants which goal is to harvest energy in the summer in the form of warm water, and storage it in geothermal probes to temper the roads in the winter.

Two variants using pipe registers with different laying pattern and three variants using a polyurethane bounded porous interlayer were defined. The grain size and thickness from the interlayer were varied to control the amount and velocity of water flowing through it.

A model was created to study and define the characteristics to maximize the thermal yield of each variant with the use of information of a nearby weather station and the previously defined layer characteristics. Afterwards, an analysis of the surroundings was performed to define the necessary characteristics of the geothermal probes.

The overall system was defined where every part (Buffer, heat pumps, valves etc.) of it was modelled, designed and dimensioned. Finally, a monitoring system was described to monitor the operation of the test track once it is built.

This research project summarizes the required information to build a real size tempered road demonstrator on the Federal Highway Research Institute's (BASt) test track.

Summary

Tempered road system – Investigation for the construction of a test track on the duraBASt

1 State of the Art

During the winter, traffic safety and traffic flow on roads and sidewalks are often affected, due to harsh weather conditions like ice and snow. The most common solution is using de-icing salts to melt ice and snow, but this is not sustainable since it damages the environment, vehicles and roads.

An innovative solution has been studied and developed in different countries over the last years to avoid the use of de-icing salts. Through the tempering of the road not only can the use of de-icing salts be avoided, but also the temperature span of the asphalt pavements between summer and winter can be diminished. Geothermal energy can be used to store the warmth harvested in the summertime to heat the roads in the winter months.

The energy required for the tempering system can be extracted by using geothermal probes, which are a cost-friendly energy source that it is also able to store energy from the summer. The heat can be extracted from the soil by means of different systems (e.g., double U-tube probes, storage probes, surface collectors).

Previous studies conducted by the partners of this research project have provided insights into the application and feasibility of tempered road systems by the use of pipe registers for the tempering of the road, and a borehole heat exchanger system to store and extract geothermal energy.

Pipe registers have a few disadvantages; they are slow and expensive to build, demand extra caution while renovating the surface course and are complicated to repair. Due to these disadvantages, the application of an innovative highly permeable interlayer, developed in the Highway Engineering Institute of the RWTH University, has been thought as an alternative to the pipe registers.

2 Objective

The purpose of the project is to develop a construction concept to build a test track implemented with appropriate installation to control the temperature of the surface of a road. To provide the necessary energy, and store the seasonal heat, borehole heat exchangers were chosen.

The goal was to generate a document which can be used as the base for the invitation of tenders. For this, five different test fields were studied and defined, two using pipe registers and three using a polyurethane-bounded highly porous interlayer. In addition, the overall system, which governs the operation of the test fields, was designed.

3 Research methodology

The research was separated in three work packages, which were carried out by the different project partners. These work packages included cross-tasked questions that necessarily linked the project partners to work and coordinate the framework of the project in joint expert panels.

The basis of each work package was firstly an analysis of national and international literature. If technical examinations were required, experienced employees of the different research institutes carried them out.

4 Road Construction Concept

4.1 Pipe Registers

To define the concept for the construction of the two different pipe register variants, the knowledge gained from the project “Tempered Road System-Feasibility Study” FE-Nr. 09.0174/2011/HRB was used.

In the aforementioned project, an extensive research on the suitability of different pipe materials, pipe-laying techniques, pipe location and laying pattern was performed. For the purpose of this project, a cross-linked polyethylene with aluminium (PE-Xa/AL/PE-HD) pipe was chosen due to its capability to withstand high temperatures. This is important since it is recommended for the construction to build the pipe layer with mastic asphalt, which makes the fixation of the pipes

constructively easier, but have to be laid at high temperatures.

Another important aspect defined is the spatial location of the pipes in the layer. If the pipes are laid too deep, it is harder to temper the surface. If they are laid too near to the surface, they can be easily damaged when renovating the surface course. For this reason the laying depth was defined as at least four [cm] under the surface as can be seen in Figure 1.

As mentioned before, two different laying patterns were chosen in this research project. These can be seen in Figure 2. The first pattern (S1) is a spiral double-pipe system. The second pattern (S2) selected is a serpentine single-pipe system, which is laid transversal to the driving direction. These were chosen mainly to be able to study the difference between a single-pipe and double-pipe system.

As for the carrier medium, a high heat capacity, a high thermal conductivity and low viscosity are

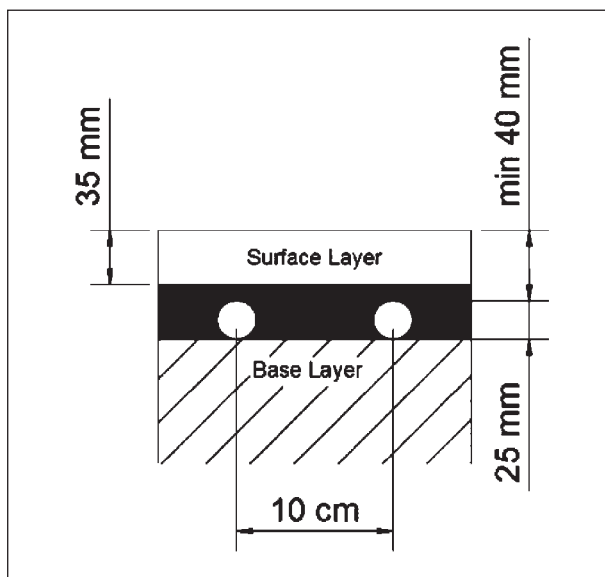


Fig. 1: Laying depth of pipe registers

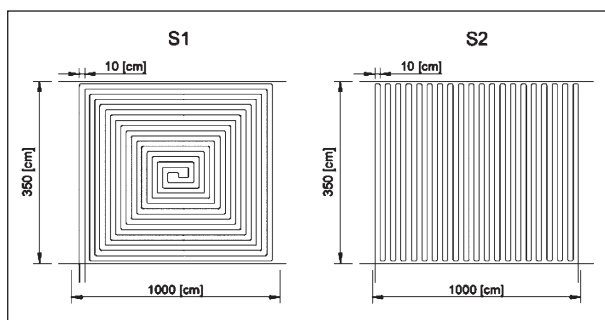


Fig. 2: Laying patterns (not to scale)

desired. Because of these points and due to the fact that it has no environmental disadvantages, water was chosen. To prevent the freeze of water within the pipes in the cold season, the control and operation must be regulated to avoid this.

4.2 Porous Interlayer

As an innovative alternative to the pipe register, a polyurethane (PU) base interlayer was considered. This solution is easier and faster to build than the pipe register alternative, since it is basically built as a normal asphalt layer, and can potentially provide an even temperature distribution throughout the entire surface. Polyurethane is a multifunctional, solvent-free, two component system which is ideal for the solidification of aggregates. Essentially, it consists of two components, polyol and polyisocyanate.

In this research project, two different granulometric curves were chosen. A standard PA 8 curve but with PU as binder, and a 0-5 mixture, which consists in small amounts of fine aggregates between 0,063 mm and 2 mm and a large amount between 2 mm and 5,6 mm. The granulometric curves can be seen in Figure 3. Both variants have an air void content between 32% – 38%.

These curves were chosen because the particle size distribution dictates the permeability of the layers. By using finer aggregates, the water flows slower horizontally through the layer.

In addition, the thickness of the layer was varied. In summary three PU variants were considered, one using a PA 8 mixture with a thickness of 5 cm, and

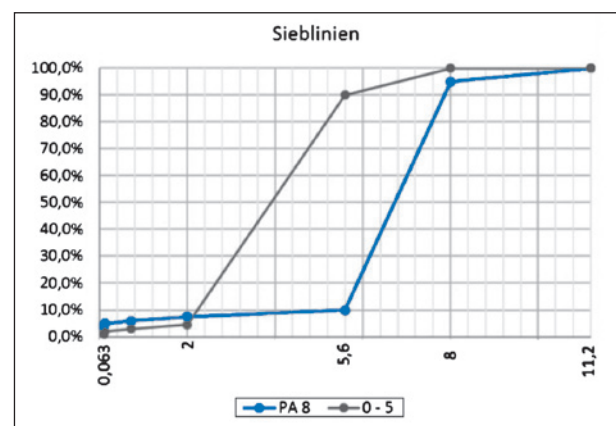


Fig. 3: Granulometric curves from PU variants

two using the 0,063 mm-5,6 mm mixture with two different thicknesses: 5 cm and 8 cm.

Another important aspect included in the research was the adhesion and sealing between layers. For the system to work, the porous interlayer must be completely sealed. For this purpose, experiments were conducted using two different solutions to secure the adhesion and sealing between the PU-bounded layer and the upper and lower layers. The first solution was a bitumen sheet (Kebuflex BR2), which is normally used under mastic asphalt in bridges. The second alternative was pouring mastic asphalt directly on top of the PU layer. The results show that mastic asphalt is more suitable for this purpose.

Due to this application of the PU layer is completely new, no previous data is available. So recommendations were made regarding the inlet and outlet of water to have a correct functioning of the interlayer. Experiments were conducted in small prototypes where two different inlet and outlet systems were proposed and analyzed. The first one was using a small channel to distribute the water among the entire side of the interlayer. The second one was using small pipe evenly distributed among the side of the layer. In Figure 4 the results of the thermal experiments with these pipes can be seen. The results show that the water is distributed evenly throughout the entire layer.

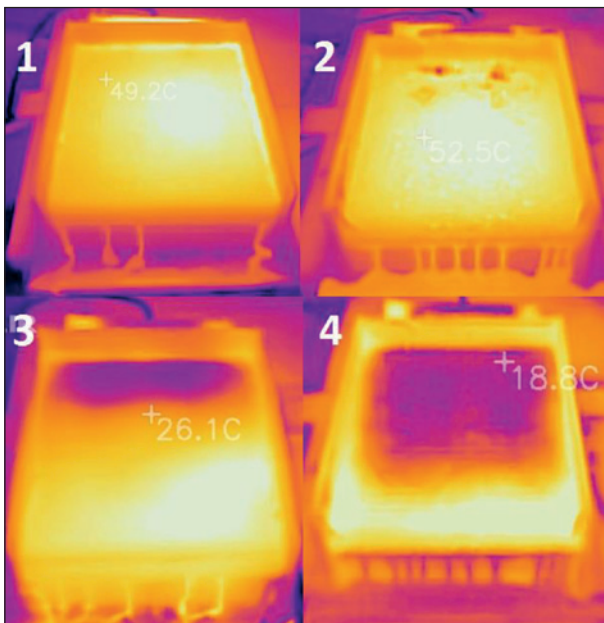


Fig. 4: Experimental setup results

5 Concept for the overall-system

5.1 Environmental conditions/location analysis

To assess the overall system, the relevant climate and weather data were put together. During a normal year, the air temperature fluctuates between -10°C and 30°C . Especially in the summer months the solar insolation of the black road surface is of significant importance.

For the laying of the geothermal probe system the soil properties, especially the thermal conductivity and volumetric thermal capacity were estimated using the geological layer order along the possible drill path. In this respect, a mix of sand and gravel in the first 15-30m and underneath a mix of sand, clay, silt and brown coal can be expected. The ground-water level thereby lies at 10m.

Under consideration of standard values from the VDI Guideline 4640 sheet 1 for probe lengths between 65 m and 75 m vertical depth, an average effective thermal conductivity of 2.2 W/(mK) and a volumetric thermal capacity of about $2.387 \text{ MJ/(m}^3\text{K)}$ is expected. Accurate digestion will provide a Thermal Response Test prior to drilling. For the drilling the rear section of the testing ground (DU-Z3) is available, were the space is sufficient, to drill the holes. A placement of the holes underneath the testing ground is not advisable, because the measurement results could be disturbed by possible changes of the temperature field underneath the road.

For the construction of the overall operation system, section on the side of the five test tracks would be available.

The power supply can be secured by the on-site distribution box. There are empty pipes along the test line that can be used for this purpose.

5.2 Concept of the overall system

The designed overall system consists of five independent lane sections including the hydraulic system as well as five separate bore hole heat exchanger.

Figure 5 shows the concept for the governing overall system per test field. The thermal storage tank (Pufferspeicher) works decoupling the different test

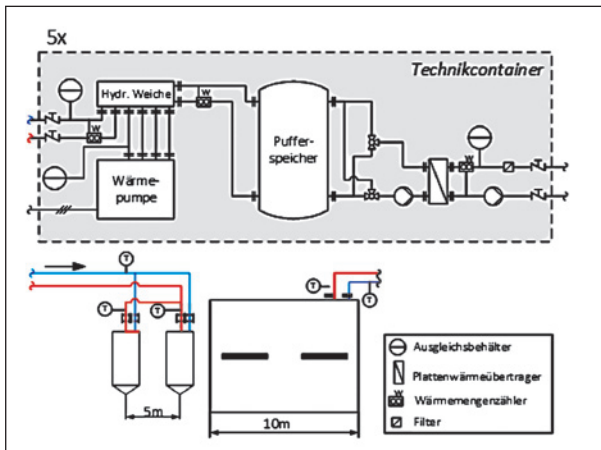


Fig. 5: Concept for the overall system per field

tracks as well as the borehole heat exchangers. It also allows the cushioning of the load peaks, whereby the operational time of the borehole heat exchanger is minimized. The systems technical component will be built in containers on the testing site.

For the design of the overall system, a simulation model was developed for the full-transient simulation.

For the design of the components, the operation of the system was simulated with an active control and with respect to the following variables:

- Weather data: Test reference year,
- Soil Temperature,
- Control Parameters.

After a parameter variation analysis, a necessary heat pump power of 8 kW resulted. The operation time of the borehole heat exchanger system (BHES) resulted in approximately 90% in the winter months, while in the summer the terms of the BHES is minimal. As for the operation time of the heat pump, the result was to be about 1,500 h/a.

In view of the requirements of the specification, the porous layer shows a better performance.

It became clear that it is not possible, with reasonable energetic and constructional effort, to completely eliminate temperature peaks. In particular, peak loads due to high levels of solar irradiation are reflected in a brief overshoot of the defined temperature ranges. Overall, however, a mean reduction of the surface temperatures in the operating interval is possible.

5.3 Specification for the borehole heat exchanger system

The borehole heat exchanger system will be based on geoKOAX® geothermal storage probes. The design of the borehole heat exchanger system is based on the geological profile, the site-specific boundary conditions, the required heat load profile as well as the technical data of the used heat pump. It was carried out with the geoSIM® software, which takes into account special characteristics of the geoKOAX® borehole heat exchangers. The base load temperature was limited to 0°C. For the approval of the geothermal drilling, a water permit must be obtained from the responsible groundwater authority.

The drilling diameter will be 203 mm, which should be easy to drill for any drilling company. To provide the storage probes, the contractor must have a DVS-certified welder, as the storage probes must be delivered in segments and welded on-site by mirror welding technique. For each test field, the required system includes two storage probes of 68 m (depending on the thermal conductivity of the soil). In total, 10 probes are to be installed in line with a separation of 5 m along the unused part of the street section, and in every case, two probes are connected using the Tichelmann principle, to avoid an extra distributor.

The “heat storage” in cooling mode (summer) essentially represents a regeneration of the soil cooled down in winter. The design of this hybrid operation is also carried out with the geoSIM® software by specifying appropriate heating and cooling loads in the heating and cooling periods.

5.4 Control concept of the overall system

The control concept developed for the demonstrator on the duraBAST consists of two separate control systems. The focus lies on a stable operation of the system.

The operation is achieved by the use of regulated pumps, valves and the connection of a heat pump. The road sections are exposed to a constant mass flow of 0.1 kg/s of water per test track. Depending on the environments temperature, the flow temperature is set via a heating curve. If the temperature falls below 25 °C, there is a direct short circuit between the inlet and outlet of the road, bypassing the reservoir. If the temperature rises

above 25°C, the inlet and outlet are connected via a plate heat exchanger connected with the thermal storage tank, resulting in a change in the flow temperatures. At a temperature below 6°C, the entire mass flow goes through the reservoir, while at higher temperatures the thermal storage tank is bypassed.

The second control system influences the storage temperatures by activating the geothermal probe system. In summer operation, the required temperature range of the thermal storage tank is set to 12 – 25°C (lowering of storage temperatures over long-term storage in the surrounding soil). In the winter, the required temperature range is set between 25 – 35°C (regular operation of the geothermal probe system).

of heat energy in winter and the return of heat energy in the summer are possible.

6 Conclusions

The goal of the present research project was to test, model and define every part of the road tempering system and a subsequent monitoring system.

Regarding the construction design of the pipe register variants; this report presents the consideration that must be taken into account for the tempering of roads with pipe registers.

As for the construction design of the road tempering system with a PU bounded interlayer, the experience from former projects and the results of an experimental test program, the main characteristics for the road system could be defined. Regarding the systematic for the inlet and outlet of the water, and the sealing of the entire system, recommendations were made that must be implemented for a correct functioning of the system.

As part of the research project, a viable system concept for the temperature control of the test fields was designed using simulation calculations. The associated control concept is aimed at an autonomous operation and enables the temperature control of the fields in the requirement unit.

The energy required for the tempered road fields is to be provided by means of a heat pump system based on geothermal energy. A total of 10 geoKOAX[®] borehole heat exchangers, with a preliminary length of 68 m each, are to be used. The local conditions at the duraBASt allow the use of geothermal energy according to the current state, so that the extraction

Inhalt

1	Einleitung und Stand der Technik	11	5	Nachweis der Wirkungsweise	35
1.1	Forschungsziel	12	5.1	Datenerfassung und Monitoring des Gesamtsystems	35
1.2	Wirtschaftliche, wissenschaftliche und technische Bedeutung	13	5.2	Visualisierung	38
2	Vorgehensweise	13	5.3	Datenspeicherung	38
3	Konzept Straßenbaukonstruktion	13	6	Zusammenfassung und Fazit	38
3.1	Konzeption der Rohrregister	13	Literatur	39	
3.1.1	Grundlagen	13	Bilder	40	
3.1.2	Konzeption	13	Tabellen	41	
3.1.3	Einbautechnologie	17	Anhang	42	
3.2	Konzeption der PU-Schicht	17			
3.2.1	Grundlagen	17			
3.2.2	Konzeption	17			
3.2.3	Einbautechnologie	20			
3.3	Ausschreibungskonzept	22			
3.3.1	Rohrregister Varianten	22			
3.3.2	PU-Varianten	22			
3.3.3	Abdichtung der PU-Varianten	22			
3.4	Erstellung von Kennfeldern zur Bestimmung der thermischen Ergiebigkeit	22			
4	Konzept Gesamtsystem	25			
4.1	Umgebungsbedingungen/ Standortanalyse	25			
4.2	Anforderungsdefinitionen	28			
4.3	Konzeption des Gesamtsystems	28			
4.4	Lastenheft für das Erdwärmesondensystem	32			
4.5	Konzept zur Wärmespeicherung	33			
4.6	Regelkonzept Gesamtsystem	33			
4.7	Genehmigungskonzept	34			
4.7.1	Wärmeträgermedium	34			
4.7.2	Einsatz der Erdwärmespeichersonden	34			

1 Einleitung und Stand der Technik

Aufgrund klimatischer Einflüsse ist die Straßenbefestigung extremen Bedingungen ausgesetzt, die die Leistungsfähigkeit der Verkehrswege negativ beeinflussen und eine grundlegende Erneuerung oder umfangreiche Instandsetzung zur Folge haben. Hier sind insbesondere die Extremverhältnisse in den Sommer- und Wintermonaten zu nennen. Hitzeinwirkungen im Sommer führen zu Spurrinnenbildung in der Straßenbefestigung, der Einfluss von Kälte, Eis und Salz im Winter schwächt die Substanz, was ebenfalls zu einer Reduzierung der Lebensdauer der Fahrbahnbefestigung führen kann. Darüber hinaus stellen Straßenabschnitte, die früher als das restliche Streckennetz zu Glättebildung neigen, wie z. B. Brückenbauwerke, eine Herausforderung für den Winterdienst dar.

Einen weiteren Aspekt stellt der negative Einfluss des Winterdienstes auf die Umwelt dar. Durch den hohen Salzeintrag, der im Winter Glättebildung auf Straßen verhindern soll, werden Pflanzen und Gewässer verunreinigt. Ebenso wird durch den Salzeintrag die Korrosion von Brücken und Fahrzeugen begünstigt, was die Lebensdauer in zweierlei technischer Hinsicht negativ beeinflusst (HESS et al. 2012).

Um diesen negativen Aspekten entgegenzuwirken soll eine Temperierung der Straßenoberflächen dafür genutzt werden, die Temperaturspanne des Asphaltüberbaus zu reduzieren, um die Lebensdauer der Straße zu verlängern. Insbesondere in den Wintermonaten kann so die Straße beheizt werden, um der Eisbildung entgegenzuwirken. Darüber hinaus kann die im Sommer durch Sonneneinstrahlung zugeführte Energie abgeführt werden, was gleichzeitig eine Kühlung der Asphaltfläche zur Folge hat. Im Idealfall kann die abgeführte Energie gespeichert werden, um anschließend in der kalten Jahreszeit wieder zur Heizung der Straße oder der umliegenden Infrastruktur zur Verfügung zu stehen.

Die zur Temperierung notwendige Energie kann durch den Einsatz von Erdwärmesonden erfolgen, wodurch einerseits der Einsatz konventioneller und kostenintensiver Energieträger umgangen wird und andererseits ein saisonaler Wärmespeicher zur Verfügung steht, der die Energiespeicherung im Sommer ermöglicht. Dabei kann die Wärme dem Erdreich mittels unterschiedlicher Systeme (z. B.

Doppel-U-Rohr-Sonden, Speichersonden, Flächenkollektoren) entzogen bzw. zugeführt werden.

Im Rahmen erster Studien, die bezüglich der Temperierung von Straßen am Institut für Straßenwesen (ISAC) der RWTH Aachen und der Durth Roos Consulting GmbH durchgeführt wurden, konnten Erkenntnisse über die Anwendung und Umsetzbarkeit der Beheizung von Straßenoberflächen gewonnen werden. Anhand der von den Forschungsnehmern durchgeführten Projekte FE 04.0221/2008/KRB „Erkundung der Potenziale der Geothermie als Beitrag für den Winterdienst“, FE 09.0174/2011/HRB „Temperierte Straße – Machbarkeitsstudie“ und FE 15.0401/2004/ARB „Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie“ wurde der Einsatz von Rohrregistern und Erdwärmesondensystemen zur Beheizung von Fahrbahnen bereits untersucht und bewertet.

Neben den genannten Forschungsprojekten befinden sich bereits zahlreiche Systeme zur Temperierung von Fahrbahnoberflächen weltweit im praktischen Einsatz (u. a. WÜRTELE et al. 2005). Dabei erfolgt die Temperierung ausschließlich über Rohrregister, die mit einem Temperierungsfluid durchflossen werden. Die angewendeten Systeme ermöglichen dabei zwar eine Temperierung des Straßenoberbaus, bergen allerdings auch Risiken und Probleme, insbesondere im Hinblick auf die Verletztechnik sowie die Dauerhaftigkeit. Um das Eindringen des Temperierungsfluids in den Boden zu vermeiden, sind besondere Anforderungen an den dichten Verbund der Rohre zu stellen. Darüber hinaus muss der Schutz vor Korrosion des Rohrregisters ebenfalls gewährleistet sein. Die Lage der Rohrregister muss präzise bestimmt werden. Insbesondere die Tiefe und Lage der Rohre zueinander beeinflussen die Wirksamkeit des Temperierungssystems. Die Nachteile derartiger Systeme liegen vor allem in den hohen Kosten für hitzebeständige Rohrsysteme, der problematischen Handhabung beim Einbau der Rohre und dem erhöhten Fremdkörperanteil in der Straßenbefestigung. Die damit einhergehende Problematik des Schichtenverbundes und des erhöhten Aufwands bei der Sanierung und Erneuerung der Asphaltbefestigung sowie insbesondere im kommunalen Bereich der Unmöglichkeit, Aufgrabungen für andere Versorgungsträger funktionsfähig zu verschließen, deuten auf mögliche Schwachstellen des Systems hin.

Aufgrund der zuvor beschriebenen Nachteile des Einsatzes von Rohrregistern für die Temperierung

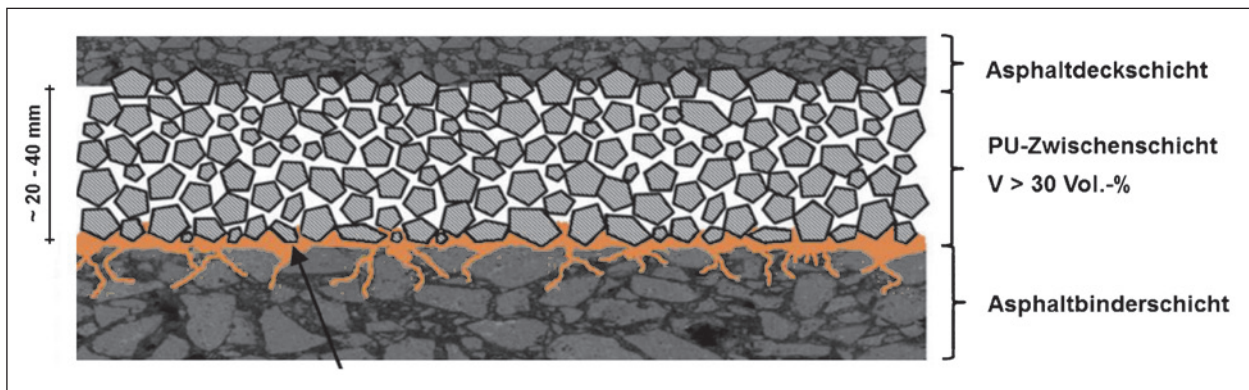


Bild 1: Prinzip des durchströmten Gesamtsystems (SCHACHT et al. 2014)

von Straßen wurde am Institut für Straßenwesen der RWTH Aachen in mehreren Entwicklungsschritten ein bautechnisch neuartiges Straßenbaukonzept entwickelt, welches sich als fluiddurchströmte Zwischenschicht zur Temperierung von Straßenbefestigungen eignet (SCHACHT et al. 2014). Konventionelle, offeneporige Asphalte (PA – engl.: porous asphalt) erfüllen zwar die hydraulischen Eigenschaften für eine Durchströmung, sind jedoch aufgrund ihrer geringen Dauerhaftigkeit für eine derartige Anwendung nicht geeignet. Daher wurde ein Konzept für ein Polyurethan-gebundenes (PU), offeneporiges und dauerhaftes Material erarbeitet und dessen Einsetzbarkeit bautechnisch im Labormaßstab nachgewiesen (RENKEN/OESER 2014; RENKEN/OESER 2015; RENKEN et al. 2015a; RENKEN et al. 2015b; RENKEN et al. 2015c; FE 07.0264/2012/ARB). Die gewonnenen Erkenntnisse lassen erwarten, dass sich das Material hervorragend für eine temperierbare Zwischenschicht eignet (Bild 1).

Das in Bild 2 dargestellte bautechnische Konzept sieht grundsätzlich eine Temperierung der Straßenkonstruktion mit einer offenenporigen Zwischenschicht vor. Im Rahmen der Studie: Synthetisch gebundene offeneporige Zwischenschichten zur gezielten Temperierung von Straßen im Winter (SCHACHT et al. 2014) wurde bereits ein solcher Asphaltbau zur Temperierung der Straße entwickelt (Bild 2). Hierbei wurde die Zwischenschicht zwischen der Deck- und der Binderschicht vorgesehen. Grundsätzlich konnte die Eignung als fluiddurchströmte Schicht nachgewiesen werden. Weiterhin zeigten Untersuchungen hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften sowie der thermischen Wirksamkeit des Systems vielversprechende Ergebnisse (SCHACHT et al. 2014).

Entsprechend der technischen Gegebenheiten werden im Rahmen dieses Projektes die von der BAST

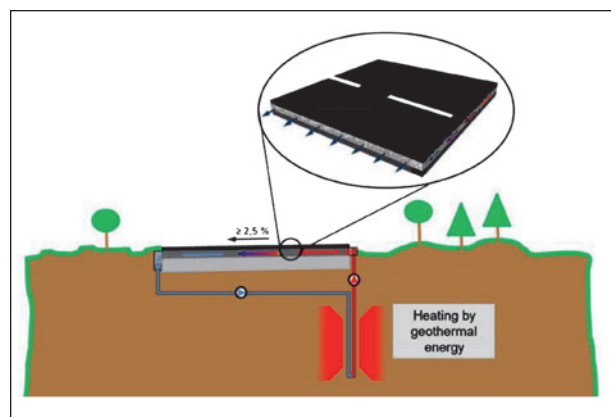


Bild 2: Konstruktionsprinzip des durchströmten Gesamtsystems (SCHACHT et al. 2014)

vorgegebenen Temperierungssysteme (zwei Konzepte mit Rohrregistern und drei Konzepte mit PU-Zwischenschichten) berücksichtigt. Da die PU-Zwischenschichten bisher nur im Labormaßstab vorlagen, wurde innerhalb dieses Projektes ein praxistauglicher Asphaltbau mit offeneporiger Zwischenschicht konzipiert, der von einem temperierbaren Fluid durchflossen werden kann und die oben genannte Anforderung erfüllt.

1.1 Forschungsziel

Für eine qualitativ hochwertige bautechnische Umsetzung eines befahrbaren Demonstrators mit verschiedenen Temperierungssystemen, wurde ein Konzept für die Ausschreibung entwickelt. Dieses Vorhaben umfasst die Entwicklung eines Konzepts für den Aufbau des Straßenoberbaus mit entsprechenden Installationen zur Temperierung des Fahrbahnaufbaus. Zur Bereitstellung der notwendigen Energie sowie eines saisonalen Wärmespeichers soll ein Erdwärmesondensystem eingesetzt werden.

Fünf verschiedene Versuchsfelder sollen auf dem duraBAST-Testgelände dazu dienen die Funktion und Wirkungsweise verschiedener Temperierungssysteme darzulegen und zu bewerten. Hierbei werden Systeme mit Rohrregistern und Systeme mit einer durchströmten Zwischenschicht betrachtet.

Ziel des Vorhabens ist es, ein Gesamtkonzept zu erstellen, welches als Grundlage für die Ausschreibungsunterlagen für den Bau des Demonstrators auf dem duraBAST-Testgelände verwendet werden soll.

1.2 Wirtschaftliche, wissenschaftliche und technische Bedeutung

Die Beheizung von Fahrbahnabschnitten, insbesondere von Brückenbauwerken und anderen glättegefährdeten Bereichen, kann zukünftig eine sinnvolle und wirtschaftliche Alternative für den Straßenbetriebsdienst darstellen. Hierzu sind allerdings technisch geeignete und vor allem umsetzbare Lösungsansätze zu betrachten. Dies soll im Rahmen des beschriebenen Projektes geschehen.

Der Vergleich der Systeme zur Temperierung von Fahrbahnabschnitten (technisch und betrieblich) stellt einen wesentlichen Entwicklungssprung für diese Technologie dar und wird somit einen hohen Nutzen sowohl für den Erhaltungs- als auch den Betriebsdienst darstellen.

2 Vorgehensweise

Die in der Angebotsaufforderung definierten Forschungsinhalte sollen durch das Institut für Straßenwesen (ISAC) und den Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung (WSA) der RWTH Aachen in Kooperation mit den Firmen Durth Roos Consulting GmbH und geoKOAX GmbH in drei Arbeitspaketen betrachtet werden.

Erforderliche Verknüpfungen der einzelnen Arbeitsschritte werden in der Untersuchungsmethodik berücksichtigt. Arbeitspaketübergreifende Fragestellungen sowie die erforderlichen Verknüpfungen zwischen den einzelnen Arbeitspaketen werden im Rahmen des Projektes durch gemeinsame Expertenrunden der Projektbeteiligten bearbeitet bzw. abgestimmt.

Die Bearbeitung der einzelnen Arbeitspakete erfolgt wissenschaftlich deduktiv. Die Grundlage jedes Ar-

beitspaketes bildet zunächst eine Analyse nationaler und internationaler Literatur zur Beschreibung der Problematik. Sind technische Untersuchungen notwendig, werden diese durch erfahrene Mitarbeiter der Forschungseinrichtungen durchgeführt.

3 Konzept Straßenbaukonstruktion

In Kapitel 3.1 werden beide Lösungen, die Verwendung von Rohrregistern und die Polyurethan-gebundene Zwischenschicht definiert. Wie zuvor beschrieben, wird der Einbau fünf verschiedener Varianten, zwei mit Rohrregistern und drei mit PU-Zwischenschicht, geplant. Jeder dieser Ausführungen wurde eine Kennzeichnung zugewiesen, welche jeweils im weiteren Verlauf dieses Berichts verwendet wird. Die Kennzeichnungen lauten wie folgt:

- S1: Spiralförmig Rohrregister,
- S2: Rohrregister in Schleifen quer zur Fahrtrichtung,
- S3: 5 cm dick PA 8 PU-Zwischenschicht,
- S4: 5 cm dick 0-5 PU-Zwischenschicht,
- S5: 8 cm dick 0-5 PU-Zwischenschicht.

3.1 Konzeption der Rohrregister

3.1.1 Grundlagen

Hinsichtlich der Grundlagen zum Einsatz von Rohrregistern innerhalb von Asphaltkonstruktionen wird auf den BAST-Bericht „Temperierte Straße – Machbarkeitsstudie“ verwiesen. Die dort beschriebenen Erkenntnisse wurden im Folgenden zur Erstellung eines Einsatzkonzeptes berücksichtigt.

3.1.2 Konzeption

Im Rahmen der Konzeption werden zwei Varianten bestimmt und untersucht. Die daraus resultierenden Spezifikationen werden hinsichtlich des Gesamtentwurfs beurteilt. Folgende Designparameter für die zwei Varianten müssen definiert werden:

1. Verlegemuster,
2. Einbautiefe und Rohrabstände,
3. Rohrbefestigungen,

4. Rohrregister, Lage und Größe,
5. Geeignete Materialien der Rohre,
6. Trägermedium,
7. Quer- und Längsgefälle der Konstruktion.

Geeignete Rohrmaterialien

Für die Umsetzbarkeit der Systeme ist das Rohrmaterial von großer Bedeutung. Die Rohre müssen den hohen Einbautemperaturen (bei Gussasphalt 230 °C) standhalten und den Verdichtungsprozess bei der Verwendung von Walzasphalt überstehen. Im Allgemeinen müssen die Materialien folgende Ansprüche erfüllen:

- keine Querschnittsänderungen bei der Montage (kein Schmelzen der Rohre),
- ausreichende Ringstabilität (bei der Verdichtung und unter Verkehr),
- hohe Korrosionsbeständigkeit (um einen Ausfall im Betrieb zu vermeiden).

In der Machbarkeitsstudie wurden verschiedene Rohrmaterialien untersucht. In der Vergangenheit verwendete Metallrohre werden zunehmend durch Kunststoff- oder Verbundwerkstoffe ersetzt (LUND, 2000). Eisen- und Stahlrohre haben ein erhöhtes Korrosionsrisiko und bedeuten im Allgemeinen höhere Installationskosten, da spezielle Ausrüstung erforderlich ist, um sie zu biegen.

In Bezug auf Kunststoff- und Kunststoffverbundrohre haben FELDMANN et al. (2010) und GOTT-

SCHALK (2010) umfangreiche Labortests durchgeführt. In Tabelle 1 werden die Ergebnisse der Untersuchungen zusammengefasst dargestellt.

Angesichts der thermischen Beständigkeit und der Biegeeigenschaften des PE-Xa/AL/PE-HD empfiehlt die Machbarkeitsstudie die Verwendung dieser Rohre. Das Rohr soll einen Außendurchmesser von 25 mm und einen Innendurchmesser von ca. 20 mm haben.

Rohrbefestigungen

Um die Gleichmäßigkeit des Verlegemusters zu gewährleisten, ist eine unterstützende Struktur erforderlich. Diese verhindert das nachträgliche Verrutschen der Rohre. In der Machbarkeitsstudie wurden bereits drei Alternativen vorgestellt:

- punktuelle Befestigung der Rohre mittels Metallklammern,
- Einlegen der Rohre in eine Plastikmatte,
- Befestigung der Rohre mit Draht auf einem Stahlgitter.

In Tabelle 2 ist ein Vergleich zwischen diesen drei Systemen dargestellt (FE 09.0174/2011/HRB). Der Vergleich zeigt, dass die Verwendung von Stahlgittern den anderen Alternativen vorzuziehen ist, da diese zukünftig evtl. maschinell verlegt werden können, was die Installation wesentlich erleichtert.

Insbesondere der maschinelle Einbau, der über die Verwendung von Stahlgittern ermöglicht wird, bietet ein hohes Potenzial den Bauvorgang schneller

Material	Beschreibung	Thermische Beständigkeit		Biegefähigkeit
PE-RT	Polyethylen-Rohre mit erhöhter Temperaturbeständigkeit	200 [°C]	Im Gussasphalt-Probekörper nur mit Durchlaufkühlung	Achsabstand 10 cm nur mit Hilfsmittel herstellbar
PE 100	Polyethylen-Rohre mit erforderlichen Mindestfestigkeit von 10 MPa (DIN 8074, 2011)	-	Ofentest (250 °C/60 Min.) nicht bestanden	Keine Angaben
PE-Xa	Durch die Peroxid-Vernetzung ist die Temperaturbeständigkeit der Rohre erhöht	250 [°C]	MA-Probekörper: leichte Schäden; im Ofen ohne Schäden	Achsabstand 10 cm nur mit Hilfsmittel herstellbar
PE-Xa/PE-HD	Peroxidvernetzte Rohre mit einer äußeren Polyethylen-Schicht hoher Dichte	240 [°C]	Ofentest (240 °C/60 Min.) Oxidation; keine Verformung im Ofentest und MA-Probekörper; Aufwölbung im Testeinbau	Keine Angaben
PE-Xa/Al/PE-HD	Rohre aus vernetztem Polyethylen mit Aluminium-Ummantelung und äußerer Schutzschicht aus Polyethylen hoher Dichte	250 [°C]	Gussasphalteinbau (200 °C) und Ofentest ohne Schäden	Achsabstand 10 cm nur mit Hilfsmittel herstellbar

Tab. 1: Vergleich der Rohrmaterialien (FE 09.0174/2011/HRB)

und einfacher zu gestalten. Dies weitergehend zu untersuchen war jedoch nicht Teil dieses Forschungsvorhabens. Es wird empfohlen Stahlgitter zu verwenden, da diese in unterschiedlichen Maschenweiten hergestellt werden können, sodass der Gitterabstand entsprechend ausreichend für

die Integration in das Mischgut der Binderschicht gewählt werden kann. Trotz einer geringeren Lagestabilität der PE-Xa/Al/PE-HD Rohre im Vergleich zu anderen Rohrmaterialien beim Einbau, kann dies durch einen fachgerechten Einbau kompensiert werden.



Bild 3: Rohrbefestigungssysteme (FE 09.0174/2011/HRB)

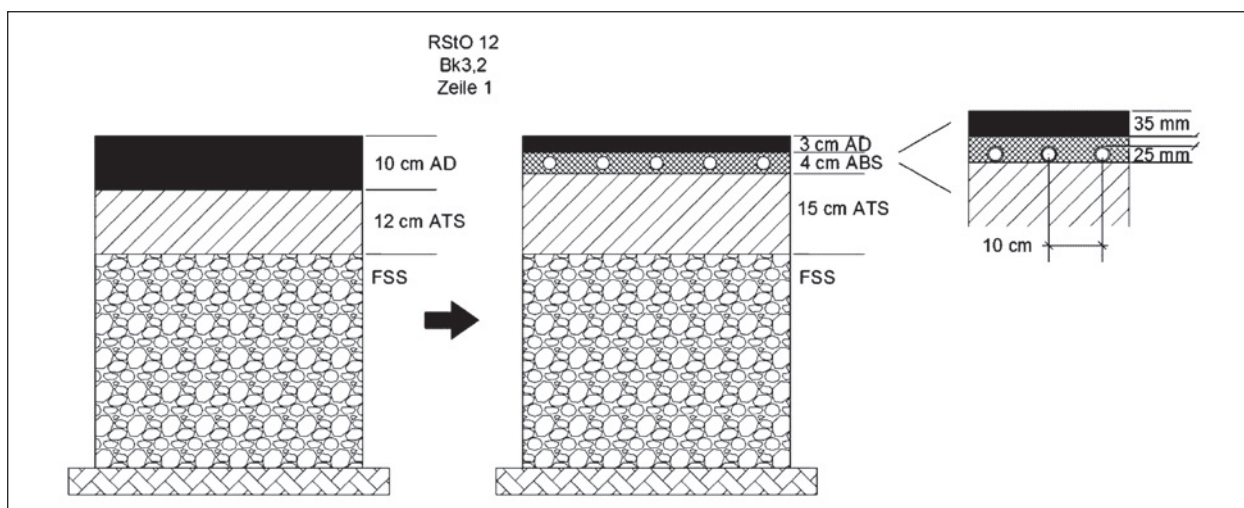


Bild 4: Oberbau angelehnt an die RStO

System	Anforderungen während des Einbaus	Kupfer	Aluminium	Rostfreier Stahl	Verbundmaterial PE-Xa/Al/PE-HD
Metallschellen	Hitzebeständigkeit	Nicht relevant			
	Lagestabilität beim Einbau	++	++	++	++
	Geeignet für maschinelle Verlegung	--	--	--	--
Plastikmatte	Hitzebeständigkeit	-	-	-	-
	Lagestabilität beim Einbau	+	+	+	-
	Geeignet für maschinelle Verlegung	o (*)	o (*)	o (*)	o (*)
Stahlgitter	Hitzebeständigkeit	++	++	++	++
	Lagestabilität beim Einbau	+	+	+	o
	Geeignet für maschinelle Verlegung	o (*)	o (*)	o (*)	o (*)

(++ sehr gut, + gut, o nur eingeschränkt, - schlecht, -- sehr schlecht) //
(*) für maschinelle Verlegung ist ein komplett vorgefertigtes System erforderlich. Ein solches System ist derzeit nicht verfügbar.

Tab. 2: Rohrbefestigungssysteme im Vergleich (FE 09.0174/2011/HRB)

Verlegemuster

Das Ziel des Verlegemusters ist es, dass am besten geeignete Muster bzgl. der Herstellung und Temperaturverteilung zu finden. In der Machbarkeitsstudie (FE 09.0174/2011/HRB), wurden bereits zwei verschiedene Verlegemuster vorgestellt (siehe Bild 5).

S1 ist eine spiralförmige Anordnung eines Doppelrohres, während in S2 ein in Schleifen verlegtes Einzelrohr dargestellt wird. Serpentinmuster sind leichter herzustellen, weisen jedoch eine geringere Effizienz im Gegensatz zu Doppelrohrsystemen auf. Beim Doppelrohrsystem befindet sich immer ein warmes Rohr neben einem kalten Rohr, wodurch der thermische Nutzen effizienter ausfällt.

Für die Auswahl der zwei verschiedenen Verlegemuster, die auf dem duraBAST-Testgelände getestet werden sollen, müssen drei wichtige Schwerpunkte untersucht werden: Schwierigkeitsaufwand der Konstruktion, Aufbau quer oder längs zur Straße und die Wahl zwischen Einzel- oder Doppelrohrsystemen. In den vereinbarten Spezifikationen für dieses Projekt wurden die zwei zu prüfenden Verlegemuster vorgegeben:

- spiralförmig angeordnetes Doppelrohr,
- Einzelrohr (in Schleifen) quer zur Straße.

Einbautiefe und Rohrabstände

In der Machbarkeitsstudie (FE 09.0174/2011/HRB) wurde festgestellt, dass die Einbautiefe der Rohre mindestens 4 cm unterhalb der Fahrbahn liegen sollte, damit die Rohrregister bei der Reparatur der obersten Asphaltdecke nicht beschädigt werden. Die Tiefe darf jedoch auch nicht zu groß gewählt sein, da das System sonst mit größer werdender Tiefe an Effizienz verliert.

In den Spezifikationen (Lastenheft) für dieses Projekt wird der Asphaltaufbau vorgegeben. Die für dieses Projekt gewählte Lastklassifikation ist ein RStO 12, Bk 3,2, Zeile 1, das heißt eine 10 cm Asphaltdecke und eine 20 cm Asphalttragschicht als gebundener Oberbau. Bei den Varianten mit Rohrregistern würde dies in 3 Schichten unterteilt werden: eine 3,5 cm dicke Asphaltdeckschicht, eine 4 cm dicke Asphaltbinderschicht und schließlich eine 15 cm dicke Asphalttragschicht. Um die Mindesttiefe (4 cm) einzuhalten, die erforderlich ist um das Rohrregister bei Reparaturen der Deckschicht nicht zu beschädigen, sollten die Rohre, wie in Bild 4 zu

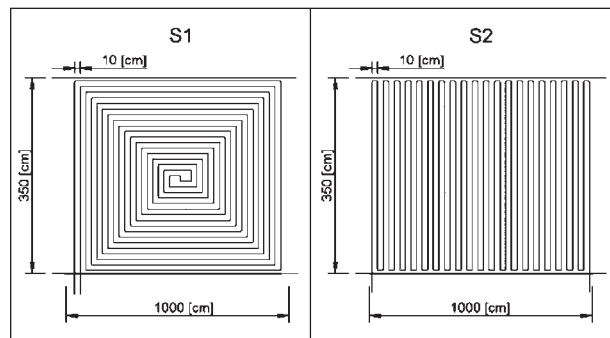


Bild 5: Verlegemuster (EICKER, 2005)

sehen ist, an der Unterseite der Binderschicht installiert werden. Der Abstand der Rohre sollte recht klein gewählt sein, sodass sich die Wärme gleichmäßig auf die gesamte Oberfläche verteilen kann. Die Machbarkeitsstudie empfiehlt aufgrund von Erfahrungen aus früheren Projekten einen Abstand von 10 cm. Dies ist aus Sicht der Anlage noch beherrschbar.

Zusammenfassend empfiehlt sich also eine Einbautiefe von 3,5 cm (Deckschicht) plus eine 4 cm Binderschicht. Das entspricht somit 5 cm von der Oberfläche bis zum Oberkannte des Rohres. Der Rohrabstand soll 10 cm betragen.

Trägermedium

Die Machbarkeitsstudie stellt fest, dass das ideale Trägermedium eine hohe Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit, aber eine niedrige Viskosität aufweisen sollte. Die ersten beiden Eigenschaften verbessern die Wärmeübertragung in den Rohren. Eine niedrige Viskosität ist wünschenswert, weil eine eventuelle Pumpe weniger Energie benötigen würde. Aus ökologischer Sicht sollte das Trägermedium nicht schädlich für die Umwelt sein, da Undichtigkeiten des Systems auftreten könnten. Klassische Trägermedien werden mit Frostschutzmittel (z. B. Glykol) gemischt – Glykol reduziert jedoch die Wärmekapazität des Trägermediums.

Aufgrund der Tatsache, dass es nicht umweltschädlich ist und alle thermischen Anforderungen erfüllt, die ein Trägermedium aufweisen soll, empfiehlt die Machbarkeitsstudie die Verwendung von Wasser. Um ein Einfrieren des Gesamtsystems zu vermeiden ist hierzu das erforderliche Steuer- und Regelkonzept auf dieses Medium anzupassen (siehe Kapitel 4.6).

Quer- und Längsgefälle der Konstruktion

Dadurch, dass das Wasser mit geringen Druck durch die Rohrleitungen gepumpt wird, spielt das Gefälle in der Durchführung des Systems eine untergeordnete Rolle. Dennoch wird eine Querneigung von 2,5 % empfohlen.

3.1.3 Einbautechnologie

Der Einbau der Rohrregister erfolgt unabhängig vom eingesetzten Material und Befestigungsverfahren bei allen Verfahren in einem vergleichbaren Ablauf. Zunächst werden die Rohrregister auf der vorhandenen Asphalttragschicht befestigt. Anschließend erfolgt die Überprüfung des Systems auf Dichtheit und Durchflusseigenschaften. Erst wenn das Rohrsystem einwandfrei funktioniert erfolgt der Einbau des Asphaltmaterials, welches die verlegten Rohrregister vollständig umschließen soll. Dabei sind Befestigungssystem und Einbauverfahren so aufeinander abzustimmen, dass die Rohrregister ihre vorgesehene Lage behalten. Da auf der einen Seite bereits mehrere verschiedene Einbautechnologien eingesetzt werden und auf der anderen Seite all diese Technologien erhebliche Herausforderungen aufweisen, wird im vorliegenden Fall darauf verzichtet, eine bestimmte Einbautechnologie vorzuschreiben. Wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben wird jedoch der Einbau von PE-Xa/Al/PE-HD-Rohren mit Stahlgittern empfohlen.

3.2 Konzeption der PU-Schicht

3.2.1 Grundlagen

Zunächst erfolgt die Auswahl des Straßenoberbaus für die Temperierung von Fahrbahnen über eine durchströmte Zwischenschicht für drei Varianten. Dabei steht das Konzept der durchströmten PU-Zwischenschicht im Vordergrund. Für den Entwurf der Zwischenschicht werden die hydraulischen Anforderungen an die Schicht genau definiert. Dies schließt die Bestimmung der erforderlichen Parameter Festigkeit, Tragfähigkeit und hydraulische Performance ein. Gleichzeitig erfolgt die Bestimmung und Zusammensetzung des Wärmeträgermediums, welches durch die Berücksichtigung verschiedener Härtegrade und Kalkanteile sehr abweichende Verhaltensweisen aufweisen kann.

Für den Straßenoberbau mit einer integrierten PU-Zwischenschicht wird ein entsprechender Schicht-

aufbau (Tragschicht, Binderschicht, Deckschicht) betrachtet. Dieser wird mit dem erforderlichen Längs- und Quergefälle versehen, um den Durchfluss des Temperierungsfluids durch die Zwischenschicht zu gewährleisten. Auf Basis der Erkenntnisse aus den bereits abgeschlossenen FuE-Projekten (FE 07.0264/2012/ARB und FE 89.0304/2014) wurde am ISAC bereits ein erster Demonstrator (90 cm x 90 cm) mit einer fluiddurchströmten, temperierbaren Zwischenschicht umgesetzt.

Darüber hinaus ist die Systemtechnik der Zu- und Abläufe des Temperierungsfluids in den durchströmten Schichten und deren Abdichtung zu klären. Sowohl Einlass als auch Auslass müssen dicht und verlustfrei sichergestellt werden. Je nach Anschlussmöglichkeiten vor Ort wird hier ein geeigneter Systemanschluss konzipiert. Beratend steht hierbei eine Expertenrunde zur Seite, die sich aus den Verantwortlichen aller mitwirkenden Unternehmen und bei Bedarf aus weiterem Fachpersonal zusammensetzt.

3.2.2 Konzeption

PU-Komponenten

Bei dem multifunktionalen Werkstoff Polyurethan handelt es sich um ein lösemittelfreies Zwei-Komponenten-System, welches sich hervorragend zur Verfestigung von Gesteinen eignet. Im Wesentlichen besteht Polyurethan aus den beiden Rohstoffen Polyol und Polyisocyanat.

Die chemische Zusammensetzung lässt sich in folgende Komponenten unterteilen (A- und B-Komponente):

- A-Komponente:
Zusatzmittel enthaltendes Polyolgemisch,
- B-Komponente:
Diphenylmethan-diisocyanat.

Für die Herstellung der Polyolkomponente werden zu 83 % nachwachsende Rohstoffe verwendet. Auf das Polyurethangesamtsystem bezogen ergibt dies einen Anteil von nachwachsenden Rohstoffen von 45 %.

Die Umweltverträglichkeit und Unbedenklichkeit des verwendeten Polyurethansystems wurde in diversen Untersuchungen und gutachterlichen Stellungnahmen beurteilt und nachgewiesen (siehe Anhang 2).

Insbesondere eine humantoxikologische Bewertung von PU-beschichteten Gesteinen wurde untersucht. Hierbei konnte eindeutig festgestellt werden, dass aus toxikologischer und hygienischer Sicht gegen den Einsatz von PU-beschichteten Aggregaten keine Bedenken bestehen. Dies wird im Anhang näher erläutert.

Weitere technische Details können dem technischen Merkblatt entnommen werden (siehe Anhang 3).

Sieblinie und Permeabilität der PU-Schicht

Die granulometrische Kurve der Polyurethan-Zwischenschicht wird in Abhängigkeit von Hohlraumgehalt und Hohlraumstruktur sowie in Abhängigkeit von der gewünschten Tragfähigkeit gewählt. Diese ist jedoch nur von untergeordneter Bedeutung. Hohlraumgehalt und -struktur bestimmen die Durchlässigkeit der Schicht. Für dieses Projekt wurden zwei unterschiedliche Sieblinien gewählt:

PA 8: Standard offenporiges Asphaltmischgut, gebunden mit Polyurethan (siehe blaue Kurve in Bild 6),

PA 0-5: Mischgut umfasst einen kleinen Anteil Feinstoffe (0,063 mm bis 2 mm) und einen großen Anteil Körner (2 mm bis 5,6 mm) (siehe graue Kurve in Bild 6).

Der Hauptunterschied zwischen diesen beiden Mischgütern und der Grund warum diese beiden

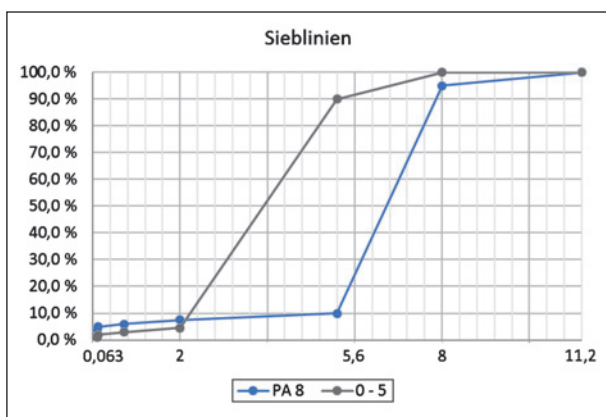


Bild 6: Sieblinien PU-Varianten

Variante	Horizontale Durchlässigkeit [m/s]
PA 8	1,051 E-02
0-5	6,623 E-03

Tab. 3: Horizontale Durchlässigkeit nach TP Asphalt-StB Teil 19

gewählt wurden, ist die Größe der Hohlräume und dementsprechend die Hohlraumstruktur. Diese kontrollieren die Geschwindigkeit des Wassers, welches horizontal durch die Schicht fließt. Beide Varianten haben einen ähnlichen Hohlraumgehalt, der zwischen 32 % und 38 % liegt. Bezüglich der horizontalen Durchlässigkeit, wurde dies nach TP Asphalt-StB Teil 19 gemessen. Die Ergebnisse zeigen einen kleinen Unterschied zwischen beiden Varianten. Die PA 8 Variante hat eine sehr starke Durchlässigkeit, wohingegen die 0-5 Variante eine starke Durchlässigkeit hat (nach DIN 18130-1:1998-05). Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt.

Durch die bisherige Forschungsleistung konnte ein vollständig neues Materialkonzept auf Basis von Polyurethan sowie mögliche Einbauverfahren und -technologien entwickelt und erprobt werden. Anhand der Forschungsergebnisse wurde festgestellt, dass durch die Verwendung von Polyurethan die Materialperformance des Deckschichtmaterials erheblich gesteigert werden kann. Weiterhin wurde die neuartige Straßendeckschicht auf einer Testfläche mit geeigneten, modifizierten Herstellungs- und Einbauverfahren realisiert und bewertet.

Im Wesentlichen konnten folgende relevante, mechanische Materialcharakteristika festgestellt werden:

- hohe Verformungsbeständigkeit unter Beibehaltung der Duktilität,
- hohe Ermüdungsbeständigkeit,
- geringe Beeinflussung durch Temperatur,
- gute Versickerungs- und Drainageleistung,
- sehr hohe mechanische Oberflächenresistenz (Kornausbruch),
- geringes Alterungsverhalten.

Demnach ist es erstmals möglich die hervorragenden, funktionalen Eigenschaften eines offenporigen Systems mit einer hochstabilen Materialperformance und -dauerhaftigkeit zu verknüpfen. Darüber hinaus lassen sich durch ein gezieltes Materialdesign lärmwirksame sowie flächenschonende Planungsziele berücksichtigen (RENKEN/OESER 2017).

Asphaltaufbau

Der gewählte Schichtenaufbau des Asphaltes in diesem Projekt basiert auf der RStO 12 Bk 3,2

Zeile 1. Für die drei PU-Varianten (S3, S4 und S5) wurden zwei verschiedene Sieblinien für das Gesteinskörnungsgemisch gewählt. Für die 0-5 Variante wurden zwei verschiedene Schichtdicken gewählt; 5 cm und 8 cm (siehe Bild 7). Diese zwei Dicken wurden gewählt, um zu untersuchen, ob ein größeres Wasservolumen, das durch die Schichten fließt, erhitzt werden kann, um dadurch mehr Energie zu gewinnen.

Haftung und Abdichtung zwischen den Schichten

Damit das System funktionsfähig ist, muss die offenporige Zwischenschicht vollständig wasserdicht sein. Jeglicher Wassereintritt oder -austritt aus der Umgebung kann das System, durch die Erzeugung von unerwünschtem Wärmetransport, negativ beeinflussen. Vom Standpunkt der Sicherheit und Dauerhaftigkeit her muss die Verbindung zwischen Deck- und Binderschicht einer Belastung von mindestens 15 kN standhalten können (12 kN zwischen allen anderen Schichten), sodass kein Rutschen zwischen den Schichten möglich ist (ZTV Asphalt-StB 2007/2013). Dadurch, dass es sich um eine offenporige Zwischenschicht handelt, funktioniert gewöhnlicher Haftkleber (Bitumen-emulsion) nicht, da er direkt durch die Poren abfließt. Um diesem Problem entgegen zu wirken wurden die folgenden Alternativen getestet: eine Schweißbahn und ein Gussasphalt.

- Schweißbahn

Um die Polyurethan-Zwischenschicht mit der Deck- und Tragschicht zu verbinden und abzudichten, wurde als erstes Produkt die Schweißbahn Kebuflex BR 2 getestet. Dieses Produkt wird üblicherweise benutzt, um Gussasphalt mit Brücken zu verkleben, wo eine Ausführung mit Walzasphalt nicht möglich ist. Um diese Schicht

aufzubringen muss die Unterseite zunächst erhitzt werden, damit die Asphaltsschicht darauf gegossen werden kann.

- Gussasphalt

Die andere getestete Alternative ist eine Gussasphaltschicht über der Polyurethan-Schicht. Gussasphalt hat keine Luftporen und erfordert keine Verdichtung, weshalb die Anwendung einfach ist.

Zur Prüfung des Schichtenverbundes wurde der Abscherversuch nach Leutner durchgeführt (TP Asphalt-StB – Teil 80). Hierzu wurden Bohrkerne aus den betrachteten Asphaltverbänden entnommen, an denen dann der Schichtenverbund geprüft wurde. Bei diesem Versuch werden die verbundenen Asphaltsschichten gegeneinander abgeschert und die zugehörige maximale Scherkraft ermittelt. Die Ergebnisse dieser Prüfungen sind in Tabelle 4 dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die beste Lösung für den Schichtenverbund die Kombination mit Gussasphalt ist. Ein Nachteil von Gussasphalt ist jedoch das Eindringen des Bitumens in die PU-Schicht. Dies wurde anhand der Bohrkerne, die zur Prüfung des Schichtenverbundes hergestellt wurden, ermittelt. Dazu wurden die Bohrkerne, nachdem der Schichtenverbund an ihnen geprüft wurde, halbiert und die Eindringtiefen gemessen. Da die Eindringtiefen des Gussasphaltes nicht mehr als einen Zentimeter betragen, wird empfohlen die PU-Schicht einen Zentimeter dicker auszubilden.

Variante	PA 8	0 - 5
Gussasphalt	24,9 [kN]	29,6 [kN]
Schweißbahn	7,6 [kN]	9,9 [kN]

Tab. 4: Schichtenverbund Ergebnisse

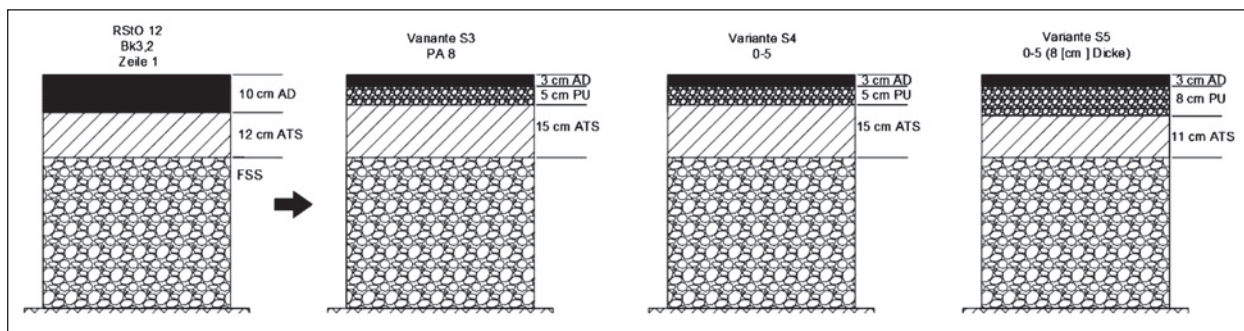


Bild 7: Asphaltaufbau von Pu-Varianten S3, S4 und S5

Trägermedium

Als Trägermedium für die PU-Variante soll Wasser verwendet werden. Wie im Kapitel 3.1.2 festgestellt wurde ist Wasser nicht umweltschädlich und erfüllt alle thermischen Anforderungen, die ein Trägermedium aufweisen soll. Um das Einfrieren des Gesamtsystems zu vermeiden, ist hierzu das erforderliche Steuer- und Regelkonzept auf dieses Medium anzupassen (siehe Kapitel 4.6).

3.2.3 Einbautechnologie

Einbau von PU

PU-Schichten wurden bereits zu anderen Einsatzzwecken eingebaut. Bei dem vorliegenden Einsatz der PU-Zwischenschicht und ihren Anschlüssen für die Durchströmung handelt es sich jedoch um ein vollkommen neues Einsatzgebiet.

Prinzipiell ist die Herstellung von Materialsystemen mit PU-Bindemitteln mit einer konventionellen Bauweise gleichzusetzen. Die Gesteinskörnungen werden mit dem Bindemittel bis zur vollständigen Mischguthomogenität vermischt. Aufgrund des hohen Bindevermögens des PU-Bindemittels unterscheidet sich jedoch das Funktionsprinzip der Gesamtkonstruktion gegenüber der konventionellen Bauweise erheblich.

Bei der Herstellung von PU-Asphalt ist es erforderlich, die spezifische Oberfläche der verwendeten Gesteinskörnungen mit dem Polyurethan vollständig zu benetzen. Dadurch werden die Gesteinskörnungen an den Kontaktstellen dauerhaft zu einer monolithischen, dreidimensionalen, verformungsbeständigen Struktur verfestigt (Bild 8). Obwohl die monolithische Verklebung nur an den Kontaktstel-

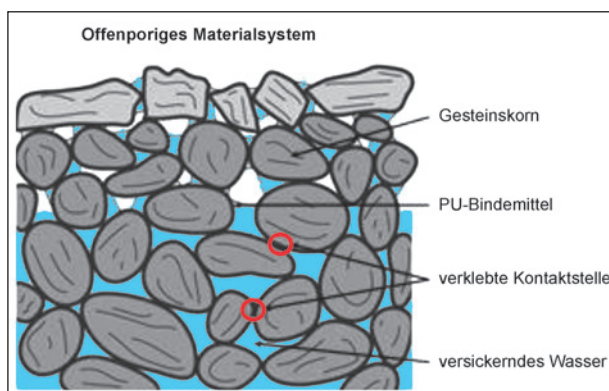


Bild 8: Funktionsprinzip von offeneren PU-Systemen (RENKEN/OESER 2015)

len auftritt, entsteht eine sehr hohe Materialfestigkeit, sodass problemlos offenerporige Strukturen mit hohen Festigkeiten erreicht werden können (RENKEN/OESER 2015).

Für die Temperierung des Fahrbahnaufbaus ist das Zusammenspiel zwischen Schicht und Anschluss von entscheidender Bedeutung. Welche Toleranzen beim Einbau zulässig sind und ob das System mit anderer Zusammensetzung und anderen Anschlusskonstruktionen betrieben werden kann, ist aktuell noch nicht bekannt.

Systemtechnik und Isolierung des Zu- und Ablaufs

Damit das System funktioniert, ist der Umstand unter dem das Wasser in die Polyurethan-Zwischenschicht eintritt, durchfließt und austritt von höchster Bedeutung. Dabei müssen die folgenden Eigenschaften eingehalten sein:

- Zufluss und Abfluss des Systems müssen wasserdicht sein.
- Der Wasserdruck sollte regulierbar sein. Der Druck sollte nicht so groß sein, um die offenerporige Schicht nicht auszuspülen und die Abdichtung des Systems nicht zu beschädigen, aber er sollte groß genug sein, um die Schicht gleichmäßig zu erwärmen.
- Das Zuflusssystem muss das Wasser gleichmäßig über die gesamte Länge des Versuchsstückes verteilen.
- Zufluss- und Abflusssystem sollten vorzugsweise aus einem isolierenden Material gemacht sein, um so wenig Wärme wie möglich an die Umgebung zu verlieren.
- Die Verbindung zwischen Zufluss, offenerporiger Zwischenschicht und Ausfluss muss komplett abgedichtet sein.
- Das System sollte nahe der vollständigen Sättigung arbeiten, diese jedoch nie erreichen.

Beispiele von Lösungen, die diese Problematiken ansprechen sind in Bild 9 und Bild 10 zu sehen. In Bild 9 ist ein Prototyp abgebildet, bei dem Wasser durch einen Kanal oder eine Rinne auf einer Seite der offenerporigen Schicht gesammelt wird. Das Wasser sollte gepumpt werden, um den Wasserfluss über die gesamte Länge der Schicht zu gewährleisten.

In Bild 10 wird das Wasser durch ein Rohr innerhalb der offenporigen Schicht geleitet. Kleine Röhrrchen sind senkrecht mit diesem Rohr verbunden und in die offenporige Schicht eingebettet. Diese kleinen Röhrrchen sollten gleichmäßig über die gesamte Länge der Versuchsstrecke gelegt werden, um sicherzustellen, dass das Wasser innerhalb der gesamten Schicht verteilt wird. Der Abstand zwischen den Rohren soll 15 cm betragen (von Rohrmitte zu Rohrmitte).

Um das Wasser besser durch die gesamte Schicht zu verteilen, wird empfohlen, die Rohre – wie in Bild 11 dargestellt – einzusetzen.

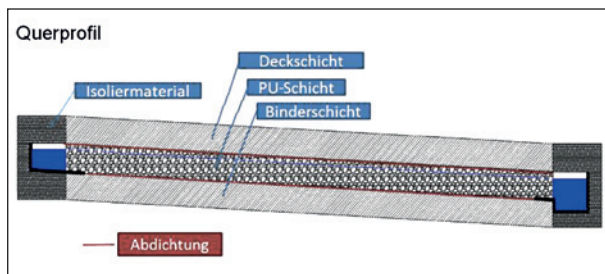


Bild 9: Prototyp-System 1 – Rinne

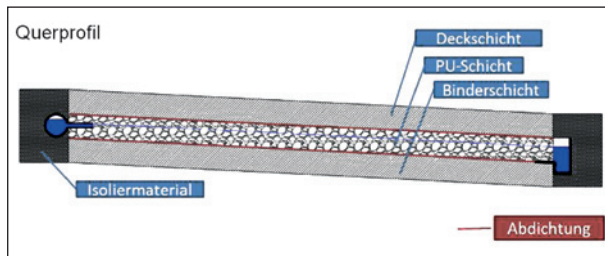


Bild 10: Prototyp-System 2 – Rohre

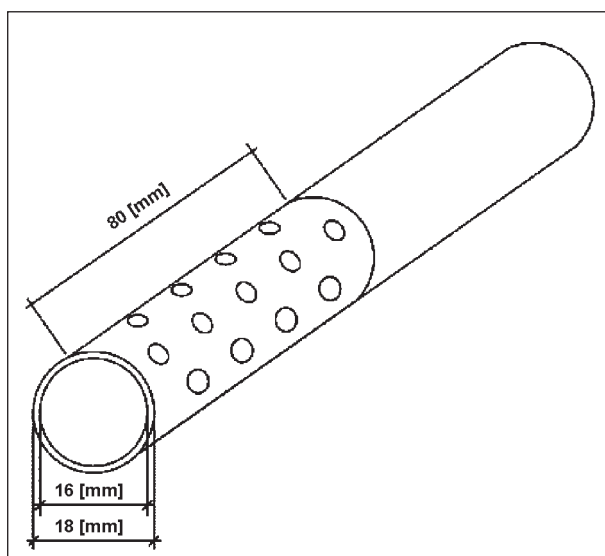


Bild 11: Einflusarrohr mit seitlichen Öffnungen

Um das System zu testen wurde ein spezieller Versuchsaufbau gestaltet. Zwei Röhrrchen aus Kupfer wurden im Abstand von 9 cm in eine PU-Schicht eingebaut (siehe Bild 12).

Die PU-Schicht wurde im Anschluss bis auf eine Temperatur von ungefähr 60 °C erwärmt. Danach wurde Wasser mit einer kleinen Wasserpumpe in die Röhrrchen gepumpt. Um zu erkennen, ob sich das Wasser mit diesem System durch die gesamte Schicht verteilt hat, wurden regelmäßig Fotos mit einer Wärmebildkamera aufgenommen. In Bild 13 sind beispielhafte Bilder dargestellt. Anhand dieser Bilder ist deutlich zu sehen, dass sich das Wasser durch die ganze Schicht verteilt. In diesem Fall betrug die Querneigung ungefähr 2,5 %.



Bild 12: Versuchsaufbau Röhrrchen-System

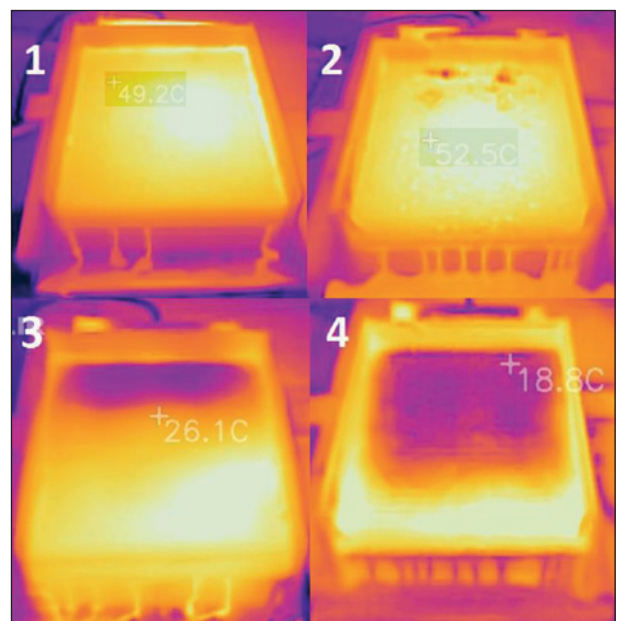


Bild 13: Wärmebilder Versuchsaufbau

3.3 Ausschreibungskonzept

3.3.1 Rohrregister Varianten

Wie beschrieben werden für den Einbau der Rohrregister unterschiedliche Befestigungsverfahren verwendet (vgl. Kapitel 3.1). Für die Temperierung des Fahrbahnaufbaus ist es entscheidend, dass die Rohrregister auch nach Einbringen der zugehörigen Asphaltsschicht unbeschädigt sind und sowohl horizontal, als auch vertikal die vorgesehene Lage aufweisen. Das Zusammenspiel von Material und Befestigung der Rohrregister auf der einen Seite, sowie Material und Einbauverfahren des Asphaltes auf der anderen Seite muss aufeinander abgestimmt sein. Dies birgt technische Herausforderungen und wirtschaftliches Potenzial. Daher muss dieser Teil der Versuchsanlagen (Beschreibung der Leistung, Lieferung und Einbau der Rohrregister einschließlich des Einbaus der umgebenden Asphaltsschicht) funktional beschrieben werden.

3.3.2 PU-Varianten

PU-Schichten sind in anderen Einsatzumfeldern bereits eingebaut worden. Bei dem vorliegenden Einsatz der PU-Zwischenschicht und ihren Anschlüssen für die Durchströmung handelt es sich um ein vollkommen neues Einsatzgebiet. Das Zusammenspiel zwischen Schicht und Anschluss ist für die Temperierung des Fahrbahnaufbaus von entscheidender Bedeutung. Es liegen bisher keine Erfahrungen dazu vor, ob das System mit anderer Zusammensetzung und anderen Anschlusskonstruktionen betreibbar ist und welche Toleranzen beim Einbau und Anschluss zugelassen werden können. Für die PU-Varianten ist die Verwendung der Sieblinien, die im Kapitel 3.2.2 beschrieben sind, vorgeschrieben. Außerdem, sollen die im Kapitel beschriebenen Einbaudicken verwendet werden.

3.3.3 Abdichtung der PU-Varianten

Die Abdichtung des Systems bildet einen maßgeblichen Aspekt der PU-Varianten. Daher muss die Verbindung zwischen der PU-Schicht und den Deck- und Tragschichten vollständig dicht sein. Zu diesem Zweck soll, wie bereits in Kapitel 3.2.2 festgestellt wurde, Gussasphalt als Deckschicht verwendet werden. Bezüglich der Abdichtung zwischen der PU-Schicht und der Tragschicht wird empfohlen,

dass nach dem Einbau der Tragschicht, ein mit einer SAMI-Schicht (Stress Absorbing Membrane Interlayer) vergleichbarer Belag aufgebracht wird, um so einerseits eine vollständige Abdichtung und andererseits auch eine ausreichende Haftung zwischen PU-Schicht und Tragschicht zu realisieren.

3.4 Erstellung von Kennfeldern zur Bestimmung der thermischen Ergiebigkeit

Die im Rahmen dieses Vorhabens untersuchten Straßenkonzepte weisen unterschiedliche Charakteristiken in Bezug auf die thermische Ergiebigkeit unter Berücksichtigung der jahreszeitlich bedingten Umgebungsbedingungen auf. Zur Bestimmung der thermischen Eigenschaften der Testfelder auf dem duraBAST-Testgelände sowie zur Auslegung, wurde ein dynamisches Prozesssimulationsmodell entwickelt, das eine zeitlich und örtlich aufgelöste Untersuchung sämtlicher Prozessparameter erlaubt. In einem ersten Schritt wurden mittels dieses Modells die reinen Charakteristiken der temperierten Straßenabschnitte untersucht. Zu diesem Zweck wurden die Teilmodelle der verschiedenen Straßensegmente mit einem konstanten Massenstrom (0,1 kg/s) des ausgewählten Betriebsfluids (Wasser) bei verschiedenen definierten Vorlaufemperaturen im Rahmen einer Parametervariation simuliert. Hierzu wurden gesammelten Wetterdaten verwendet, um die äußeren Wärme- bzw. Kältebelastungen zu berechnen.

Angepasst an den jahreszeitlichen Verlauf wird der Anlagenbetrieb in einen Sommer- und Winterbetrieb unterteilt. Während im Sommerbetrieb (April-September) die Straße immer mit einer konstanten Vorlauftemperatur von 10 °C beaufschlagt wurde, wurde die Vorlauftemperatur im Winterbetrieb (Oktober-Januar) variiert. In den Diagrammen (Bild 14 bis Bild 17) sind die Leistungs- bzw. Temperaturverläufe über den Jahresstunden (gesamt 8.760 h) dargestellt. Somit liegt der Winterbetrieb von 0-2.190 h sowie von 6.571-8.760 h vor. Der Sommerbetrieb läuft entsprechend von 2.191-6.570 h. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind Sommer- und Winterbetrieb nur einmalig in Bild 14 gekennzeichnet, für die verbleibenden Abbildungen gilt jedoch die gleiche Aufteilung.

Bild 14 und Bild 15 zeigen die jahreszeitlichen Verläufe der übertragenen Leistung eines Straßensegmentes mit einer Schicht mit Rohrregistern (Rohr-

abstand 25 cm, Verlegemuster S2), während Bild 16 und Bild 17 die entsprechenden Verläufe für die durchströmte Zwischenschicht zeigen. Die Wahl eines im Vergleich zur Systemkonzeption größeren Rohrabstandes resultiert hierbei aus den numerischen Anforderungen des Modells. Bei einer feineren Diskretisierung steigen die Rechenanforderungen extrem an, sodass eine Konvergenz nicht sichergestellt werden kann. Die gewählte Diskretisierung stellt gleichwohl eine Abschätzung zur sicheren Seite im Sinne der Betriebssicherheit dar. Auch die Leistungsanforderungen des Gesamtsystems werden hierdurch nicht tangiert, da im Extremfall einer durchströmten Schicht ebenfalls nur eine geringfügig höhere Wärmelast übertragen wird. Allgemein zeigt sich für die durchströmte Schicht eine stärkere Fluktuation in der Leistung, was auf die

Speicherwirkung der Schicht zurückzuführen ist. Es zeigen sich darüber hinaus deutliche Unterschiede sowohl zwischen den zwei Bauarten als auch zwischen den Betriebszuständen mit unterschiedlichen Vorlauftemperaturen.

Im Winterbetrieb ist die übertragene Leistung bei einer Vorlauftemperatur von 35 °C für beide Bauarten vergleichbar, auch wenn die Schwankungen im Fall der durchströmten Schicht ausgeprägter sind. Wird die Vorlauftemperatur auf 55 °C eingestellt, ergibt sich eine signifikante Erhöhung der Leistungsaufnahme beider Straßensegmente im Winterbetrieb, was durch die größere treibende Temperaturdifferenz zwischen Straßenkörper und Umgebung begründet ist (vgl. Tabelle 5). Auch hier ist der Verlauf der Leistungsaufnahme im Fall der porösen Schicht

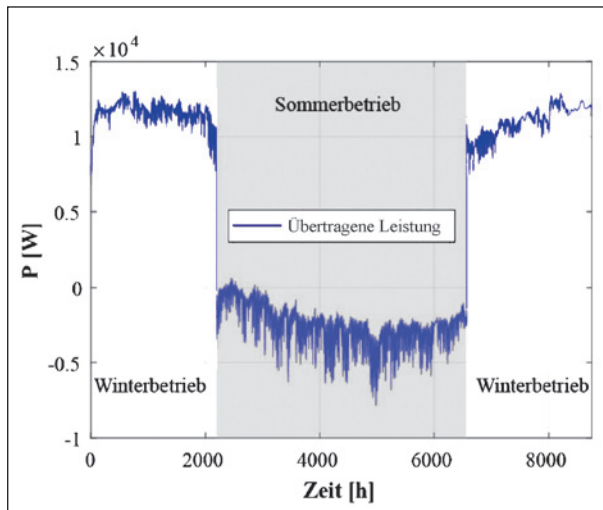


Bild 14: Übertragene Leistung Straßensegment, Durchströmte Zwischenschicht, $T_{\text{Vorlauf}} = 35 \text{ °C}$

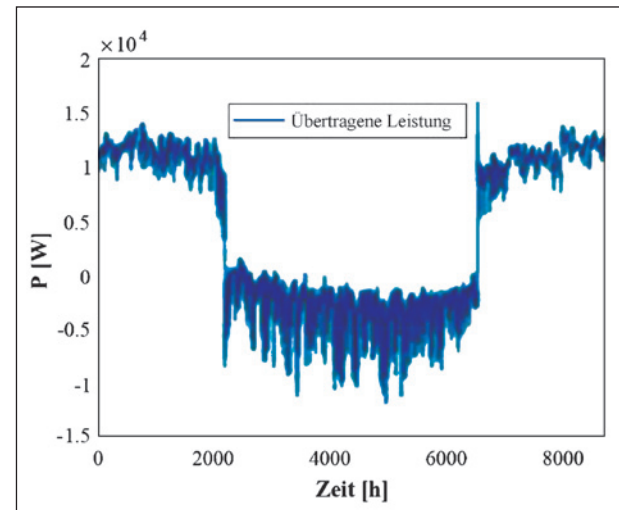


Bild 16: Übertragene Leistung Straßensegment Schicht mit Rohrregistern, $T_{\text{Vorlauf}} = 35 \text{ °C}$

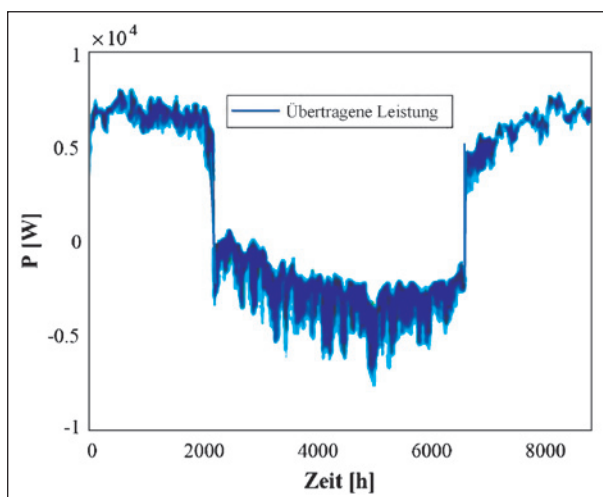


Bild 15: Übertragene Leistung Straßensegment Schicht mit Rohrregistern, $T_{\text{Vorlauf}} = 35 \text{ °C}$

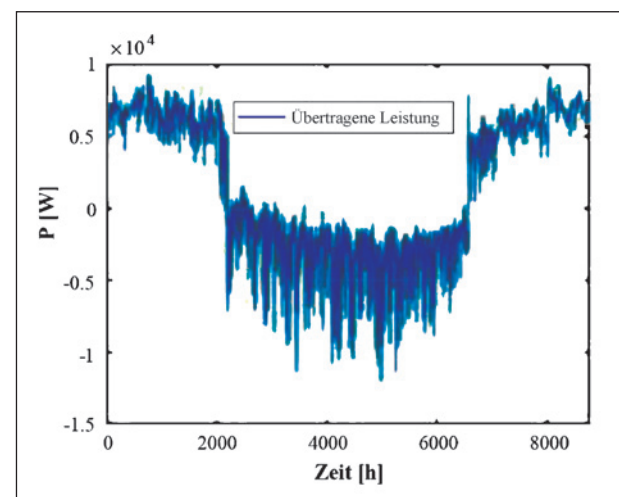


Bild 17: Übertragene Leistung Straßensegment, durchströmte Zwischenschicht, $T_{\text{Vorlauf}} = 55 \text{ °C}$

etwas unruhiger, was in einer höheren Peak-Leistungsabgabe der durchströmten Schicht resultiert (vgl. Tabelle 5).

Im Sommerbetrieb zeigt sich eine deutlich größere Leistungsabgabe der Straße mit durchströmter Zwischenschicht, die Leistungsabgabe ist im Vergleich zur Schicht mit Rohrregistern nahezu doppelt so groß. Auch hier ist die Fluktuation der Leistungsabgabe im Fall der durchströmten Schicht ausgeprägter. Da im Sommerbetrieb die Vorlauftemperatur in allen Simulationen konstant ist, sind die Unterschiede zwischen den Ergebnissen für identische Bauarten vernachlässigbar.

Tabelle 5 zeigt die Maximalwerte der Leistungsaufnahme bzw. Leistungsabgabe. Auch hier spiegeln sich die o. g. Schlussfolgerungen wieder.

Basierend auf diesen Ergebnissen ist eine zur Temperierung der Straße ausreichende, jedoch gleichzeitig möglichst niedrige Vorlauftemperatur im Winterbetrieb anzustreben, um die Verluste zu minimieren. Da auch die eingesetzte Wärmepumpe bei einem niedrigen Temperaturniveau effizienter arbeitet, werden 35 °C als maximale Vorlauftemperatur für die Anlagenkonzeption festgelegt.

Im Folgenden werden die Verläufe der minimalen und maximalen Deckschichttemperaturen an der Oberfläche der Straße analysiert. Hierzu wurde die Oberfläche räumlich diskretisiert und die Temperaturwerte ausgewertet. Hierbei ist zu beachten, dass minimale und maximale Temperaturwerte in der Regel nicht am selben Ort lokalisiert werden können. Die Lage der Extremwerte ist speziell durch die Verlegemuster bedingt.

Bild 18 zeigen die minimalen Deckschichttemperaturen (Oberfläche der Straße) im jahreszeitlichen Verlauf bei einer konstanten Vorlauftemperatur von 35 °C im Winterbetrieb sowie 10 °C im Sommerbetrieb. Es wird deutlich, dass die durchströmte Schicht ganzjährig eine geringere Spreizung (ca. 35 °C vs. 45 °C) des Temperaturprofils aufweist. Während die Minimaltemperaturen im Fall der durchströmten Zwischenschicht die Sollwerte aus dem Lastenheft nicht unterschreiten, ergeben sich im Fall der Schicht mit Rohrregistern einzelne Unterschreitungen im Winterbetrieb. Darüber hinaus ergibt sich ein signifikant niedrigeres mittleres Temperaturniveau im Sommerbetrieb bei Einsatz der durchströmten Zwischenschicht (vgl. Bild 19), was auf die Speicherwirkung der wassergefüllten Schicht zurückzuführen ist.

Typ	Max. Leistungsaufnahme (Winter)	Max. Leistungsabgabe (Sommer)
Schicht mit Rohrregistern, $T_{\text{Vorlauf}} = 35 \text{ °C}$	8.390,5 [W]	-7.574,0 [W]
Durchströmte Schicht, $T_{\text{Vorlauf}} = 35 \text{ °C}$	9.535,0 [W]	-11.768,4 [W]
Schicht mit Rohrregistern, $T_{\text{Vorlauf}} = 55 \text{ °C}$	13.294,4 [W]	-7.559,7 [W]
Durchströmte Schicht, $T_{\text{Vorlauf}} = 55 \text{ °C}$	16.197,3 [W]	-11.765,0 [W]

Tab. 5: Maximale Leistungsaufnahme und -abgabe ausgesuchter Straßensegmente

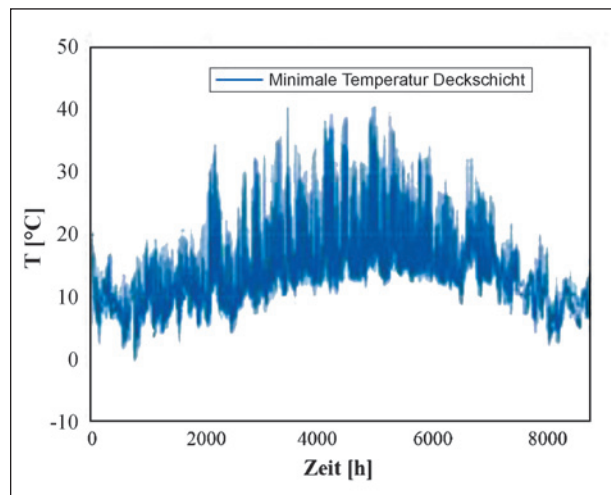


Bild 18: Minimale Deckschichttemperatur Straßensegment, Schicht mit Rohrregistern, $T_{\text{Vorlauf}} = 35 \text{ °C}$

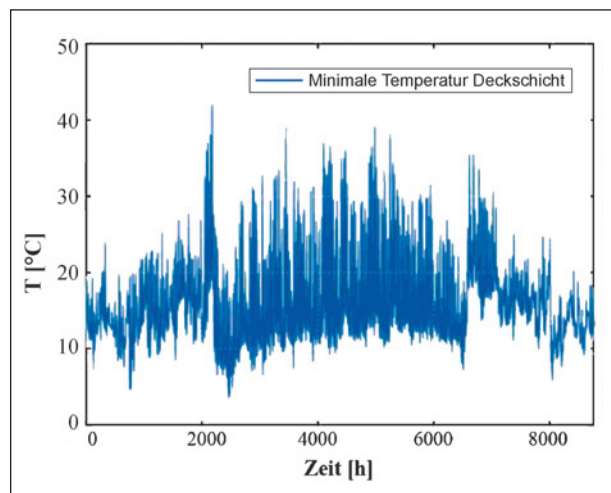


Bild 19: Minimale Deckschichttemperatur Straßensegment, durchströmte Zwischenschicht, $T_{\text{Vorlauf}} = 35 \text{ °C}$

Bild 20 und Bild 21 zeigen die Verläufe der Maximaltemperaturen. Auch hier zeigt sich eine im Mittel niedrigere Maximaltemperatur im Fall der durchströmten Zwischenschicht im Sommerbetrieb, während diese im Winter höher liegt als bei der Schicht mit Rohrregistern. Deutlich wird bei Analyse der Maximaltemperaturen, dass sowohl die Schicht mit Rohrregistern als auch die durchströmte Zwischenschicht eine temporäre, kurzfristige Überschreitung der festgelegten Maximaltemperaturen an Sommertagen mit hoher solarer Einstrahlung nicht verhindern können. Dies ist auf die verhältnismäßig schlechte Wärmeleitfähigkeit der Asphaltsschichten zurückzuführen, wodurch die Wärme nicht von der Oberfläche abgeführt werden kann.

Die Analyse der durchgeführten Simulationsrechnungen zeigte abschließend, dass mit Vorlauftem-

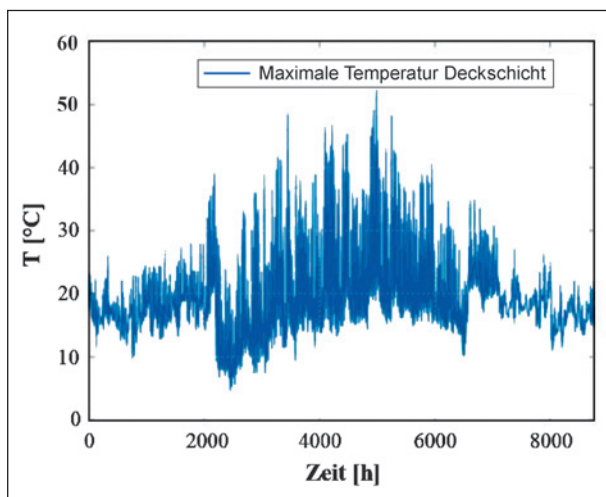


Bild 20: Maximale Deckschichttemperatur Straßensegment, Schicht mit Rohrregistern, $T_{\text{Vorlauf}} = 35 \text{ °C}$

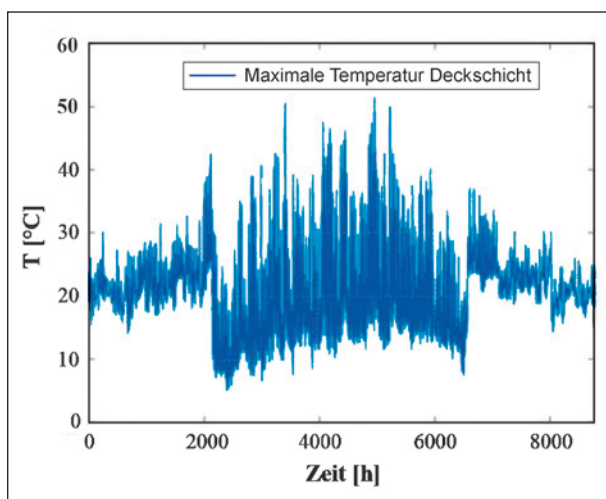


Bild 21: Maximale Deckschichttemperatur Straßensegment, durchströmte Zwischenschicht, $T_{\text{Vorlauf}} = 35 \text{ °C}$

peraturen von 35 °C im Winterbetrieb und 10 °C im Sommerbetrieb eine Temperierung der Straßenoberfläche im Rahmen der festgelegten Grenzen grundsätzlich möglich ist. Die Ergebnisse flossen somit in die Konzeption der Gesamtanlage ein.

4 Konzept Gesamtsystem

4.1 Umgebungsbedingungen/ Standortanalyse

Insbesondere die klimatischen Verhältnisse beeinflussen die Leistungsfähigkeit der Straßenbefestigung und haben entsprechend einen erheblichen Einfluss auf die Betriebsweise des Systems. Als Grundlage für die Systemauslegung wurden relevante Klima- und Wetterdaten für den Standort Autobahnkreuz Köln-Ost zusammengestellt. Insbesondere betrifft dies die Lufttemperaturen, die Luftfeuchtigkeit, die Niederschlagsart und -menge, die solare Einstrahlung und die Sonnenstunden in einer zeitlichen Auflösung von bis zu einer Stunde. Die Analyse der frei verfügbaren Wetter- und Klimadaten führte zur Festlegung auf die Testreferenzjahre (TRY) des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Testreferenzjahre (TRY) sind speziell zusammengestellte Datensätze, die für jede Stunde eines Jahres verschiedene meteorologische Daten enthalten. Sie sollen einen mittleren, aber für das Jahr typischen Witterungsverlauf repräsentieren. Für die Modellierung wurden qualitativ hochwertige, frei verfügbare Messdaten benötigt. Aus diesem Grund wurden Daten für den Standort Essen eingesetzt, da dieser Standort dem duraBast-Testgelände räumlich am nächsten kommt. Wichtige Einflussparameter innerhalb des Datensatzes sind insbesondere die Umgebungstemperatur, solare Einstrahlung, Verschattung durch Wolken sowie Windgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit. Zusätzlich wurden Bodentemperaturdaten des DWD aufbereitet und eingesetzt.

Im jahreszeitlichen Verlauf schwankt die Lufttemperatur zwischen -10 °C und 30 °C (vgl. Bild 22). Insbesondere in den Sommermonaten ist darüber hinaus die solare Einstrahlung (vgl. Bild 23 und Bild 24) auf die schwarze Straßenoberfläche von entscheidender Bedeutung. Als weitere Randbedingung hat die Bodentemperatur einen Einfluss auf die Temperaturverläufe in der Straße, wobei Bild 25 den vorgegeben Verlauf zeigt.

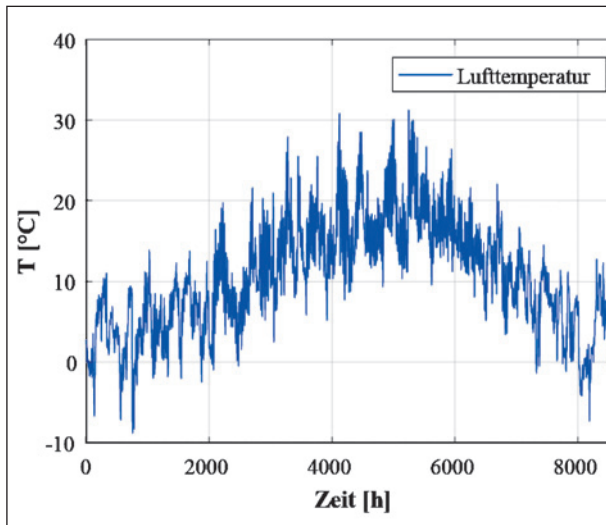


Bild 22: Jahreszeitlicher Verlauf der Lufttemperatur (Test Referenz Jahr)

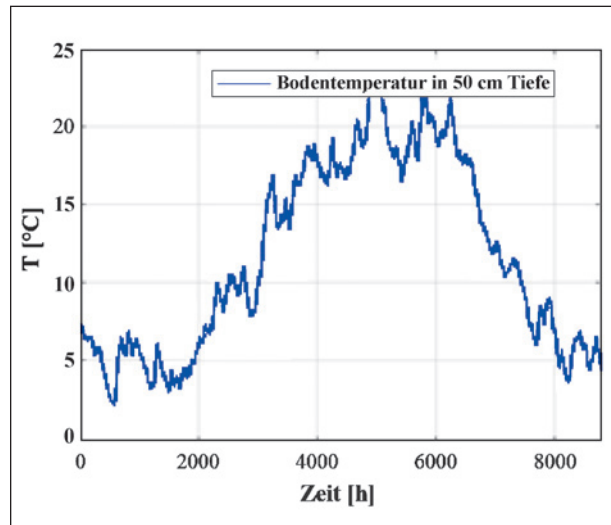


Bild 25: Jahreszeitlicher Verlauf der Bodentemperatur

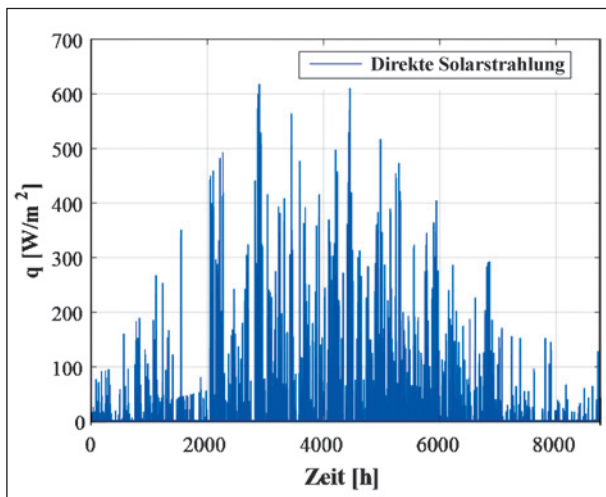


Bild 23: Jahreszeitlicher Verlauf der direkten solaren Einstrahlung (Test Referenz Jahr)

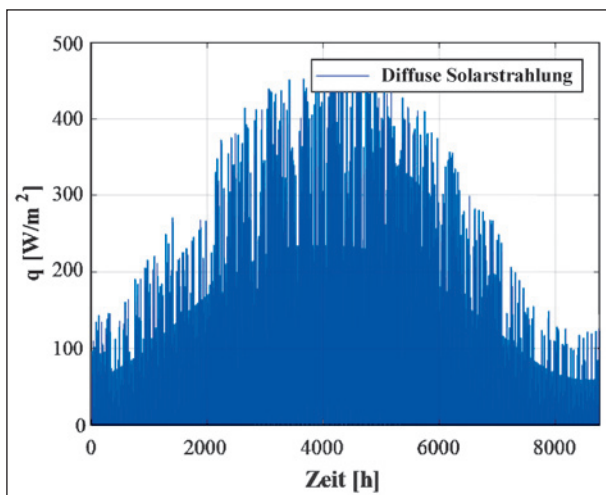


Bild 24: Jahreszeitlicher Verlauf der diffusen solaren Einstrahlung (Test Referenz Jahr)

Basierend auf den vom Geologischen Dienst NRW zur Verfügung gestellten Daten wurde die Machbarkeit eines Erdwärmesondensystems am Standort Autobahnkreuz Köln-Ost überprüft. Die für die Bohrungen potenziell zur Verfügung stehenden Bereiche auf dem duraBAST-Testgelände werden dabei aus hydrologischen Gesichtspunkten als unkritisch eingestuft (vgl. Bild 26).

Des Weiteren liegt das Gelände in keinem Wasserschutzgebiet (vgl. Bild 27). Tiefenbeschränkungen hinsichtlich der Bohrungen sind nicht bekannt. Erdbohrungen sind damit grundsätzlich möglich, wenngleich im Vorfeld nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann, dass während der Bohrarbeiten unerwartete geologische Bedingungen eine Limitierung der Bohrtiefe bedingen können.

Zur Auslegung des Erdwärmesondensystems werden anhand der geologischen Schichtenfolge die Erdreichereigenschaften insbesondere die effektive Wärmeleitfähigkeit und volumetrische Wärmekapazität entlang des möglichen Bohrpfad ab geschätzt. Der vom Geologischen Dienst NRW herausgegebene Profilschnitt am Standort (vgl. Bild 28) lässt auf den ersten 15-30 m eine Mischung aus Sand und Kies erwarten. Darunter werden 70-80 m Sand, Ton, Schluff und Braunkohle erwartet. Der Grundwasserspiegel liegt dabei bei etwa 10 m.

Unter Hinzunahme von Richtwerten aus der VDI-Richtlinie 4640 Blatt 1 wird bei Sondenlängen bis 65 m/75 m vertikaler Tiefe eine mittlere effektive Wärmeleitfähigkeit von 2,2 W/(mK) und eine volumetrische Wärmekapazität von ca. 2,387 MJ/(m³K) erwartet. Aufgrund der Heterogenität des Erdreichs und insbesondere des Grundwasserleiters können

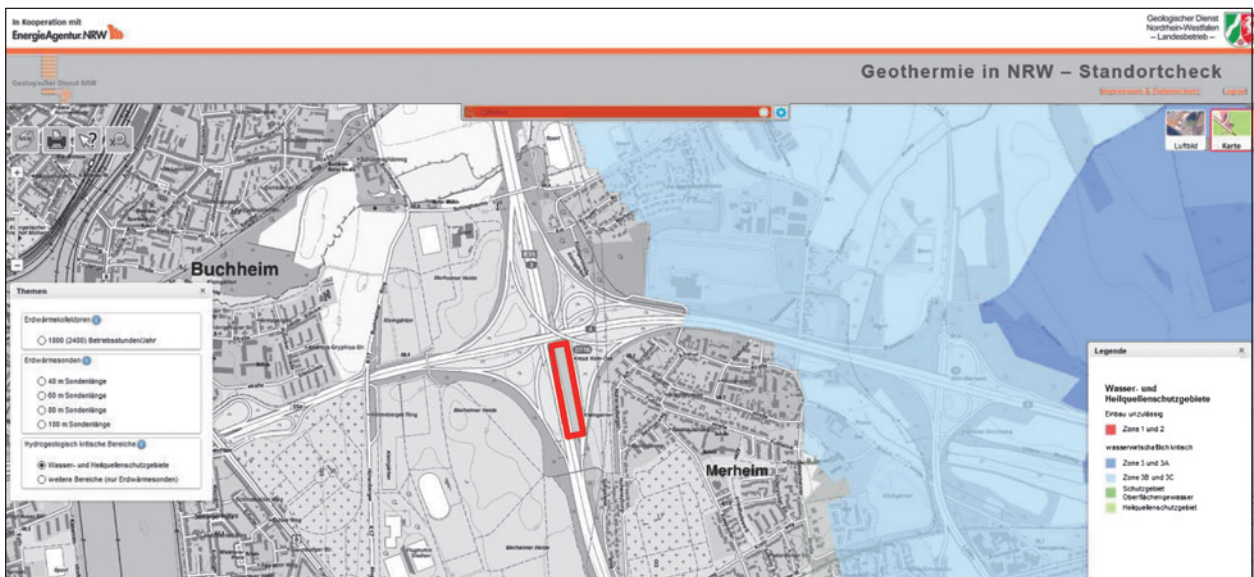


Bild 26: Hydrologische Bewertung am Autobahnkreuz Köln-Ost, Quelle: Geologischer Dienst NRW

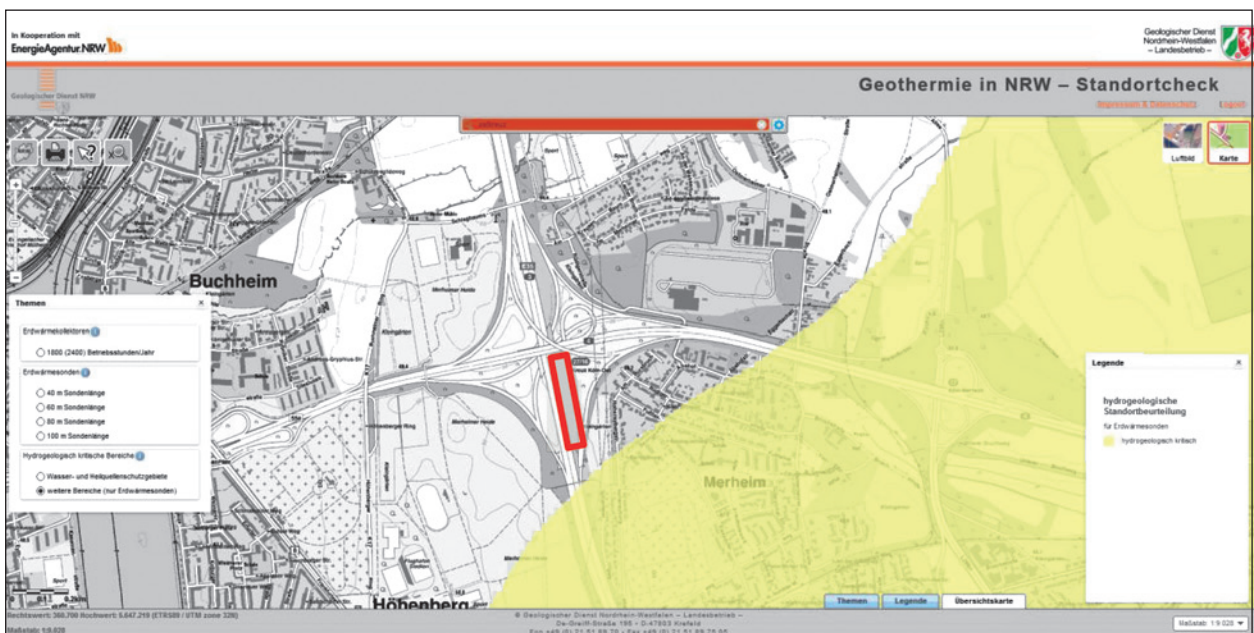


Bild 27: Bewertung Wasserschutzgebiete am Autobahnkreuz Köln-Ost, Quelle: Geologischer Dienst NRW

die Eigenschaften am endgültigen Bohrpunkt abweichen. Um valide Daten für die jeweiligen Bohrpunkte zu erlangen, muss ein sogenannter Thermal Response Test (TRT) zur Ermittlung einer mittleren Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs oder alternativ ein Enhanced Thermal Response Test (ETRT) zur Ermittlung eines Wärmeleitfähigkeitsprofils durchgeführt werden. Ab einer Gesamtleistung von 30 kW der Anlage ist mindestens ein TRT laut VDI-Richtlinie 4640 Blatt 2 verpflichtend. Für dieses Projekt empfehlen wir die Durchführung eines ETRT, da dieser, im Gegensatz zum TRT, die thermischen Bodenparameter (Wärmeleitfähigkeit und thermischer Bohr-

lochwiderstand) für jede Tiefe über die ganze Länge der Sonde misst und das verwendete Glasfaserkabel im Boden verbleiben kann, um dann über die Laufzeit des Versuchs für Zwecke des Monitorings weiterhin zur Verfügung steht.

Für die Bohrungen selbst steht der hintere Abschnitt des Versuchsfeldes (DU-Z3) zur Verfügung, sodass der Platz ausreichend bemessen ist, um Bohrungen abzutiefen. Von einer Platzierung der Bohrungen unterhalb der Versuchsfelder ist hier abzuraten, da die Messergebnisse nicht durch mögliche Änderungen des Temperaturfeldes unterhalb der Straße gestört werden sollen.

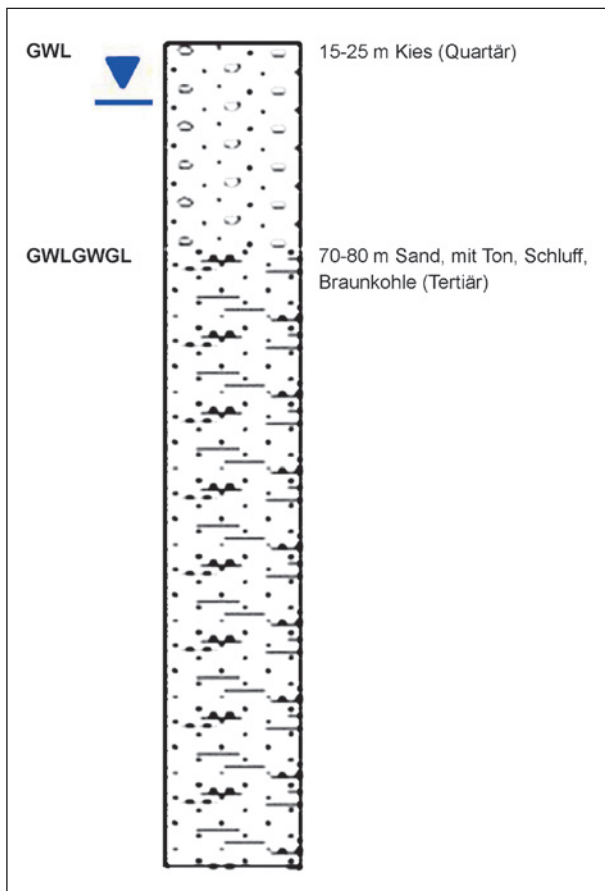


Bild 28: Zu erwartendes geologisches Schichtenprofil,
Quelle: Geologischer Dienst NRW

Für den Systemaufbau steht ebenfalls der nicht temperierte Straßenabschnitt neben den Versuchsfeldern zur Verfügung.

Die Stromversorgung kann über den örtlichen Verteilerkasten sichergestellt werden. Leerrohre entlang der Versuchsstrecke sind vorhanden bzw. können nachträglich problemlos gezogen werden.

Anschließend wird auf Grundlage der Analyse der standortspezifischen Gegebenheiten das Testfeld kartiert.

4.2 Anforderungsdefinitionen

Aus dem vorgegebenen Lastenheft und den Zielen dieses Projektes lassen sich konkrete Anforderungen an das Gesamtsystem ableiten. Auf Basis der durchgeführten Simulationen unter Einbeziehung der Umgebungsbedingungen am Standort des Testgeländes (vgl. Kapitel 4.3), ergeben sich die folgenden grundsätzlichen Anforderungen an die Konzeption des Gesamtsystems:

a) Leistungsaufnahme je Testfeld

Die Leistungsaufnahme je Testfeld wurde auf Basis einer Parametervariation abgeschätzt. Die maximale Leistungsaufnahme bewegt sich hierbei bei einer realistischen Vorlauftemperatur von 35 °C im Winterbetrieb in Bereichen bis zu 10 kW, während die maximale Leistungsabgabe im Sommerbetrieb bei ca. 11 kW liegt. Hierbei ist zu beachten, dass diese Werte zeitlich begrenzt auftreten.

b) Einsatz eines Pufferspeichers

Der Einsatz eines Pufferspeichers zur Minderung der Lastspitzen kann den Einsatz einer Wärmepumpe mit geringerer Leistungsfähigkeit ermöglichen und ist deshalb anzustreben.

c) Wärmepumpe

Das laut Leistungsbeschreibung geforderte Temperaturniveau (2 – 35 °C) erfordert den Anschluss einer Wärmepumpe an die Erdwärmesonde(n). Eine Heizleistung von 8 kW in Verbindung mit dem Pufferspeicher wird hier aufgrund der möglichen zeitlichen Verteilung der Speicherladung als ausreichend betrachtet.

Alle fünf Versuchsfelder sollen durch unabhängige Erdwärmesondensysteme bestehend aus Wärmepumpe, Pufferspeicher und Speichersonden versorgt werden. Die Felder werden in diesem Fall über separate Verteilerweichen an die jeweiligen Pufferspeicher angeschlossen (vgl. Kapitel 4.3).

4.3 Konzeption des Gesamtsystems

Das Ziel des Forschungsvorhabens bestand in der Entwicklung eines betriebsfähigen Systemkonzeptes für einen ganzjährigen Betrieb des Demonstrators auf dem duraBast-Testgelände. Aus Gründen der technischen Machbarkeit war eine möglichst einfache Konzeption anzustreben, die weitgehend auf Speziallösungen verzichtet, jedoch auch die für Versuchszwecke notwendige Flexibilität bereithält. Das finale Konzept des Gesamtsystems wurde anhand der notwendigen thermischen Lasten sowie Temperaturen bemessen.

Das projektierte Gesamtsystem besteht aus den temperierbaren Fahrbahnabschnitten inklusive des dazugehörigen hydraulischen Systems (Anschluss Straße, Zu- und Ableitungen, Ventilen, Umwälzpum-

pen) und Anschlussleitungen sowie fünf separaten Erdwärmepumpensystemen bestehend aus Wärmepumpen mit aktiver und passiver Kühlfunktion inkl. Erdwärmesonden, Heizkreisverteiler sowie -thermischen Pufferspeichern.

Bild 30 zeigt das Konzept für das Gesamtsystem je Einzelfeld. Um einen unabhängigen Betrieb aller Felder zu gewährleisten, sind die Felder über elektrisch regelbare Ventile an die Heizkreisverteiler der jeweiligen Erdwärmesondensysteme (EWS) angeschlossen. Die Pufferspeicher dienen hierbei der prozesstechnischen Entkopplung der Straßensegmente sowie der Erdwärmesondensysteme und bilden gleichzeitig die Schnittstelle zwischen diesen.

Die Pufferspeicher erlauben die Abfederung von Lastspitzen innerhalb vorgegebener Betriebszustände, wodurch die notwendige Betriebszeit des Erdwärmesondensystems bestehend aus Speichersonden und Wärmepumpe minimiert werden kann. Die Systemtechnik wird hierbei in zentralen modularen Containern auf dem Versuchsfeld zwischen Erdwärmesondenfeld und den temperierten Abschnitten eingebaut (vgl. Bild 29).

Zur Auslegung des Gesamtsystems der auf dem duraBAST-Testgelände zu erstellenden Anlagen wurde ein Prozesssimulationsmodell in der objektorientierten Simulationsumgebung Modelica erstellt. Das Modell erlaubt die volltransiente Simulation sämtlicher Prozesse im Bereich der verschiedenen Teilsysteme. Hierbei ist sowohl eine losgelöste Betrachtung der einzelnen Teilfelder als auch eine Analyse des Betriebs des Gesamtsystems möglich. Für jede Komponente wurden Teilmodelle erstellt, die in einem Systemmodell verschaltet wurden und die o. g. Einflussparameter aufweisen.

Das auf Basis der dynamischen Prozesssimulation entwickelte Systemkonzept erlaubt den Aufbau eines solchen Systems aus am Markt verfügbaren Standardkomponenten. Neben dem spezifischen Straßenbau kommen hierbei lediglich standardisier-

te Pufferspeicher, Verteiler, Wärmepumpen, Ventile, Umwälzpumpen und reguläre Regler zum Einsatz. Hierdurch erfordert der Aufbau des Systems keine projektspezifischen Anpassungen der Regelparameter o. Ä. Eine Optimierung des Systemverhaltens sollte im Rahmen des Versuchsbetriebs auf dem Testgelände erfolgen.

Da beide Teilsysteme (Straßensegmente, EWS) durch die Pufferspeicher entkoppelt sind, können beide Systeme unabhängig voneinander konfiguriert und optimiert werden. Gleichzeitig ergeben sich durch das Zusammenspiel der Komponenten und auf Basis der Kennfelder und üblicher Betriebsparameter von Erdwärmesondensystemen der jahreszeitliche Energiebedarf und die Betriebsdauer der Systemkomponenten.

Zur Auslegung und Dimensionierung der Komponenten wurde der Betrieb der Anlage mit aktiver Regelung und entsprechend der folgenden Einflussgrößen simuliert und ausgewertet:

- Wetterdaten: Test Referenz Jahr,
- Bodentemperatur: DWD,
- Regelparameter: (vgl. Kapitel 4.6).

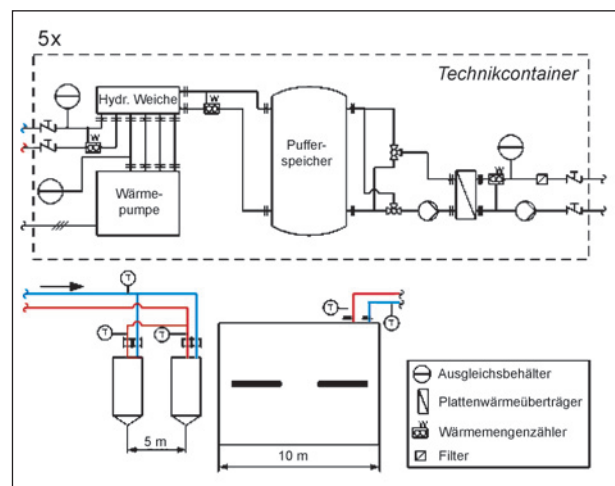


Bild 30: Konzept für das Gesamtsystem je Einzelfeld

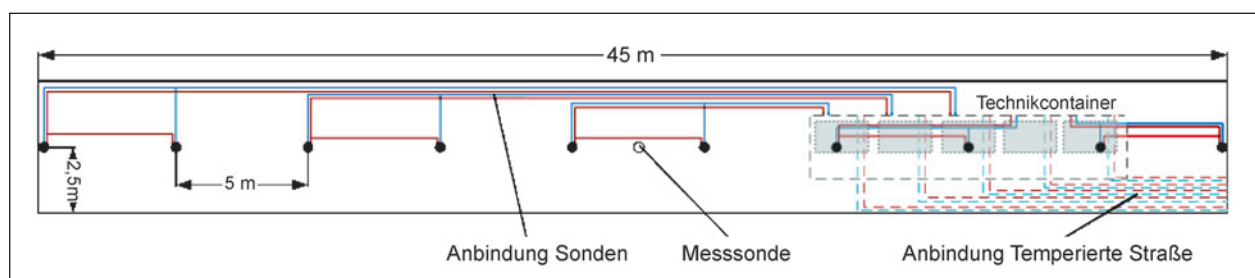


Bild 29: Anbindungsplan duraBAST

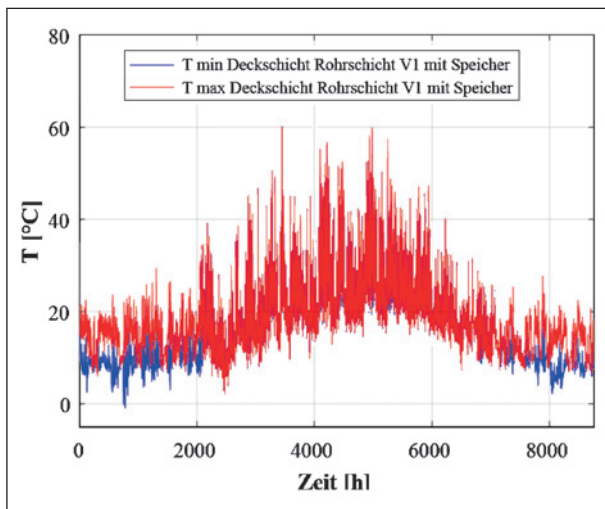


Bild 31: Minimale und maximale Deckschichttemperatur Straßensegment, Schicht mit Rohrregistern, Gesamtanlage

Im Rahmen einer Parametervariation wurde anschließend die Leistung des Erdwärmesondensystems variiert, wobei sich abschließend eine Leistung von 8 kW für den Heiz- und Kühlbetrieb als realistische Lösung herausstellte.

Das Simulationsmodell lieferte als zentrales Ergebnis neben den Temperaturverläufen für Straße und sämtliche Komponenten die benötigte Laufzeit des EWS sowie die für die Dimensionierung des Erdwärmesondensystems notwendige Daten. Im Folgenden werden die Ergebnisse beispielhaft analysiert:

Bild 31 zeigt ausgewählte Temperaturverläufe für das Gesamtsystem eines Straßensegmentes mit Rohrleitungen (Verlegemuster S2) bei Einsatz einer Wärmepumpe mit 8 kW Leistung.

Hierbei ist ersichtlich, dass das System grundsätzlich eine Einstellung der Straßen-Deckschichttemperaturen im Rahmen der Anforderungen des Lastenhefts erlaubt. Gleichwohl kommt es zu kurzzeitigen Temperaturspitzen.

Bild 32 zeigt die sich einstellende Temperatur des Pufferspeichers im Gesamtsystem. Hierbei wird der Betrieb innerhalb der gesetzten Betriebsintervalle im Sommer- und Winterbetrieb ersichtlich. Gleichzeitig können der Bild auch direkt die Betriebspunkte des EWS-Systems entnommen werden. Deutlich wird, dass die Betriebszeiten des EWS zu ca. 90 % in den Wintermonaten zu finden sind, während im Sommer die Laufzeiten des EWS sehr gering sind, was auch auf das relativ große zulässige Temperaturintervall zurückzuführen ist.

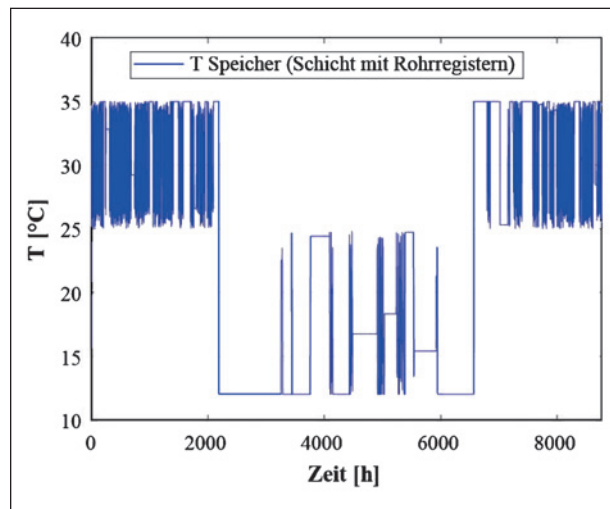


Bild 32: Speichertemperatur des Pufferspeichers, Schicht mit Rohrregistern, Gesamtanlage

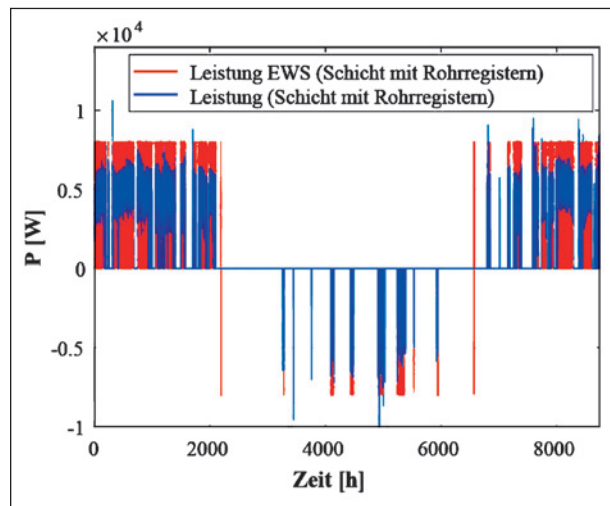


Bild 33: Vergleich der zeitlichen Leistungsprofile von Straßensegment und EWS, Schicht mit Rohrregistern, Gesamtanlage

Bild 33 zeigt vergleichend die Lastprofile des Straßensegmentes sowie des Erdwärmesondensystems. Auch hier werden der vergleichsweise große Heizbedarf im Vergleich zum Kühlbedarf sowie die resultierenden kurzen Betriebszeiten im Sommer deutlich. Zusammenfassend ergibt sich für diese Konfiguration eine Betriebsdauer der Wärmepumpe von ca. 1.500 h/a.

Bild 34 zeigt die ausgewählten Temperaturverläufe für die durchströmte Schicht. Hierbei wird ersichtlich, dass die Minimaltemperaturen im Vergleich zur Schicht mit Rohrregistern höher, die Maximaltemperaturen im Vergleich niedriger liegen. Somit zeigt die durchströmte Schicht eine zu erwartende bessere Leistung im Sinne der Anforderungen des Lastenhefts.

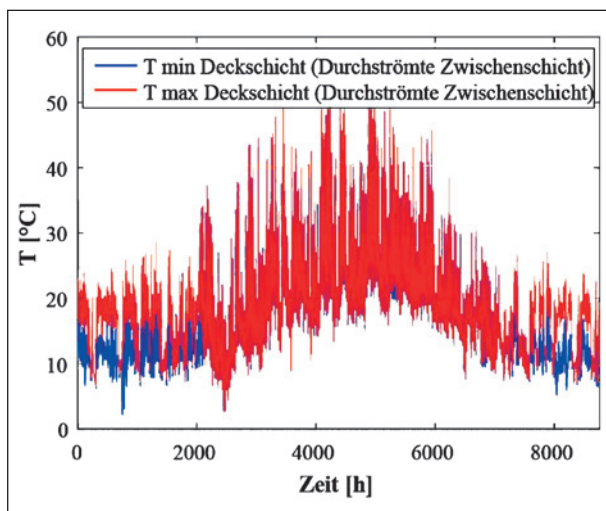


Bild 34: Minimale und maximale Deckschichttemperatur
Straßensegment, Durchströmte Zwischenschicht,
Gesamtanlage

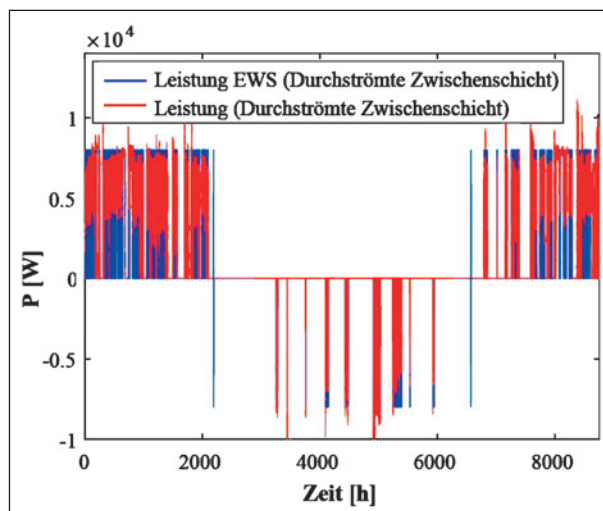


Bild 36: Vergleich der zeitlichen Leistungsprofile von Straßen-
segment und EWS, Durchströmte Zwischenschicht,
Gesamtanlage

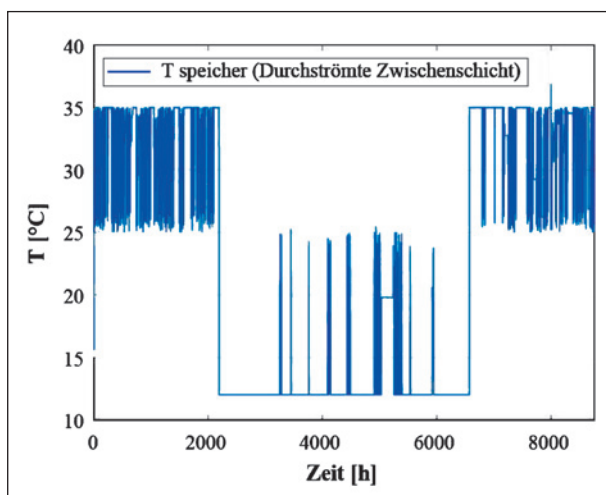


Bild 35: Speichertemperatur des Pufferspeichers, Durchström-
te Zwischenschicht, Gesamtanlage

Bei der Analyse der Speichertemperaturen der Gesamtanlage mit durchströmter Schicht zeigt sich in Bild 35 ein vergleichbares Profil wie bei der Schicht mit Rohrregistern. Die Speichertemperaturen werden vom EWS im zulässigen Temperaturintervall gehalten.

Ein interessanter Aspekt zeigt sich beim Vergleich der Leistungen des Straßensegments mit durchströmter Zwischenschicht sowie des zugehörigen Erdwärmesondensystems. Deutlich sichtbar sind hier Leistungspeaks des Straßensegments, die die Leistung der Wärmepumpe überschreiten. Die zusätzliche notwendige Energiemenge wird durch eine längere Betriebsdauer des EWS ausgeglichen (Bild 36).

Eine Absenkung der oberen Speichertemperatur wurde diskutiert, diese ist jedoch im Hinblick auf die Ergebnisse und die Ausnutzung der Betriebsstunden des EWS im Fall der durchströmten Schicht nicht realistisch umsetzbar, da sich hierdurch zwangsläufig die notwendigen Betriebsstunden im Sommer erhöhen würden.

Bei der Konzeption der Gesamtanlage wird ein intermittierender Betrieb der Wärmepumpe berücksichtigt. Aufgrund der somit nicht konstant einstellbaren Vorlauftemperatur für die Straßensegmente ist eine Abweichung zu den erstellten Kennfeldern im Betrieb zu erwarten, was durch die Prozesssimulation bestätigt wurde: Im Rahmen dieser Simulation wurde deutlich, dass es mit sinnvoll vertretbarem energetischem und baulichem Aufwand nicht möglich ist, sämtliche Temperaturspitzen vollständig zu eliminieren. Dies ist insbesondere durch die verhältnismäßig geringe Wärmeleitfähigkeit des Asphaltes bedingt. Insbesondere Lastspitzen im Sommer durch eine hohe solare Einstrahlung schlagen sich unmittelbar in einer kurzzeitigen Überschreitung der definierten Temperaturbereiche nieder. Insgesamt ist eine mittlere Absenkung der Oberflächentemperaturen im Betriebsintervall jedoch möglich. Eine Optimierung der Steuerparameter im Sinne einer prädiktiven Regelung (Aufheizung des Straßenkörpers bei sinkenden Umgebungstemperaturen) wäre ein möglicher Ansatz.

4.4 Lastenheft für das Erdwärmesondensystem

Die Auslegung des Erdwärmesondensystems beruht einerseits auf dem geologischen Profil und den standortspezifischen Randbedingungen sowie insbesondere auf dem notwendigen Wärmelastprofil und den technischen Daten der eingesetzten Wärmepumpe, die sich aus den Simulationsergebnissen ableiten. Primäres Ergebnis der Auslegung ist die Bestimmung des Sondenfeldes zur Versorgung der temperierten Versuchsfelder unter der Bedingung eines nachhaltigen Betriebs. Die Grundlagen dafür stellt die VDI-Richtlinie 4640 Blatt 2, die die Temperaturreaktion im Betrieb einschränkt und aus der zusätzlich hervorgeht, dass für die hier eingesetzten Speichersonden eine umfassende Berechnung durchgeführt werden muss. Die Grundlasttemperatur wurde hierbei auf 0 °C begrenzt.

Die aufgeführten Randbedingungen in Tabelle 6 und 7 sind je Feld anzunehmen.

Als Erdwärmesonde soll eine Speichersonde vom Typ geoKOAX[®] eingesetzt werden. Speichersonden weisen ein vielfach höheres Innenvolumen für die Wärmeträgerflüssigkeit (Sole) auf, was starke Schwankungen der Eintrittstemperatur in die Wärmepumpe bei zyklischem Betrieb mindert und damit die Effizienz der Wärmepumpe erhöht. Durch ihre höhere Effizienz gegenüber herkömmlichen Sondentypen mit kleinerem Innenvolumen können so geringere Bohrtiefen unter Einhaltung der Temperaturgrenzen gewährleistet werden. Darüber hinaus bietet das größere Solevolumen einen zuverlässigeren Betrieb während der passiven Kühlung oder Heizung (ohne Wärmepumpe), was als Variante zum Wärmepumpenbetrieb einen deutlichen Vorteil gegenüber herkömmlichen Sondensystemen innerhalb dieses Projektes bietet.

Die verpflichtende Simulation sowie die Auslegung für Speichersonden wird mit der Software geoSIM[®] durchgeführt, die die besonderen Eigenschaften der Speichersonde und speziell der geoKOAX[®] berücksichtigt.

Der Bohrdurchmesser mit 203 mm kann von vielen Bohrunternehmen problemlos gebohrt werden. Zur Bereitstellung der Speichersonden muss das Bohrunternehmen über einen nach DVS zertifizierten Schweißer verfügen, da die Speichersonden in Segmenten angeliefert und vor Ort im Heizelementstumpfschweißverfahren verbunden werden müssen. Pro Versuchsfeld wird eine Systemeinheit vor-

	Heizbetrieb	Kühlbetrieb
Leistung WP [kW]	8	8
Energiemenge [MWh]	13	0,992

Tab. 6: Randbedingungen von Feldern I

	Heizbetrieb	Kühlbetrieb
Januar [%]	24,5	
Februar [%]	22,1	
März [%]	12,7	
April [%]		2,3
Mai [%]		9,1
Juni [%]		16,1
Juli [%]		38,9
August [%]		29,9
September [%]		3,7
Oktober [%]	3,4	
November [%]	13,7	
Dezember [%]	23,6	
Eff. Wärmeleitfähigkeit Erdreich [W/(mK)]	2,2	
Eff. Vol. Wärmekapazität Erdreich [MJ/(kgK)]	2,387	
Jahresmitteltemperatur [°C]	10	
Erdwärmesondentyp	geoKOAX 140	
Bohrungsdurchmesser [mm]	203	
Simulationszeitraum [a]	10 (nach Rücksprache mit BAST)	

Tab. 7: Randbedingungen von Feldern II

gesehen, wofür jeweils zwei Speichersonden á 68 m (aktuelle Abschätzung, kann sich in Abhängigkeit der realen Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs nach Durchführung des ETRTs ändern) benötigt werden. Die insgesamt 10 Sonden werden in einer Linie mit einem Abstand von 5 m entlang des freien Straßenabschnitts abgeteuft und jeweils zwei Sonden im Tichelmann-Prinzip verschaltet, sodass auf einen zusätzlichen Verteiler verzichtet werden kann. Die Anbindung mittels DN 40 Rohrleitungen aus PE 100 an das Systemhaus erfolgt durch das Bohrunternehmen bis zur Innenwand.

Zur Abdichtung und Verpressung der Sonden im Erdreich ist die Verwendung von hochwertigem Verpressmaterial mit hoher Wärmeleitfähigkeit und nachgewiesener Frost-Tau-Wechsel-Beständigkeit obligatorisch. Die eingesetzte Sole im Erdwärmesondenkreislauf muss den Anforderungen des Herstellers der Wärmepumpe genügen.

4.5 Konzept zur Wärmespeicherung

Die Möglichkeit, Wärmeenergie bei entsprechenden Randbedingungen der Fahrbahn zu entziehen und im Bedarfsfall der Beheizung der Fahrbahn wieder zur Verfügung zu stellen, soll in diesem Konzept aufgegriffen und mittels der Erdwärmesonden umgesetzt werden. Im Heizbetrieb (Winter) stellt das Erdreich dabei eine Wärmequelle dar, um eine Wärmepumpe mit der notwendigen Energie zu versorgen. Die Wärmespeicherung im Kühlbetrieb (Sommer) stellt im Wesentlichen eine Regeneration des im Winter abgekühlten Erdreichs dar. Der hybride Betrieb ermöglicht somit eine vergleichbar hohe Systemeffizienz, Temperaturstabilität über die Betriebszeit sowie reduzierte Kosten für die Anlage.

Ein möglicher Wärmetransport durch den voraussichtlich vorliegenden Grundwasserleiter soll hier durch eine detaillierte Analyse der tiefenabhängigen Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs mittels ETRT erfolgen. Eine detaillierte Untersuchung der Grundwasserströmung wird hier nicht als notwendig angesehen, da die Untersuchung der Grundwasserströmungscharakteristik und dessen Auswirkungen auf das Erdwärmesondenfeld ein eigenes Forschungsziel darstellt und nicht Zielsetzung dieses Projektes sein kann. Die Untersuchung von Grundwasserströmungen ist zudem bei Erdwärmeprojekten dieser Größenordnung unüblich. Bei Grundwasserströmungen ist darüber hinaus keine effektive Wärmespeicherung möglich, jedoch wird auch die Regeneration beschleunigt, was insgesamt die langfristige Effizienz des Sondenfeldes gewährleistet und damit einen vergleichbaren Effekt hat.

Die Auslegung dieses hybriden Betriebs erfolgt ebenfalls mit der Software geoSIM® durch Vorgabe entsprechender Heiz- und Kühllasten in den Heiz- und Kühlperioden.

4.6 Regelkonzept Gesamtsystem

Basierend auf den durchgeführten Berechnungen und Erfahrungen vergangener Projekte wurde eine robuste Regelstrategie entwickelt, die primär die Temperierung im Temperaturfenster laut Lastenheft gewährleistet. Der Fokus liegt hierbei zunächst auf einem stabilen Betrieb der Anlage ohne notwendige Optimierungen. Dabei wurde die thermische Trägheit der Schichten berücksichtigt, indem durch die Kombination aus gemessenen Wetterdaten (Temperatur, Feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit) und Er-

wartungswerten die Temperierung der Straße zeitlich aufgelöst mittels des Modells analysiert wurde.

Als Regelgrößen stehen im Konzept die jeweiligen Volumenströme sowie Vorlauftemperaturen der einzelnen Versuchsfelder zur Verfügung. Die Steuerung erfolgt durch elektronisch geregelte Pumpen und Ventile sowie durch die Zuschaltung der Wärmepumpe (im Bedarfsfall).

Aufbauend auf den durch die Fahrbahn geforderten Regelgrößen wurden die Soll-Temperaturen und -Volumenströme für das Gesamtsystem definiert. Darüber hinaus wurde auf Basis des vorliegenden Betriebszustands (Sommer-/Winterbetrieb) die Systemverschaltung mittels der eingesetzten Regelventile definiert.

Das entwickelte Regelungskonzept für den Demonstrator besteht aus zwei getrennten Regelkreisen, die aufgrund der Anforderungen an eine reale Umsetzung gewählt wurden (s. o.):

- Da in einer realen Anwendung - im Gegensatz zum Einsatz auf dem Demonstrationsgelände - eine direkte Messung der Oberflächentemperaturen über zusätzliche Messtechnik nicht möglich ist, ist die im Simulationsmodell umgesetzte und für die Umsetzung vorgesehene direkte Regelung der Straßenfelder an die in der DIN vorgegebene Regelung von Fußbodenheizungen angelehnt, wobei die relevante Führungsgröße die messbare Außentemperatur ist. Die temperierten Straßenfelder werden ganzjährig mit einem konstanten Massenstrom von 0,1 kg/s Wasser je Segment beaufschlagt, die hierzu benötigte Pumpenleistung ist vernachlässigbar. Je nach Verschaltung wird eine Umwälzpumpe je Testfeld benötigt. In Abhängigkeit der Außentemperatur (im Modell: Test Referenz Jahre) wird über eine Heizkennlinie die Vorlauftemperatur mittels eines Dreiwege-Ventils eingestellt. Hierbei ist zwischen Sommer- und Winterbetrieb zu unterscheiden. Im Sommerbetrieb (April-September) steht vor allem die Kühlung der Straßenoberfläche im Vordergrund. Bei einer Außentemperatur unter 25 °C erfolgt ein direkter Kurzschluss zwischen Vor- und Rücklauf der Straße unter Umgehung des Speichers, da signifikante Aufheizung der Straße über einen längerfristigen Zeitraum nicht zu erwarten ist. Steigt die Außentemperatur auf über 25 °C, werden Vor- und Rücklauf über einen Plattenwärmeübertrager mit dem Pufferspeicher verbunden, wodurch sich eine Veränderung der Vorlauftemperaturen

ergibt. Im Winterbetrieb wird bei einer Temperatur unterhalb von 6 °C der komplette Massenstrom durch den Speicher geleitet, während bei höheren Temperaturen ebenfalls eine Umgehung des Speichers erfolgt.

- Die zweite Regelstrecke beeinflusst über die Aktivierung des Erdwärmesondensystems die Speichertemperaturen. Auch hierbei ist zwischen Sommer- und Winterbetrieb zu unterscheiden. Im Sommerbetrieb beträgt der Solltemperaturbereich des Pufferspeichers 12 bis 25 °C (Absenkung der Speichertemperaturen über Langzeitspeicherung im umgebenden Erdreich). Im Gegensatz dazu liegt dieser im Winterbetrieb zwischen 25 – 35 °C (regulärer Betrieb des Erdwärmesondensystems). Bei einer Unter- bzw. Überschreitung der Intervallgrenzen wird das EWS aktiviert, um die Speichertemperaturen einzuregeln.

Das Anlagenkonzept ermöglicht zudem grundsätzlich die Nutzung passiver Heizung und Kühlung unter Umgehung der Wärmepumpe, um eine hohe Flexibilität hinsichtlich möglicher Forschungsarbeiten zu gewährleisten. Obwohl zum gegenwärtigen Stand eine passive Temperierung ausschließlich mittels Erdwärmesonden nicht die geforderten Grenztemperaturen in der Straße einhalten kann, ist eine Untersuchung unter realen Bedingungen speziell hinsichtlich der Anlagen- und Betriebskosten interessant und sollte verfolgt werden. Insbesondere eine passive Kühlung im Sommerbetrieb scheint erfolgsversprechend und würde die Wärmepumpenbetriebszeiten und damit den Bedarf an elektrischer Energie deutlich senken. Eine entsprechende Untersuchung wird in kommenden Forschungsprojekten empfohlen.

4.7 Genehmigungskonzept

4.7.1 Wärmeträgermedium

Für den Wärmetransport in die Fahrbahn ist ein Wärmeträgermedium erforderlich. Die Auswertung bestehender Erfahrungen führt zu der Empfehlung, Wasser für den Wärmetransport einzusetzen (vgl. Kapitel 3.1.2).

Die Rohrregister bilden einen geschlossenen Kreislauf für die Temperierung der Fahrbahn. Dieser Kreislauf wird über einen Wärmetauscher an das Erdwärmesondensystem angeschlossen. Daher

kommt das Wärmeträgermedium nicht mit anderen Kreisläufen oder der Umgebung in Verbindung. Darüber hinaus soll reines Wasser als Wärmeträgerflüssigkeit eingesetzt werden, sodass kein Genehmigungsbedarf gesehen wird.

Aus energetischen Gründen sind auch bei der durchströmten Zwischenschicht die Anschlüsse so auszubilden, dass keine Verluste auftreten. Der Kreislauf wird ebenfalls über einen Wärmetauscher an das Erdwärmesondensystem angeschlossen, sodass das Wärmeträgermedium nicht mit anderen Kreisläufen oder der Umgebung in Verbindung kommt. Auch für die durchströmte Zwischenschicht wird reines Wasser als Wärmeträgerflüssigkeit eingesetzt. Das PU-Bindemittel Elastopave 6551/102 wird durch den Bindemittelhersteller regelmäßigen Kontrollen hinsichtlich aller umwelt- und gesundheitsrelevanter Aspekte unterzogen. Weiterhin wurde die Leistung des vorstehenden Produktes gemäß Verordnung (EU) Nr. 305/2011 zertifiziert (CE-Zertifizierung Nr. DE27-0005-01-CPR-16, siehe Anhang). Daher wird auch für diese Systemvariante kein Genehmigungsbedarf gesehen.

4.7.2 Einsatz der Erdwärmespeichersonden

Für die Gewinnung sowie Speicherung von Wärme sollen Erdwärmespeichersonden eingesetzt werden, wobei eine Einbautiefe von 100 m Tiefe ausreichen soll. Vor dem Abteufen der Erdwärmesonden muss eine Bohrgenehmigung vorliegen, die die Untere Wasserbehörde ausstellt. Diese wird in der Regel vom Bohrunternehmen beantragt. Ab 100 m Tiefe wäre zusätzlich eine bergrechtliche Genehmigung einzuholen, was hier durch den Einsatz von Erdwärmespeichersonden jedoch vermieden werden kann. Letztere wird zum gegenwärtigen Stand des Projektes jedoch nicht benötigt, da die Sondenlängen deutlich unterhalb von 100 m liegen werden. Für die Erstellung der Bohrgenehmigung ist – bei einer Systemleistung von mehr als 30 kW – die Durchführung eines Thermal Response Tests nach VDI-Richtlinie 4640 Blatt 2 vorgeschrieben.

Bei dem vorgesehenen Sondensystem handelt es sich um einen geschlossenen Kreislauf, der kein Grundwasser entnimmt oder rückführt. Trotzdem kann es bei dem vorgesehenen Speichersystem im Rahmen der VDI 4640-Richtlinie zu einer Temperaturveränderung im Boden und Grundwasser kommen. Die VDI-Richtlinie sichert jedoch ab, dass die thermischen Auswirkungen auf den Untergrund auf

ein Minimum beschränkt werden. Die thermischen Entwicklungen werden durch ein laufendes Monitoring der Anlage gemessen und kontrolliert. Die Erkenntnisse aus diesen Daten helfen, die Auslegung der in Überlegung stehenden und zukünftiger Anlagen zu optimieren.

5 Nachweis der Wirkungsweise

5.1 Datenerfassung und Monitoring des Gesamtsystems

EWS-System, Straßensegment

Für die verschiedenen Forschungsarbeiten, die mit der Versuchsanlage durchgeführt werden, sollen Fahrbahnaufbau, Erdwärmesonden und Anschlüsse mit Sensoren ausgestattet und die Messdaten in einem gemeinsamen System zusammengeführt werden.

Fahrbahnaufbau, Erdwärmesonden und Anschlüsse sollen mit Sensoren ausgestattet werden, damit ein umfassendes Monitoring der Anlage und wissenschaftliche Auswertungen möglich sind. Die Daten sind in einem geeigneten Softwaresystem zu sammeln, zu filtern, anzuzeigen, zu exportieren und zu archivieren. Die Bedienung und Anzeige soll im Betriebsgebäude des duraBAST-Testgeländes erfolgen. Es ist zu empfehlen die Messung der Schichttemperaturen mithilfe von Typ K-Thermoelementen durchzuführen, da bereits durch andere

Forschungsprojekte belegt wurde, dass diese hinsichtlich ihrer Funktionsfähigkeit für diesen Verwendungszweck ausreichend geeignet sind. Für die Datenerfassung sollte aus technischen und betriebswirtschaftlichen Aspekten, abgestimmt auf die Typ K-Thermoelemente, 8-Kanal-USB-Datenerfassungsmodulare der Firma Omega verwendet werden, die die ausgewerteten Daten an einen Mess-PC weiterleiten.

Im Einzelnen werden folgende Sensoren (Tabelle 8) benötigt, wobei die Auflistung für Sensoren, die bereits für vergleichbare Projekte verwendet wurden, als Auszug anzusehen ist.

Die Typ K-Thermoelemente entsprechen der Genauigkeitsklasse 1 und können Temperaturen in einem Bereich von -40 °C bis $+375\text{ °C}$ messen. Sie haben eine maximale Ungenauigkeit von $\pm 1,5\text{ °C}$, der sich jedoch auf den gesamten Temperaturbereich bezieht.

An jedem Feld müssen die Sensoren an eine Technikbox angeschlossen werden und von dort mit einer Datenleitung an den Systemcontainer weitergeleitet werden (pro Feld eine Strom- und eine Datenleitung zum Systemcontainer).

Idealerweise sollen sich die Sensoren in der Mitte der entsprechenden Schicht befinden. Dazu muss der Einbau der Schichten lagenweise erfolgen. Da dies technisch jedoch schwierig zu realisieren ist, kann sich die Lage der Sensoren hin zur Oberkante der darunterliegenden Schicht verschieben.

Fahrbahnfläche	Wärmebildkamera pro Feld; insgesamt 5 Wärmebildkameras mit Mast inklusive Fundament (Aufstellungsort im Grünstreifen zwischen Fahrbahn und Lärmschutzwand) und Ausrichtung auf die Fahrbahnoberfläche Temperaturen (z. B. Typ K-Thermoelemente) an der Fahrbahnoberfläche, je Feld 2 Stellen; insgesamt 10 Temperatursensoren	Bedarfsposition, ggf. nur Integration
Fahrbahnaufbau mit Rohrregister	Temperaturen (z. B. Typ K-Thermoelemente) im Fahrbahnaufbau, je Feld 2 Doppelstellen mit 5 Sensoren; insgesamt 20 Temperatursensoren	
Fahrbahnaufbau mit PU-Schichten	Temperaturen (z. B. Typ K-Thermoelemente) im Fahrbahnaufbau, je Feld 2 Stellen mit 3 Sensoren; insgesamt 18 Temperatursensoren	
Zu-/Abläufe Fahrbahnfelder	Temperatur (z. B. Typ K-Thermoelemente), je ein Sensor an Zu- und Ablauf der fünf Fahrbahnfeldern; insgesamt 10 Temperatursensoren	Bedarfsposition, ggf. nur Integration
Zu-/Abläufe Erdwärmesonden	Temperatur (z. B. Typ K-Thermoelemente), Zu- (1x) und Ablauf (2x) der Erdwärmesonden; insgesamt 15 Temperatursensoren (3 je System)	Bedarfsposition, ggf. nur Integration
Technikcontainer	Drucksensoren oder Differenzdrucksensoren zwischen Zu- und Ablauf der Straßenfelder und Erdwärmesonden; insgesamt 20 Drucksensoren oder 10 Differenzdrucksensoren Wärmemengenzähler im Solekreis und hydraulischen Kreis der Straßenfelder. Optional: Wärmemengenzähler zwischen Wärmepumpe und Speicher (wird ggf. bereits durch Wärmepumpe bereitgestellt); insgesamt 15 (plus 5 optionale) Wärmemengenzähler	

Tab. 8: Benötigte Sensorik

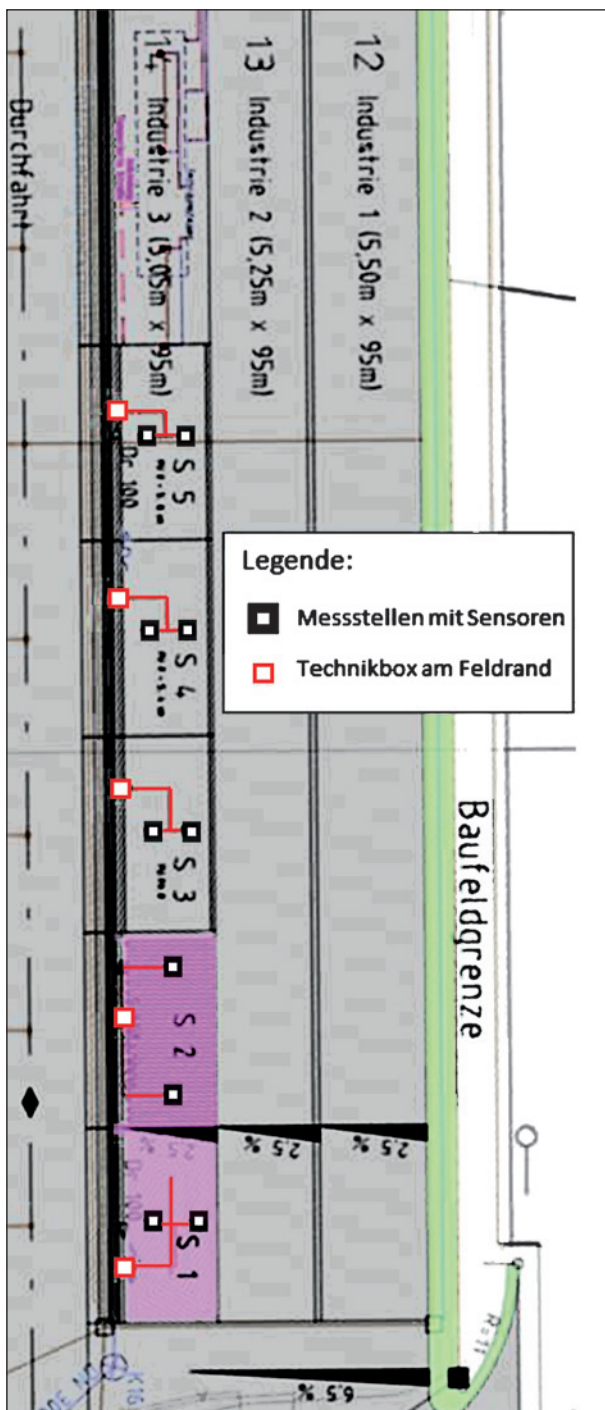


Bild 37: Lage der Sensoren im Grundriss

In Bild 37 ist die Lage der Sensoren im Grundriss zu sehen. Es werden zwei Sensorbereiche pro Feld bei PU-Schichten und je zwei Sensorbereiche mit Doppelausstattung bei Schichten mit Rohrregistern installiert. In Bild 38 bis Bild 41 ist die Lage der Sensoren in den jeweiligen Sensorbereichen im Aufriss dargestellt.

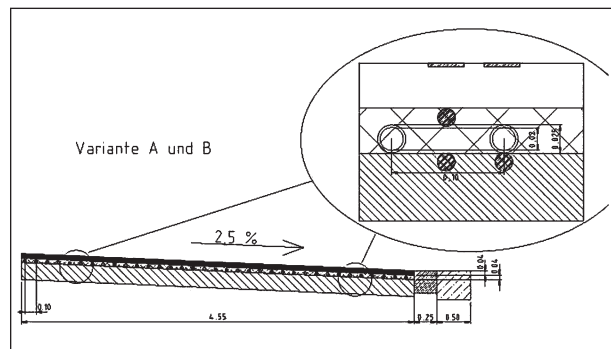


Bild 38: Sensorausstattung Felder S1 und S2

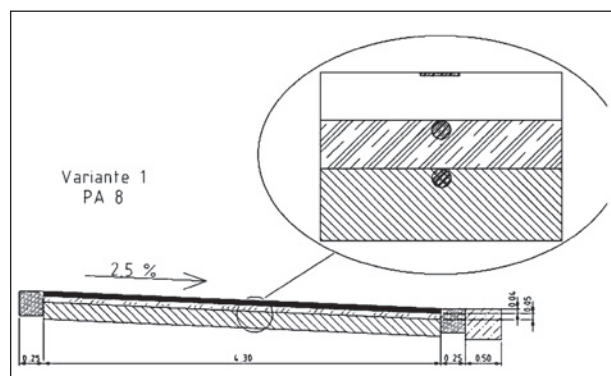


Bild 39: Sensorausstattung Feld S3

Felder mit Rohrregistern (Felder S1 und S2) erhalten Typ K-Thermoelemente-Sensoren an der Fahrbahnoberfläche sowie an der Oberkante der Binder- und Tragschicht; 2 x 2 Stellen (mittig zwischen zwei Rohren sowie genau im Schnitt der Rohre, dann aber ohne den Sensor in der Rohrregister-schicht) (Bild 38).

Zusätzlich soll in jedem Versuchsfeld mit Rohrregister ein Typ K-Thermoelement auf das Rohr an zwei verschiedene Stellen geklebt werden, um den Temperaturverlauf am Rohr zu verfolgen.

Felder mit durchströmten PU-Schichten (Felder S3 bis S5) erhalten Typ K-Thermoelemente-Sensoren an der Fahrbahnoberfläche sowie in der Oberkante der durchströmten Schicht und Oberkante der Tragschicht; 2 Stellen pro Feld (oberes Drittel, unteres Drittel in Querrichtung mittig im Feld) (Bild 39 bis Bild 40).

Zusätzlich sind die Daten zu den o. g. Parametern in einem geeigneten Softwaresystem zusammenzuführen. Auswertung, Export und Archivierung sowie Visualisierung erfolgen ggf. im Betriebsgebäude.

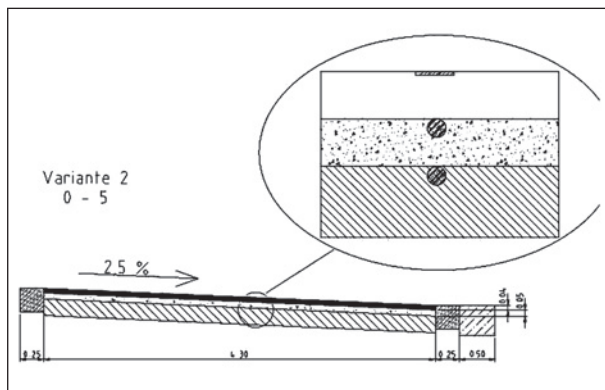


Bild 40: Sensorausstattung Feld S4

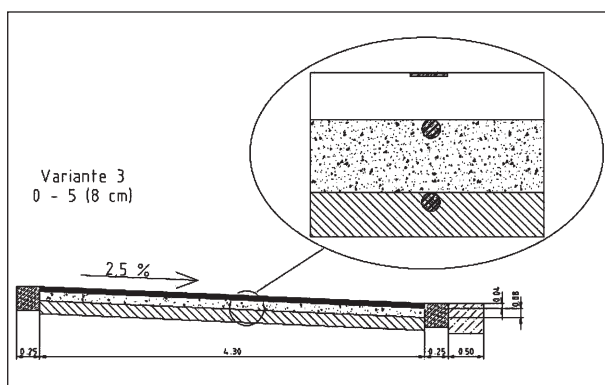


Bild 41: Sensorausstattung Feld S5

Umgebungsbedingungen Luft-/Bodentemperatur, Luftfeuchtigkeit, Niederschläge (vgl. Wetterstation)

Sowohl für die Steuerung der Temperierungsanlage als auch für die wissenschaftliche Auswertung der Energiebilanzen ist eine Wetterstation in der Nähe der Anlage erforderlich, hierbei müssen folgende Anforderungen erfüllt werden:

- Thermometerhütte
 1. Standort inmitten der Rasenfläche,
 2. Frei von Erschütterungsquellen,
 3. Türöffnung in Richtung Nord,
 4. Hüttenkasten so hoch, dass sich die Messfühler in exakt 2 m Höhe befinden,
 5. Büsche und Bäume dürfen durch ihr Wachstum nicht die Messgeräte beeinträchtigen.
- Erdbodenmessfeld
 1. Entfernung von kleiner gleich 2,5 m südlich der Thermometerhütte. Bei Platzmangel darf

es auch östlich oder westlich angelegt werden.

2. Bei konventioneller Messung hat es eine Größe von 2 x 3,8 m und bei automatischer Messung von 2 x 2,5 m. Es soll aus natürlich gewachsenem (nicht aufgeschüttetem) Boden bestehen.
3. Die Fläche ist von Bewuchs freizuhalten; abgelagerte Niederschläge dürfen nicht beseitigt werden.
4. Die Erdbodenthermometer werden von Ost nach West fortschreitend so in den Boden eingebracht, dass sich die Messfühler in Tiefen von 5, 10, 20, 50 und 100 cm befinden. Der Abstand zwischen den Thermometern in 5 cm und 10 cm sollte 10 cm, zwischen den Thermometern in 20 cm, 50 cm und 100 cm sollte 50 cm sein, zum Flächenrand sollte 1 m eingehalten werden nach Süden.
5. Für das Minimumthermometer am Erdboden dient als Geräteträger ein Metallstab auf dem die Halterung für das Thermometer stufenlos verschoben werden kann. Der Stab hat eine Länge von 50 cm, an Stationen > 500 m ü. NN wegen der zu erwartenden größeren Schneehöhen eine Länge von 1 m. Er wird senkrecht in das Erdbodenmessfeld gesteckt und die Halterung so eingestellt, dass das Thermometer sich waagrecht 5 cm über dem unbewachsenen Boden bzw. der Schneedecke befindet. Der Abstand zu den Erdbodenthermometern soll 50 cm betragen.

Niederschlagsmessgerät

Abstand zu Hindernissen oder anderen Sensoren, sollen mindestens der 2-fachen, im Idealfall der 4-fachen Hindernis-/Sensorhöhe entsprechen.

Zu Hindernissen oder Sensoren, die niedriger sind als die Auffanghöhe, soll die Entfernung des Niederschlagsmessers mindestens 2 m betragen. Die Aufstellung erfolgt auf einer ebenen, mit Gras bewachsenen Fläche, ggf. auf einer Kiesfläche, aber nicht auf Dächern oder Terrassen.

Schneeverwehungen dürfen das Messgerät auf keinen Fall erreichen.

Der Niederschlagsmesser wird an einem senkrechten Pfahl befestigt. Der am Pfahl befestigte Sensor soll nach Norden zeigen. Im Normalfall ragt der

Pfahl 90 cm aus dem Boden, die Auffangfläche befindet sich in exakt 1 m Höhe.

Bei einer Stationshöhe von > 500 m ü. NN beträgt die Höhe der Auffangfläche 1,5 m, bei einer Stationshöhe von > 800 m ü. NN 2 m über dem Grund.

Windmesser

Windgeschwindigkeits- und Windrichtungssensor wird auf einem freistehenden senkrechten Mast in 10 m oder 12 m Höhe über Grund montiert. Kippmaste sind auch erlaubt.

Hindernisse sollen mindestens 10-mal so weit entfernt sein, wie sie den Windsensor überragen.

Eine Wetterstation wird auf dem duraBASt-Testgelände eingerichtet. Eine Integration der Daten in das vorliegende Steuerungs- und Monitoringsystem ist voraussichtlich möglich. Daher kann in der Ausschreibung auf eine eigene Wetterstation für die Versuchsfelder der temperierten Straße verzichtet werden.

5.2 Visualisierung

Die Visualisierung des jeweiligen Straßenaufbaus mit Temperierung soll über Displays erfolgen. Dazu werden die maßgeblichen Parameter zur Veranschaulichung der Funktionalität der Temperierung der konzipierten und zusammengestellten Infrastruktur und des Erdwärmesondensystems auf diesen dargestellt.

Wie bereits in Kapitel 5.1 beschrieben wird der Fahrbahnaufbau, die Erdwärmesonden und die Anschlüsse mit Sensoren ausgestattet, damit ein umfassendes Monitoring der Anlage und eine wissenschaftliche Auswertung möglich sind. Dazu werden die gemessenen Daten in einem geeigneten Softwaresystem zusammengeführt, gefiltert, gespeichert und auf Displays angezeigt. Vorort erfolgt die Visualisierung entweder auf einem Mess-PC im Technikcontainer oder im Betriebsgebäude des duraBASt-Testgeländes.

Des Weiteren werden die Informationen so aufgearbeitet, dass zur Visualisierung der digital verfügbaren Daten sowohl eine Grafikagentur zur professionellen Darstellung der gegebenen Daten als auch ein auf Datenauswertung und Visualisierung spezialisiertes Unternehmen innerhalb einer Ausschreibung adressiert werden kann.

5.3 Datenspeicherung

Zur Datenerfassung und Zwischenspeicherung der Daten wird an jedem Versuchsfeld eine Technikbox installiert von der aus die Daten zum Messcontainer weitergeleitet werden. Im Messcontainer erfolgt anschließend die Umwandlung und Speicherung der Versuchsdaten und die Übertragung in eine Datenbank für spätere Analysen mithilfe von Mess-PCs mit ausreichender Leistung. Die Datenaufzeichnung aller gemessenen Parameter erfolgt kontinuierlich.

6 Zusammenfassung und Fazit

Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens „Temperierte Straße – Untersuchungen zur Realisation eines Demonstrators auf dem duraBASt-Testgelände“, ist die Entwicklung von einem Konzept eines Straßentemperierungssystems in unterschiedlichen Versuchsfeldern mit Definition und Modellierung aller Komponenten, um daraus in Zukunft eine hierzu mögliche Kontrollmethode ableiten zu können.

Zur Betrachtung des Konstruktionsmodells der Rohrregistervarianten wurden die Ergebnisse des Projekts „Temperierte Straße – Machbarkeitsstudie“ (FE-Nr. 09.0174/2011/HRB) zur Hilfe genommen. Dieses Projekt widmete sich der Untersuchung jeglicher Aspekte der Temperierung einer Straße mittels Rohrregisternsystemen.

Für die Bestimmung der Parameter der Konstruktion der PU-gebundenen Zwischenschichten eines Straßenaufbaus waren Kenntnisse aus vorläufigen Studien, sowie experimentelle Erfahrungswerte ausgewerteter Praxistests behilflich. Die Abdichtung zweier Schichten, die Ein- und Ausflussmethode des Wassers, sowie die Korngrößenverteilung wurden geprüft und konkretisiert.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein tragfähiges Systemkonzept für die Temperierung der Testfelder mittels Simulationsrechnungen ausgelegt. Das zugehörige Regelkonzept zielt auf einen autonomen Betrieb ab und ermöglicht die Temperierung der Felder im Anforderungsbereich.

Die für die temperierten Straßenfelder notwendige Energie soll mit einem erdwärmebasierten Wärmepumpensystem bereitgestellt werden, wobei insge-

samt 10 Erdwärmesonden vom Typ geoKOAX® mit einer voraussichtlichen Länge von je 68 m eingesetzt werden sollen. Die örtlichen Gegebenheiten am Standort der duraBAST-Teststrecke lassen die Nutzung von Erdwärme nach gegenwärtigem Stand zu, sodass die Entnahme von Wärmeenergie im Winter und die Rückführung von Wärmeenergie im Sommer möglich ist.

Durch Sensoren im Gesamtsystem werden Daten ermittelt und an einen Mess-PC übermittelt. Die wissenschaftliche Auswertung und ein umfassendes Monitoring der Anlage erfolgt anschließend mithilfe von entsprechender Software.

Literatur

EICKER, T.:

Geothermische Temperierung von Brückenbelägen, Diplomarbeit am Zentrum für Geothermie und Zukunftsenergien, Fachhochschule Bochum, Bochum 2005

FE 07.0264/2012/ARB (2012):

Simulationsgestützte Entwicklung neuer Straßenbaustoffe und innovativer Herstellungs- und Einbautechnologien, FuE-Projekt, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)

FELDMANN, M.; MANGERLING, I.; STEINHÄUER, B.; DÖRING, B.; PAK, D.; BEUCHER, S.; KEMPER, D.; SCHARNIGG, K:

Vermeidung von Glatteisbildung auf Stahlbrücken. FE 15.0401/2004/ARB, im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach 2010

GOTTSCHALK, D.:

Geothermisches Brückenheizungssystem. In: Geothermische Energie; Heft 66, 01.2010, S. 32-34

HESS, R. (2012):

Einsatz von Geothermie im Winterdienst. In: Straße und Autobahn 05.2012, S. 305-310, Kirschbaum Verlag, Bonn

HESS, R.; JANSEN, D. (2013):

Die temperierte Straße. In: Straße und Autobahn 10.2013, S. 745-749, Kirschbaum Verlag, Bonn

HESS, R.; KRÖBER, V.; SCHULZ, T.; ABDULZAHRA, A.; WAGNER, A.; GRAFMÜLLER, H.; KARCHER, C.; KUBANEK, K.; ROOS, R.; BÜCHERL, M.; SCHABER, K.-H.; STEFFEN, M.; BACH, I.; OESER, M.; REINOLD, P. (2013): Temperierte Straße – Machbarkeitsstudie, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1102, herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (heute BMVI), Fachverlag NW im Carl Schünemann Verlag, Bremen

LUND, J. (2000):

Pavement Snow Melting. GHC Bulletin 21, (06.2000), Heft 2; S. 12-19

RENKEN, L.; KREISCHER, S.; OESER, M. (2015a):

Entwicklung von Deckschichtmaterialien für versickerungsfähige Verkehrsflächenbefestigungen auf Basis alternativer Bindemittel – Teil II: Ansprache der Performance, Straße und Autobahn, Ausgabe 11-2015, Seite 776-784, Kirschbaum-Verlag, Bonn

RENKEN, L.; OESER, M. (2015):

Entwicklung von Deckschichtmaterialien für versickerungsfähige Verkehrsflächenbefestigungen auf Basis alternativer Bindemittel – Teil I: Festigkeit, Permeabilität, Kornverlust, Straße und Autobahn, Ausgabe 09-2015, S. 601-608, Kirschbaum-Verlag, Bonn

RENKEN, L.; OESER, M. (2014):

Innovative Material Concepts – Application Potentials and Characterization of Synthetic Road Pavements. In: Aachener Mitteilungen, Band 62, Proc. of the 3rd. China-Europe Workshop on Functional Pavement, Aachen, 101-112

RENKEN, L. & OESER, M. (2017):

Klimawandel – Berücksichtigung beim Bau von Straßen. In: Kolloquium Kommunales Verkehrswesen – Tagungsband [FGSV-Nr. 002/117], ISBN 978-3-86446-179-8, Münster

RENKEN, L.; OESER, M.; MILATZ, M.; GRABE, J. (2015b):

Measurement of Hydraulic Properties of Unsaturated Permeable Polyurethane bound Asphalt. Proc. of the 6th Asia-Pacific conference on unsaturated soils (AP UN-SAT 2015), Guilin, China

- RENKEN, L.; SIMON, M.; OESER, M. (2015c):
Development of Permeable Block Pavements
based on Polyurethane. Proc. of the 11th
Conference on Concrete Block Pavement
(ICCBP 2015), Dresden
- SCHACHT, A.; MUNK, M.; BUSEN, C.; OESER, M.
(2014):
Synthetisch gebundene offenporige Zwischen-
schichten zur gezielten Temperierung von Stra-
ßen im Winter. In: Ernst & Sohn, Bautechnik,
Band 91, Heft 7, S. 466-471
- WÜRTELE, M.; SPRINKE, P.; EUGSTER, W.
(2005):
Geothermie sorgt für Verkehrssicherheit. Studie
für das Ministerium für Verkehr, Energie und
Landesplanung des Landes Nordrhein-West-
falen

Bilder

- Bild 1: Prinzip des durchströmten Gesamt-
systems (SCHACHT et al. 2014)
- Bild 2: Konstruktionsprinzip des durchströmten
Gesamtsystems (SCHACHT et al. 2014)
- Bild 3: Rohrbefestigungssysteme
(FE 09.0174/2011/HRB)
- Bild 4: Oberbau angelehnt an die RStO
- Bild 5: Verlegemuster (EICKER, 2005)
- Bild 6: Sieblinien PU-Varianten
- Bild 7: Asphaltaufbau von PU-Varianten S3, S4
und S5
- Bild 8: Funktionsprinzip von offenporigen
PU-Systemen (RENKEN/OESER 2015)
- Bild 9: Prototyp-System 1 – Rinne
- Bild 10: Prototyp-System 2 - Rohre
- Bild 11: Einflussrohr mit seitlichen Öffnungen
- Bild 12: Versuchsaufbau Röhrchen System
- Bild 13: Wärmebilder Versuchsaufbau
- Bild 14: Übertragene Leistung Straßensegment,
Schicht mit Rohrregistern, $T_{\text{Vorlauf}} = 55 \text{ °C}$
- Bild 15: Übertragene Leistung Straßensegment
Schicht mit Rohrregistern, $T_{\text{Vorlauf}} = 35 \text{ °C}$
- Bild 16: Übertragene Leistung Straßensegment,
durchströmte Zwischenschicht,
 $T_{\text{Vorlauf}} = 55 \text{ °C}$
- Bild 17: Übertragene Leistung Straßensegment,
Durchströmte Zwischenschicht,
 $T_{\text{Vorlauf}} = 35 \text{ °C}$
- Bild 18: Minimale Deckschichttemperatur Stra-
ßensegment, Schicht mit Rohrregistern,
 $T_{\text{Vorlauf}} = 35 \text{ °C}$
- Bild 19: Minimale Deckschichttemperatur Stra-
ßensegment, durchströmte Zwischen-
schicht, $T_{\text{Vorlauf}} = 35 \text{ °C}$
- Bild 20: Maximale Deckschichttemperatur Stra-
ßensegment, Schicht mit Rohrregistern,
 $T_{\text{Vorlauf}} = 35 \text{ °C}$
- Bild 21: Maximale Deckschichttemperatur Stra-
ßensegment, Durchströmte Zwischen-
schicht, $T_{\text{Vorlauf}} = 35 \text{ °C}$

- Bild 22: Jahreszeitlicher Verlauf der Lufttemperatur (Test Referenz Jahr)
- Bild 23: Jahreszeitlicher Verlauf der direkten solaren Einstrahlung (Test Referenz Jahr)
- Bild 24: Jahreszeitlicher Verlauf der diffusen solaren Einstrahlung (Test Referenz Jahr)
- Bild 25: Jahreszeitlicher Verlauf der Bodentemperatur
- Bild 26: Hydrologische Bewertung am Autobahnkreuz Köln-Ost, Quelle: Geologischer Dienst NRW
- Bild 27: Bewertung Wasserschutzgebiete am Autobahnkreuz Köln-Ost, Quelle: Geologischer Dienst NRW
- Bild 28: Zu erwartendes geologisches Schichtenprofil, Quelle: Geologischer Dienst NRW
- Bild 29: Anbindungsplan duraBASt
- Bild 30: Konzept für das Gesamtsystem je Einzel-feld
- Bild 31: Minimale und maximale Deckschichttemperatur Straßensegment, Schicht mit Rohrregistern, Gesamtanlage
- Bild 32: Speichertemperatur des Pufferspeichers, Schicht mit Rohrregistern, Gesamtanlage
- Bild 33: Vergleich der zeitlichen Leistungsprofile von Straßensegment und EWS, Schicht mit Rohrregistern, Gesamtanlage
- Bild 34: Minimale und maximale Deckschichttemperatur Straßensegment, Durchströmte Zwischenschicht, Gesamtanlage
- Bild 35: Speichertemperatur des Pufferspeichers, Durchströmte Zwischenschicht, Gesamtanlage
- Bild 36: Vergleich der zeitlichen Leistungsprofile von Straßensegment und EWS, Durchströmte Zwischenschicht, Gesamtanlage
- Bild 37: Lage der Sensoren im Grundriss
- Bild 38: Sensorausstattung Felder S1 und S2
- Bild 39: Sensorausstattung Feld S3
- Bild 40: Sensorausstattung Feld S4
- Bild 41: Sensorausstattung Feld S5

Tabellen

- Tab. 1: Vergleich der Rohrmaterialien (FE 09.0174/2011/HRB)
- Tab. 2: Rohrbefestigungssysteme im Vergleich (FE 09.0174/2011/HRB)
- Tab. 3: Horizontale Durchlässigkeit nach TP Asphalt-StB Teil 19
- Tab. 4: Schichtenverbund Ergebnisse
- Tab. 5: Maximale Leistungsaufnahme und -abgabe ausgesuchter Straßensegmente
- Tab. 6: Randbedingungen von Feldern I
- Tab. 7: Randbedingungen von Feldern II
- Tab. 8: Benötigte Sensorik

Anhang

Anhang 1: CE Zertifikat Elastopave



Leistungserklärung

(Verordnung der Bauprodukten Nr. 305/2011)

Nr. DE27-0005-01-CPR-16

DE

1.	Eindeutiger Kenncode des Produkttyps:	Elastopave 6551/102 EN 13813: ZA.1.5
2.	Verwendungszweck(e):	Kunsthazestrichmaterial
3.	Hersteller:	BASF Polyurethanes GmbH Elastogranstrasse 60 D-49448 Lemförde GERMANY
4.	Bevollmächtigter:	Nicht relevant.
5.	System(e) zur Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit (AVCP):	AVCP-System 4
6a.	Harmonisierte Norm: Notifizierte Stelle(n):	EN 13813:2002 Nicht relevant.
6b.	Europäisches Bewertungsdokument: Europäische Technische Bewertung: Technische Bewertungsstelle: Notifizierte Stelle(n):	Nicht relevant.

7. Erklärte Leistung(en):

<i>Wesentliche Merkmale</i>	<i>Leistung</i>	<i>Harmonisierte technische Spezifikation</i>
Brandverhalten	Keine Leistung erklärt (NPD)	EN 13501-1
Freisetzung korrosiver Substanzen	SR	EN 13813
Wasserdurchlässigkeit	Keine Leistung erklärt (NPD)	EN 1062-3
Verschleißwiderstand	AR0,5	EN 13813
Haftzugfestigkeit	B2,0	EN 13813
Schlagfestigkeit	IR4	EN ISO 6272
Trittschallisolierung	Keine Leistung erklärt (NPD)	EN ISO 140-6
Schallabsorption	Keine Leistung erklärt (NPD)	EN 12354-6
Wärmedämmung	Keine Leistung erklärt (NPD)	EN 12664
Chemische Beständigkeit	Keine Leistung erklärt (NPD)	EN 13529

8. Angemessene Technische Dokumentation und/oder Spezifische Technische Dokumentation:

Nicht relevant.

Die Leistung des vorstehenden Produkts entspricht der erklärten Leistung/den erklärten Leistungen. Für die Erstellung der Leistungserklärung im Einklang mit der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 ist allein der obengenannte Hersteller verantwortlich.

Unterzeichnet für den Hersteller und im Namen des Herstellers von:

<i>Name und Funktion</i>	<i>Ort und Datum der Ausstellung</i>	<i>Unterschrift</i>
Herr Dr. Friedhelm Lehrich Vice President	Lemförde (Germany) 27.10.2016	
Herr. Dr. Onno Graalman Head of Operations PU Systems West	Lemförde (Germany) 27.10.2016	

Anhang 2: Nachweis der PU-Umweltverträglichkeit

Zum Nachweis der PU-Umweltverträglichkeit wurde in der Vergangenheit ein PU-System namens Elastocoast hinsichtlich seiner Umweltverträglichkeit geprüft. Das im Rahmen dieses Projektes verwendete Elastopave hat die identischen Eigenschaften wie Elastocoast. Somit können die Ergebnisse der Umweltverträglichkeitsprüfung des Elastocoast auf das Elastopave übertragen werden. Im Folgenden wird Elastocoast synonym für Elastopave verwendet.

Wie in dem Prüfbericht H-240767K-14-Bg vom 07.04.2014 des Hygiene-Instituts des Ruhrgebiets ausgeführt wurde, erfüllt das PU-System (Elastocoast), das einer beschleunigten Verwitterung unterworfen wurde, hinsichtlich des Restgehaltes an freien monomeren Isocyanaten die in Verordnung (EU) Nr. 10/2011 (Materialien und Gegenstände aus Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen) genannten Anforderungen. Die in Empfehlung XLVII des Bundesinstituts für Risikobewertung (Spielzeug aus Kunststoffen und anderen Polymeren sowie aus Papier und Pappe) festgelegten Anforderungen werden damit ebenfalls erfüllt.

Aus hygienischer Sicht ist von Bedeutung, dass keine Freisetzung von aromatischen Aminen aus Elastocoast nachweisbar sind und in Folge von Niederschlag, insbesondere nach Einwirkung von Wasser über drei Tage, keine freien Isocyanate im Produkt mehr nachweisbar sind. Durch Kontakt mit Wasser zersetzen sich die in der PU-Beschichtung noch vorhandenen Reste an freien Isocyanaten.

Die kritische Phase stellt die Herstellung und Aufbringung der PU-Beschichtung auf die Gesteine dar. Die einschlägigen Arbeitsschutzvorschriften müssen dabei beachtet werden.

Weiterhin wurden folgende umweltrelevante Untersuchungen durchgeführt:

- **Fish Embryo Toxicity Test**

“Effect of water samples derived from an application simulation of stones treated with Elastocoast on the embryonic stages of *Danio rerio*” (GLP-Code of Testing Facility: ELA-002/4-14)

- **Pseudomonas Putida Growth Inhibition Test**

“Effects on cell multiplication of *pseudomonas putida* by water samples derived from an application simulation of stones treated with Elastocoast” (GLP-Code of Test Facility: ELA-002/3-07)

- **Umu-test (ISO 13829, DIN 38412-3)**

“Effect of water samples derived from an application simulation of stones treated with Elastocoast”

- **Alga, Growth Inhibition Test**

“Effect of water samples derived from an application simulation of stones treated with Elastocoast on the growth of *desmodesmus subspicatus*, static conditions” (GLP-Code of Test Facility: ELA-002/4-30)

- **Sediment–Water Chironomid Life-Cycle Toxicity Test using Spiked Water**

“Effect of water samples derived from an application simulation of stones treated with Elastocoast on the development of *chironomus riparius*” (GLP-Code of Testing Facility: ELA-002/4-29)

- **Daphnia Magna, Acute Immobilisation Test (OECD 202) Static Exposure**

“Effect of water samples derived from an application simulation of stones treated with Elastocoast on the immobilisation of *daphnia magna*” (GLP-code of Test Facility: ELA-002/4-20)

-
- ***Daphnia Magna*, Reproduction Test (OECD 211) Semi-Static Exposure**
“Effect of water samples derived from an application simulation of stones treated with Elastocoast on the reproduction of *daphnia magna*” (GLP-Code of Testing Facility: ELA-002/4-21)
 - **Estimation of Emissions to the Aqueous Environment**
“Semi-technical testing for estimation of leaching from coated stones treated with Elastocoast”
 - **Water Regulations Advisory Scheme (WRAS) – BS 6920 Test on Effect of Water Quality**

Anhang 3: Technisches Merkblatt

Technical Data Sheet

Elastopave® 6551/102

Page 1 / 3
Version 09/ms
Date of issue: 24.06.2015



Application

Solvent free, two component Polyurethane coating for outdoor applications to reinforce gravels, discoloration by weathering might occur.

Chemical Characteristics

Polyol-Component: Preparation based on: polyol, additives
Iso-Component: P-MDI = IsoPMDI 92140

Supply

The type of supply for the components will be decided after consultation with our Sales Office

Storage, Preparation

Polyurethane components are moisture sensitive. Therefore they must be stored at all times in sealed, closed containers. The A-component (Polyol) must be homogenised by basic stirring before processing. More detailed information should be obtained from the separate data sheet entitled "Information for in-coming material control, storage, material preparation and waste disposal" and from the component data.

Possible Hazards

The B-component (Isocyanate) irritates the eyes, respiratory organs and the skin. Sensitisation is possible through inhalation and skin contact. MDI is harmful by inhalation. On processing these, take note of the necessary precautionary measures described in the Material Safety Data Sheets (MSDSs). This applies also for the possible dangers in using the A-component (Polyol) as well as any other components. See also our separate information sheet "Safety- and Precautionary Measures for the Processing of Polyurethane Systems." Use our Training Programme "Safe Handling of Isocyanate."

Waste Disposal

More detailed information is provided in our country-specific pamphlet

Consumer articles, medical products

There are national and international laws and regulations to consider if it is intended to produce consumer articles (eg articles that necessitate food or skin contact, toys etc.) or medical objects out of BASF products. Where these do not exist, the current legal requirements of the European Union for consumer articles as well as medical products should be sufficient. Consultation with our Sales Office and our Ecology and Product Safety Department is strongly recommended.

Elastopave® 6551/102

Page 2 / 3
 Version 09/ms
 Date of issue: 24.06.2015



We create chemistry

Component Data				
Characteristics	Unit	Polyol-Comp	Iso-Comp.	Method
Density (25°C)	g/cm ³	0.99	1.23	G 133-08
Viscosity (25°C)	mPa·s	1350	200	G 133-07
Shelf-life	months	9	6	

Component Data				
Characteristics	Unit	Polyol-Comp	Iso-Comp.	Method
Density (25°C)	g/cm ³	0.99	1.23	G 133-08
Viscosity (25°C)	mPa·s	1350	200	G 133-07
Shelf-life	months	9	6	

Typical Processing Data			
Machine Processing			
Characteristics	Unit	Value	Method
Mixing ratio	Parts by weight	Polyol-Comp. = 100 : Iso-Comp. = 84	
Time of processing at 23 °C	min.	20	
Recommended processing temperature			
Polyol-Component	°C	10 - 30	
Isocyanate-Component	°C	10 - 30	

Typical Processing Data			
Machine Processing			
Characteristics	Unit	Value	Method
Mixing ratio	Parts by weight	Polyol-Comp. = 100 : Iso-Comp. = 84	
Time of processing at 23 °C	min.	20	
Recommended processing temperature			
Polyol-Component	°C	10 - 30	
Isocyanate-Component	°C	10 - 30	

Typical Processing Data			
Machine Processing			
Characteristics	Unit	Value	Method
Mixing ratio	Parts by weight	Polyol-Comp. = 100 : Iso-Comp. = 84	
Time of processing at 23 °C	min.	20	
Recommended processing temperature			
Polyol-Component	°C	10 - 30	
Isocyanate-Component	°C	10 - 30	

Elastopave® 6551/102

Page 3 / 3
 Version 09/ms
 Date of issue: 24.06.2015



We create chemistry

Typical Physical Properties			
Characteristics	Unit	Measured value	Method
Hardness	Shore D	72	DIN 53505
Tensile strength	N/mm ²	32	DIN EN ISO 527
Elongation	%	40	
Tear strenght	N/mm	40	DIN 53515
Density	g/cm ³	1.1	DIN 53420

The mechanical properties were measured by use of test specimen which were casted by hand stored for 28 days under standard climatic condition.

© = registered trade mark of BASF

The data contained in this document as well as advice or other support services are based on our current knowledge and experience and are provided according to our best knowledge. In view of many factors that may affect processing and application of our products, this data does not relieve processors from carrying out their own investigations and tests, particularly with regards to the suitability of the goods supplied for the processes and purposes they intend to use them for, neither does this data imply any guarantee of certain properties, or the suitability of the product for a specific purpose. Any descriptions, drawings, photographs, data, proportions, weights, measured values etc. given herein may change without prior notice and do not constitute the agreed contractual quality of the product. It is the responsibility of the recipient of our products to ensure that any proprietary rights and existing laws and legislation are observed.

BASF Polyurethanes GmbH
 Postfach 1140
 49440 Lemförde
 Germany

Tel.: +49 (0) 5443/12-0
 Fax: +49 (0) 5443/12-2474
 Mail: pu-hartschaum@basf.com
 Internet: www.pu.basf.eu

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2015

S 89: Ermittlung von repräsentativen Substanzwerten in homogenen Abschnitten

Villaret, Frohböse, Jähnig, Karcher, Niessen, Buch, Zander
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 90: AKR-Untersuchungen für Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche

Müller, Seidel, Böhm, Stark, Ludwig, Seyfarth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 91: Straßen im Gesamtsystem der Verkehrsträger
Durner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 92: Längslebenheitsmesssysteme – Überprüfung der Signalverarbeitungsverfahren nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM)

Neubeck, Wiesebrock
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2016

S 93: Bewertung und Optimierung der Hydrophobierung zur Verminderung des AKR-Schädigungsfortschrittes in Fahrbahndeckenbetonen

Weise, Schrang € 19,50

S 94: Beanspruchung und Entfernbarkeit temporärer Fahrbahnmarkierung

Kemper, Schacht, Klapproth, Oeser, Beyer € 16,50

S 95: Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel

Bialucha, Merkel, Motz, Demond, Schmidt, Ritter, Haas € 14,50

S 96: Bewertungshintergrund für den Widerstand gegen Polieren von Gesteinskörnungen nach dem PWS-Verfahren

Dudenhöfer, Rückert
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 97: Einheitliche Bewertungs- kriterien für Elemente der Straßenverkehrsinfrastruktur im Hinblick auf Nachhaltigkeit – Straße und Tunnel

Fischer, Sauer, Jungwirth, Baumgärtner, Hess, Ditter, Roth, Xalter
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 98: Verifikation eines Europäischen Prüfverfahrens zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Asphalt

Böhm, Beara
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 99: Ansprache und Steuerung von Healing-Effekten bei Asphalt

Wistuba, Alisov, Isailović
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 100: Probekörperherstellung für performance-basierte Asphaltprüfungen

R. Roos, C. Karcher, A. Wittenberg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 101: Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator MLS10 Sensorik zur Beanspruchungsdetektion im ersten gemeinsamen Versuchsbetrieb

Wacker, Scherkenbach, Rabe, Golkowski
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 102: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen – Teil 1: Bodenmaterial

Kellermann-Kinner, Bürger, Marks € 16,50

S 103: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Untersuchungen von Bauweisen in Freilandlysimetern – Teil 1: Untersuchungszeitraum 2010 - 2013

Brand, Tiffert, Endres, Schnell, Marks, Kocher € 19,50

S 104: Nachhaltige und effiziente Sanierung von Schlaglöchern

Thienert, Beckedahl, Koppers, Paffrath, Nafe € 15,00

2017

S 105: Untersuchungen zur Überprüfung des Luftporenanteils als Verdichtungsanforderung bei feinkörnigen Böden und bindigen Mischböden

Lypp, Birle, Heyer, Vogt € 20,50

S 106: Zusammenhang zwischen Bitumenchemie und straßenbautechnischen Eigenschaften

Radenberg, Nytus, Gehrke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 107: Baustoffe für standfeste Bankette

Koukoulidou, Birle, Heyer € 15,50

S 108: Neue Wege zur Finanzierung des Straßenbaus – Entwicklungen des europäischen Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2015 in Bonn

Durner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 109: RIVA – Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels

Korn, Leupold, Mayer, Kreienkamp, Spekat € 15,50

S 110: Vergleichbarkeit der Auslaugraten von Materialien mit und ohne Sandzumischung nach dem Säulenkurzverfahren (DIN 19528)

Lin, Linnemann, Vollpracht € 16,50

S 111: Bitumenextraktion aus Asphalt mit dem nachwachsenden Rohstoff Octansäuremethylester(Kokosester)

Alisov, Wistuba
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 112: Nachweis der flächendeckenden Verdichtungskontrolle von Asphalt

Zander, Buch, Birbaum

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 113: Einfluss der Temperatur auf die Probekörperherstellung bei Niedrigtemperaturgussasphalt im Rahmen der Kontrollprüfungen

Schellenberg

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 114: Studie zum Anwendungspotenzial von werksgemischtem Kaltbauweisen – Asphalt

Mollenhauer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2018

S 115: Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxisgerechten Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes

Wistuba, Isailović

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 116: Weiterführende Untersuchungen zur Beurteilung des Adhäsionsverhaltens zwischen Bitumen und Gestein

Radenberg, Nytus, Boetcher, Diedel, Miehl

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 117: Bauzeitenverkürzung durch optimierten Asphalteinbau

Böhm, Tielmann, Ulrich, Verges, Muschalla

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 118: Untersuchung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Asphaltbinderkonzepte

Renken, Wistuba

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 119: Grundfragen des straßenrechtlichen Nutzungsregimes – Straßenrecht im Zeichen des Klimawandels

Durner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 120: Temperaturuntersuchungen am und im Mobile Load Simulator MLS30 – Analyse des Temperatureinflusses während eines Dauerversuchs für weitere Versuchsprogramme

Wacker, Scherckenbach, Jansen in Vorbereitung

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 121: Repräsentative Ermittlung der performance-relevanten Asphalteeigenschaften als Grundlage neuer Vertragsbedingungen

Roos, Plachkova-Dzhurova, Grafmüller, Milch, Hase, Schindler

Schröter, Zumsande, Wörner, Kazakova, Patzak in Vorbereitung

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 122: Ermittlung neuer Zuordnungswerte zur Einteilung bindiger Böden in Fest- und Lockergesteine

Möller, Bundschuh, Birle, Heyer

€ 18,50

S 123: Bindemitteldesign für Asphaltstraßen – Definition eines chemisch-rheologischen Anforderungsprofils

Stephan, Weigel

€ 19,00

S 124: Dauerhafte Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung aktueller ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte

Müller, Schulte-Schrepping, Benra, Ludwig, Breitenbücher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 125: Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie

Radenberg, Manke, Steeb, Jänicke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 126: Bau und Messungen an einer Versuchsstrecke mit optimierter Kiestragschicht unter der Betondecke

Freudenstein, Neudert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2019

S 127: Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton

Villaret, Kiehne, Riwe, Villaret

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 128: Reduzierung der Schwindverformungen des Straßenbetons durch den Einsatz neuartiger Schwindreduzierer

Breitenbücher, Penttilä, Schulte-Schrepping

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 129: Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt

Hase, Beyersdorf, Hase, Rademacher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 130: Entwicklung einer Prüfsystematik für Porous Mastic Asphalt (PMA)

Radenberg, Holzwarth

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 131: Einfluss viskositätsverändernder Zusätze auf den Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe

Radenberg, Gehrke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 132: Temperierte Straße – Untersuchungen zur Realisierung eines Demonstrators auf dem duraBAST

Oeser, Carreño, Renken, Kemper, Kneer, Höfler, Al-Sibai,

Hess, Gouya, zu Dohna, Steins € 15,50

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 03-63

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.