

Vermeidung von Glätte- bildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 87

The logo for 'bast' is written in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a 3D appearance. It is positioned in the bottom right corner of the page.

Vermeidung von Glätte- bildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie

von

Markus Feldmann
Bernd Döring
Jan Hellberg
Markus Kuhnhenne
Daniel Pak

Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau
RWTH Aachen

Ingbert Mangerig
Stefan Beucher
Andreas Hess

Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Universität der Bundeswehr München

Bernhard Steinauer
Dirk Kemper
Karen Scharnigg

Institut für Straßenwesen
RWTH Aachen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 87

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 beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

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

Kurzfassung – Abstract

Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie

Auf Brücken, insbesondere auf Stahlbrücken, bildet sich im Winter gegenüber den anderen Streckenabschnitten oft vorzeitig Glätte. Dadurch kann der Straßenverkehr in erheblichem Maße gefährdet werden.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, das vorzeitige Auftreten von Glätte zu verhindern. Die derzeit gebräuchlichsten Methoden sind, die Brücken vorzeitig zu streuen oder automatische Taumittelsprühanlagen zu installieren.

In dem vorliegenden Projekt wurde eine weitere, innovative Methode untersucht, nämlich die Temperierung der Fahrbahn mit Hilfe von Geothermie. Dazu wurden Simulationsreihen und damit zusammenhängende praxisnahe Messungen durchgeführt. Die Messungen wurden auf einer eigens hierfür hergestellten Testbrücke aus Stahl-Brückenmodulen sowie in weiteren Testfeldern auf bestehenden Brücken vorgenommen.

Der Bericht stellt wichtige Informationen und Ergebnisse zur Verfügung, die notwendig sind, um ein Brücken-Projekt mit Fahrbahn-Temperierung zu planen und umzusetzen. Dabei werden die Aspekte

- konstruktive Gestaltung,
- thermische Eigenschaften,
- mechanische Festigkeit,
- Regelstrategien und
- Wirtschaftlichkeit

eines solchen Systems betrachtet. Weiterhin enthält der Bericht Beispiele, welche Varianten hinsichtlich des geothermischen Systems möglich sind, und gibt Eckdaten zu deren Dimensionierung an.

Nach den hier vorliegenden Ergebnissen ist die Realisierung eines Fahrbahn-Temperierung-Systems mittels Geothermie für Stahlbrücken möglich. Die thermische Leistung ist für den angestrebten Zweck ausreichend. Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften konnten zumindest keine

kurzfristig erkennbaren Beeinträchtigungen festgestellt werden, wobei hier weiterer Forschungsbedarf besteht. Damit bietet die geothermische Fahrbahn-Temperierung die Möglichkeit, umweltschonend zur Vermeidung von frühzeitiger Glättebildung auf Straßenbrücken beizutragen.

Preventing of icing-up of bridges by use of geothermal energy

In wintertimes, especially steel bridges can exhibit prematurely icy roads that may affect the traffic to a high extent.

There are different means to prevent the premature freezing of bridges. The most common methods to achieve this are to grit the bridges early or to install de-icing spray units.

Within this project a further innovative method, the use of geothermal energy for heating the road-surface was investigated. For this simulation series were carried out. Combined with these simulations also practical tests on a bridge, that was built for this purpose, were performed. Further tests took place on already existing bridges.

This report gives important information and research findings being necessary to plan and to realize a road heating. The following aspects of such a system are considered:

- engineering design,
- thermal characteristics,
- mechanical strength,
- regulation strategies and
- economy.

Furthermore the report gives examples of possible geothermal systems and design parameters.

The results of the study on road heating on bridges show that a thermal activation of a steel bridge road surface by use of geothermal energy is feasible. The thermal performance is sufficient for the purpose. Concerning the mechanical strength, the durability tests that were performed so far showed

no significant loss of strength. However, these tests have been conducted only in short term. To find a result in long term there is a need of further research. In summary the geothermal road surface heating provides the opportunity to reduce a premature freezing on road bridges by an environmental friendly approach.

Inhalt

1	Einleitung	7	3.4.3	Metallaschen und Schrauben oder Nägel	30
1.1	Anlass	7	3.4.4	Zusammenfassung	31
1.2	Zielsetzung	8	4	Kleinteilversuche	31
1.3	Vorgehensweise	8	4.1	Thermische Versuche	31
2	Grundlagen	9	4.1.1	Allgemeines	31
2.1	Stand der Technik	9	4.1.2	Aufbau Asphaltiervorgang der 1 m x 1 m-Probekörper	31
2.1.1	Grundlagen zum Winterdienst	9	4.1.3	Messergebnisse	32
2.1.2	Taumittelsprühanlagen	10	4.1.4	Zusammenfassung	38
2.1.3	Literaturstudie und Vergleichs- projekte	11	4.2	Stabilität/Festigkeit	38
2.2	Wärmetechnische Grundlagen	14	4.2.1	Allgemeines	38
2.2.1	Grundlagen für Temperatur- berechnung Brücke	14	4.2.2	5-Punkt-Biegeversuch	40
2.2.2	Formen der Glättebildung	15	4.2.3	4-Punkt-Biegeversuch	41
2.2.3	Grundwassernutzung und Erdwärmesonden	16	4.2.4	Zusammenfassung	41
2.3	Belagsaufbau bei Stahlbrücken	20	5	Testfeldmessung	41
3	Variantenentwicklung	21	5.1	Konzept und Bau der Testbrücke	41
3.1	Rohrmaterial	21	5.1.1	Allgemeines	41
3.1.1	Allgemeines	21	5.1.2	Fertigung der Rohrmäander	42
3.1.2	Thermische Beständigkeit	22	5.1.3	Erstellung der Testbrücke	42
3.1.3	Verarbeitbarkeit zu Rohrregistern	24	5.1.4	Einbau der Rohrmäander und Asphaltieren der Deckschicht	44
3.1.4	Zusammenfassung	25	5.1.5	Einbau der Messtechnik	46
3.2	Rohrdurchmesser	25	5.2	Thermische Versuche	47
3.3	Rohrpositionierung	25	5.2.1	Allgemeines	47
3.3.1	Allgemeines	25	5.2.2	Winterfall	47
3.3.2	Laborversuche	26	5.2.3	Sommerfall	50
3.3.3	Entwicklung von Varianten für numerische Untersuchungen der Rohrlage	28	5.2.4	Zusammenfassung und Bewertung	52
3.3.4	Zusammenfassung	28	5.3	Stabilität/Festigkeit	52
3.4	Fixierung und Fertigung	29	5.3.1	Rohreinbau auf Brücke unter Praxisbedingungen	52
3.4.1	Allgemeines	29	5.3.2	Untersuchung der Testabschnitte auf Brücke unter Praxisbedingungen	53
3.4.2	Befestigungsgitter	29	5.3.3	Zusammenfassung	55

6	Numerische Simulation	55
6.1	Grundlagen zu den Simulations- verfahren	55
6.2	Erstellung und Validierung der Rechenmodelle	55
6.2.1	FEM-Modelle	55
6.2.2	TRNSYS-Modelle	57
6.3	Detailuntersuchungen mittels FEM-Berechnungen	60
6.3.1	Allgemeines	60
6.3.2	Beurteilungskriterium für die thermische Leistungsfähigkeit	62
6.3.3	Systembedingte Trägheit (Einschaltssituation)	64
6.3.4	Wärmebedarfsermittlung	64
6.3.5	Ermittlung der sommerlichen Wärmegewinne	66
6.4	Untersuchungen mittels TRNSYS-Berechnungen	67
6.5	Regelstrategie und Energiebedarf	69
6.5.1	Allgemeines	69
6.5.2	Entwicklung von drei Regelstrategien	69
6.5.3	Simulation der Regelstrategien für vier Klimazonen Deutschlands	69
6.6	Zusammenfassung	71
7	Wirtschaftlichkeitsuntersuchung ...	71
7.1	Kosten für das Rohrsystem in der Fahrbahn	71
7.2	Wärmebereitstellung	72
7.3	Systemtechnik	73
7.4	Gesamtanlage	73
8	Schlussfolgerungen und Ausblick ...	74
9	Literatur	75

1 Einleitung

1.1 Anlass

Eine moderne Gesellschaft mit ihrer weit differenzierten Arbeitsteilung verlangt einen möglichst störungsfreien Verkehr zum Transport von Personen und Waren. Dazu gehört, dass auch bei winterlichen Witterungsbedingungen der Verkehrsfluss auf den Straßen möglichst aufrechterhalten wird und besondere Gefahren zu mindern sind.

Gemäß Bundesfernstraßengesetz (FStrG 2007) sollen die Träger der Straßenbaulast die Bundesfernstraßen bei Schnee- und Eisglätte räumen und streuen. Angesichts der Bedeutung der Unfallvermeidung und der Aufrechterhaltung des Verkehrs wird diese Aufgabe von den Baulastträgern äußerst ernst genommen.

Bereits einzelne kritische Streckenabschnitte können dazu führen, dass das Unfallrisiko ansteigt und der Verkehr in größeren Bereichen zum Erliegen kommt. Zu diesen besonders zu beachtenden Streckenabschnitten gehören Stahlbrücken. Die relativ geringe Masse dieser Brücken, die gleichwohl unter konstruktiven Aspekten häufig von Vorteil ist und die bestimmte Brückenkonstruktionen überhaupt



Bild 1: Glättegefahr auf Stahlbrücke – Talbrücke Obere Argen

erst möglich macht, führt bei entsprechenden Witterungsbedingungen dazu, dass sich hier früher und häufiger Glätte bilden kann als auf der übrigen Strecke (s. Bild 1).

Um diese vergleichsweise kurzen Streckenabschnitte im Rahmen des konventionellen Winterdienstes zu bearbeiten, ist ein erheblicher Aufwand erforderlich. Es müssen längere Anfahrtswege der Streufahrzeuge mit entsprechendem Zeit- und Personalbedarf berücksichtigt werden, im Bereich von Steigungen kann die Situation durch bereits liegen gebliebene Fahrzeuge zusätzlich erschwert werden.

In den letzten Jahren hat man die Situation an gefährdeten Stellen durch automatische Taumittel-sprühanlagen verbessert, Einrichtung und Betrieb solcher Anlagen sind allerdings mit erheblichen Kosten verbunden. Weitere Probleme ergeben sich aus der korrosiven Wirkung des Streumittels und aus der Tatsache, dass Tausalz eine Umweltbelastung darstellt.

Eine Alternative besteht in der Temperierung der Fahrbahn, wobei die Wärme nicht mit konventionellen Energieträgern erzeugt werden soll, sondern Geothermie (Erdwärme) zum Einsatz kommt (Bild 2). Dabei wird Wärme aus dem Erdreich über Sonden oder auch aus dem Grundwasser entzogen und über ein geeignetes Rohrsystem für eine Nutzung an die Oberfläche geholt. Bereits wenige Meter unter der Erdoberfläche herrschen über das Jahr betrachtet konstante Temperaturen, wobei das Temperaturniveau mit größerer Tiefe kontinuierlich steigt. Im Vergleich zur Beheizung von Gebäuden

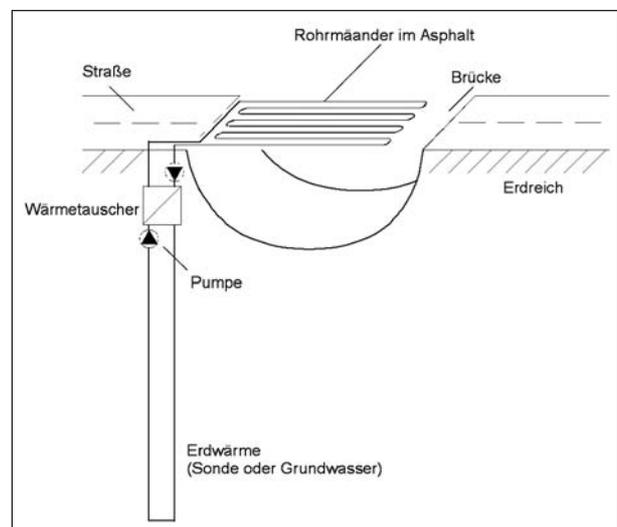


Bild 2: Prinzip der Fahrbahntemperierung mittels Geothermie

benötigt die Fahrbahntemperierung deutlich niedrigere Temperaturen, was eine günstige Voraussetzung für die Nutzung von Geothermie darstellt. Es ist zu prüfen, bei welchen geothermischen Bedingungen und bei welcher Ausführung auf der Brücke ein solches System funktionieren kann, ohne es zusätzlich mit konventionellen Energieträgern zu beheizen.

Zusätzlich kann das Temperierungssystem im Sommer auch zur Kühlung genutzt werden. Durch eine solche Kühlung werden die Aufheizung des Asphalts und die damit verbundene Abnahme der Festigkeit reduziert, und Spurrinnen bilden sich langsamer und in geringerem Maße. Bei geeigneten Konstellationen besteht darüber hinaus die Möglichkeit, die hier gewonnene Wärme anderen Nutzungen zur Verfügung zu stellen.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieses Forschungsprojektes ist, Möglichkeiten zur Fahrbahntemperierung von Stahlbrücken unter Verwendung von Geothermie als Wärmequelle zu untersuchen und die für ein Referenzprojekt notwendigen Grundlagen zu erarbeiten. Dabei ergeben sich folgende Fragestellungen:

1. Welche Varianten geothermischer Systeme sind möglich, und welche Eckdaten zur Dimensionierung können angegeben werden? (Kapitel 2)
2. Wie ist eine temperierte Stahlfahrbahnplatte zu gestalten? (Kapitel 3)
3. Welche thermischen Eigenschaften besitzt ein solches System? (Kapitel 4 und 5)
4. Kann eine ausreichende mechanische Festigkeit erzielt werden? (Kapitel 4 und 5)
5. Welche grundlegenden Strategien zur Regelung sind zu beachten? (Kapitel 6)
6. Wie stellt sich die Wirtschaftlichkeit eines solchen Systems dar? (Kapitel 7)

Um hier zu signifikanten Aussagen zu kommen, werden in mehreren Schritten numerische Untersuchungen und praktische Tests vorgenommen.

Angestrebt wird bei der Fahrbahntemperierung, dass die erhöhte Glättegefahr auf Brücken vermieden wird, nicht aber eine kontinuierliche Freihaltung der Brückenfahrbahn von Eis und Schnee. Denn durch die bauartbedingte geringe wärmespeichern-

de Masse kommt es in Situationen mit hohen nächtlichen Ausstrahlungen zu schnell absinkenden Oberflächentemperaturen bisweilen unter 0 °C, trotz Lufttemperaturen über dem Gefrierpunkt. Der Straßenabschnitt reagiert aufgrund des puffernden Bodenwärmestroms mit einem deutlich trägeren Temperaturverhalten. Für die Fahrbahnoberfläche der Stahlbrücke soll mit Hilfe des Temperierungssystems dieser Nachteil kompensiert werden.

1.3 Vorgehensweise

Zunächst erfolgen in Kapitel 2 eine Zusammenstellung und Auswertung der bisher durchgeführten Maßnahmen zur Temperierung von Fahrbahnbelägen. Dann werden die bestimmenden Parameter zur Glatteisbildung und zur Dimensionierung des hier vorgeschlagenen Systems dargelegt und Berechnungsverfahren aufgezeigt. Die Anforderungen an die Wärmequelle werden anhand überschlägiger Berechnungen abgeschätzt.

In Kapitel 3 werden Tastversuche zu Rohrmaterialien einschließlich der Fixierungsmöglichkeiten durchgeführt. Weiterhin werden mittels FEM-Berechnungen geeignete Varianten für das Temperierungssystem hinsichtlich der thermischen Leistungsfähigkeit erarbeitet (Parameter: Lage und Abstand der Rohre, Volumenstrom, Vorlauftemperatur).

Basierend auf diesen Untersuchungsergebnissen werden im vierten Kapitel weitere messtechnische Untersuchungen beschrieben. Es werden Probekörper für Kleinteilversuche erstellt, die in einer Klimakammer dynamischen Belagsprüfungen unterzogen werden. Parallel dazu werden etwas größere Probekörper erstellt, die für Messungen zur Überprüfung der thermischen Leistungsfähigkeit und der Validierung der numerischen Ergebnisse verwendet werden.

Der nächste Schritt des Projektes dient der praxisorientierten Systementwicklung. Dazu wird eine Testbrücke erstellt, wobei ein Brückenmodul (orthotrope Platte) zum Einsatz kommt, das auf dem Betriebsgelände eines Bauunternehmens errichtet und dort mit schweren Baufahrzeugen befahren wird. Um den Aufwand gering zu halten, erfolgt die Erwärmung des Mediums mittels konventioneller Technik. Diese Testinstallation ist zu planen, die Ausführung ist zu begleiten und ein Messprogramm für die Ermittlung der thermischen Eigenschaften

und zur Bewertung mechanischer Merkmale ist durchzuführen (Kapitel 5). Neben den Untersuchungen an der Testbrücke wurden auf einem Brückenabschnitt unter normaler Nutzung Rohrschleifen eingebaut, allerdings ohne diese mit einem Temperierungssystem zu verbinden. Die Untersuchungen an dieser Brücke unter Praxisbedingungen liefern weitere Informationen hinsichtlich des Einbaus und mechanischer Eigenschaften.

Parallel dazu werden komplexe numerische Simulationen durchgeführt, um die Temperaturentwicklung im Bauteil differenziert zu ermitteln sowie das dynamische Verhalten im Jahresverlauf einschließlich Speicher etc. zu untersuchen (Kapitel 6). In diesem Zusammenhang werden auch Angaben zum Energiebedarf sowie zur Regelstrategie erarbeitet.

Für die Entscheidung über die Realisierung einer Anlage ist die Wirtschaftlichkeit dieser Form der Fahrbahntemperierung zu überprüfen, die Ergebnisse hierzu sind im siebten Kapitel beschrieben. Einerseits soll die Optimierung der Anlage im Hinblick auf die Minimierung der Fahrbahnvereisung insbesondere in den Übergangsperioden (Winterandzonen) erreicht werden, zugleich soll aber auch die Größe der Wärmespeicher auf das unumgänglich Notwendige beschränkt bleiben. Um die hier ermittelten Kosten einordnen zu können, dienen die Kostenangaben von Taumittelsprühanlagen als Vergleichsgrößen.

2 Grundlagen

2.1 Stand der Technik

2.1.1 Grundlagen zum Winterdienst

Ziel des Winterdienstes ist es, auch in den Wintermonaten bei Schnee und Eis einen möglichst sicheren Straßenverkehr zu gewährleisten. Im Bundesfernstraßengesetz heißt es dazu „Die Träger der Straßenbaulast sollen ... die Bundesfernstraßen bei Schnee- und Eisglätte räumen und streuen“ (FStrG 2007). Im Allgemeinen gibt es also keine verbindliche Verpflichtung zum Winterdienst, lediglich an besonderen Gefahrenstellen gilt die Verkehrssicherungspflicht gemäß § 823 BGB.

Tatsächlich geht der heutige Räum- und Streudienst weit über die rechtlichen Anforderungen hinaus, da er aus gesamtwirtschaftlichem Interesse unverzichtbar ist. Dabei stellt die Qualität des Win-

terdienstes einen Kompromiss zwischen den Mobilitätsansprüchen der Gesellschaft und der finanziellen und personellen Leistungsfähigkeit der zuständigen Dienststellen dar.

Neben dem Schneeräumen und Streuen zur Beseitigung von Glätte kann seit einigen Jahren durch den Einsatz der Feuchtsalztechnologie bereits vorbeugend die Bildung von Eisglätte vermieden werden.

Zur Optimierung und Rationalisierung des Winterdienstes wurde in den 1980er Jahren mit der Einrichtung von Glättemeldeanlagen (GMA) auf Autobahnen begonnen. Zum Ende des Jahrtausends waren ca. 600 GMA in diesem Bereich in Betrieb (WIRTZ, H., MORITZ, K., THESENVITZ, U., 2006). Vor allem in Bayern, aber auch teilweise im Norden, im Weserbergland, ist das Netz der GMA eng vermascht, doch es sind noch lange nicht alle kritischen Stellen im Netz erfasst.

Die GMA sind das wichtigste Hilfsmittel zur Winterdienstoptimierung und werden an glättegefährdeten Punkten auf Straßen installiert. Eine GMA besteht aus einem Flächensensor, Windmessgerät, Luftthermometer, einem Sensor zur Messung der relativen Luftfeuchtigkeit, einem Niederschlagsmessgerät und einem Schaltschrank. Die gewonnenen Daten werden zyklisch an einen Leitrechner in der Straßenmeisterei weitergeleitet. Dort werden die Daten ausgewertet und grafisch dargestellt (siehe auch DIN EN 15518).

Stellt sich eine mögliche Gefahrensituation auf der Straße ein, löst die GMA einen Alarm aus und die Straßenmeister können reagieren. Solche Alarme ermöglichen ein Eingreifen bis 90 Minuten vor der eintretenden Glätte. Sie wurden entwickelt, um Autobahn- und Straßenmeistereien in die Lage zu versetzen, eine mögliche Glättebildung an besonders gefahrenträchtigen Punkten des Netzes – den so genannten Glättefallen – erst gar nicht entstehen zu lassen. An jeder Messstelle einer GMA sollen alle Parameter ermittelt werden, die für das Zustandekommen einer Glättegefahr auf der Fahrbahn von Bedeutung sind. Laut den „Betriebstechnischen Anforderungen an Glättemeldeanlagen“ sind dies die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit oder der Taupunkt, der Niederschlag, die Fahrbahnoberflächentemperatur, daraus werden der Fahrbahnzustand und die Fahrbahnglätte ermittelt. Bei besonderen Anforderungen sollen darüber hinaus noch die Parameter Windgeschwindigkeit bzw. Windrichtung,

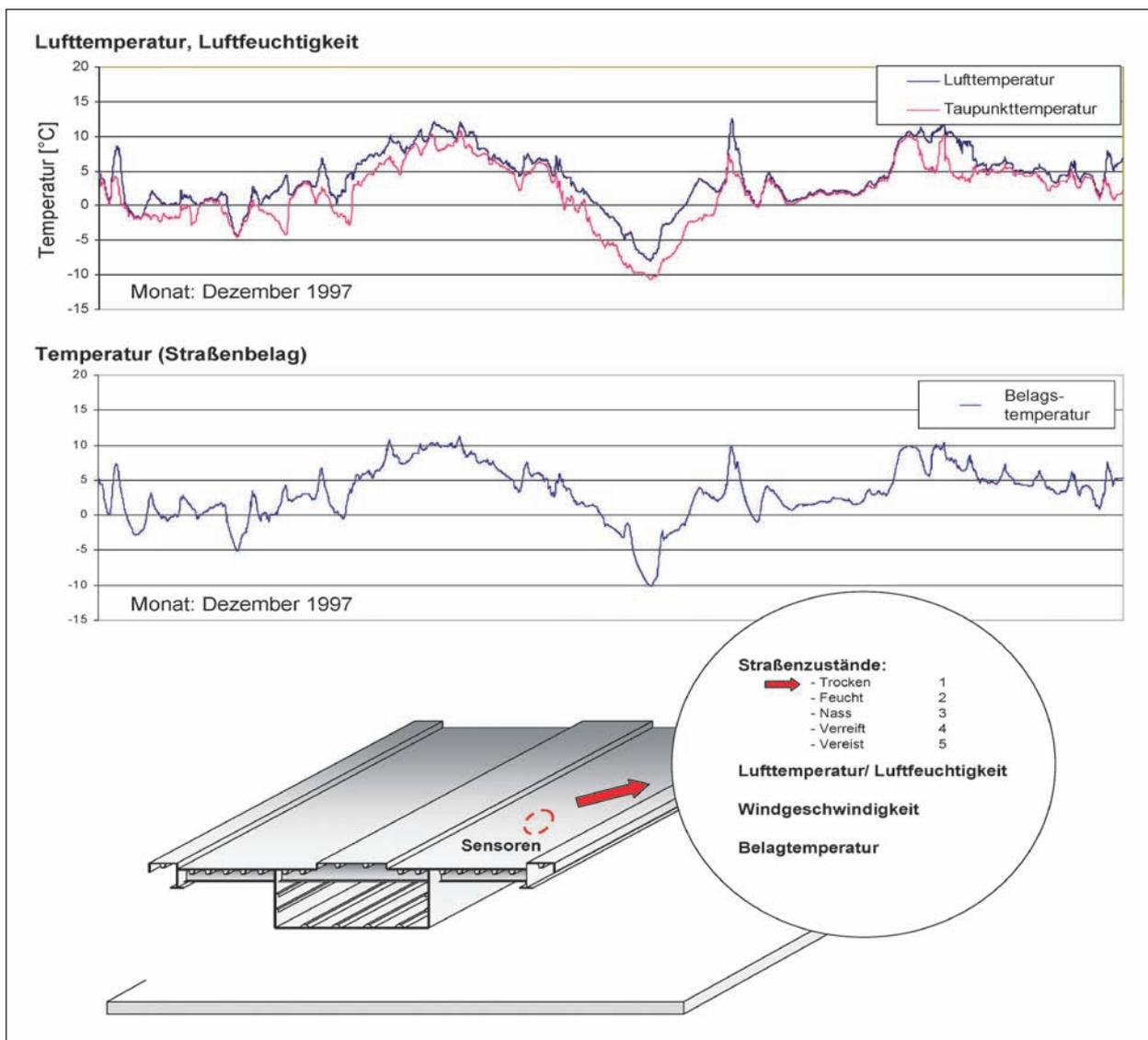


Bild 3: Beispielhafter Datensatz aus SWIS

die Schneehöhe, die Temperatur der Straßenkonstruktion und die Gefriertemperatur oder der Restsalzgehalt erfasst werden (KLOTZ, S., BALKE, J., 2004). Die Installation der GMA sollte im ungünstigsten Punkt der Fahrbahn erfolgen, der für Richtungsfahrbahnen, unabhängig vom jeweiligen Mikroklima, zwischen den Rollspuren liegt (SCHARSCHING, H., 1992).

Seit Anfang der 90er Jahre gehört auch das Straßenzustands-Wetter-Informationssystem (SWIS) auf deutschen Autobahnen zum Standard. Das SWIS wurde entwickelt, um Informationen der GMA zu sammeln (Bild 3) und zusammen mit Prognosen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für die jeweils zuständigen Autobahnmeistereien zur Verfügung zu stellen. Diese koordinieren danach dann ihren Einsatzdienst und die Rufbereitschaften. Da-

neben besitzen einige Bundesländer zusätzlich noch eigene Systeme.

2.1.2 Taumittelsprühanlagen

Neben den informationstechnischen Maßnahmen stellen auch die baulichen Maßnahmen einen wichtigen Punkt dar. Während das Netz der GMA ausgebaut wird, ist es auch wichtig, weitere Hilfsmittel wie die Taumittelsprühanlagen (TMS) zu installieren. Vor allem an gefährdeten Stellen, wie Brücken, Steigungen, Gefällen und Kurven, können sie den Winterdienst sehr vereinfachen. Sie werden durch einen Alarm der GMA aktiviert. Sie versprühen dann aus elektronisch gesteuerten Düsen aufgelöstes (flüssiges) Auftausalz auf die Fahrbahn und können insbesondere Sonderwinterdiensteinsätze

für diese gefährdeten Bereiche vermeiden. Der Winterdienst wird dadurch nicht ersetzt, sondern in ausgewählten Einzelfällen effektiv unterstützt.

TMS können großräumig auf bis zu 6 km langen Straßenabschnitten oder aber auch in kleinen Bereichen installiert werden. Allerdings ist darauf zu achten, dass sie den gesamten gefährdeten Bereich wie lange Steigungen oder Gefälle komplett besprühen und nicht nur einen kleinen Teil.

In Nordrhein-Westfalen sind die Taumittelsprühanlagen an folgenden Standorten eingerichtet (Straßen. NRW, 2005):

- A 1: Brücke über den Dortmund-Ems-Kanal bei Münster-Amelsbüren,
- A 1: Brücke über den Dortmund-Ems-Kanal bei Ladbergen,
- A 2: Streckenbereich „Bielefelder Berg“, Länge rd. 4 km in beiden Fahrrichtungen,
- A 4: Wiehltalbrücke zwischen den Anschlussstellen Bielstein und Gummersbach,
- A 30: Brücke über den Dortmund-Ems-Kanal bei Rheine,
- A 45: Streckenbereich zwischen Anschlussstellen „Hagen-Süd“ und „Lüdenscheid-Nord“ (Sauerland-Aufstieg) in Fahrrichtung Frankfurt durchgehend auf einer Länge von rd. 6 km und in Fahrrichtung Dortmund nur auf den vorhandenen 4 Brücken,
- A 45: Streckenbereich Watterscheide „Kalteiche“ bis Landesgrenze NRW/Hessen auf einer Länge von rd. 2,5 km in beiden Fahrrichtungen.

Die TMS haben auch in ihrem kleinen Umfang schon gute Arbeit geleistet, da der Erfolg zu verbuchen ist, dass Unfälle auf Grund von „Schmiere“, die entstand, wenn frischer Schnee festgefahren wurde, praktisch nicht mehr vorkommen. Auch haben Untersuchungen gezeigt, dass nicht nur Unfälle zurückgingen, sondern auch die Anzahl der Staus, die durch liegen gebliebene Lkw verursacht wurden (KLOTZ, S., BALKE, J., 2004).

Die Menge des Taumittels wird auf das Nötigste beschränkt, da die TMS nur anspringt, wenn sie eine Warnung der GMA erhält, und somit unnötige Sprühungen nicht vorkommen.

Dies zeigt, dass TMS einen guten Beitrag für Winterdienstmanagementsysteme bieten. Sie sind

zwar mit erheblichen Kosten verbunden, können aber die Verkehrssicherheit und den Verkehrsfluss verbessern.

2.1.3 Literaturstudie und Vergleichsprojekte

Erste Erfahrungen mit Fahrbahnbeheizungen gehen zurück bis in die 1950er und 60er Jahre, als man mit elektrischen Heizdrähten arbeitete. Aus ökologischen und ökonomischen Erwägungen ist diese Lösung heutzutage nur für ausgewählte Kleinanwendungen akzeptabel. Aus der ersten Hälfte der 80er Jahre liegen Unterlagen über zwei Projekte mit so genannten Wärmerohren (Heatpipes) vor, bei denen Wärme mittels kontinuierlicher Verdampfungs- und Kondensationsprozesse in einem hermetisch verschlossenen Rohr transportiert wird. Im Jahr 1989 wurde ein Vorschlag für die Ausstattung eines innerstädtischen Straßenabschnittes mit einem Rohrsystem bei der BAST vorgelegt, wobei die Energie aus dem mit warmen Abwasserleitungen belegten Untergrund genommen werden sollte. Dieses Projekt wurde nicht realisiert.

In den letzten 10 Jahren hat es im Ausland interessante Projekte gegeben, die dazu führten, sich auch in Deutschland wieder mit diesem Thema zu beschäftigen. Unter anderem sind hier zu nennen:

1. Schweiz: Projekt „Serso“, Eisfreihaltung einer exponierten Autobahnbrücke (Betonbrücke), realisiert 1994 (Bild 4 und Bild 5),
2. Niederlande: Projekt „Nordseesperwerk Haringvliet“, Autostraße mit Fahrbahn auf Gasbeton als Isoliermaterial, realisiert 1998 (Bild 6),
3. Niederlande: mehrere Projekte mit einem System zur „Walzasphalt-Straßenheizung“ (Bild 7),
4. USA: Heated Bridge Technology, landesweites Forschungsprojekt mit unterschiedlichen Konzepten zur Temperierung von Brücken (8 Projekte realisiert zwischen 1994 und 1998),
5. USA: Smartbridge, Temperierung einer Betonbrücke, 1999.

Die Erfahrungen aus diesen Projekten sind grundsätzlich positiv. Es ist zu beachten, dass die ausgeführten Objekte erhebliche Unterschiede in Bezug auf die Brückenkonstruktion, die eingesetzten Wärmequellen und die meteorologischen Randbedingungen aufweisen. Ein zusätzlicher Impuls, sich aktuell mit diesem Thema zu befassen, kommt aus

dem Bereich der Gebäudetechnik: Hier hat sich in den letzten Jahren die thermische Aktivierung von Bauteilen etabliert, die teilweise in Verbindung mit einer thermischen Nutzung des Untergrundes betrieben wird.

Nachfolgend einige Informationen zu relevanten Projekten in diesem Zusammenhang:

SERSO (CH)

1994 wurde im Verlauf der A 8 am Thuner See eine mit einem Temperierungssystem ausgestattete Betonbrücke in Betrieb genommen. Als Rohrmaterial kommt bei diesem Projekt Edelstahl zum Einsatz. Die Rohre befinden sich 7 cm unter der Oberfläche in einem „Vermörtelungsbelag“ (Offenporiger Walzasphalt mit Mörtelschlämme vergossen), die Unterseite der Brücke ist mit 10 cm Wärmedämmung ausgestattet. Die Wärmeversorgung erfolgt über ein Erdwärmesondenfeld, das als saisonaler Speicher betrieben wird (SERSO).



Bild 4: Brücke am Thuner See (CH), Projekt „Serso“, Einbau der Rohrregister



Bild 5: Brücke am Thuner See (CH), Wirkung der Temperierung

Haringvliet (NL)

Im Jahr 1999 wurde eine Fahrbahntemperierung für einen Teilbereich der Brücke über das Haringvliet-Sperrwerk in den Niederlanden realisiert (Bild 6). Hier erfolgt die Verlegung in einer Betonschicht unterhalb des Asphaltbelages. Darunter befindet sich Porenbeton (30 cm), der aufgrund seiner geringen Wärmeleitfähigkeit eine Wärmedämmung nach unten darstellt (S & H, 1999).



Bild 6: Erstellung der Fahrbahntemperierung Haringvliet-Sperrwerk (NL)

Walzasphalt-Straßenheizung (NL)

Ebenfalls aus den Niederlanden kommt das System in Bild 7. Hierbei handelt es sich um ein System, das für Walzasphalt entwickelt worden ist. Es besteht aus einer Fixierungsmatte, die die Position der Rohrleitungen festlegt und ein Befahren der verlegten Rohrmäander ermöglicht. In diese Fixierungsmatte werden dann Rohrleitungen aus PE (Polyethylen) geklemmt. Nach Angaben des Herstellers sind inzwischen mehrere Projekte damit erstellt worden, sieben in den Niederlanden und jeweils eins in Belgien und Großbritannien. Unter diesen Projekten ist eine Betonbrücke, die übrigen sind Straßen und Plätze (De BOND, 2006).



Bild 7: Walzasphalt-Straßenheizung (NL)

Heated Bridge Technology (USA)

In den USA wurden im Rahmen eines nationalen Programms acht Brücken landesweit mit unterschiedlichen Techniken zur Beheizung ausgestattet (Tabelle 1). Bei keinem dieser Projekte wurden dabei Rohrleitungen im Asphalt verlegt; bei allen Brücken handelt es sich um Betonbrücken mit

Rohrleitungen oder auch Heizdrähten im Beton (Heated Bridge, 1999).

Smartbridge (USA)

Ein weiteres Projekt zur Brückentemperierung in den USA wurde 1999 gestartet (OSU). Unter der Bezeichnung „Smartbridge“ wurde ebenfalls die Temperierung einer Betonbrücke realisiert (Bild 8 und Bild 9).

Darüber hinaus gibt es weitere Projekte in Japan, einige Informationen hierzu gibt der Geothermie-Spezialist Dr. Burkhard SANNER (SANNER, B., 2007).

Die Auswertung der Literatur zeigt Folgendes auf: Es gibt bislang kein deutsches Projekt, das eine geothermische Brückenheizung beinhaltet. Aufgrund unterschiedlicher Gegebenheiten hinsichtlich Belagsaufbaus, Nutzung und klimatischer Randbedingungen sind die Ergebnisse ausländischer Projekte

Item	Oregon						Nebraska	Texas	Virginia	Wet Virginia
	Silver Creek	Highland Zoo	Hood River 2nd St	1-84						
				West	Center	East				
Design objective	snowfree	snowfree	snowfree	snowfree	snowfree	snowfree	snowfree	anti-ice	snowfree	anti-ice
ADT (winter)	350									
System	Hydronic	MIC	MIC	Hydronic	MIC	Hydronic	Hydronic	Hydronic	Heat pipe	MIC
Heated area(ft ²)	6.200	12.714	18.853	6.440	4.378	6.850	17.211	2x8.600	5.185	9.070
Heat source	geo	elec	elec	geo	elec	nat gas	nat gas	geo	propane	elec
Design heat flux (W/ft ²)	37	30	60	64.5	70	64.5		12	58	48
Dimension (ft)										
Deck	40x105	36x129	26x154	27x103	24x103	29x103	12x1.204	2x58x146	44x117	44x200
Approaches	2x40x20	36x44								
Surface type										
Deck	pcc	pcc	pcc	pcc	pcc	pcc	pcc	pcc	pcc	pcc
Approaches		ac						pcc		
Cost (htg) (\$)	411.000	335.297	415.324	307.200	104.460	332.800	289.999	1.200.000	181.500	180.000
Cost/area (\$/ft ²)	66	26	22	48	24	49	17	70	35	20
Ann optg/maint cost (\$)	9.200	12.460	18.455	9.900	6.960	4.135		8.880	2.160	600-920
Op cost/hr (\$)							9.25			
Bridge crossing	water	highway	railroad	highway	highway	highway	pedstrn overpass	highway	water	water
System designer	ODOT	ODOT	ODOT	ODOT	ODOT	ODOT	Delta-Therm	Value Engrg	SETA	Payne Engrg

Tab. 1: Zusammenstellung aus „Heated Bridge Technology“ (Heated Bridge, 1999)



Bild 8: Smartbridge – vor dem Betonieren der Fahrbahnplatte



Bild 9: Smartbridge – Unterseite

nicht direkt übertragbar. Darüber hinaus stellt die Verlegung der Rohrregister in Gussasphalt auf einer Stahlbahnplatte eine Neuerung dar, für die keine vergleichbaren Projekte ermittelt werden konnten.

2.2 Wärmetechnische Grundlagen

2.2.1 Grundlagen für Temperaturberechnung Brücke

Brücken sind wie alle Außenbauwerke klimatischen Einwirkungen ausgesetzt. Die Sonnenstrahlung, die Atmosphäre und die terrestrische Umgebung stehen mit dem Bauwerk in thermischem Kontakt und tauschen Wärmeenergie aus. In Bild 10 sind die klimatischen Einflussgrößen dargestellt.

Die diese Wärmeübertragungsprozesse bestimmenden primären meteorologischen Größen wie etwa die Lufttemperatur, die Windgeschwindigkeit oder die Komponenten der Sonnenstrahlung sind bei Simulationsberechnungen von entscheidender Bedeutung und sind daher durch reale Klimadaten-sätze zu berücksichtigen.

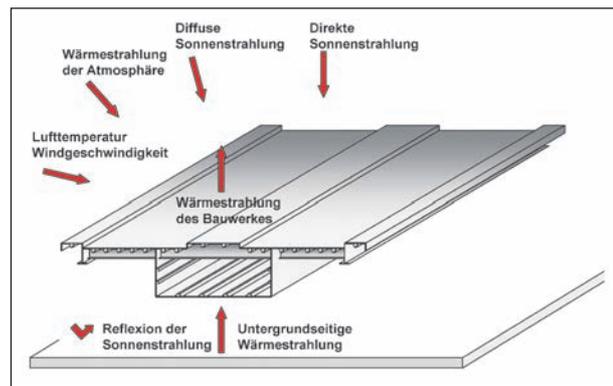


Bild 10: Klimatische Einwirkungen auf Außenbauwerke

Die Simulation der Temperaturverhältnisse innerhalb eines Brückenquerschnitts kann durch die Temperaturfeldberechnung erfolgen. Dieser liegt die Fourier'sche Differentialgleichung der Wärmeleitung zu Grunde (Glg. 2.1).

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.1)$$

In die Gleichung gehen die thermo-physikalischen Eigenschaften wie etwa die Wärmekapazität, die Wärmeleitfähigkeit und die Dichte des vorliegenden Werkstoffes ein. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Größenordnung der thermo-physikalischen Eigenschaften verschiedener Materialien.

Bei der Bestimmung der thermischen Randeinwirkungen wird zwischen konvektiven und strahlungsbasierten Komponenten unterschieden.

Die Wärmeübertragung zwischen einem strömenden Medium und der Oberfläche eines Festkörpers wird durch den konvektiven Wärmeübergang beschrieben. Es wird hierbei prinzipiell zwischen der freien – von Dichteunterschieden hervorgerufene Strömung – und der erzwungenen – von äußeren Einflüssen hervorgerufene Strömung – Konvektion unterschieden.

Die übertragene Wärmestromdichte ist der Temperaturdifferenz zwischen dem strömenden Medium und der Oberflächentemperatur des Festkörpers proportional. Der Proportionalitätsfaktor wird als Wärmeübergangskoeffizient bezeichnet. Aufgrund der Komplexität der thermodynamischen Vorgänge ist die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten sehr stark von den jeweiligen geometrischen und materiellen Gegebenheiten abhängig.

Für die Bestimmung der konvektiven Wärmeübertragung bei Brückenbauwerken infolge Winds existieren zahlreiche Ansätze zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit der Oberflächenorientierung und der Windgeschwindigkeit

Baustoff	Wärmekapazität c [J/kgK]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mk]	Dichte ρ [kg/m ³]
Stahl	460	50	7.850
	460	46	7.840
Beton	880	0.8-1.4	1.900-2.300
	922	1.4	2.480
	1.170	2.3	2.400
	840	1,7	2.400
	920	2.04	2.500
Asphalt	838	0.75	2.240

Tab. 2: Thermo-physikalische Kennwerte (LICHTTE, 2004)

Baustoff		langwellige Strahlung	kurzwellige Strahlung
Stahl	roh mit Walz- oder Gusschaut	0.76-0.83	
	frisch abgeschmirgelt	0.25-0.46	0,37-0.60
	angerostet	0.61	0.65-0.80
	ganz rot verrostet	0.71-0.85	0.80-0.90
	weiß angestrichen	0.90-0.95	0.12-0.16
	verzinkt	0.23-0.28	0.92
Beton	ungefärbt	0.88-0.95	0.65
	weiß angestrichen	0.88-0.95	0.35
	stark verschmutzt	0.88-0.95	0.50-0.90
Asphalt	normal	0.88	0.88-0.95
	mit hellen Kies durchsetzt	0.6	

Tab. 3: Emissionskoeffizienten (VDI, 1997)

	Kondensationsglätte	Glätte durch gefrierenden Nebel	Schneefall	Glatteisregen	Hagel und Graupel	Auskühlung des Bauwerkes
Fahrbahntemperatur unter 5 °C	x	x	x	x		x
Lufttemperatur in 5 cm Höhe unter 2 °C	x	x	x	x		
Lufttemperatur in 2 m Höhe unter 0 °C		x	x	x		
Lufttemperatur 5 cm Höhe unter 5 °C						x
höhere Windgeschwindigkeit						x
keine Strahlung	x	x	x	x	x	x
starker Abfall des Luftdrucks (vorausschauend)	x	x	x	x	x	x
Niederschlagsart		Nebel	Schnee	Regen	Hagel und Graupel	

Tab. 4: Randbedingungen für die Glättebildung auf der Brückenfahrbahn (H. S. W. GmbH, 2007)

keit (LICHTTE, 2004; VDI, 1997 (s. Tabelle 3)). Für die Fragestellung des Wärmeübergangs innerhalb des vom Wasser durchströmten Rohrquerschnitts existieren nach Prof. MANGERIG Ansätze, die die übertragene Wärmestromdichte in Abhängigkeit der Strömungsverhältnisse beschreiben (MANGERIG, 1986).

Neben dem konvektiven Wärmeaustausch findet stets ein Wärmeaustausch durch Strahlung statt. Hierbei wird die auf Bauwerksoberflächen auftretende Strahlung teils reflektiert bzw. absorbiert. Der absorbierte Anteil wird in Wärme umgewandelt und ist in der Energiebilanzierung der Querschnittsränder mit zu berücksichtigen. Die Fähigkeit der Oberfläche, Wärmestrahlung zu absorbieren, ist materialabhängig und unterscheidet sich im kurzwelligen Bereich (Sonnenstrahlung) vom langwelligen Bereich (Wärmestrahlung). Tabelle 3 gibt einen Überblick für die Größenordnung der Emissionskoeffizienten verschiedener Materialien.

2.2.2 Formen der Glättebildung

Die auf Straßen auftretenden Formen der Glättebildung können in drei Hauptformen untergliedert werden (s. Tabelle 4):

- Glätte durch Gefrieren von Feuchtigkeit (Kondensation),
- Glätte durch unterschiedliche Formen von Niederschlag und
- Glätte durch Gefrieren von nassen Straßenabschnitten.

Glätte durch Kondensation findet man am häufigsten auf Straßenbrücken. Durch die großen Tempe-

ratorschwankungen und die geringe Wärmespeicherkapazität kühlt die Straßenoberfläche ab und unterschreitet den Taupunkt. Die Feuchtigkeit aus der Luft kondensiert an der Oberfläche und gefriert, wenn die Temperatur unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ sinkt.

Glätte durch Niederschlag entsteht durch verschiedene Formen des Niederschlags. Schnee, Eisregen und Hagel bzw. Graupel sind als wichtigste zu Glatteis führende Niederschlagsarten zu nennen. Zwischen Wolkenuntergrenze und Erdoberfläche kann sich der Zustand des Niederschlags noch verändern. Die Umgebungstemperatur bestimmt dabei die Form des Niederschlags (MeteoGroup Deutschland GmbH, 2007).

Glätte durch Gefrieren tritt häufig an Tagen mit Temperaturen knapp über null auf. Wenn dann durch Niederschlag die Straßen abends nass sind und der Himmel aufklart, kann durch die Abstrahlung gegen den Himmel die Temperatur der Straßenoberfläche schnell unter den Gefrierpunkt absinken. Bereits nach kurzer Zeit entsteht so eine Eisschicht.

2.2.3 Grundwassernutzung und Erdwärmesonden

Geothermienutzung

Die Temperatur der Erdoberfläche schwankt mit den Tages- und Jahreszeiten, abhängig von Lufttemperatur und Solarstrahlung. Wenn man in tiefere Schichten des Erdreiches vordringt, nehmen die Temperaturschwankungen ab. Bereits in 10 bis 20 m Tiefe liegt die Schwankungsbreite nur noch bei ca. $0,1\text{ K}$ im Jahresverlauf. In unseren Breiten liegt in dieser Tiefe die Temperatur bei etwa $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Geht man in größere Tiefen, steigt die Temperatur kontinuierlich an, und zwar durchschnittlich mit etwa 3 K pro 100 m („geothermischer Gradient“). Folgende technische Varianten zur Erdwärmennutzung sind von Bedeutung:

- Erdwärmesonden zur Nutzung oberflächennaher Geothermie im Bereich bis 400 m ,
- Grundwassernutzung,
- Erdwärmekollektoren (Nutzung oberflächennaher Geothermie im Bereich wenige Meter unter der Erdoberfläche),
- tiefe Geothermie (Verwendung von Sonden in Tiefen größer 400 m).

Für die Brückentemperierung sind insbesondere die beiden erstgenannten Varianten von Interesse. Erdwärmekollektoren werden für die hier betrachtete Anwendung zu groß, die tiefe Geothermie hat höhere Kosten und ist hinsichtlich der Genehmigungsverfahren erheblich aufwändiger. Zu erwähnen sind an dieser Stelle auch die Kombinationen aus Pfahlgründungen und Erdwärmesonden, die so genannten Energiepfähle, bei denen aus statischen Gründen benötigte Gründungspfähle mit einem wasserführenden System analog den Erdwärmesonden ausgestattet werden.

Erdwärmesonden

Erdwärmesonden werden in Deutschland vorwiegend im Bereich bis 100 m Tiefe verwendet, da darüber hinaus eine bergrechtliche Genehmigung erforderlich wird. Zunächst werden Bohrungen bis in die entsprechende Tiefe vorgenommen, nach Einbringen der Sonden (Bild 11 und Bild 12) werden



Bild 11: Spitze einer Erdwärmesonde

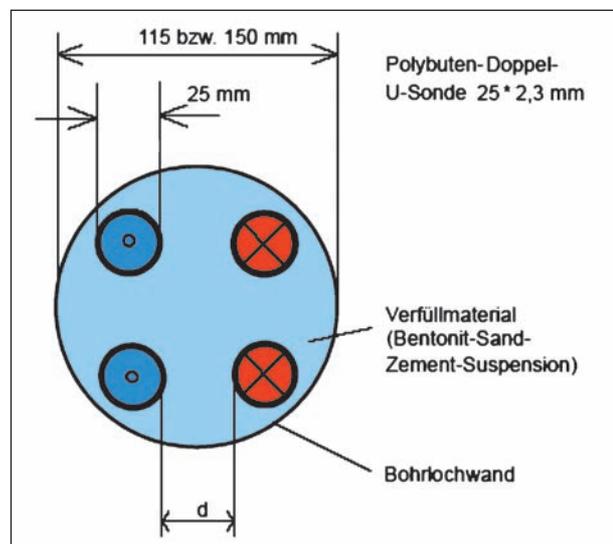


Bild 12: Querschnitt Erdwärmesonde – hier: Doppel-U-Sonde

Untergrund	spezifische Entzugsleistung	
	1.800 h/a	2.400 h/a
Schlechter Untergrund (trockenes Sediment, $\lambda < 1,5 \text{ W/mK}$)	25 W/m	25 W/m
Felsgestein ($1,5 \text{ W/mK} < \lambda < 3 \text{ W/mK}$)	60 W/m	50 W/m
Festgestein mit hoher Wärmeleitfähigkeit ($\lambda > 3 \text{ W/mK}$)	84 W/m	70 W/m

Tab. 5: Spezifische Entzugsleistungen für Erdwärmesonden (VDI 4640-2, 2001)

die Bohrlöcher dann mit einem geeigneten Mörtel verfüllt, der einen guten thermischen Kontakt zwischen Rohr und Erdreich gewährleistet.

Bei günstigen geologischen Bedingungen können die Sonden auch direkt in den Boden gerammt werden.

Die Auslegung von Erdwärmesonden erfolgt nach zwei Parametern: einerseits nach der Leistung (Watt) und andererseits hinsichtlich der Energiemenge (kWh oder MJ), die innerhalb einer Winterperiode dem Erdreich entzogen werden soll. Beide Größen sind von der Anordnung der Sonden im Erdreich und den wärmetechnischen Eigenschaften des Erdreiches abhängig. Für die spezifische Entzugsleistung (W/m Sondenlänge) enthält die VDI 4640 eine Tabelle zur Abschätzung der Entzugsleistungen, ein Auszug ist in Tabelle 5 zusammengestellt.

Für die Anforderung hinsichtlich der Energiemenge, die innerhalb eines Jahres entzogen werden kann, sind auch abschätzende Berechnungen möglich, angesichts der Komplexität dieser Vorgänge sind aber numerische Verfahren unbedingt zu empfehlen. Hierzu steht eine Reihe von Programmen zur Verfügung. Eine Auswahl dieser Programme wird nachfolgend kurz beschrieben:

- **EWS-Modul**

Das EWS-Modul beinhaltet eine Kombination aus numerischen und analytischen Berechnungen. Es sind Vereinfachungen hinsichtlich der Parameter Grundwasserströmung und jahreszeitliche Schwankungen in den oberflächennahen Bodenschichten vorgenommen worden. Vorteil ist die freie Verfügbarkeit des Programms.

- **TRNSYS**

TRNSYS ist ein universelles Programm zur Ermittlung von Energie und Temperaturen im Zeitverlauf. Für das thermische Verhalten von Geothermiebohrungen wird ein entsprechendes Modul angeboten, das auf den Berechnungsverfahren des EWS-Moduls beruht. Der Nutzen des Programms besteht darin, dass eine Modellierung des Gesamtsystems möglich ist (Fahrbahnplatte mit Rohrmäander, Regelstrategie, Witterung, Erdwärmesonde).

- **SHEMAT**

Bei SHEMAT (Simulator for Heat and Mass Transport) handelt es sich um ein Finite-Differenzen-Programm zur Simulation von stationären und instationären Prozessen in geothermischen Reservoirs in zwei und drei Dimensionen. Unter anderem lässt sich mit dieser Software auch das langfristige Verhalten von geothermischen Heizanlagen zur Gewinnung von Wärme aus tiefen Aquifers vorhersagen. Auch eine Simulation von Erdwärmesonden im Erdreich ist möglich.

Da es sich bei diesem Programm nicht speziell um eine Software zur Berechnung von Erdwärmesondenspeichern handelt, erweist sich die Eingabe des Sondenfeldes als weniger komfortabel, als dies bei den Programmen wie EWS der Fall ist. Dafür ist es hier möglich, die Eigenschaften des Untergrundes genauer abzubilden.

- **FEFLOW**

Bei FEFLOW (Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System) handelt es sich um ein FE-Programm zur Simulation von zwei- und dreidimensionalen unterirdischen Wasserflüssen. Hierbei werden sowohl der Feststofftransport als auch der Wärmetransport berücksichtigt. Für die Bemessung der Erdspeicher spielt insbesondere der Wärmetransport unter Berücksichtigung der Grundwasserverhältnisse eine Rolle. FEFLOW besitzt eine offene Programmierschnittstelle für eigene Erweiterungen. Bei FEFLOW handelt es sich um eine „Universalsoftware“, mit der auch komplexere Vorgänge (z. B. Schadstofftransport im Grundwasser) simuliert werden können. Die Simulation von Erdwärmesonden ist also nur als kleiner Baustein dieses sehr umfangreichen Programmpaketes zu sehen (FEFLOW 5.2).

Grundwassernutzung

Neben der indirekten Nutzung der Erdwärme mittels Erdwärmekollektoren und Erdwärmesonden besteht je nach Standort auch die Möglichkeit, Grundwasser über Brunnen zu entnehmen und die Wärme direkt oder über einen Wärmetauscher dem Verbraucher (hier Fahrbahnplatte) zur Verfügung zu stellen. Hierzu sind jedoch üblicherweise mindestens zwei Brunnen erforderlich, da nach den geltenden Vorschriften das Wasser im Allgemeinen dem Untergrund nach der Nutzung wieder zugeführt werden muss (SANNER, B., 1998). Die Nutzung des Grundwassers ist nach dem Wasserhaushaltsgesetz genehmigungspflichtig.

Zunächst wird das Grundwasser dem Untergrund über Förderbrunnen entnommen. Von dort aus wird es (ggf. über einen Zwischenwärmetauscher) dem Rohrsystem der Brücke zugeführt, die dem Wasser die Wärme entzieht (bzw. es im Falle einer Kühlung erwärmt). Das so abgekühlte (oder erwärmte) Grundwasser wird dem Untergrund über Schluckbrunnen wieder zugeführt. Die Schluckbrunnen müssen in Grundwasserfließrichtung in ausreichendem Abstand vom Förderbrunnen gebohrt werden, die Temperaturveränderung des zurückgeleiteten Grundwassers sollte ± 6 K nicht überschreiten (VDI 4640-2).

Ein Nachteil der direkten Grundwassernutzung ist, dass die Brunnenanlagen Pflege und Wartung erfordern. Auch können ungünstige chemische Zusammensetzungen des Grundwassers die langfristige Funktionsfähigkeit der Anlage beeinträchtigen. Bei größeren Anlagen ist die Grundwassererschließung den Erdwärmesonden jedoch von den Kosten her meist überlegen (SANNER, B. 1998).

Erdreich als Wärmespeicher

Die zuvor dargelegten Ausführungen gingen von einer Wärmeentnahme aus dem Erdreich aus, d. h., die Energie muss durch Wärmeleitung oder Grundwasserströmung nachgeliefert werden. Das Erdreich kann aber auch zur thermischen Energiespeicherung verwendet werden, d. h., im Verlauf der Jahreszeiten wird im Sommer Energie eingespeichert und im Winter wieder entnommen, um die Zeit zwischen Angebot und Nachfrage nach thermischer Energie zu überbrücken (saisonale Energiespeicherung).

Hierbei ist die Menge der gespeicherten Energie wichtiger als die Leistung, welche der Speicher

beim Beladen aufnehmen und beim Entladen abgeben kann. Das Verhältnis von in den Speicher eingeleiteter Wärmemenge zu aus dem Speicher zurückgewonnener Wärmemenge wird als Speichernutzungsgrad (SNG) η bezeichnet.

mit:

$$\eta = \frac{Q_{\text{aus}}}{Q_{\text{ein}}}$$

Q_{aus} : aus Speicher zurückgewonnene Wärmemenge in kWh

Q_{ein} : in Speicher eingeleitete Wärmemenge in kWh

Dieser hängt im Wesentlichen von der Speichergröße ab. Kann mit Speichervolumina kleiner 30.000 m^3 ein Nutzungsgrad von 50 bis 60 % erreicht werden, so liegt dieser bei Volumina größer 150.000 m^3 schon bei 80 bis 90 %. Das System schwingt sich aufgrund seiner großen Trägheit erst langsam ein, sodass nach drei Betriebsjahren etwa 80 % dieser Werte erreicht werden (VDI 2640-3).

Der Speicher muss in der Lage sein, zunächst verhältnismäßig viel thermische Energie aufnehmen zu können. Diese muss dann über einen längeren Zeitraum gespeichert und anschließend möglichst vollständig wieder abgeben werden. Die Energieverluste während eines Speicherzyklus sind dabei so niedrig wie möglich zu halten.

Auch hier ist zwischen zwei grundsätzlich verschiedenen Arten der thermischen Nutzung des Erdreichs zu unterscheiden:

- Erdwärmesondenspeicher,
- Aquiferspeicher (Grundwasser wird abgepumpt und wieder eingeleitet).

Die grundsätzlichen Anforderungen unterscheiden sich bei der reinen Wärmeentnahme im Vergleich zur Wärmespeicherung (Tabelle 6).

	Energie-speicherung	Direkte Wärme-/Kältenutzung
Wärmeaustausch an der Erdoberfläche	minimieren	maximieren
Verhältnis von Umgrenzungsfläche zu Volumen	minimieren	maximieren
Geometrie	kompakt, geschlossen	ausgedehnt, offen
Vorhandensein von Grundwasserströmung	ungünstig	günstig

Tab. 6: Vergleich der Anforderungen Energiespeicherung und Energieentnahme

Auf die Varianten Erdwärmesondenspeicher und Aquiferspeicher soll im Folgenden näher eingegangen werden.

Erdwärmesonden-Speicher

Erdwärmesonden-Speicher bestehen aus einer Vielzahl von Erdwärmesonden in vertikalen oder leicht geneigten Bohrlöchern (s. o.), über welche thermische Energie in den Untergrund eingebracht und diesem auch wieder entzogen wird. Sie werden überwiegend in wasserungesättigtem Untergrund eingesetzt, können aber auch in der gesättigten Zone gebaut werden, wenn die hydrologische Situation am Standort den Bau eines Aquiferspeichers nicht zulässt.

Ein günstiges Verhältnis von Umgrenzungsfläche zu Volumen wird durch eine kompakte Anordnung der Sonden erreicht. Günstig ist eine hexagonale Geometrie, da hier alle Sonden zu ihren Nachbarn

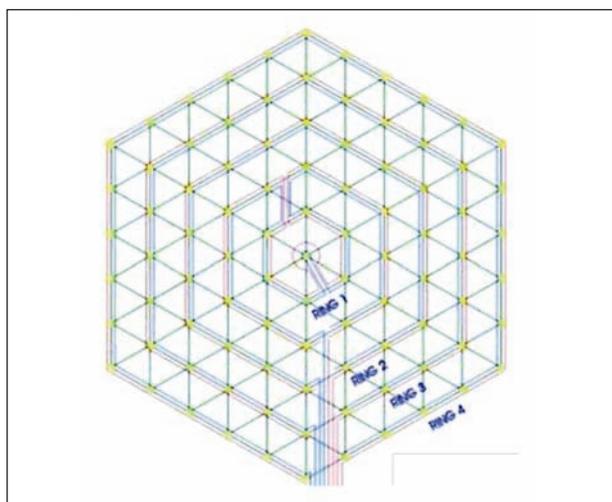


Bild 13: Hexagonale Anordnung der Erdsonden bei SERSO



Bild 14: Sondenfeld vor Aufbringen der Humusschicht (SERSO)

den jeweils gleichen Abstand haben. Eine rechteckige Anordnung, die oft aus baupraktischen Gründen gewählt wird, weist im Gegensatz dazu eine um 25 % größere Deckfläche auf (VDI 4640-3). Aus diesem Grund entschied man sich beim SERSO-Projekt für eine hexagonale Anordnung der Sonden (Bild 13, Bild 14).

Der Abstand der einzelnen Erdwärmesonden zueinander hängt hierbei zum einen von den physikalischen Eigenschaften des Untergrundes (Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, s. o.), zum anderen von der Zeitdauer zwischen Laden und Entladen ab und liegt üblicherweise im Bereich zwischen 2 und 5 m (VDI 4640-3).

Zur Auslegung des Speichers sei auch hier auf die numerischen Verfahren verwiesen. Anhand des SERSO-Projektes soll ein Eindruck von den Größenverhältnissen gegeben werden: Einer temperierten Brückenfläche von 1.300 m² stehen hier 55.000 m³ Speichervolumen gegenüber. Eine weitere Modellrechnung wurde für die Schönwasserparkbrücke (BAB 57 bei Krefeld) durchgeführt, dort ergaben sich 83.000 m³ Speichervolumen bei einer zu temperierenden Brückenfläche von 1.570 m².

Eine Sonderform der Erdwärmesonden stellen Pfahlgründungen mit integrierten Rohrleitungen dar. Diese Technik wird unter der Bezeichnung „Energiepfahl“ im Hochbau eingesetzt (KATZENBACH et al., 2007).

Aquiferspeicher

Als Aquifer wird ein Locker- oder Festgestein bezeichnet, in dessen Poren- und/oder Kluftsräumen sich Grundwasser befindet, welches sich dort bewegen kann (Leiter für Grundwasser). In der Praxis handelt es sich meist um weitflächig verbreitete Sand-, Kies-, Sandstein- oder Kalksteinschichten im Untergrund (VDI 4640-3). Aquifer sind häufig nach oben und unten durch geringdurchlässige Schichten, die so genannten Aquifugen (z. B. Tone), begrenzt, wodurch sich Grundwasserstockwerke bzw. Grundwasserhorizonte bilden (Bild 15).

Die wichtigste Eigenschaft eines Aquifers ist seine Transmissivität

$$T = k * m$$

T: Transmissivität in m²/s

k: Durchlässigkeit (Durchflussfläche 1 m breit bei 1 m Mächtigkeit) in m/s

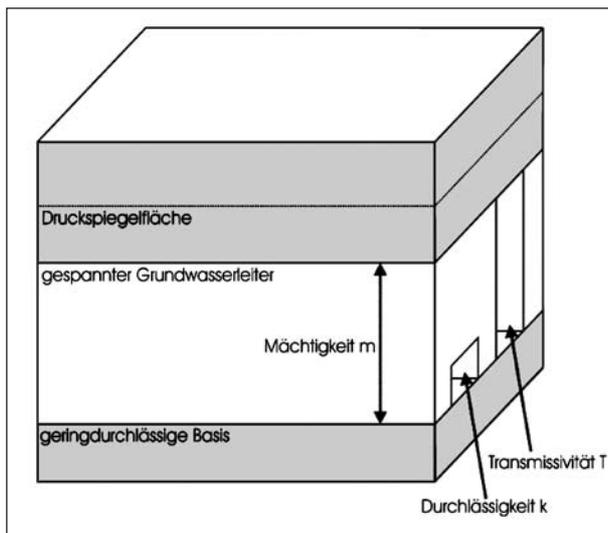


Bild 15: Aquifer – prinzipieller Aufbau

m: Mächtigkeit in m

Aquiferspeicher müssen eine bestimmte Mindestgröße aufweisen, um technisch einwandfrei betrieben und kostengünstig gebaut werden zu können, diese liegt bei etwa 50.000 m^3 . Große Aquiferspeicher stellen von allen Varianten der Erdwärmespeicherung die preisgünstigste Lösung dar (REUß, M., 2003). Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass oberflächennahe Aquifere häufig der Trinkwassernutzung vorbehalten sind und für die Speicherung geeignete Schichten daher eher in Tiefen unterhalb 100 m liegen (BINE 2003).

Eine hydrogeologische Voruntersuchung des Speicherstandortes ist unbedingt erforderlich, um Eignung und Dimensionierung zu bearbeiten.

2.3 Belagsaufbau bei Stahlbrücken

Der Belagsaufbau auf Stahlbrücken in Deutschland ist das Ergebnis eines langjährigen Prozesses. Viele Versuchsreihen und die Erfahrungen aus der Praxis haben zu dem heute auf Stahlbrücken üblichen Belagsaufbau geführt (Bild 16).

Unterschiedlichste Anforderungen werden an die Brückenbeläge gestellt. Diese können nicht nur von einem einzigen Baustoff erfüllt werden. Deshalb wird ein bestimmter Schichtenaufbau des Belages durch die Wahl verschiedener Baustoffe in dem Entwurf der ZTV-ING, Teil 7, Abschnitt 4 („Beläge auf Stahlbrücken mit einem Abdichtungssystem“, früher: ZTV-BEL-ST), festgelegt, der auf dem Stahlblech zu einer Gesamtdicke von ca. 80 mm führt.

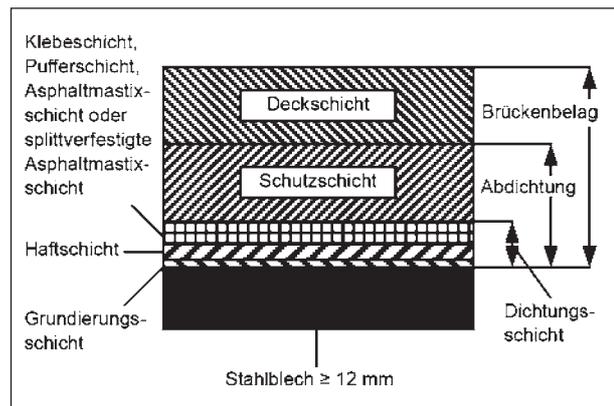


Bild 16: Grundsätzlicher Belagsaufbau auf Brücken entsprechend ZTV-ING, Teil 7, Abschnitt 4

Der Brückenbelag setzt sich i. Allg. zusammen aus der Dichtungs-, der Schutz- und der Deckschicht, wobei die Dichtungs- und Schutzschicht zusammen die Abdichtung bilden (Bild 16).

Für die Ausführung der Dichtungsschicht existieren gemäß Entwurf der ZTV-ING, Teil 7, Abschnitt 4, verschiedene Varianten, die sich u. a. im verwendeten Material und der Ausführungsart unterscheiden:

- Bauart 1 mit Reaktionsharz-Dichtungsschicht,
- Bauart 2 mit Bitumen-Dichtungsschicht,
- Bauart 3 mit Reaktionsharz/Bitumen-Dichtungsschicht.

Die Dichtungsschicht besteht bei der Bauart 1 aus einer Grundierungsschicht, einer Haftschrift sowie einer speziellen Verbindungsschicht zur Schutzschicht, i. d. R. der Pufferschicht. Diese Bauart wird auch bei den im Kapitel 4.2 beschriebenen Kleinteilversuchen angewendet, weil sie in der Praxis häufig zum Einsatz kommt.

Für die Schutz- und Deckschicht wird in der Regel Gussasphalt gewählt, bei dem die Zuschläge aufgrund des Bindemittelüberschusses im heißen Zustand im Bindemittel „schwimmen“, wodurch die Masse gießfähig und gegenüber Walzasphalten keine Verdichtung notwendig ist. Der Gussasphalt ist dadurch im eingebauten Zustand nahezu hohlraumfrei (Hohlraumgehalt $< 2,5 \%$) und somit wasserdicht. Die eingebaute Schichtdicke sollte sowohl bei der Schutz- als auch der Deckschicht jeweils ca. 35 mm betragen.

Durch die im Vergleich zum Walzasphalt hohen Einbautemperaturen des Gussasphaltes (aktuell

bis maximal 230 °C) werden nicht nur die Dichtungsschicht und die Fahrbahntafel hohen Temperaturbeanspruchungen beim Einbau ausgesetzt, sondern auch die Rohrleitung zum Transport des Temperiermediums.

3 Variantenentwicklung

3.1 Rohrmaterial

3.1.1 Allgemeines

Das Rohr bzw. das Rohrmaterial wird bei einem Praxiseinsatz den unterschiedlichsten Beanspruchungen ausgesetzt, die es ohne unzulässige Veränderungen des Materials sowie Verformungen ertragen muss. Neben der hohen Einbautemperatur des Gussasphaltes gehört dazu, dass sich die Rohre, ohne zu knicken, so biegen lassen, dass der entsprechende Rohrabstand gewährleistet ist.

Vier Rohrmaterialien bzw. Rohrkonfigurationen wurden in Betracht gezogen:

1. PE-RT-Rohre (Polyethylen erhöhter Temperaturbeständigkeit nach DIN 16833),
2. PE-Xa-Rohre (vernetztes Polyethylen), wobei zwei unterschiedliche Fabrikate zum Einsatz gekommen sind,
3. PE-Xa-Rohre mit Aluminiumummantelung,
4. Edelstahlrohre.

Bei den Rohren aus PE-Xa wird durch peroxidische Vernetzung die thermische und mechanische Beständigkeit des Kunststoffes stark erhöht, das Material ist nach DIN 4726 sauerstoffdicht. Die Rohrvarianten 1, 2 und 4 wurden bereits bei den internationalen Vergleichsprojekten (siehe Kapitel 2.1.3) eingesetzt, die PE-Xa-Rohre mit Aluminiumummantelung werden erstmalig für diese Anwendung untersucht. Zu beachten ist, dass sich unter den zitierten Vergleichsprojekten keine Stahlbrücke mit Gussasphalt befindet, sodass die konkreten Einbaubedingungen abweichend sind.

Edelstahlrohre sind in dem hier relevanten Temperaturbereich unkritisch. Die Herstellung der Rohrmäander aus Edelstahlrohren ist mit erhöhtem Aufwand (Biegen durch externe Fachfirma oder Verwendung von Rohrbögen) und demzufolge mit höheren Kosten verbunden. Daher wurden Edelstahl-

rohre im weiteren Verlauf des Projektes nicht vertieft untersucht.

3.1.2 Thermische Beständigkeit

Das Ziel dieser Vorversuche mit den verschiedenen Rohrmaterialien war es, ein geeignetes Rohrmaterial für den Einsatz in der Praxis zu finden. Diese Vorversuche zur Beurteilung des Rohrmaterials hinsichtlich der Beständigkeit beim Gussasphalteinbau wurden mit den drei Kunststoffrohren (Variante 1 bis 3) durchgeführt.

PE-RT

Aufgrund der bereits aus den Niederlanden vorliegenden Erfahrungen mit Rohrleitungen aus PE-RT und einem dazugehörigen speziellen Befestigungssystem wurde auch im Rahmen dieses Projektes diese Kombination aus Rohrleitung und abgestimmter Befestigung untersucht. Allerdings muss hierbei auch berücksichtigt werden, dass in den Niederlanden dieses System nur in Walzasphalt mit Temperaturen von ca. 170 °C und nicht in Gussasphalt mit Einbautemperaturen von 200 °C bis 230 °C angewendet wurde.

Wegen der beim Einbau von Gussasphalt hohen Temperaturen (bis zu 230 °C) ist nicht nur die kurzzeitige Haltbarkeit des Materials gegenüber hohen Temperaturen von Interesse, sondern auch der Zeitraum, bis der Gussasphalt auf ca. 100-120 °C abgekühlt ist. Dieser Zeitraum wurde anhand von Laborversuchen ermittelt (Bild 17). Dabei wurde eine Dauer von ca. 40 min festgestellt, bis die Temperatur im Gussasphalt von 230 °C auf ca. 100 °C abgesunken war. In der Praxis ist zu erwarten, dass sich unter den In-situ-Bedingungen kürzere Zeiten einstellen.

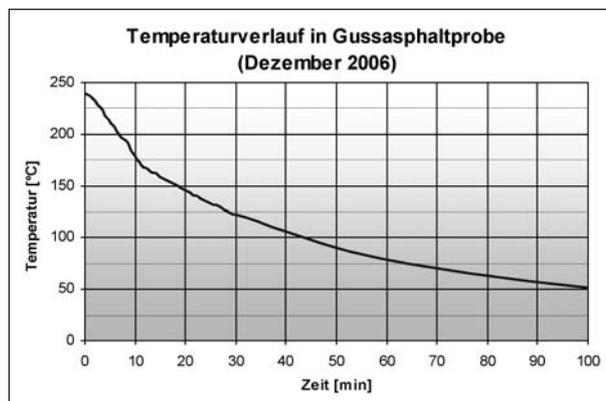


Bild 17: Exemplarischer Temperaturverlauf in einer Gussasphaltprobe

Im Bild 18 sind das Befestigungssystem sowie das Rohrmaterial, welches in den Niederlanden eingesetzt wird, dargestellt.

Die Vorversuche zeigten erhebliche Differenzen für zwei unterschiedliche Chargen: Die erste Charge zeigte beim Einbau in den Gussasphalt keine offensichtlichen negativen Auswirkungen der hohen Temperaturen, bei einer zweiten Lieferung des gleichen Rohrmaterials kam es hingegen zu extremen Verformungen der Rohre, sodass diese für weitere Untersuchungen unbrauchbar waren. In Bild 19 und Bild 20 sind die unterschiedlichen Lieferungen nach dem Einbau im Gussasphalt dargestellt.

Durch eine Kühlung der Rohre mit Wasser beim Gussasphalteinbau (Bild 21, linke Probe) konnten die Verformungen des Rohres vermieden und somit die Gebrauchstauglichkeit gewährleistet werden.

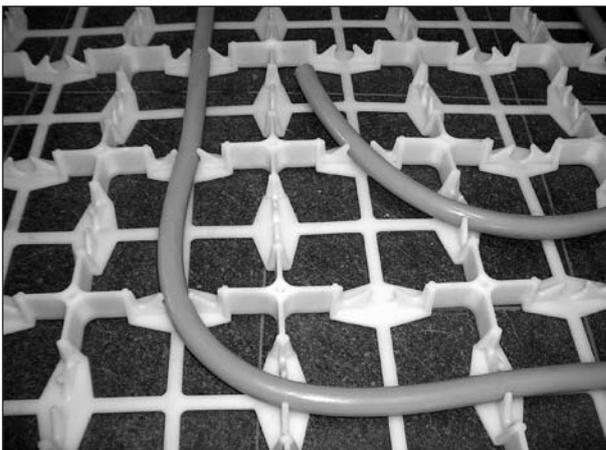


Bild 18: Rohrmaterial (PE-RT) und Befestigungssystem

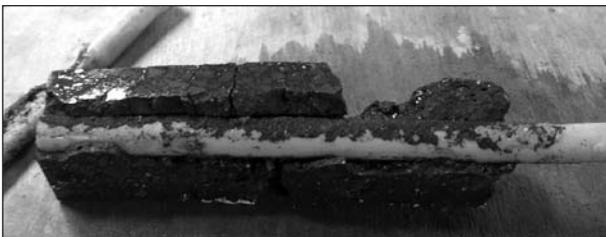


Bild 19: Unbeschädigtes Rohr (PE-RT) nach Einbau im Gussasphalt (1. Lieferung)



Bild 20: Verformtes Rohr (Vordergrund) (PE-RT) nach Einbau im Gussasphalt (2. Lieferung)

Für die Versuche wurden die Kunststoffrohre mittig in eine Schalung eingepasst und auf einer im Vorfeld hergestellten Gussasphaltschutzschicht befestigt. Um die Wirkung einer Rohrkühlung während des Aufbringens des Gussasphaltes beurteilen zu können, wurden von jedem Material jeweils zwei Versuchskörper hergestellt. Der eine Versuchskörper wurde durch fließendes Wasser gekühlt, der andere nicht. Die Deckschicht wurde per Hand in die Schalung eingebracht. Der Gussasphalt hatte dabei eine Temperatur von ca. 200 °C.

Diese im Labor einfach zu realisierende Maßnahme der Durchlauf-Kühlung sollte allerdings für den Einsatz der Rohre in der Praxis nicht zur Pflicht-Anforderung werden.

Bei den vergleichenden Versuchen mit PE-RT-Rohren war auch festzustellen, dass das ungekühlte Rohr geschmolzen (Bild 22) und Gussasphalt in das Rohr eingedrungen ist. Eine Nutzung des Rohres ist nicht mehr möglich. Das gekühlte Rohr blieb funktionstüchtig.

Aufgrund dieser Resultate wird das PE-RT-Rohr nicht für eine Verwendung im Gussasphalt empfohlen und im Rahmen dieses Projektes nicht weiter untersucht.



Bild 21: Asphalteinbau – Rohre PE-RT (mit und ohne Wasserkühlung)

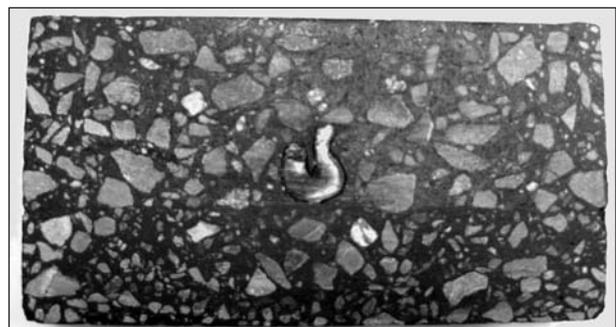


Bild 22: Zerstörtes ungekühltes Rohr PE-RT (aufgeschnittener Probekörper)



Bild 23: Asphalt einbau – Rohre PE-Xa ohne Aluminiumummantelung (mit und ohne Wasserkühlung)

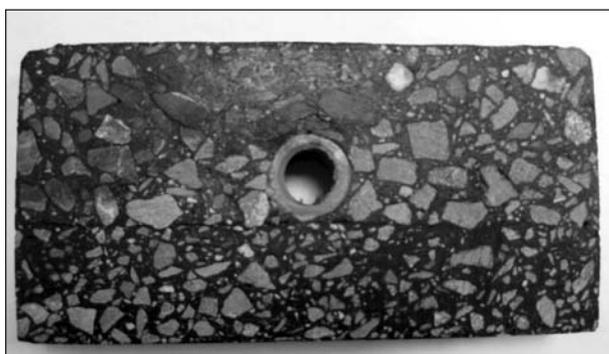


Bild 24: Unzerstörtes Rohr PE-Xa ohne Aluminiumummantelung (aufgeschnittener Probekörper)

PE-Xa

Mit den Rohren aus PE-Xa-Kunststoff wurden die gleichen Probekörper wie für das zuvor erläuterte Material hergestellt (Bild 23), wobei auch hier der Einfluss der Wasserkühlung mit untersucht wurde.

Es zeigte sich, dass die Rohre durch den Gussasphalt geringfügig geschädigt wurde und zwar im Bereich der äußersten Schicht (Bild 24). Die Kühlung während des Einbringens des Gussasphaltes konnte diesen Effekt weiter vermindern.

PE-Xa mit Aluminiummantel

Auch für das PE-Xa-Rohr mit Aluminiummantel wurde der Einfluss des heißen Gussasphalts getestet (Bild 25, Bild 26), hier konnte keine Schädigung des Kunststoffmaterials festgestellt werden.



Bild 25: Rohr PE-Xa mit Aluminiumummantelung-Verbund zwischen Gussasphalt und Rohr (Ansicht)



Bild 26: Rohr PE-Xa mit Aluminiumummantelung-Verbund zwischen Gussasphalt und Rohr (Draufsicht)

Zusammenfassende Betrachtung zur thermischen Beständigkeit

Zur Überprüfung der thermischen „Haltbarkeit“ der Rohre wurden die verschiedenen Rohre im Ofen einer thermischen Beanspruchung bei einer Temperatur von 250 °C ausgesetzt. Auch diese Ergebnisse zeigen, dass nur die Rohre aus PE-Xa (ggf. mit Kühlung) mit und ohne Aluminiumummantelung für den Einbau im Gussasphalt geeignet sind (Bild 27), während sich das Rohr aus PE-RT stark verformte.

Als Ergebnis dieser Versuche zur thermischen Stabilität des Rohrmaterials lässt sich schlussfolgern, dass ohne zusätzliche Kühlung nur die Rohre aus

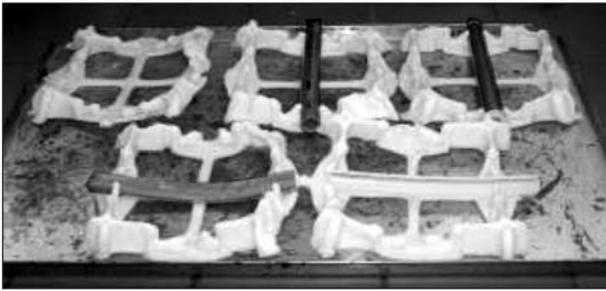


Bild 27: Rohre und Befestigungsgitter nach der thermischen Beanspruchung im Laborofen bei 250 °C

dem PE-Xa-Material mit Aluminiummantelung geeignet sind. Mit zusätzlicher Kühlung oder bei Inkaufnahme geringfügiger Schädigungen im äußeren Bereich des Rohres, die die Funktion nicht beeinträchtigen, sind auch die PE-Xa-Rohre ohne Aluminiumummantelung einsetzbar. Die Rohre aus PE-RT eignen sich hingegen nicht für den Einsatz im Gussasphalt.

3.1.3 Verarbeitbarkeit zu Rohrregistern

Die verwendeten Rohre müssen neben der thermischen Beständigkeit auch gewährleisten, dass sich der gewählte Rohrabstand herstellen lässt. Das heißt, die Rohre müssen im gesamten Bereich eine in etwa konstante Querschnittsfläche aufweisen (Knicken muss ausgeschlossen werden). Nach Möglichkeit sollen sich die Rohre ohne zusätzliche Hilfsmittel so weit biegen lassen, dass der gewählte Rohrabstand von 10 oder 15 cm realisiert werden kann.

Als Achsabstände der Rohre wurden neben den in den Niederlanden verwendeten 15 cm auch 10 cm gewählt, weil sich bei diesem Abstand eine homogenere Oberflächentemperatur ergibt (Kapitel 4.1.3 und Kapitel 5.2.2).

Während sich der Achsabstand von 15 cm bei allen Rohren problemlos ohne die Verwendung von Hilfsmitteln herstellen lässt, vermindert sich bei den PE-RT- und PE-Xa-Rohren beim Biegen auf den Achsabstand von 10 cm der Querschnitt des Rohres im Bogen (Knicken). Der ursprüngliche Querschnitt der Rohre muss jedoch so weit wie möglich erhalten bleiben, damit das Medium das Rohr gut durchströmen kann. Von den Herstellern der PE-Xa-Rohre ohne Ummantelung wird ein minimaler Biegeradius ohne Hilfsmittel von $5 \cdot D$, d. h. 10 cm für einen Rohrdurchmesser von 20 mm, vorgegeben. Daraus ergibt sich ein Rohrabstand von 20 cm, sofern keine Schleifen an den Wendepunkten ausgebildet werden. Durch Erwärmen des Rohres und mit

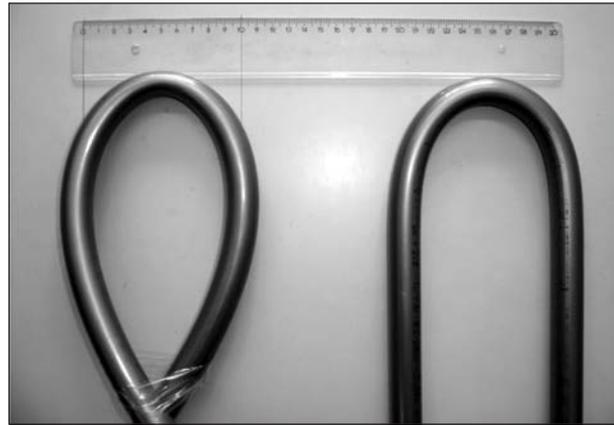


Bild 28: Rohre aus PE-Xa auf 10 cm Achsabstand gebogen – rechts: mit Aluminiumummantelung; links: ohne Aluminiumummantelung

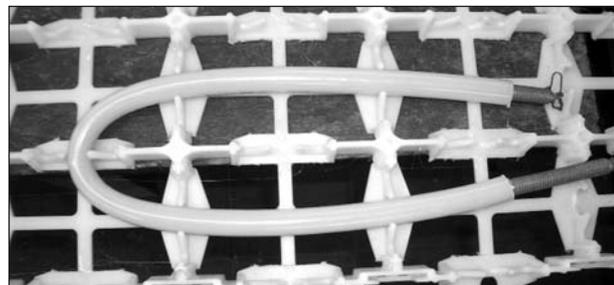


Bild 29: Rohre aus PE-Xa mit Hilfsmittel auf 10 cm Achsabstand gebogen

Hilfe von Biegefedern kann mit erhöhtem Aufwand auch der Abstand von 10 cm hergestellt werden (Kapitel 5.1.2).

Die Rohre aus PE-Xa mit Aluminiumummantelung lassen sich ohne Hilfsmittel auf einen Achsabstand von 10 cm biegen (Herstellerangabe $3 \cdot D$, d. h. 12 cm), ohne dass der Querschnitt nennenswert beeinflusst wird. Bei den Rohren aus PE-Xa ohne Aluminiumummantelung empfiehlt es sich folglich, eine maschinelle Fertigung der Rohrregister anzustreben, da die Fertigung mit Biegefedern von Hand sowie ein Biegen im vorgewärmten Zustand zu aufwändig sind.

Im Bild 28 sind die Rohre aus dem Material PE-Xa mit (rechts) und ohne (links) Aluminiumummantelung bei der Biegung auf einen Achsabstand von 10 cm dargestellt. Während das Rohr mit Aluminiumummantelung auch ohne Fixierung seine Form beibehält, muss das Rohr ohne Aluminiumummantelung zusätzlich fixiert werden. Das Bild 29 zeigt ebenfalls ein Rohr aus PE-Xa, welches mit Hilfe einer Biegefeder auf den Achsabstand von 10 cm gebogen und anschließend in dem modifizierten Befestigungssystem aus den Niederlanden fixiert wurde.

3.1.4 Zusammenfassung

Aufgrund der Ergebnisse aus der thermischen Beanspruchung der unterschiedlichen Rohrmaterialien sowie den Biegeversuchen der Rohre aus PE-Xa mit und ohne Aluminiumummantelung werden für einen Einsatz in der Praxis die Rohre aus dem Material PE-Xa und mit Aluminiumummantelung empfohlen, da mit diesen Rohren nicht nur eine gute thermische Beständigkeit (ohne zusätzliche Wasserkühlung), sondern auch ein leichtes Biegen auf den gewünschten Rohrabstand ohne Hilfsmittel möglich ist und die Rohre die gebogene Form beibehalten. Die Aluminiumummantelung des Rohres bietet als weiteren Vorteil für die Praxis, dass sich die Lage der Rohre, sowohl Tiefe als auch Ausrichtung, nach dem Einbau im Gussasphalt ggf. mit einem Bewehrungssuchgerät bestimmen (Kapitel 5.3) lässt.

Hinsichtlich der Kosten ist zu erwähnen, dass diese Rohre günstiger als Edelstahlrohre sind.

Auf der Testbrücke (Kapitel 5.1) wurden Rohre aus vernetztem Polyethylen (PE-Xa) ohne Aluminiumummantelung verwendet, da sich die besondere Eignung der aluminiumummantelten Rohre erst im Verlauf des Projektes herausstellte. Bei den Tests unter realen Verkehrsbedingungen, aber ohne Temperierung (Brücke unter Praxisbedingungen, Kapitel 5.3.1) kommen Rohre aus PE-Xa mit Aluminiumummantelung und mit zwei unterschiedlichen Rohrdurchmessern (16 mm und 20 mm) zum Einsatz.

3.2 Rohrdurchmesser

Der Außendurchmesser der zuvor untersuchten Rohre betrug bei allen betrachteten Varianten jeweils 20 mm. Dieser Durchmesser wurde aufgrund der Erfahrungen aus den Niederlanden gewählt, auch werden vergleichbare Systeme im Bereich der Gebäudetemperierung mit diesem Durchmesser ausgeführt. Bei kleineren Rohrdurchmessern lassen sich die Rohrmäander mit engeren Rohrabständen (z. B. 10 cm) leichter herstellen und die Störungen des Asphaltes sind geringer, andererseits erhöht sich der Energieaufwand für die Zirkulation des Mediums und der Wärmetransfer vom Rohr an den Asphalt wird bei geringerem Rohrdurchmesser schlechter (RECKNAGEL, H., SPRENGER, E., SCHRAMEK, E. 2005). Daher wurde grundsätzlich an diesem Rohrdurchmesser

festgehalten, zumal dadurch auch die Verwendung des niederländischen Befestigungssystems ohne Zusatzmaßnahmen möglich war.

Bei der Auslegung eines Gesamtsystems sind auch Abweichungen (ca. +/- 5 mm) möglich, eine Optimierung kann abhängig von der Fläche eines einzelnen Rohrmäanders, den Temperaturverhältnissen und anderen Einflussgrößen erfolgen. In einzelnen Unterabschnitten dieses Projektes wurden auch abweichende Rohrdurchmesser von 14 und 16 mm verwendet. Diese wurden in einer frühen Projektphase von einem Hersteller zur Verfügung gestellt.

Prinzipiell besitzt auch die Wandstärke der Rohre einen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit, tatsächlich sind für die hier betrachteten Rohrdurchmesser nur Wandstärken von 2 bis 2,5 mm im Angebot, aufgrund der geringen Differenz ist daher keine weitere Untersuchung dieses Kriteriums notwendig.

3.3 Rohrpositionierung

3.3.1 Allgemeines

Die geeignete Positionierung der Rohre ist abhängig von dem Durchmesser der Rohre sowie auch von der Temperatur des verwendeten Temperiermediums. Unter „Positionierung“ werden sowohl der Achsabstand der Rohre untereinander als auch die Verlegetiefe der Rohre innerhalb des Schichtenpaketes (Belagsaufbau) zusammengefasst.

Die Ziele bei der Festlegung der Rohrpositionierung waren vor allem eine gleichmäßige Temperaturverteilung an der Fahrbahnoberfläche, ein möglichst schnelles „Aufheizen“ der Fahrbahnoberfläche sowie möglichst wenig Energieverluste. Des Weiteren sollte die Temperatur des Temperiermediums möglichst niedrig (z. B. 10 °C, angepasst an die geothermische Wärmequelle) sein.

Als Abstand der Rohrachsen wurden sowohl die in den Niederlanden verwendeten 15 cm als auch 10 cm untersucht, zusätzlich wurde für einige numerische Untersuchungen noch ein Abstand von 20 cm betrachtet.

Neben den unterschiedlichen Abständen kann auch die Verlegetiefe der Rohre innerhalb des Schichtenpaketes (Belagsaufbau) variiert werden. Dabei ist bei Beibehaltung der Gesamtdicke des Belagsaufbaus eine Verlegung auf der Dichtungsschicht

(Rohrlage A, Bild 30) oder zwischen der Schutz- und der Deckschicht möglich (Rohrlage B). Des Weiteren ist auch die Verlegung der Rohre in einer zusätzlichen Zwischenschicht zwischen der Schutz- und Deckschicht möglich (Rohrlage C). Sofern die Lage der Rohre innerhalb des gesamten Belagsaufbaus gleich ist, sind die Rohrlagen B und C thermisch identisch. Die Variante der Verlegung der Rohre in einer Zwischenschicht kommt bei der Testbrücke (Kapitel 5.1) und auch bei dem Pilotprojekt „Kanalbrücke Berkenthin“ zu Anwendung. In Tabelle 7 sind die Vor- und Nachteile der drei möglichen Positionierungen der Rohrregister dargestellt.

3.3.2 Laborversuche

Zu beachten ist bei der Festlegung der Rohrlage unter Beibehaltung des Aufbaus gemäß der ZTV-ING, Teil 7, Abschnitt 4 (bzw. ZTV-BEL-ST), dass die minimale Einbaudicke des Gussasphaltes in Abhängigkeit vom Größtkorn (D) mindestens $2,5 \cdot D$ beträgt und gleichzeitig auch eine ausreichende Überdeckung (ca. 2,5 cm) über den Rohren vorhanden ist.

Im Labor wurden in einer Klimakammer die Einflüsse der unterschiedlichen Verlegehöhen und Rohr-abstände genauer untersucht. Dazu wurden sowohl die Klimakammer als auch die Probe auf ca. -5 °C

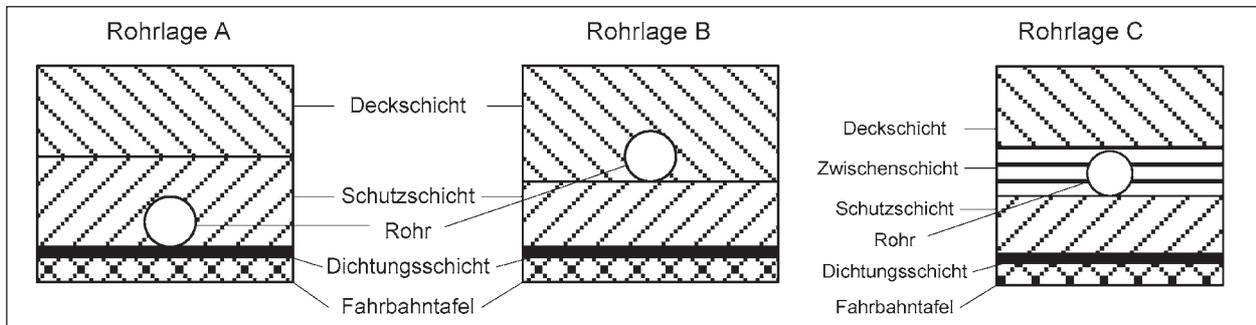


Bild 30: Mögliche Rohrlagen innerhalb des Schichtenpaketes (Belagsaufbau)

Verlegung auf der Dichtungsschicht (Rohrlage A)	Verlegung auf einer dünnen Schutzschicht (Rohrlage B)	Verlegung in einer Zwischenschicht zwischen der Schutz- und Deckschicht (Rohrlage C)
+ keine Eingriffe während des Asphaltbaus notwendig	+ Befestigung der Rohre auf der Schutzschicht; keine Beschädigung der Dichtungsschicht und des Stahlblechs	+ Befestigung der Rohre auf der Schutzschicht; keine Beschädigung der Dichtungsschicht und des Stahlblechs
+ gleichmäßige Wärmeverteilung an der Fahrbahnoberfläche	+ nur geringe Wärmeverluste an der Brückenunterseite	+ nur geringe Wärmeverluste an der Brückenunterseite
+ bei der Instandsetzung der Deckschicht besteht nicht die Gefahr der Beschädigung der Rohrleitungen beim Herausfräsen der Deckschicht	+ gleichmäßige und ebene Unterlage für die Befestigung der Rohre	+ bei der Instandsetzung der Deckschicht besteht nicht die Gefahr der Beschädigung der Rohrleitungen beim Herausfräsen der Deckschicht
+ keine Anpassung der Schichtdicken bei der Schutz- und Deckschicht notwendig	+ geringere Vorlauftemperatur notwendig; kürzere Reaktionszeiten bis Temperatur an der Oberfläche erreicht ist	+ Verringerung der Schichtdicke der Deckschicht möglich (Mindestschichtdicke sollte bei der Deck- und der Zwischenschicht eingehalten werden)
- Befestigung (wenn genagelt oder geschraubt) erfolgt auf der Dichtungsschicht – Beschädigung; ggf. Wasserzutritt	- Anpassung der Schichtdicken von der Schutz- und Deckschicht notwendig	- höherer Schichtenaufbau – Berücksichtigung der höheren Lasten und ggf. Anpassung der Fahrbahnübergänge
- hohe Wärmeverluste an der Unterseite der Brücke (ggf. Dämmung notwendig)	- bei zu geringer Überdeckung Gefahr von Rissen in der Deckschicht	- höhere Vorlauftemperatur notwendig; längere Reaktionszeiten, bis Temperatur an der Oberfläche erreicht ist
- hohe bzw. höhere Vorlauftemperatur notwendig; längere Reaktionszeiten bis Temperatur an der Oberfläche erreicht ist	- ungleichmäßige Temperaturverteilung an der Oberfläche bei zu großem Rohr-abstand	

Tab. 7: Unterschiedliche Varianten der Rohrlagen innerhalb des Schichtenpaketes (Belagsaufbau)

temperiert und die Probe mit etwa 10 °C kaltem Wasser durchströmt. Während des Versuchs erfolgte die Aufzeichnung der Temperatur in der Kammer sowie der Oberflächentemperatur über und zwischen den Rohren in Abhängigkeit von der Zeit. Insgesamt wurden dabei vier mögliche Varianten – Lage der Rohre auf der Dichtungsschicht oder mittig im Schichtenpaket zwischen der Schutz- und Dichtungsschicht sowie die beiden Rohrabstände von 10 und 15 cm – untersucht (Tabelle 8).

Im Bild 31 ist der Versuchsaufbau einer der vier untersuchten Varianten dargestellt. Neben der Aufzeichnung der Temperaturdaten wurden auch Aufnahmen mit einer Thermografiekamera gemacht.

In den Infrarot-Aufnahmen in Bild 32 bis Bild 34 sind die Unterschiede zwischen den Rohrabständen und der Rohrpositionierung im Schichtenpaket deutlich zu erkennen. Befinden sich die Rohre auf der Dichtungsschicht (Bild 32), ist der thermische Widerstand bis zur Fahrbahnoberfläche zu hoch, die Temperaturerhöhung der Fahrbahnoberfläche ist zu gering. Befindet sich die Rohrlage in der Mitte des Asphaltaufbaus (Bild 33), so ist die Temperaturerhöhung oberhalb der Rohre ausreichend, bei 15 cm Rohrabstand sinkt die Oberflächentempera-

Bezeichnung	Rohrabstand	Verlegehöhe
Var. KT A_15	15 cm	auf Dichtungsschicht (Rohrlage A)
Var. KT B_15	15 cm	Mitte, zwischen Schutz- und Deckschicht (Rohrlage B)
Var. KT A_10	10 cm	auf Dichtungsschicht (Rohrlage A)
Var. KT B_10	10 cm	Mitte, zwischen Schutz- und Deckschicht (Rohrlage B)

Tab. 8: Variantenüberblick für thermische Kleinteiluntersuchungen („KT“)



Bild 31: Untersuchungen in der Klimakammer zur Rohrpositionierung – Versuchsaufbau (Lage der Rohre auf Dichtungsschicht mit 15 cm Rohrabstand, KT A_15)

tur jedoch zwischen den Rohren deutlich ab, es entsteht ein welliges Temperaturprofil. Bei 10 cm Rohrabstand ist der Temperaturabfall zwischen den Rohren nur noch gering (Bild 34). Für die Variante KT_B 10 liegen keine Infrarotaufnahmen vor.

Aus diesen Kleinteilversuchen lässt sich folgern, dass eine Verlegung auf der Dichtungsschicht un-

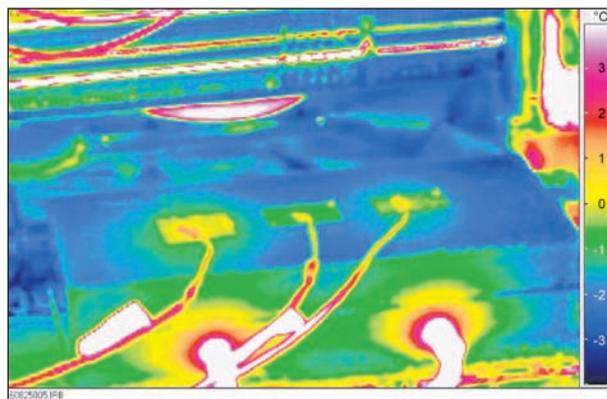


Bild 32: Infrarot-Aufnahme Kleinteilprobe mit 15 cm Rohrabstand – Lage auf der Dichtungsschicht (Var. KT A_15)

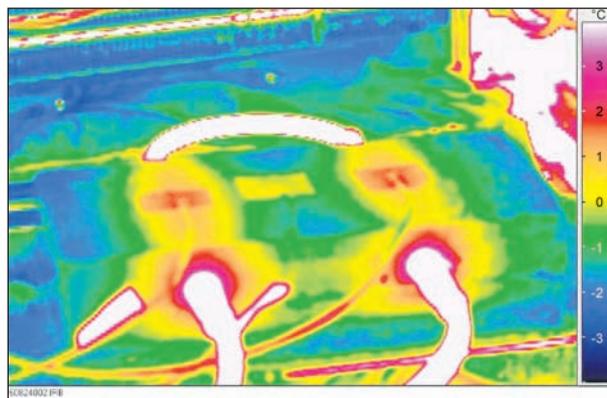


Bild 33: Infrarot-Aufnahme Kleinteilprobe mit 15 cm Rohrabstand – Lage zwischen der Schutz- und der Deckschicht (Var. KT B_15)

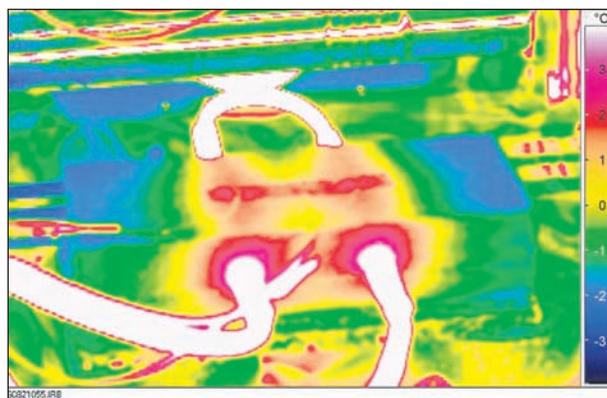


Bild 34: Infrarot-Aufnahme Kleinteilprobe mit 10 cm Rohrabstand – Lage zwischen der Schutz- und der Deckschicht (Var. KT B_10)

geeignet ist, da die Temperaturerhöhung an der Fahrbahnoberfläche zu gering ist. Die Rohrlage in der Mitte des Asphalts liefert zufrieden stellende Ergebnisse, wobei ein geringer Verlegeabstand von z. B. 10 cm hinsichtlich der thermischen Funktion vorteilhaft ist, aus Kostengründen und anderen technischen Aspekten (Störung Asphaltenschicht, Biegeradien) wäre hingegen ein Verlegeabstand von z. B. 15 cm wünschenswert.

3.3.3 Entwicklung von Varianten für numerische Untersuchungen der Rohrlage

Neben der Untersuchung der Kleinteilproben wurden numerische Methoden zur Beurteilung der thermischen Leistungsfähigkeit eingesetzt.

Querschnittsgrundlage bildete eine orthotrope Fahrbahnplatte mit einem Belagsaufbau, bestehend aus einer Dichtungsschicht aus Bitumen in Verbindung mit einer Schutz- und Deckschicht aus Gussasphalt. Auch hier werden die zwei Verlegehöhen „Rohrlage A“ und „Rohrlage B“, wie zuvor erläutert, verwendet.

Für die weiteren Untersuchungen wurde der Rohrabstand in den festgelegten Rohrlagen auf 10 und 15 cm sowie zusätzlich 20 cm definiert. Es ergaben sich somit 6 Ausführungen. Das Bild 35 zeigt die zu untersuchenden Querschnittsvarianten mit der jeweiligen Verlegehöhe und dem Rohrabstand. Die Bezeichnung ergibt sich aus der Einbauhöhe des

Rohrregisters (Rohrlage A bzw. B) sowie dem Abstand der Einzelrohre (10, 15 bzw. 20 cm). Sämtliche Untersuchungen basieren auf einem typischen Querschnitt einer orthotropen Fahrbahnplatte, bestehend aus einer Bitumenabdichtung sowie einer Schutz- und Deckschicht aus jeweils 3,5 cm dickem Gussasphalt bzw. einer unsymmetrischen Schichtaufteilung für Rohrlage B in der Art, dass die Rohre in der Mitte des Belags platziert werden.

Die thermo-physikalischen Eigenschaften sind anhand von gängigen Werten für die verwendeten Materialien Asphalt bzw. Stahl in den Berechnungen definiert (Kapitel 2.2.1). Die Ergebnisse dieser Simulationen werden in Kapitel 6.3 dargelegt, als Ergebnis dieser Simulationen soll hier vorab erwähnt werden, dass die Rohrlage B sowie ein möglichst geringer Rohrabstand (10 cm) anzustreben sind.

3.3.4 Zusammenfassung

Aufgrund der Untersuchungen in Form von Berechnungen und Messergebnissen aus den Laborversuchen erwies sich die Verlegung der Rohre mittig zwischen der Schutz- und der Deckschicht mit einem Rohrabstand von 10 cm als sinnvollste Variante. Dabei sind der Einbau der Schutzschicht mit 2,5 cm und der Einbau der Deckschicht mit 4,5 cm (bei 2 cm Rohraußendurchmesser) erforderlich. Im weiteren Verlauf des Berichtes wird dieser Aspekt noch weiter anhand von Berechnungs- und Messergebnissen vertieft.

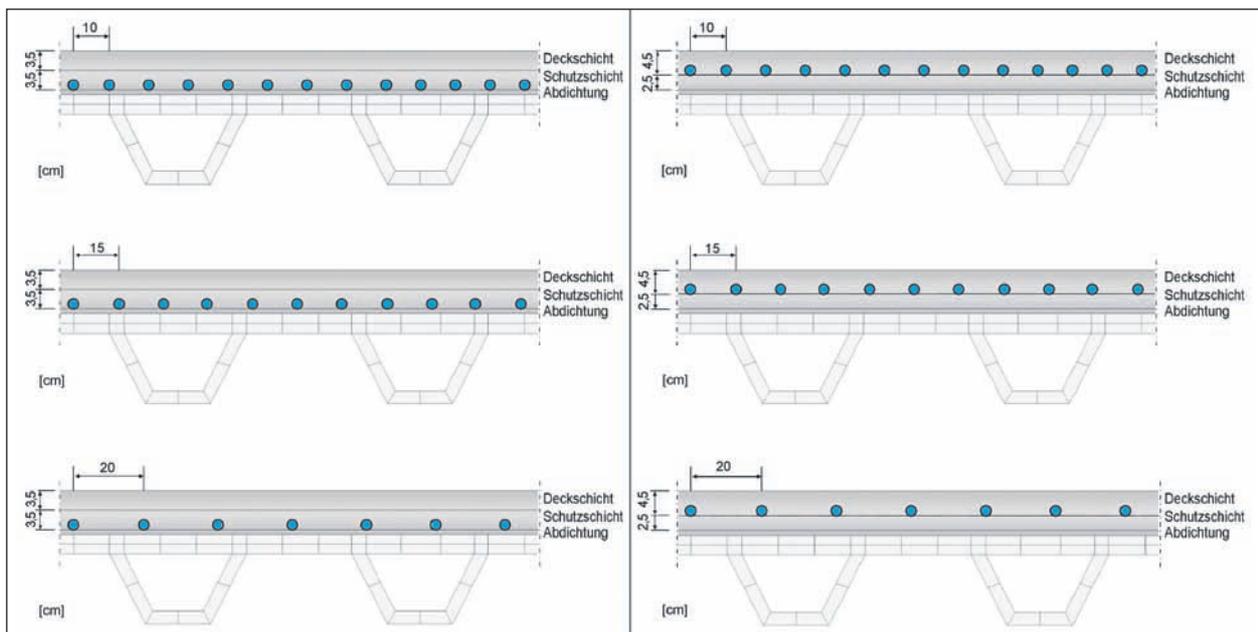


Bild 35: Querschnittsvarianten A_10, A_15 und A_20 sowie B_10, B_15 und B_20 für numerische Untersuchungen

3.4 Fixierung und Fertigung

3.4.1 Allgemeines

Für die Fertigung einer Fahrbahndecke mit eingelegtem Temperierungssystem ist es notwendig, dass die Rohrleitungen während des Asphaltvorgangs fixiert werden. Andernfalls würden die Rohre aufschwimmen, oder auch sonstige Positionsänderungen wären möglich. Für die Funktion des Temperierungssystems, aber auch für die Standfestigkeit des Asphaltes ist es erforderlich, dass die Rohrleitungen möglichst an ihrer festgelegten Position bleiben. Zwei Varianten wurden in diesem Forschungsprojekt betrachtet:

a) Verwendung eines Befestigungsgitters

Es werden Befestigungsmatten aus Kunststoff angeboten, die sich untereinander verbinden lassen und die ein „Einklippen“ der Rohrleitungen in einem definierten Abstand ermöglichen (De BOND, A., 2006). Hier handelt es sich um ein niederländisches System, das in Kombination mit den PE-RT-Rohren in Walzasphalt eingesetzt wird. Beim Asphaltieren wird die Matte durch den Asphalt beschwert, dadurch soll ein Aufschwimmen der eingeklippten Rohre verhindert werden.

b) Fixieren in der Schutzschicht mit Befestigungsmitteln

Es kommen Metalllaschen zum Einsatz, die eine Befestigung der Rohre auf der Schutzschicht mittels Schrauben oder Nägeln ermöglichen.

3.4.2 Befestigungsgitter

Das Befestigungssystem, welches bei den niederländischen Projekten zum Einsatz kommt, ist eine Art 3D-Gitterstruktur, in die die Rohre in definierten Abständen „eingeklippt“ werden und die gleichzeitig das Befahren mit Asphaltfertigern sowie Lkw ermöglicht, ohne dass sich die Rohre verformen. Im Bild 18 ist dieses Befestigungssystem zusammen mit dem Rohr dargestellt.

Dieses Befestigungssystem ist allerdings standardmäßig auf Rohrabstände von 15 cm ausgelegt, sodass für den gleichzeitig zu untersuchenden 10 cm Rohrabstand eine Anpassung des Gitters notwendig war.

Parallel zu den zuvor erläuterten Kleinteilproben zur Temperaturbeständigkeit des Rohrmaterials

(Kapitel 3.1.2) wurden Gussasphaltproben mit den verschiedenen Rohren und dem Befestigungsgitter hergestellt. Dabei konnte die Haltbarkeit der Befestigungsgitter beim Gussasphalteinbau beurteilt werden. Nach dem Abkühlen wurden die Proben so weit zerlegt, dass auch die Verbindung zwischen Gussasphalt und den Rohren sowie zwischen dem Gussasphalt und dem Befestigungsgitter beurteilt werden konnte. Das Befestigungsgitter überstand den Gussasphalteinbau weitgehend unbeschadet, allerdings zeigten sich auf der Unterseite der Probe Bereiche, die nicht vollständig mit Gussasphalt ausgefüllt wurden (Bild 36) und somit in der Praxis Schwachstellen darstellen würden. Weiterhin konnten diese Versuche noch keinen Aufschluss darüber geben, inwieweit die Befestigungsgitter ihre Funktion der Rohrfixierung während des Asphaltierens noch wahrnehmen konnten.

Die Gitter wurden auch im Laborofen einer thermischen Beanspruchung unterzogen, um den Einfluss der hohen Einbautemperaturen auf das Gitter zu simulieren. Dabei zeigte sich, dass sich das Gitter unter der Temperatureinwirkung teils erheblich verformte, die Fixierung der Rohre jedoch weiterhin gewährleistet war (Bild 37).

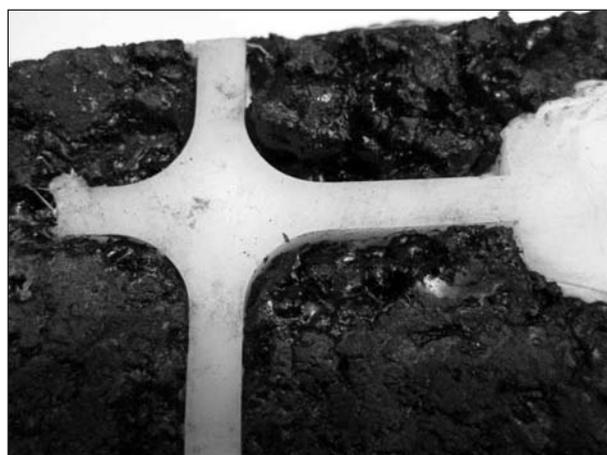


Bild 36: Nicht vollständig ausgefüllte Hohlräume im Bereich der Verstrebungen des Gitters



Bild 37: Befestigungsgitter nach der thermischen Beanspruchung im Laborofen bei 250 °C

Bei Kleinteilversuchen zeigte sich, dass ein Befestigen der Gitter auf der Schutzschicht notwendig ist, um ein Aufschwimmen zu verhindern, oder aber die Gitter mit den Rohrleitungen in einer vergleichsweise dünnen Zwischenschicht zu fixieren, wie dieses bei der Testbrücke (Kapitel 5.1) erfolgt ist.

Aufbau Asphaltvorgang eines Probekörpers von 1,60 m x 1,50 m

Um ein Fehlschlagen des aufwändigen Versuchsaufbaus der Testbrücke aus D-Brückenmodulen zu vermeiden, wurde als Zwischenschritt ein Praxistest des Asphaltvorganges mit einer 1,50 m x 1,60 m großen Probe durchgeführt.

Bild 38 zeigt den Versuchsaufbau zur Überprüfung der Haltbarkeit der Trägermatten und des PE-Xa-Rohrs und der Sicherung der Lage der Rohrmäander durch die Matten beim Asphaltvorgang mit Gussasphalt. Diese Probe wurde auf einem Betonuntergrund hergestellt und hat die folgenden Abmessungen:

- Breite = 160 cm,
- Länge = 150 cm,
- Höhe = 6 cm.

Als Rohr wurde das für die Testbrücke vorgesehene PE-Xa-Rohr mit einem Außendurchmesser von 20 mm und einer Wandstärke von 2,3 mm verwendet.

Aus diesem Versuch konnten folgende Ergebnisse gewonnen werden: Die Trägermatte schmilzt beim Kontakt mit dem Gussasphalt. Dennoch bleibt bei dem hier durchgeführten Versuch mit wasserdurchströmten Rohren eine Restfestigkeit, sodass es nur zu einer geringen Lageänderung der Rohrleitungen kommt. Daraus wurde für die Fertigung der D-Brückenmodule der Testbrücke (Kapitel 5.1.3) der Schluss gezogen, dass mit möglichst geringer Einbautemperatur zu arbeiten ist. Die eingebrachte Wärmemenge sollte zusätzlich durch einen 3-schichtigen Aufbau (Rohrlage C gemäß Bild 30) reduziert werden. Die auf die Schutzschicht gelegten Matten und Rohrregister werden mit einer Zwischenschicht fixiert. Auf dieser Zwischenschicht wird dann die Deckschicht eingebaut.

Dieser Vorversuch, aber auch die Realisierung der Testbrücke hat gezeigt, dass Störstellen (Hohlräume) im Bereich der Verzweigung der Gitter sowie

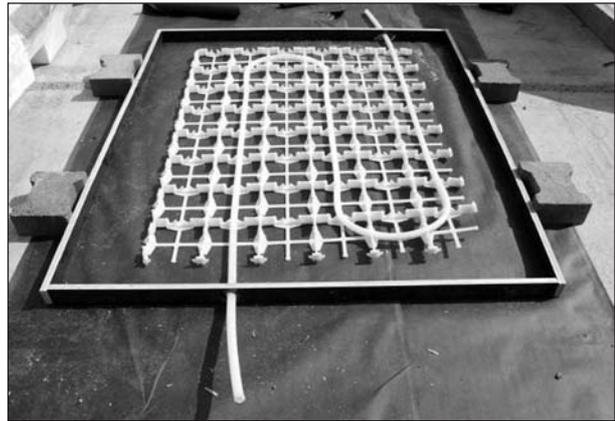


Bild 38: Aufbau der Schalung der 3. Probe mit Trägermatte



Bild 39: Fertig asphaltierter Probekörper mit Trägermatte

der Rohre entstehen. Für den Einbau der Rohre auf einer Brücke unter Praxisbedingungen (Kapitel 5.3) wurde daher auf die Verwendung der Gitter verzichtet. Dadurch konnten Rohrabstände von 10 cm auch ohne Anpassung der Gitter realisiert werden, und zusätzliche „Störkörper“, wie sie die Gitter darstellen, wurden vermieden.

3.4.3 Metallaschen und Schrauben oder Nägel

Eine Lösung ohne Matten erfordert Rohre, die sich bei den hohen Einbautemperaturen möglichst wenig verformen, daher werden hier die Verbundrohre eingesetzt, bei denen ein PE-Xa-Rohr mit einer dünnen Aluminiumschicht ummantelt ist (Kapitel 3.1).

Somit wurden bei der Brücke unter Praxisbedingungen (Kapitel 5.3.1) die Rohre mit Metallaschen sowie Metallhaltern befestigt. Die Fixierung erfolgte anfangs durch Schrauben, was sich als sehr zeitaufwändig erwies und bei einer realen Brücke sowohl zeitlich als auch aus wirtschaftlicher Sicht durch den hohen Personalaufwand nicht realisier-



Bild 40: Befestigung der Rohre durch zugeschnittenes Lochband und Schrauben



Bild 41: Befestigung der Rohre durch Metallhalter und durch „Festschießen“

bar ist. Somit wurden im zweiten Einbauabschnitt die Rohre mit Metallhaltern auf die Schutzschicht mit einem Nagelschussgerät „geschossen“, was mit einer erheblichen Zeitersparnis verbunden war, weil die Befestigung nur auf einer Seite und nicht auf zwei Seiten erfolgen musste. In den Bildern 40 und 41 sind die beiden unterschiedlichen Befestigungsvarianten dargestellt.

3.4.4 Zusammenfassung

Die Verwendung der Befestigungsmatten, entsprechend dem niederländischen System für Walzasphalt, konnte nicht vollständig überzeugen. Der Kunststoff war bei den hohen Temperaturen nicht ausreichend fest, die Lagefixierung konnte nur über eine Zwischenschicht erreicht werden, um über den reduzierten Wärmeeintrag die Temperaturerhöhung möglichst gering zu halten.

Eine punktuelle Befestigung mit Metalllaschen ist möglich, setzt aber das temperaturbeständigere PE-Xa-Rohr mit Aluminiumummantelung voraus.

4 Kleinteilversuche

4.1 Thermische Versuche

4.1.1 Allgemeines

Vor dem Aufbau der Testbrücke mit den D-Brückenmodulen wurden Kleinteilversuche mit zwei Probekörpern von 1 m x 1 m durchgeführt. Diese Versuche waren aus mehreren Gründen erforderlich:

- Bei den Probekörpern besteht die Möglichkeit, unter Laborbedingungen mit Wärmestrom-Messplatten den Wärmestrom direkt zu messen und dadurch für die Simulationsmodelle Referenzwerte für die Wärmeübergangskoeffizienten und somit die Effekte der Abstrahlung und Konvektion zu erhalten.
- Bei einem solchen kleinteiligen Modellversuch im Labor können die Randbedingungen sehr gut konstant gehalten und so ein stationärer Zustand erzeugt werden, der sich für die Validierung des Rechenmodells und die Leistungsbestimmung besser eignet.
- Trotz der Vorversuche mit den PE-Xa-Rohren, welche gezeigt haben, dass diese den Temperaturbedingungen grundsätzlich standhalten, blieben Zweifel, ob das System ungekühlt verbaut werden kann.

4.1.2 Aufbau Asphaltvorgang der 1 m x 1 m-Probekörper

Es wurden zwei Probekörper mit unterschiedlichen Rohrabständen gefertigt. Die Maße und Randbedingungen der Fertigung finden sich in Tabelle 9.

Um die Probekörper aufzubauen, wurden zwei Holzschalungen mit den folgenden Abmessungen angefertigt:

- Breite = 100 cm,
- Länge = 100 cm,
- Höhe = 8 cm.

Die Rohre werden in der Mitte der Asphaltsschicht positioniert, dieses entspricht der Rohrlage B aus Bild 30.

In Bild 42 ist exemplarisch die Schalung eines der Probekörper (1 m x 1 m) vor dem Asphaltieren zu sehen.

	Probekörper 1	Probekörper 2
Rohrabstand in cm	15	10
Rohrlage über Blech in cm	3,5	3,5
Rohrdurchmesser in mm	14	14
Rohr-Wandstärke in mm	2	2
Rohrmaterial	PE-Xa ^{a)}	PE-Xa ^{a)}
Belagsmaterial	Gussasphalt	Gussasphalt
Einbautemperatur	240	240
^{a)} (s. Kapitel 3.1)		

Tab. 9: Aufbau und Maße der Probekörper

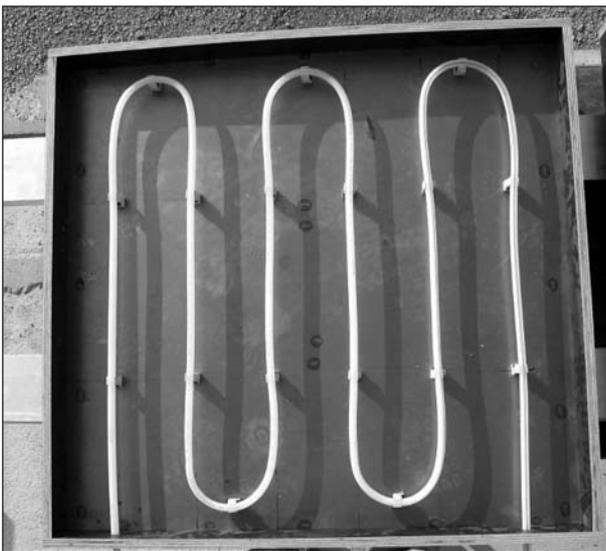


Bild 42: Schalung des Probekörpers mit 15 cm Rohrabstand



Bild 43: Asphaltieren eines Probekörpers

Die Probekörper sollten möglichst genau die Bedingungen der Testbrücke abbilden. Daher wurden auf den Unterseiten Stahlbleche mit einer aussteifenden Konstruktion verwendet, um ähnliche Wärmeübergangsbedingungen wie bei den späteren Brückenmodulen zu erreichen. Es wurde ein Rohr mit dem gleichen Material (PE-Xa) eingesetzt. Die Rohrmäander wurden von Hand durch

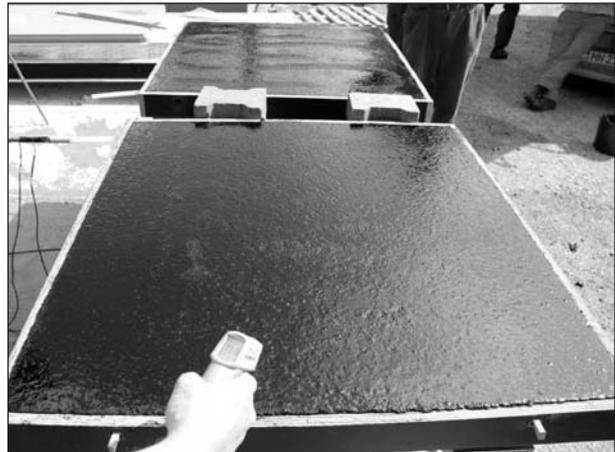


Bild 44: Die beiden Probekörper nach dem Asphaltieren

Erhitzen und Biegen mit Hilfe einer Biegefeder in Mäanderform gebracht. Dadurch konnte das Verfahren zur Herstellung der Rohrmäander für den Großversuch optimiert werden. Für die Testbrücke wurde dann ebenfalls mit einer Biegefeder gearbeitet.

Bei den Probekörpern wurde der Ansatz verfolgt, die Rohrregister nur punktuell zu befestigen und den Asphalt „in einem Guss“ einzubringen (Bild 43). Die fertig gestellten Probekörper zeigt Bild 44.

4.1.3 Messergebnisse

Die Probekörper wurden für die Messungen mit einem Umwälzthermostat (K41 der Firma Haake) mit temperiertem Wasser beschickt (Bild 47).

Die Messungen wurden in einem Laborgebäude mit näherungsweise konstanten Randbedingungen sowie im Freien zur Berücksichtigung von Solarstrahlung und Kühleffekten durchgeführt.

Die Umgebungstemperatur bei der Messung im Laborgebäude wurde konstant gehalten und eine mit realen Bedingungen im Heizfall vergleichbare Temperaturdifferenz zwischen Heizmedium und Umgebungstemperatur eingestellt. In Tabelle 10 sind die Temperaturwerte dargestellt, die zeigen, wie die reale Situation auf einer Brücke abgebildet wird.

Die Temperatur wurde für den Heizfall auf 40 °C eingestellt, damit eine ähnliche Temperaturdifferenz wie im Winter bei einer Außentemperatur von -4 °C und einer Heizmitteltemperatur aus einem Grundwasserbrunnen von ca. 12 °C erreicht wird. Der Wasserdurchfluss beträgt bei dem beschriebenen System 3 l/min (0,18 m³/h).

	real bei Brücke	Modellversuch
Lufttemperatur	-4 °C	24 °C
Vorlauftemperatur	12 °C	40 °C

Tab. 10: Temperaturen im Versuchsmodell und real

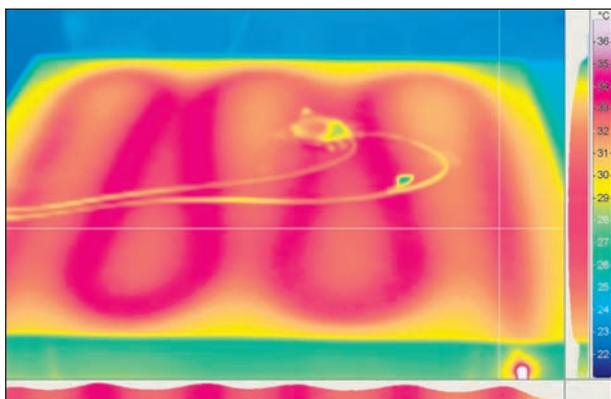


Bild 45: Infrarot-Aufnahme des 1. Probekörpers – 15 cm Rohr-
abstand, Lufttemperatur = 23 °C, Vorlauftemperatur
= 40 °C, 10.08.2007

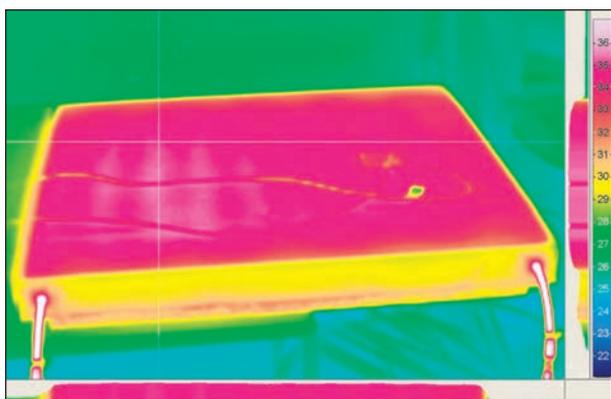


Bild 46: Infrarot-Aufnahme des 2. Probekörpers – 10 cm Rohr-
abstand, Lufttemperatur = 24 °C, Vorlauftemperatur
= 40 °C, 15.08.2007

Die Messergebnisse aus Versuchen mit den Probekörpern sind in Form von Infrarot-Aufnahmen und mehreren Diagrammen dargestellt.

Die Versuchsergebnisse von den Probekörpern 1 und 2 dienen im Wesentlichen dazu, eine gute Grundlage zur Verifikation des Simulationsmodells (Kapitel 6) für die temperierte Fahrbahnplatte zu erhalten und einen ersten Eindruck der Wirkungsweise und Leistungsfähigkeit des Systems, über die Temperaturverteilung, die Reaktionszeit und die Heizleistung abzuschätzen.

Die Infrarot-Aufnahmen (Bild 45 und Bild 46) verdeutlichen, dass der zweite Probekörper mit einem Rohrabstand von nur 10 cm gegenüber 15 cm des ersten Probekörpers bei ähnlichen Randbedingun-

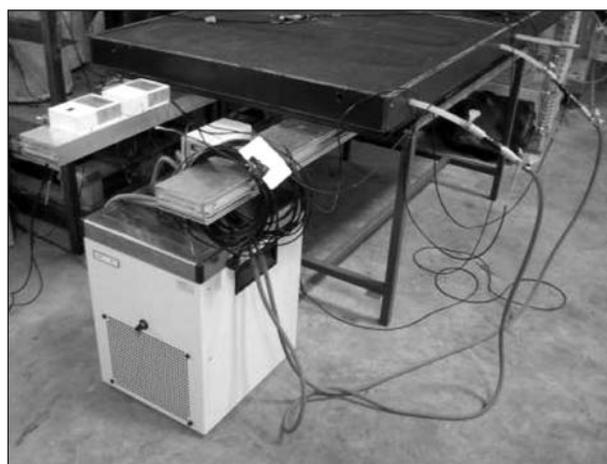


Bild 47: Messaufbau Probekörper, Haake K41 Thermostat

gen eine sehr viel homogenere Temperaturverteilung aufweist (Kapitel 3.3.3). Die Temperatur-Querschnitte am unteren sowie rechten Rand der Aufnahmen verdeutlichen dies.

Temperatur- und Wärmestrommessungen am Probekörper 1

Bild 48 zeigt die Messung eines Einschaltvorgangs. Die Auswertung dieser Messung ergibt eine Zeitkonstante bzw. eine Reaktionszeit der Probekörper von zwei Stunden. Dieser Wert ist wichtig, wenn man ein System vorausschauend betreiben will. Nach einer Anlaufzeit von zwei Stunden tritt für die Probekörper und dementsprechend auch für eine Asphalttemperierung mit gleicher Überdeckung keine große Leistungssteigerung mehr ein.

Bild 49 und Bild 50 zeigen Messergebnisse für einen längeren Zeitraum, sodass sich stationäre Verhältnisse einstellen.

Die eingespeiste Leistung, die sich aus den Messungen für das Heizmedium ergibt, entspricht etwa:

$$Q = 0,6 \text{ K} \cdot 4,2 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \cdot 0,05 \text{ kg/s} = 126 \text{ W} \quad (\text{vgl. Bild 49}).$$

Bei einer temperierten Fläche der Probekörper von ca. 1 m x 1 m stellt sich an der Straßenoberfläche zwei Stunden nach Anlauf des Systems eine Heizleistung von 75 W/m² ein. Der Durchfluss betrug dabei 0,05 kg/s und die Heizmittelübertemperatur 14 K. Nach über sechs Stunden Betrieb wird an der Straßenoberfläche eine Leistung von ca. 90 W/m² gemessen. Die Heizmittelübertemperatur liegt zu diesem Zeitpunkt bei 14 K. Die Leistungen der Probekörper liegen im Bereich einer Fußbodenheizung

und sind somit plausibel. Unter freiem Himmel und mit Windeinflüssen steigt die benötigte Heizleistung jedoch stark an.

Die Abweichung in Bild 50 für den Wärmestrom nach unten („Messwert unten“ von Wärmestrommessplatte im Vergleich zu „Berechnung aus Temp.

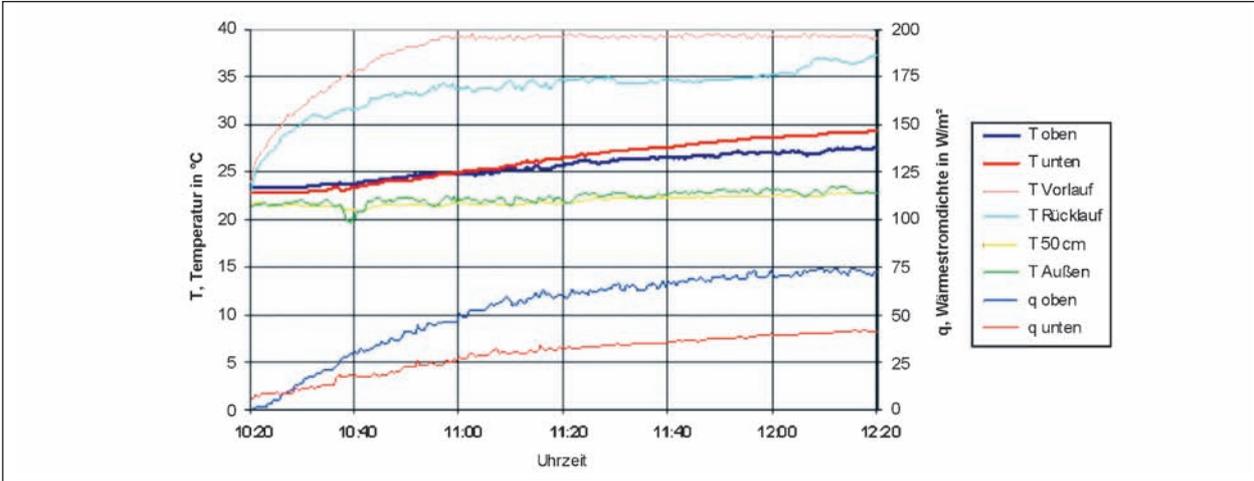


Bild 48: Messungen am Probekörper 1 (15 cm Rohrabstand), 03.08.2007

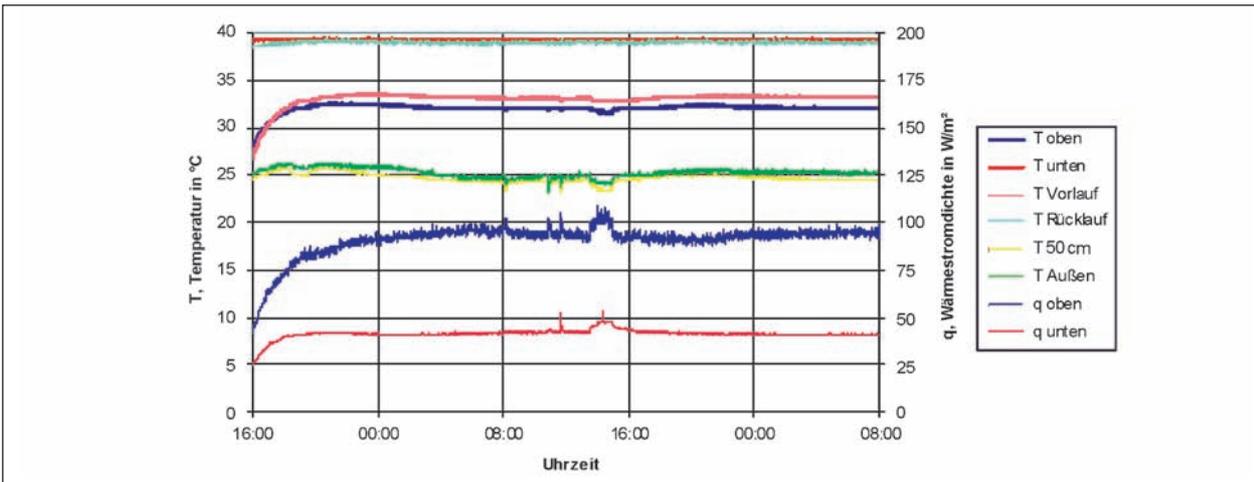


Bild 49: Messungen am Probekörper 1 (15 cm Rohrabstand), 08.-10.08.2007

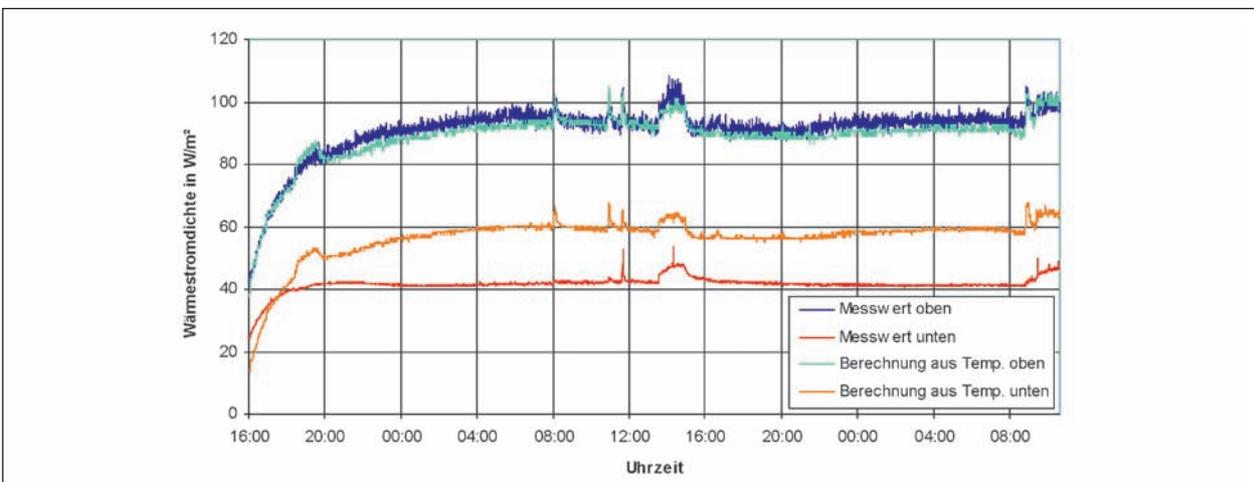


Bild 50: Vergleich zwischen den Werten aus der Messung und den Werten aus der Berechnung beim Probekörper 1 (15 cm Rohrabstand), 08.-10.08.2007

unten“) ist durch Randbedingungen zu erklären, welche schwer abgeschätzt werden können. Dies ist bedingt durch die dämmende Wirkung der Tragkonstruktion für die Probekörper wie auch durch die noch mangelnde Kenntnis des Wärmeübergangs der nach unten gerichteten Stahloberfläche.

Temperatur- und Wärmestrommessungen am Probekörper 2

Am Probekörper 2 wurden analoge Messungen durchgeführt. Eine Messreihe ist exemplarisch in den Grafiken in Bild 51, Bild 52 und Bild 53 dargestellt. Die gemessene Leistung liegt im selben Bereich wie bei Probekörper 1. Aufgrund der geringeren Rohrabstände ist die Leistung bei gleichen Randbedingungen ein wenig höher (Bild 49 und Bild 51, am dritten Tag zwischen 22 Uhr und 8 Uhr). Allerdings konnte die Umgebungstemperatur nicht

immer ganz konstant gehalten werden, was zu leichten Schwankungen der Leistung führt (Bild 51).

Bild 54 zeigt die Überprüfung der Messwerte aus den Pt100-Temperatursensoren an den Oberflächen, an Vor- und Rücklauf („Heizmedium“) sowie der Messwerte der Wärmestrommessplatten. Insgesamt erscheinen die Verläufe plausibel und auch die erwartete Phasenverschiebung zwischen eingespeister und abgegebener Wärme ist erkennbar.

Die vier Grafiken (Bilder 55 bis 58) zeigen die Messergebnisse aus Messungen im Freien, diese liefern erste Anhaltspunkte für das Kühlverhalten des thermisch aktivierten Fahrbahnsystems unter Sonneneinstrahlung.

Die Messergebnisse zeigen, dass sich bei relativ konstanten Umgebungsbedingungen die Oberflächentemperatur um ca. 5 K senken lässt (Bild 56).

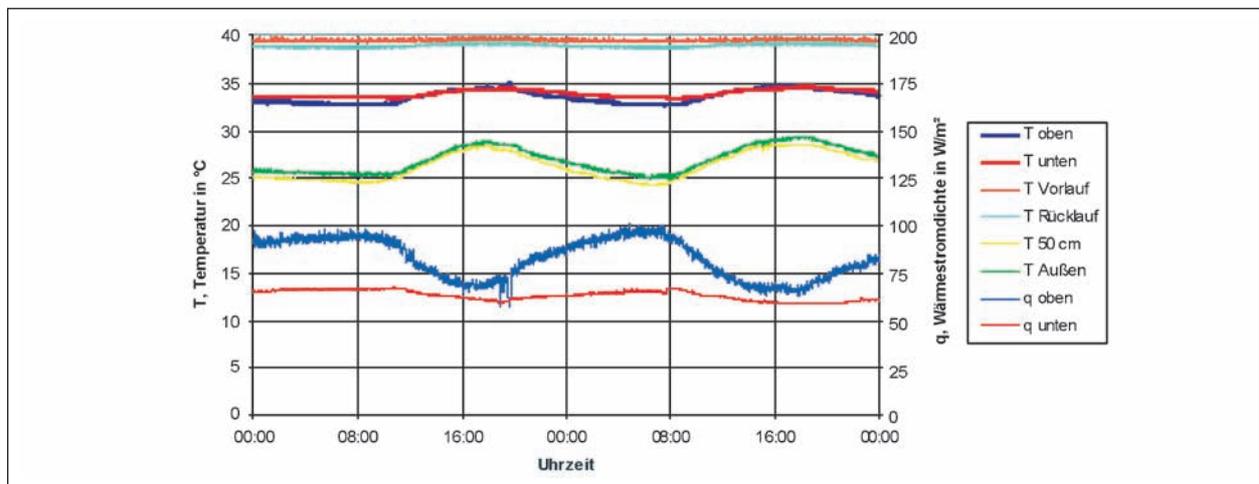


Bild 51: Messungen am Probekörper 2 (10 cm Rohrabstand), 11.-12.08.2007

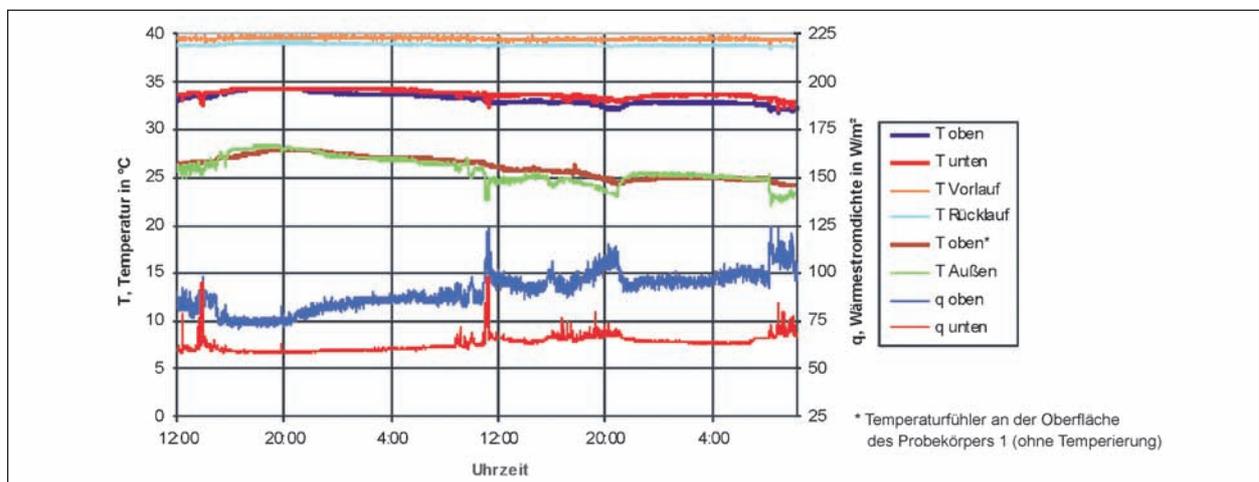


Bild 52: Messungen am Probekörper 2 (10 cm Rohrabstand), 15.-17.08.2007

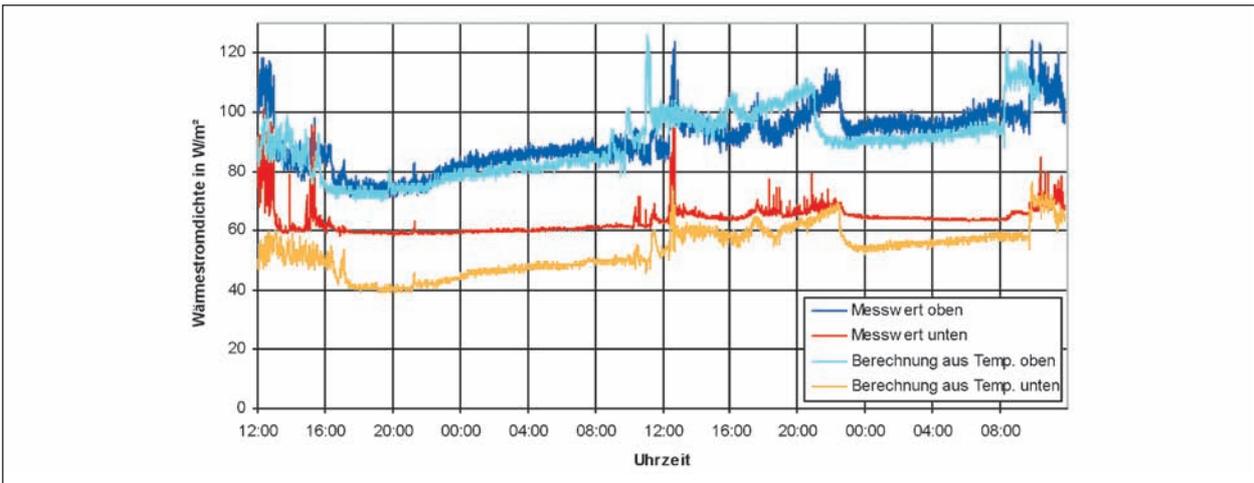


Bild 53: Vergleich zwischen Werten aus der Messung und Berechnung für Probekörper 2 (10 cm Rohrabstand), 15.-17.08.2007

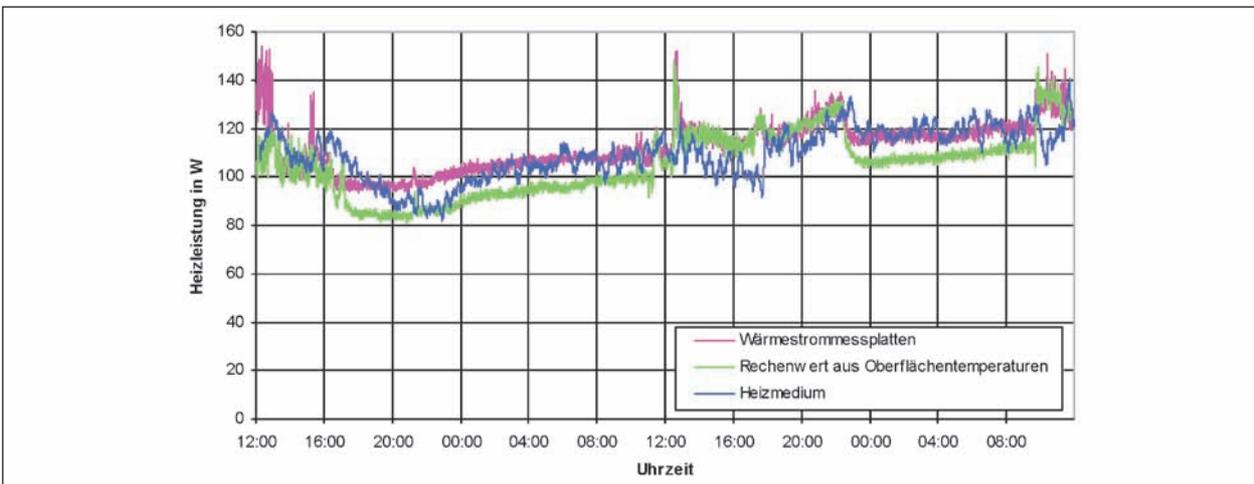


Bild 54: Wertvergleich der Heizleistung im Probekörper 2 (10 cm Rohrabstand), 15.-17.08.2007

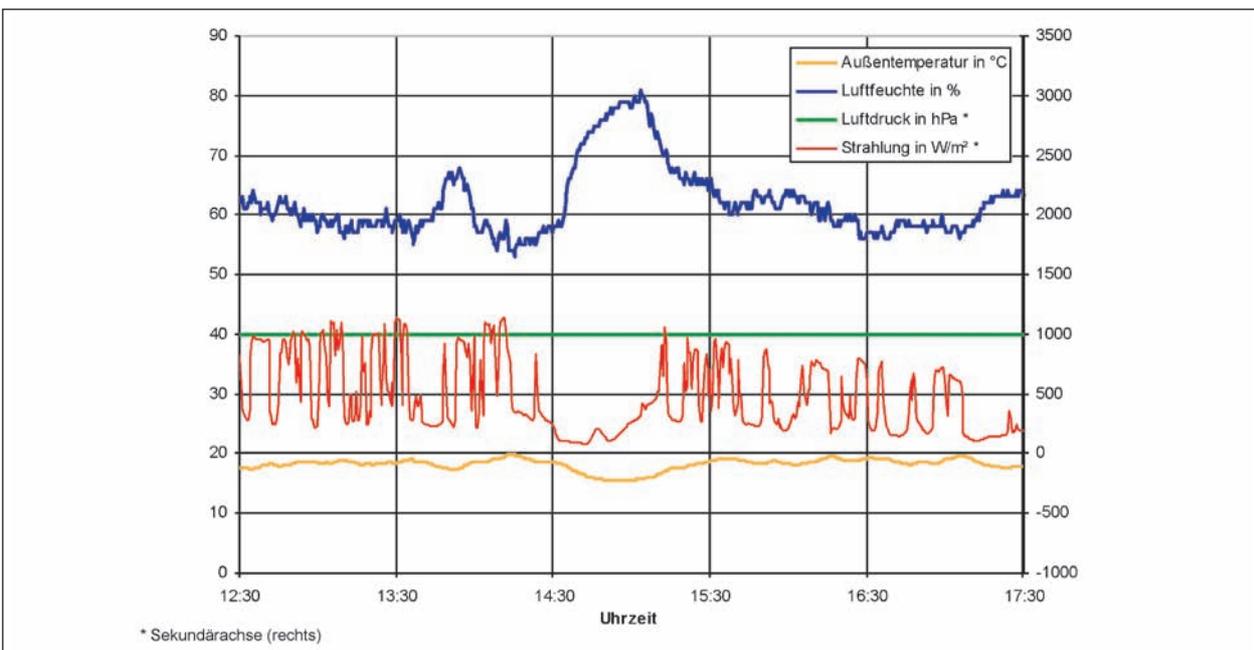


Bild 55: Daten aus der Wetterstation, 17.08.2007

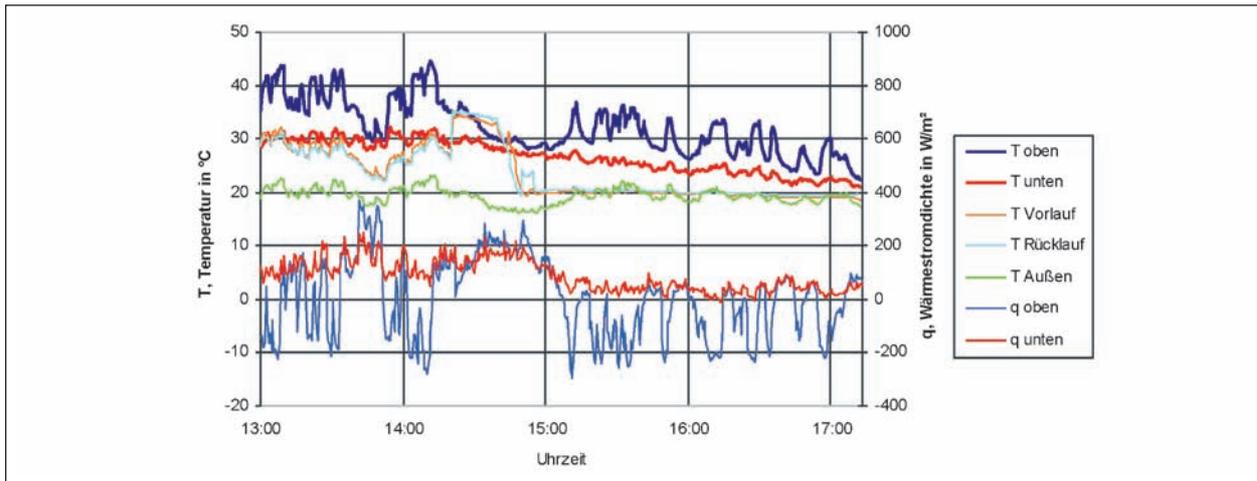


Bild 56: Messungen an Probekörper 2 (10 cm Rohrabstand) mit Kühlung ab 14:40, 17.08.2007

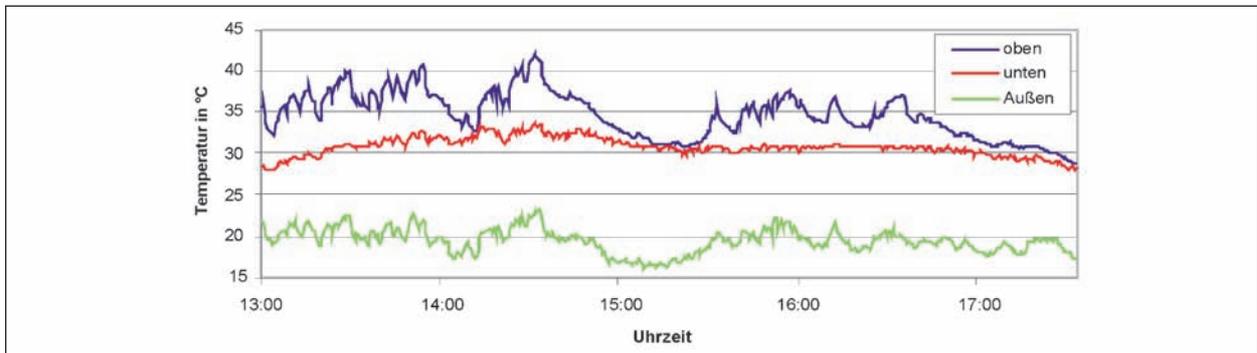


Bild 57: Oberflächentemperatur des Probekörpers 1, ohne Kühlung, 17.08.2007

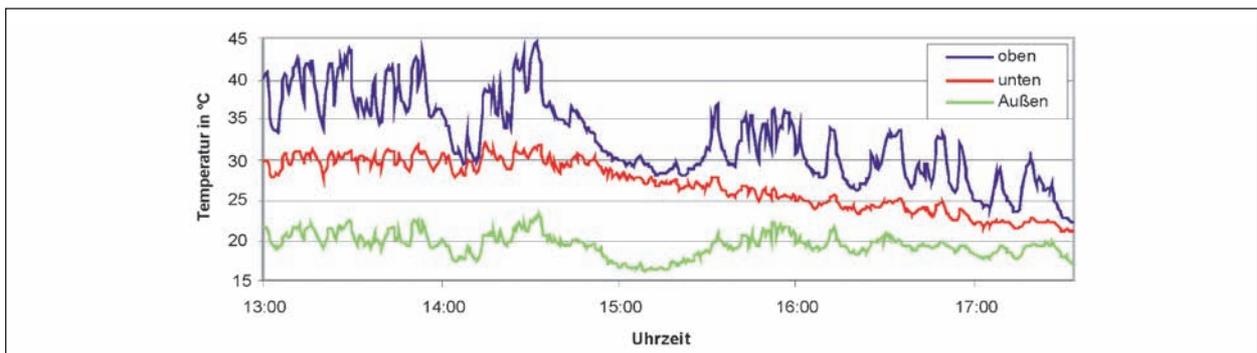


Bild 58: Oberflächentemperatur des Probekörpers 2, mit Kühlung ab 14:40, 17.08.2007

Es wird ein erstes Simulationsmodell aufgebaut, um ein Rechenmodell zu erhalten, mit dem der Versuchsaufbau der Testbrücke vorbereitet werden kann. Ein Beispiel der Simulationsergebnisse ist in den Grafiken in Bild 59 und in Bild 60 zu sehen. TO_MESS und TU_MESS sind die Messwerte für die Oberflächentemperaturen oben und unten und T OBERSEITE und T UNTERSEITE die Oberflächentemperaturen aus der Simulation. TA ist die Außentemperatur (Bild 59).

In Bild 60 sind der gemessene (QO_MESS) und der simulierte Wärmestrom (Q_OBEN) dargestellt. Des Weiteren sieht man hier die eingebrachte Energiemenge des Heizmediums aus der Simulation (QFL) und die gemessene und in der Simulation eingebrachte Außentemperatur TA.

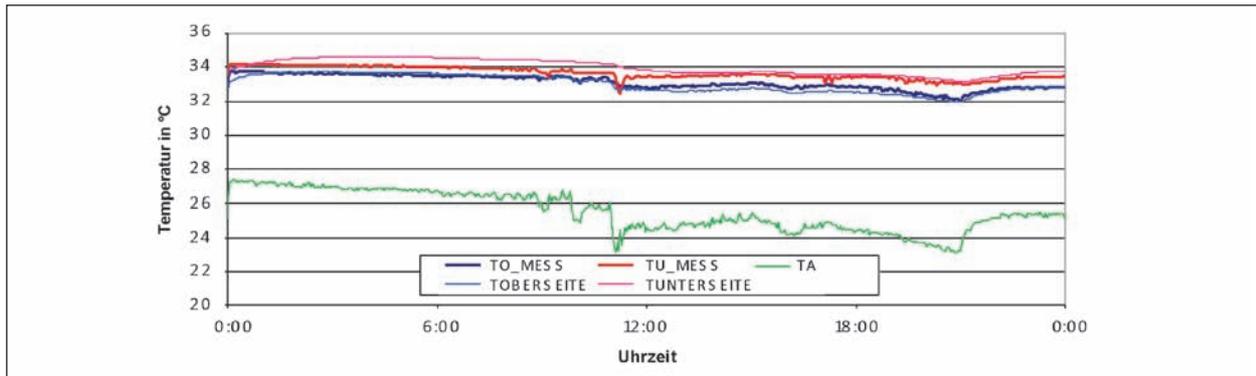


Bild 59: Vergleich zwischen den Temperaturwerten aus der Simulation und der Messung für den Probekörper 2 (10 cm Rohrabstand). Zwei-Zonen-Modell, Daten vom 16.08.2007

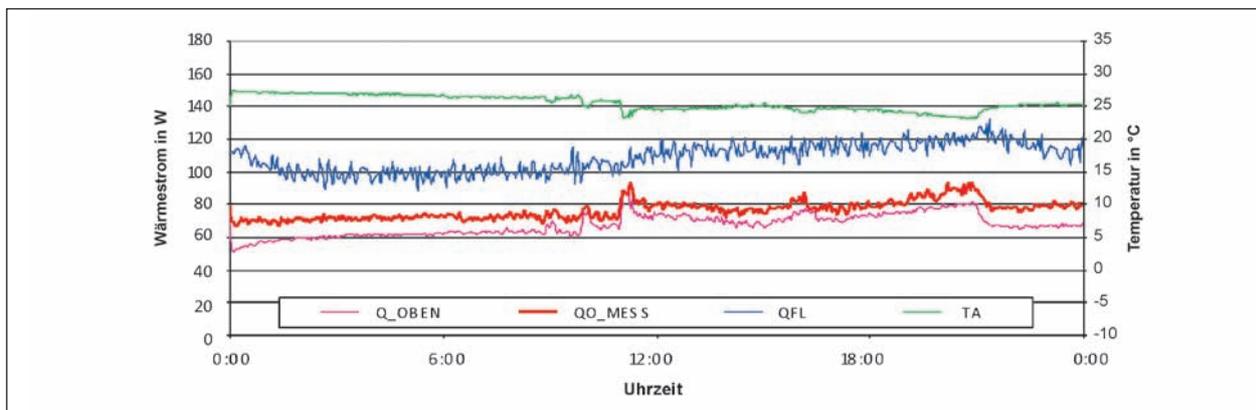


Bild 60: Vergleich zwischen den Wärmestromwerten aus der Simulation und der Messung für den Probekörper 2 (10 cm Rohrabstand). Zwei-Zonen-Modell, Daten vom 16.08.2007

4.1.4 Zusammenfassung

Die Untersuchungen an den 1 m x 1 m Probekörpern haben gezeigt, dass ein Rohrabstand von 10 cm verwendet werden muss, um eine homogene Oberflächentemperatur zu erreichen und so den Effekt von kälteren Streifen der Fahrbahn, die glatteisgefährdet sind, zu vermeiden. Die Messungen ermöglichen es, den Wärmestrom an der Oberfläche genauer zu erfassen, als es an der Testbrücke möglich wäre, und so eine wichtige Grundlage für die Simulationsmodelle (s. Kapitel 1) zu schaffen. Das erste erstellte Modell bildet den Wärmestrom und die Oberflächentemperaturen für die Messungen an den Probekörpern bereits sehr gut ab. Die mögliche Leistung in der Praxis lässt sich allerdings erst über die Messungen (s. Kapitel 5.2) und die Simulationen (s. Kapitel 1) der Testbrücke beurteilen. Das erste Simulationsmodell wird verwendet, um die nötige Leistung für das Temperierungssystem der Testbrücke auszulegen.

4.2 Stabilität/Festigkeit

4.2.1 Allgemeines

Um das Verhalten des gesamten Verbundsystems Stahl-Belag mit den eingebauten Rohren zu prüfen bzw. mit den Referenzproben (ohne Rohre) zu vergleichen, wurden mit speziell hergestellten Probekörpern dynamische Versuche durchgeführt.

Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit des Brückenbelages mit integrierten Rohren wurden Dauerschwellbiegeversuche in Anlehnung an die TP-BEL-ST bei niedrigen Temperaturen (-5 °C) durchgeführt. Aufgrund der geringen Asphaltüberdeckung im Bereich der Rohrleitungen wurde erwartet, dass sich hier Risse in der Deckschicht einstellen. Mit abnehmender Temperatur sinkt die Flexibilität des Asphalts, was die Gefahr von Rissbildung erhöht, daher ist dieser Fall besonders interessant.

Untersucht wurden neben der Referenzvariante (ohne Rohre) insgesamt vier weitere Varianten. Dabei wurden neben der Lage der Rohre – auf der

Dichtungsschicht (Rohrlage A aus Bild 30) sowie mittig zwischen der Schutz- und der Deckschicht (Rohrlage B aus Bild 30) – auch die Anzahl der Rohre und somit der Rohrabstand variiert. Aus Vorgaben, die einerseits von der Fertigung und andererseits von der Prüfmaschine kamen, wurden 15 cm breite Probekörper gefertigt, in denen entweder ein oder zwei Rohre verlaufen. Die hinsichtlich der thermischen Eigenschaften untersuchten Varianten 10, 15 und 20 cm Rohrabstand konnten mit diesem Versuchsaufbau nicht nachgebildet werden.

Die Probekörper zur Untersuchung des Gesamtsystems, bestehend aus

- Stahlplatte,
- Dichtungsschicht,
- Schutzschicht und
- Deckschicht,

wurden in Anlehnung an die TP-BEL-ST-92 ähnlich den Probekörpern für die Dauerschwellbiegeprüfung hergestellt. Hierfür wurde zuerst auf den entrosteten und mineralisch gestrahlten Stahlplatten mit den Abmessungen 700 x 200 x 12 mm eine Dichtungsschicht der Bauart 1 (Bild 16) gemäß der ZTV-BEL-ST 92 aufgebracht. Anschließend wurden darauf die Schutzschicht aus Gussasphalt 0/11S mit 25/55-5 A als Bindemittel sowie danach die Deckschicht, ebenfalls aus Gussasphalt 0/11S mit 25/55-5 A als Bindemittel, gemäß der Standardbauweise der ZTV-BEL-ST 92 eingebaut. Die Dicke der Schutz- und Deckschicht war abhängig von der untersuchten Variante, d. h. der Lage der Rohre. Bei den Referenzproben sowie bei den Varianten, bei denen die Rohre auf der Dichtungsschicht lagen, erfolgte der Einbau beider Schichten in einer Dicke von jeweils 3,5 cm über die gesamte Länge der Stahlplatte von 700 mm, aber nur über eine Breite von 150 mm.

Die Reduktion der Breite auf 150 mm ermöglichte die Befestigung des Schalrahmens zum Einbau des Asphalttes. Bei der Variante „Rohrlage B“ erfolgte der Einbau der Schutzschicht mit einer Dicke von 2,5 cm und der Deckschicht mit 4,5 cm, um die mittige Lage der Rohre zu gewährleisten sowie eine ausreichende Schichtdicke und Überdeckung zu erreichen.

Die Rohre wurden in der Längsrichtung in die Probekörper eingebaut. Dies entspricht auch der spä-

teren Verlegung der Rohre in der Praxis, da aufgrund der „Versorgung“ der Rohre mit dem Temperaturmedium ein Einbau in Querrichtung zur Brückenachse für sinnvoll gehalten wird, weil hierdurch der Vor- und Rücklauf in Brückenlängsrichtung, z. B. im Bereich der Kappen angeordnet werden kann. Insgesamt war je Variante die Prüfung von jeweils 2 Proben vorgesehen. Die vier unterschiedlichen Varianten sind als Prinzipskizzen in Bild 61 und Bild 62 dargestellt.

Die Versuchsanordnung sah abweichend von der TP-BEL-ST 92 keine indirekte Lasteinleitung über das Stahlblech, sondern eine Lasteinleitung direkt über den Asphalt vor (Bild 63). Die Versuchsanordnung der TP-BEL-ST 92 dient zur Überprüfung der Verbundfestigkeit zwischen Asphalt und Stahlplatte, während Ziel der hier durchgeführten Untersuchungen primär die Überprüfung der Dauerhaftig-

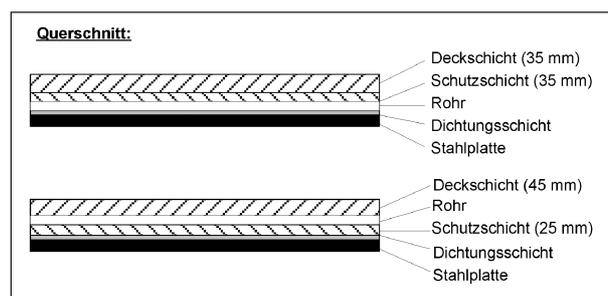


Bild 61: Lage der Rohre im Probekörper – Querschnitt

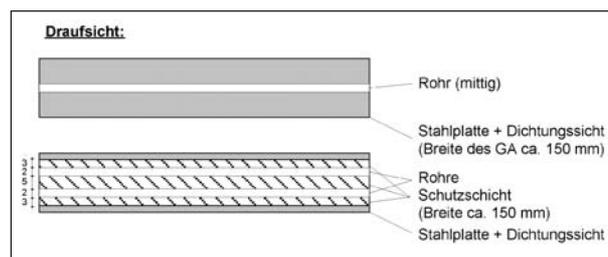


Bild 62: Lage der Rohre im Probekörper – Draufsicht

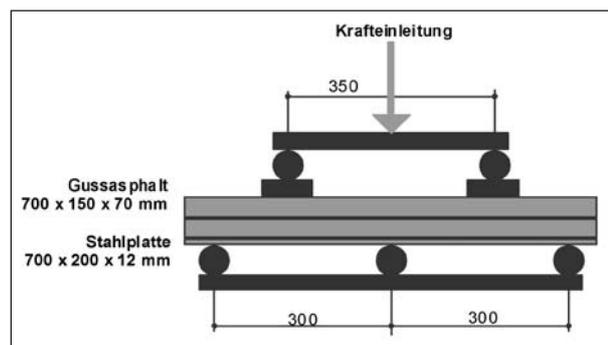


Bild 63: Prinzipskizze – Prüfkörper und Lasteinleitung für die dynamischen Versuche (5-Punkt-Biegeversuche)

keit des Belags im Hinblick auf Rissbildung und sonstige Schäden infolge der eingebauten Rohre war. Des Weiteren wurde auch eine flächige Lasteinleitung, anstelle der linearen, angeordnet, um Eindrückungen im Asphalt infolge zu hoher Spannungen im Bereich der Lasteinleitung zu vermeiden.

Die Anzahl der Lastwechsel wurde auf 100.000 bei einer Frequenz von 2 Hz festgelegt, weil bei einer höheren Anzahl der Lastwechsel die Versuche unverhältnismäßig lange dauern, ohne mehr Informationen hinsichtlich der Eigenschaften der Proben im Rahmen dieses Projektes zu gewinnen.

Die Versuche wurden sowohl als 5-Punkt-Biegeversuche (in Anlehnung an die TP-BEL-ST) als auch als 4-Punkt-Biegeversuche durchgeführt. Die Ergebnisse dieser beiden Versuche werden in den Kapiteln 4.2.2 und 4.2.3 dargestellt.

4.2.2 5-Punkt-Biegeversuch

Bei dem 5-Punkt-Biegeversuch wurde ausgehend von einer Durchbiegung von 0,9 mm am reinen Stahlblech eine Kraft von ca. 44 kN ermittelt, vgl. Bild 64. Mit dieser wurden dann die Proben beansprucht.

Allerdings zeigten sich bei den Prüfungen keine Risse in den Proben, weder in der Referenzprobe ohne Rohre noch in den Proben mit Rohren. Dieses Verhalten ist wahrscheinlich auf die Lage der Rohre in Längsrichtung der Probe zurückzuführen, weil durch diese Positionierung die Gefahr von Rissen in der Oberseite geringer ist.

Aufgrund dessen wurden zusätzlich weitere Proben untersucht, bei denen die Rohre quer zum Probekörper über dem Mittenaufleger zwischen der Schutz- und der Deckschicht und auf der Dichtungsschicht eingebaut wurden (Bild 66). Bei dieser Konfiguration ist die Gefahr von einem Riss im Bereich des Stützmomentes am größten.

Aber auch bei dieser Anordnung der Rohre traten keine Risse im Bereich der Schwächung der Deck-

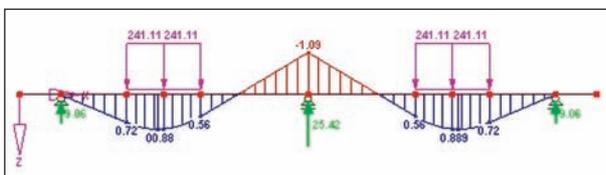


Bild 64: Kräfte sowie resultierende Feld- und Stützmente (5-Punkt-Biegeversuche)

schicht auf, sondern es zeigten sich auch hier Risse bzw. Ablösungserscheinungen im Bereich der Pufferschicht (Bild 65). Daraufhin wurden Proben mit und ohne diesen Schaden im Bereich der Dichtungsschicht aufgetrennt. Allerdings war auch nach dem Auftrennen der Proben die Ursache für das Auftreten der Risse im Bereich der Pufferschicht nicht eindeutig zu klären (Bild 67).

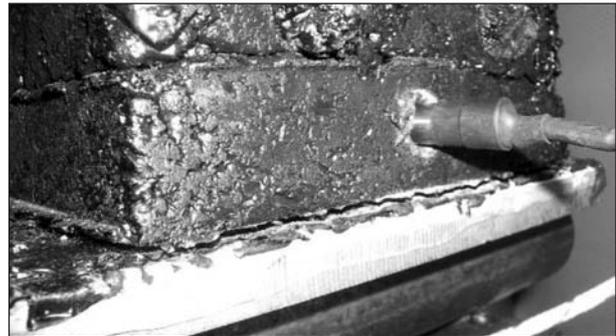


Bild 65: Prüfkörper-Riss im Bereich der Pufferschicht

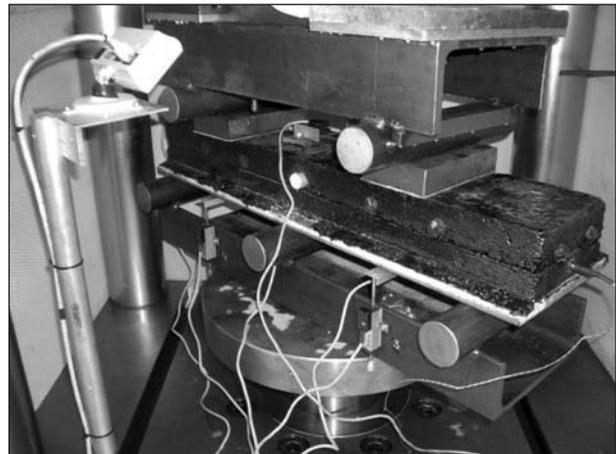


Bild 66: Prüfkörper und Lasteinleitung für die dynamischen Versuche – Rohr quer im Probekörper eingebaut

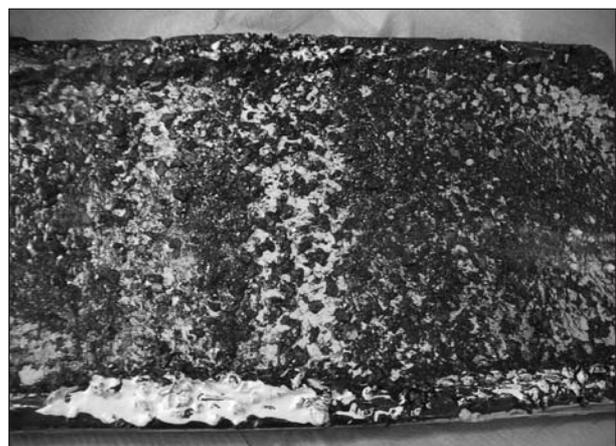


Bild 67: Aufgetrennter Probekörper im Bereich der Pufferschicht

4.2.3 4-Punkt-Biegeversuch

Aufgrund der Ergebnisse bei den 5-Punkt-Biegeversuchen wurden weitere Untersuchungen mit einer geänderten Prüfeinrichtung als 4-Punkt-Biegeversuche (Bild 68) durchgeführt. Allerdings wurden die Kräfte so angepasst, dass das resultieren-

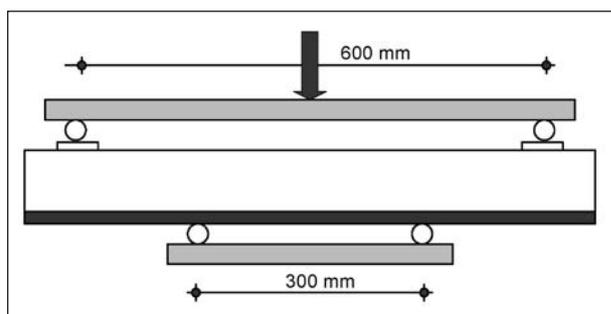


Bild 68: Prinzipskizze – Prüfkörper und Lasteinleitung für die dynamischen Versuche (4-Punkt-Biegeversuche)

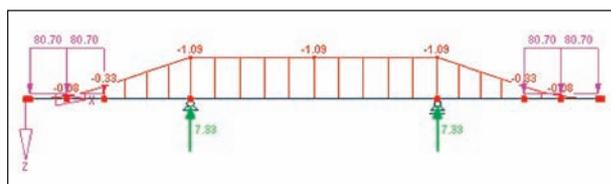


Bild 69: Kräfte sowie resultierende Feld- und Stützmomente (4-Punkt-Biegeversuche)

Lastwechselzahl [-]	Kraft (Oberlast) [kN]	Durchbiegung [mm]	Grundlast [kN]	Mittelwert [kN]	Amplitude [kN]
59	46	0,95	6,9	26,45	19,55
59	41,2	0,85	6,2	23,7	17,5
180	36,3	0,75	5,4	20,85	15,45
277	31,5	0,65	4,7	18,1	13,4
1.218	26,6	0,55	4,0	15,3	11,3
8.207	21,8	0,45	3,3	12,55	9,25

Bild 70: 4-Punkt-Biegeversuche – Randbedingungen für die Prüfung mit 1 Mio. Lastwechseln

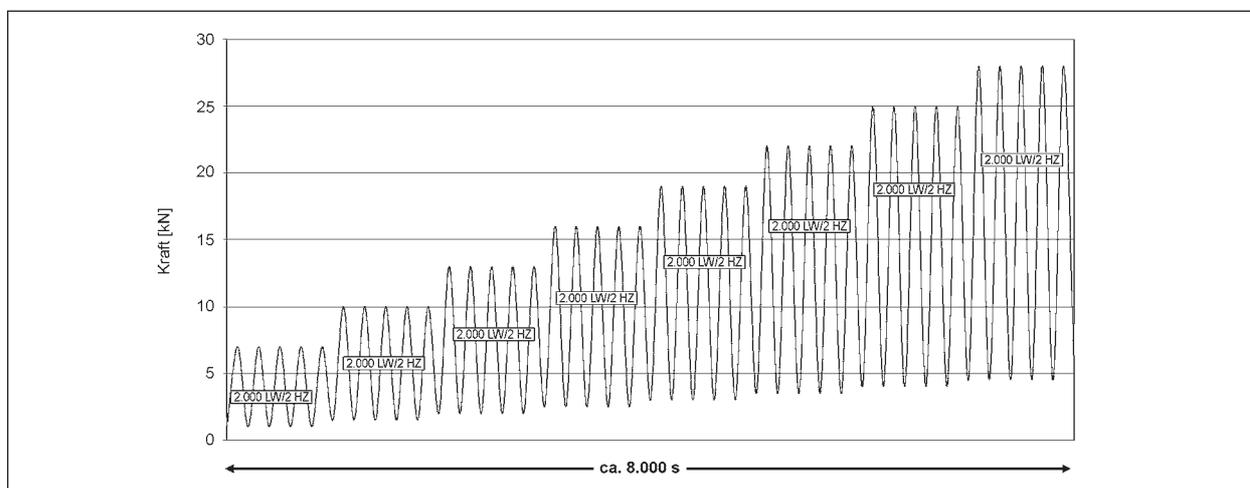


Bild 71: 4-Punkt-Biegeversuche – kontinuierliche Laststeigerung nach einer definierten Anzahl von Lastwechseln

de Stützmoment dem der 5-Punkt-Versuche entsprach (Bild 67 und Bild 69).

Mit dieser Prüfkongfiguration wurden sowohl Versuche mit einer kontinuierlichen Laststeigerung (7-28 kN) nach einer definierten Anzahl von Lastwechseln (Bild 71) sowie ein Versuch mit 1 Mio. Lastwechseln mit dem neuen Belastungsregime für die Dauerschwellbiegeversuche (Bild 70) durchgeführt.

Aber auch bei diesen Prüfungen zeigten sich keine Unterschiede zwischen den Proben ohne und den Proben mit Rohren.

4.2.4 Zusammenfassung

Mit den hier durchgeführten Untersuchungen zur Stabilität konnte ein ungünstigeres Verhalten der Probekörper durch den Einbau der Rohre nicht nachgewiesen werden.

5 Testfeldmessung

5.1 Konzept und Bau der Testbrücke

5.1.1 Allgemeines

Die Zielsetzungen für Bau und Betrieb der Testbrücke sind:

- Überprüfung der thermischen Leistungsfähigkeit anhand realer Abmessungen und natürlicher Witterungsbedingungen,
- Erkenntnisgewinn zur Standfestigkeit aufgrund des Befahrens mit schweren Lkw während der einjährigen Testphase,

- Erfahrungen hinsichtlich der Fertigung bei einer Ausführungsgröße, die sich der einer realen Brücke annähert.

Für die Messungen an einem Referenzobjekt wurde in Neuss auf dem Gelände einer Straßen-

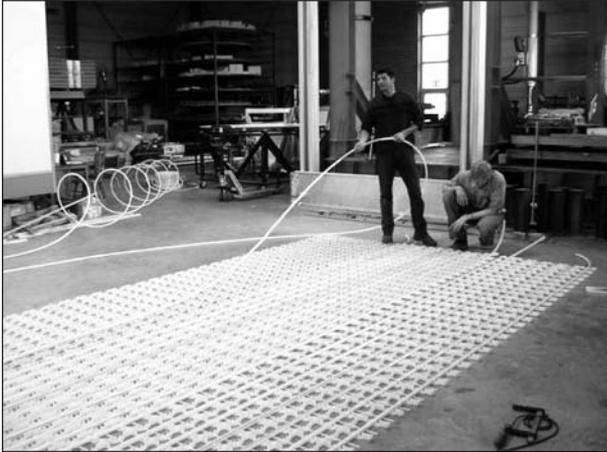


Bild 72: Fertigung der Module, Juli 2007

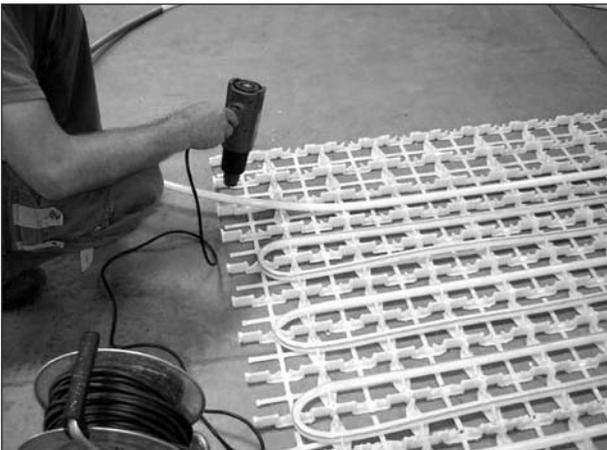


Bild 73: Erhitzen der Rohre mit Heißluftpistole

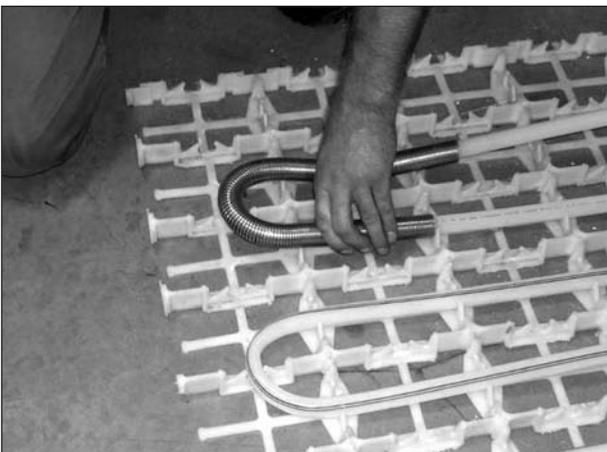


Bild 74: Biegen der Rohre mit Biegefeder

baufirma eine Testbrücke bestehend aus zwei D-Brückenmodulen mit Fahrbahntemperierung errichtet. D-Brückenmodule sind transportable vormontierte Einzelkomponenten aus Stahl für Not- und Behelfsbrücken.

Für die Temperierung wurden die Rohrleitungen mit Matten der niederländischen Walzasphalt-Straßenheizung in die Deckschicht der Fahrbahn integriert. Dabei wurde mit einer zusätzlichen Zwischenschicht gearbeitet (Rohrlage C).

Aus den Berechnungen und Vorversuchen wurde ein optimaler Rohrabstand von 10 cm ermittelt (Kapitel 3.3.3 und Kapitel 4.1.3). Da das niederländische System nur mit einem Rohrabstand von 15 cm hergestellt wird, wurden Matten für eine Fläche von 2 x 6 m von Hand auf einen Rohrabstand von 10 cm umgearbeitet. Für einen Vergleich wurde auf einer weiteren Fläche von 1 x 6 m die Temperierung mit einem Rohrabstand von 15 cm verlegt.

5.1.2 Fertigung der Rohrmäander

Die PE-Xa-Rohre werden auf den vorgefertigten Matten befestigt, sodass drei Module von jeweils 1 m Breite und 6 m Länge entstehen – zwei Module mit einem Rohrabstand von 10 cm und ein Modul mit einem Rohrabstand von 15 cm (Bild 72).

Das Formen der Rohrmäander erfolgte mit Hilfe einer Heißluftpistole und einer Biegefeder, damit die Rohre nicht knickten (Kapitel 3.1.3). Die Rohre werden zunächst mit einer Heißluftpistole auf eine Temperatur erhitzt, bei der sie ausreichend plastisch verformbar sind, und dann mit einer Biegefeder in die den Matten entsprechende Form gebracht (Bild 73 und Bild 74).

5.1.3 Erstellung der Testbrücke

Vom 06. Juli bis zum 18. Juli 2007 wurde die Testbrücke aus zwei Stahlbrückenmodulen über einer Ausschachtung auf 6 Fertigteilfundamenten errichtet. Der Belagsaufbau erfolgt prinzipiell nach ZTV-BEL-ST Bauart 1 (mit Pufferschicht), hinzu kommt die Matte zur Fixierung der Rohrleitungen.

Bild 75 bis Bild 81 zeigen die einzelnen Schritte des Baus der Testbrücke bis hin zum Aufbringen der Pufferschicht.



Bild 75: Auskoffern des Luftraumes



Bild 78: Schraub-Verbindung der zwei Module



Bild 76: Aufstellen der Brücken-Fundamente (Beton-Fertigteile)



Bild 79: Einbetonieren der Fundament-Anschlüsse



Bild 77: Grundierte Stahlbrückenmodule



Bild 80: Betonieren der Stützmauern an den Überfahrten



Bild 81: Fertige Testbrücke mit Pufferschicht und 1. Asphalt-schicht

5.1.4 Einbau der Rohrmäander und Asphaltieren der Deckschicht

Am 26. Juli 2007 wurden die in Kapitel 5.1.2 beschriebenen Rohrmäander auf den modifizierten Matten der Walzasphalt-Straßenheizung zur Baustelle auf dem Gelände der Straßenbaufirma geliefert und eingebaut. Die Asphalt-Schutzschicht wurde in der Zwischenzeit bereits aufgebracht. In Bild 82 bis Bild 88 ist der Asphaltvorgang der Zwischenschicht mit dem Rohrleitungssystem mit temperaturreduziertem Gussasphalt von 204 °C dokumentiert.

Aufgrund der Erfahrungen aus den Vorversuchen (Kapitel 4.2.2. bzw. Kapitel 3.3) wurde der Asphalt in drei Schichten gefertigt: Um die Festigkeit der Matte nicht so stark zu schwächen, dass die Rohrfixierung nicht mehr gegeben ist, wurde eine dünne Zwischenlage von Hand eingebaut.

Wie in Bild 85 sichtbar, stellte die Verformung der Matten trotz des vorsichtigen Einbaus ein Problem dar, insbesondere an den Enden und Verbindungsstellen biegt sich der Kunststoff der Matten nach oben. Diese Verformung wurde durch Auflegen von Stahlprofilen unterbunden, diese Vorkehrung ist in Bild 86 zu sehen.

Während des ganzen Asphaltier-Vorgangs wurden die PE-Xa-Rohrmäander zur Kühlung mit Leitungswasser beschickt, damit das Temperierungssystem den hohen Temperaturen standhält. Dazu wurden die Temperierungs-Module in Reihe geschaltet und eine Wasserleitung mit 20 l/min Wasserdurchfluss angeschlossen (Bild 87).



Bild 82: Positionieren der Temperierungs-Module

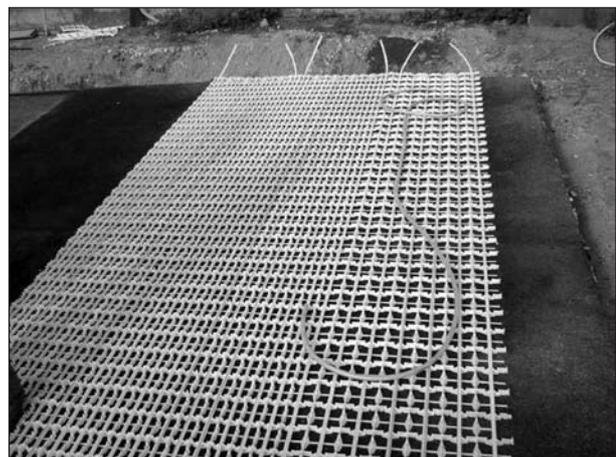


Bild 83: Fertig verlegte Rohrregister



Bild 84: Asphaltieren der Zwischenschicht

In Bild 89 ist das Messergebnis aus den Vor- und Rücklauftemperaturen während des Asphaltvorgangs zu sehen. Das Aufbringen des Asphaltes in einzelnen Lagen ist deutlich durch die Temperatur und Leistungsstufen bzw. Sprünge erkennbar: Zwischen 8:00 und 9:30 Uhr wurde die Zwischenlage



Bild 85: Verformung der Matten

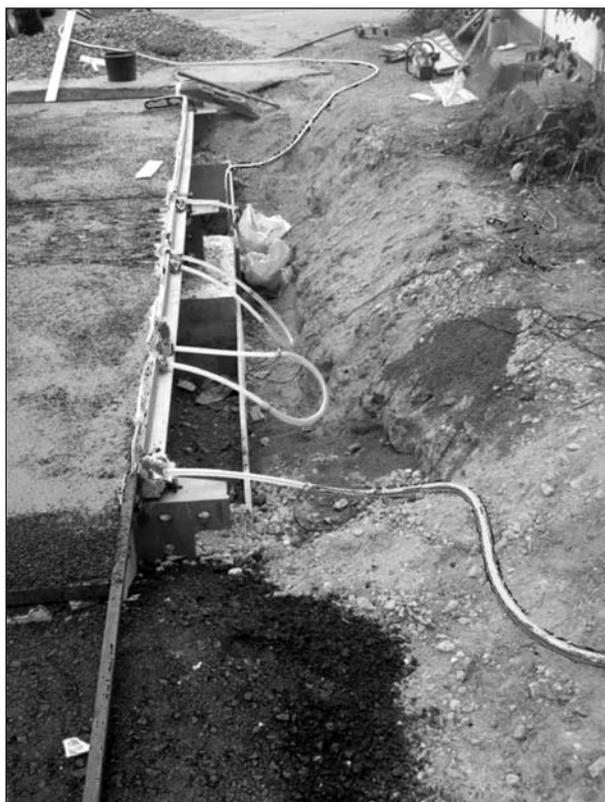


Bild 87: Kühlungssystem für den Asphaltvorgang



Bild 86: Stahlstäbe, um Verformung der Matten zu vermindern



Bild 88: Fertig gestellte Testbrücke

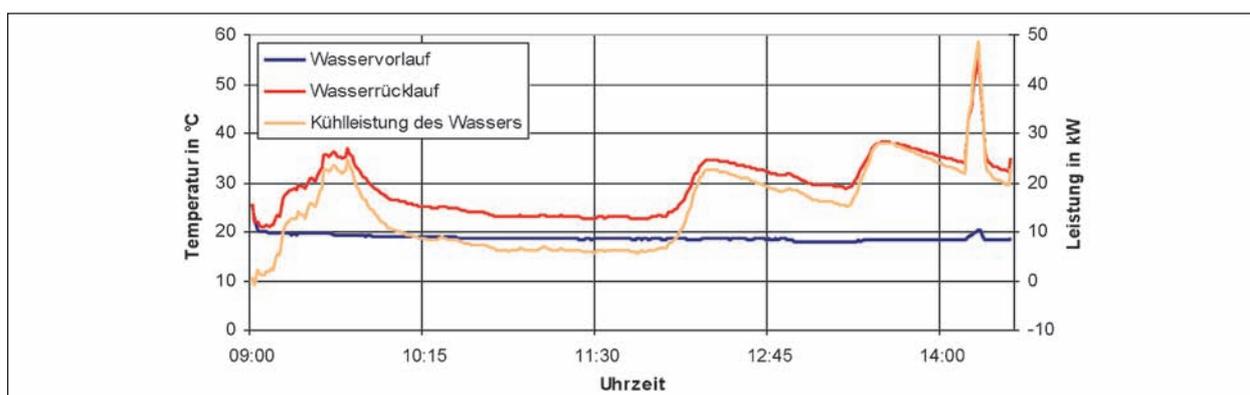


Bild 89: Wassertemperaturablauf und Kühlleistung – Asphaltvorgang des Brückenmoduls, 26.07.2007

eingbracht, dann gegen 12:00 Uhr die Deckschicht für eine Fahrbahnseite, dann gegen 13:30 Uhr die Deckschicht für die zweite Fahrbahnseite. Um 14:15 Uhr wurde die Wasserzufuhr gestoppt, sodass durch die noch vorhandene Wärme im Asphalt eine Temperaturspitze gemessen wird. Die Angabe der Kühlleistung ist zu diesem Zeitpunkt nicht korrekt, da die Messtechnik hierfür nur funktioniert, wenn das Wasser strömt.

5.1.5 Einbau der Messtechnik

Am 31. August erfolgte die Installation der Messtechnik und des Wasserkreislaufs für die Testbrücke. Für die Temperaturmessungen am Brückenmodul wurden sechs Pt100-Sensoren eingesetzt. In die Asphaltdeckschicht sind Temperaturfühler eingebaut, um die Oberflächentemperaturen des temperierten und des nicht temperierten Bereiches zu messen. Die Temperaturen auf der Unterseite werden durch aufgeklebte Temperatur-Sensoren gemessen. Des Weiteren wurden Sensoren für



Bild 90: Fräsen der Fugen für die Temperaturfühler



Bild 91: Bitumenverguss eines Temperaturfühlers

Außentemperatur und Luftfeuchte ober- und unterhalb der Testbrücke installiert. Die Bilder 90 bis 93 dokumentieren, wie die Oberflächen-Temperatur-sensoren in die Asphaltdecke eingebaut wurden.

Das Messprogramm umfasst 6 Oberflächentemperaturen:

- 2 x über Rohr (15 cm Abstand, Bild 93 vorne/ 10 cm Abstand, Bild 93 Mitte),



Bild 92: Oberflächen-Temperaturfühler über und zwischen den Rohren



Bild 93: Fertige Installation der Messtechnik und des Wasserkreislaufes

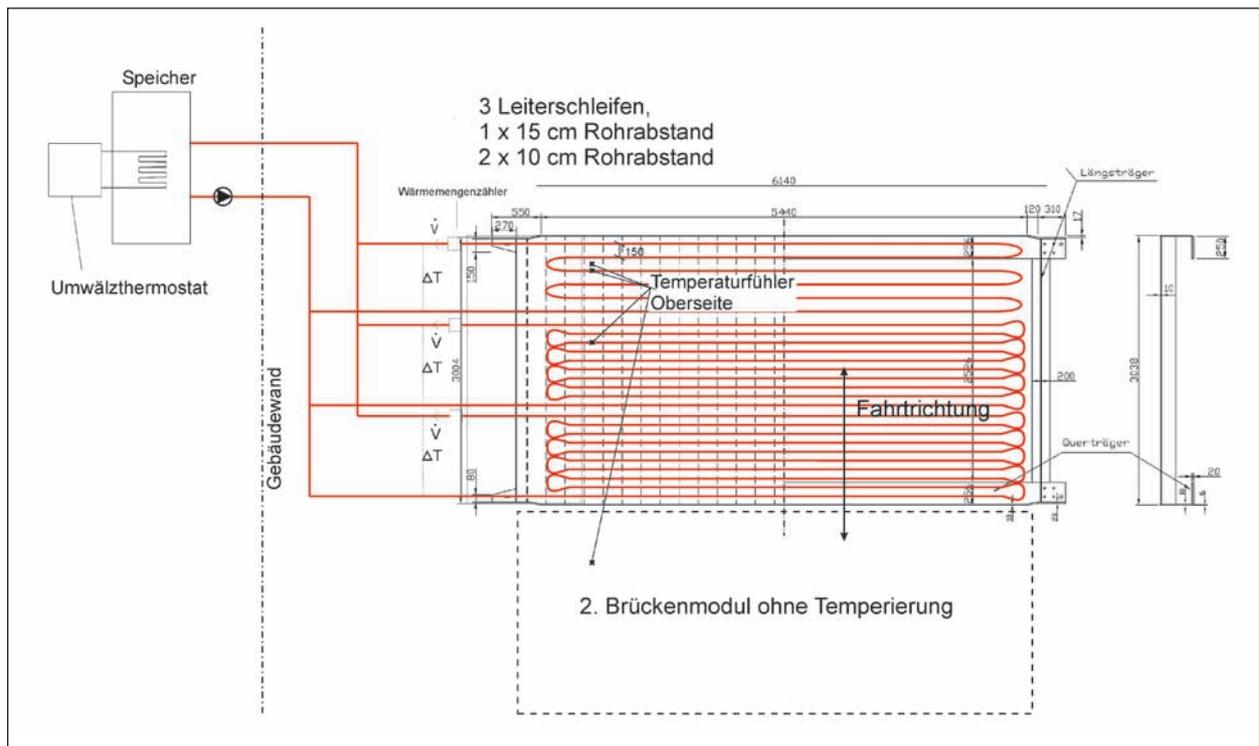


Bild 94: Fertige Installation der Messtechnik und des Wasserkreislaufes

- 1 x zwischen Rohren (15 cm, Bild 93 vorne),
 - 1 x Referenzwert (Brückenmodul ohne Aktivierung, Bild 93 hinten),
 - 2 x auf Unterseite der Brückenmodule,
- sowie 2 Fühler für die Außenluftbedingungen:
- 2 x Lufttemperatur (1 x unter Brücke) und
 - 2 x Luftfeuchte (1 x unter Brücke).

Daneben werden die 4 Heiz- und Kühlmitteltemperaturen vom Vorlauf und den drei Rückläufen der drei Rohrregister (vgl. Kapitel 5.1.2) aufgezeichnet und mit Wärmemengenzählern die Volumenströme gemessen (Bild 94).

5.2 Thermische Versuche

5.2.1 Allgemeines

Vom 31. August 2007 bis zum 25. September 2008 wurden mit Hilfe der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Messtechnik die Temperaturen und Wetterdaten vor Ort aufgezeichnet. Es folgen die Messergebnisse von Tagen mit relevanten Witterungsbedingungen, die in dieser Messperiode auftraten.

5.2.2 Winterfall

Im Winter wird das System zunächst mit Wasser aus einem 150-Liter-Behälter betrieben. Am 9.11.2007 wird eine Heizpatrone mit konstanter Heizleistung eingebaut und das System aktiv beheizt. Die Fahrbahntemperierung wird dabei im Dauerbetrieb eingesetzt. Die Leistung der Heizpatrone beträgt 2.000 W, diese wurde anhand überschlägiger Berechnungen für die Größe der Fahrbahnplatte ermittelt.

Der Wasserspeicher reagiert auf die Energieentnahme vergleichbar einer Erdsonde, da er nur eine begrenzte Wärmespeicherwirkung hat. Diese wirkt bei Temperaturänderungen an der Straßenoberfläche als Puffer.

In Bild 95 werden die Messwerte der temperierten Abschnitte des Brückenmoduls den Temperaturen des unbeheizten Referenzmoduls gegenübergestellt. Die Temperaturerhöhung durch die Temperierung liegt bei etwa 4 bis 5 K für die Messpunkte über den Rohrleitungen, bei besonders niedrigen Außentemperaturen auch darüber. Die Vorlauftemperatur (T_{Vorlauf}) ist für beide untersuchten Rohrabstände gleich. Man sieht, dass für die dargestellten Messstellen, die sich direkt über dem Rohr befinden, die Oberflächentemperaturen

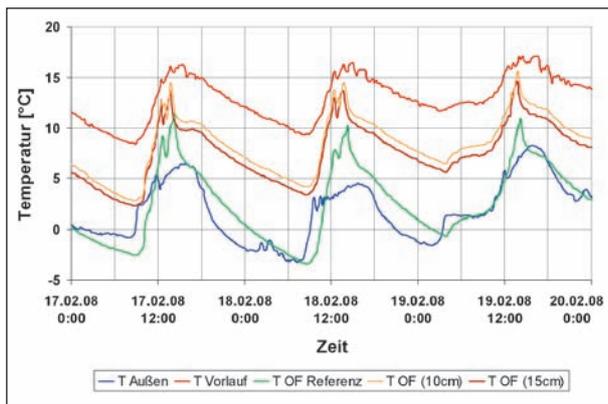


Bild 95: Temperatur-Messwerte vom 17.-19.02.2008

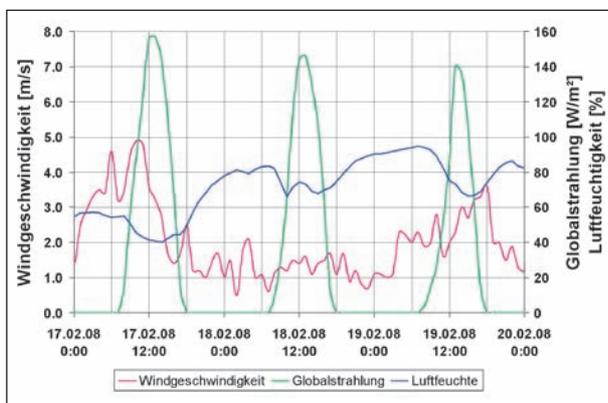


Bild 96: Klima-Messwerte vom 17.-19.02.2008

(T OF) bei einem Rohrabstand von 10 cm um bis zu 1 K höher liegen als bei 15 cm. Das Register mit 10 cm Abstand hat wegen der größeren Rohrlänge pro Quadratmeter eine höhere Leistung.

In Bild 96 werden die wichtigsten Wetterdaten für denselben Zeitraum zum Vergleich visualisiert. Der dargestellte Zeitraum wurde ausgewählt, da hier Temperaturschwankungen um den Gefrierpunkt vorliegen und der Einfluss von Sonneneinstrahlung und Wind deutlich wird. Auf Grund dieser Bedingungen ist der Wechsel zwischen Tages- und Nachttemperaturen entsprechend groß.

Am 20. Dezember 2007 wurden die Bilder 97 und 98 aufgenommen, die die Wirkung der Temperierung sehr anschaulich zeigen. Der beheizte Bereich der Testbrücke bleibt schneefrei, was in beiden Bildern gut sichtbar ist. Darüber hinaus ist in Bild 98 der Unterschied zwischen der Straße im Vordergrund und dem sich daran anschließenden nicht temperierten Brückenmodul zu erkennen: Auf der Straße ist die Schneedecke sichtbar dünner als auf dem untemperierten Modul.



Bild 97: Foto von der Testbrücke, vom 20.12.2007



Bild 98: Foto von der Testbrücke, vom 20.12.2007 – Vergleich temperiertes Modul (schneefrei), untemperiertes Modul (Mitte), Straße auf Erdreich (Vordergrund)

In den Bildern 99 und 100 werden für den Zeitraum vom 19. bis 21. Dezember die Messdaten wie in den vorangegangenen Grafiken dargestellt. Hier handelt es sich um einen Periode mit bedecktem Himmel. Die Solarstrahlung ist geringer, die Oberflächentemperatur der Brücke (Referenz) folgt hier mit nur geringen Abweichungen der Lufttemperatur.

Die Grafiken in Bild 101 und Bild 102, Klima-Messwerte vom 01.-03.01.2008, zeigen einen weiteren Zeitraum (01. bis 03. Januar) mit Außentemperaturwerten und Oberflächentemperaturwerten des Referenzmoduls um 0 °C. Am 03. Januar werden hier erhöhte Windgeschwindigkeiten mit Werten um 5 m/s gemessen, was dazu führt, dass die Wirkung der Temperierung etwas abnimmt. Hier werden etwa 4 K gemessen, wo sonst über 5 K auftrafen.

Neben den gezeigten Zeitverläufen sind auch die Infrarot-Aufnahmen (Bild 103 bis Bild 105) gut ge-

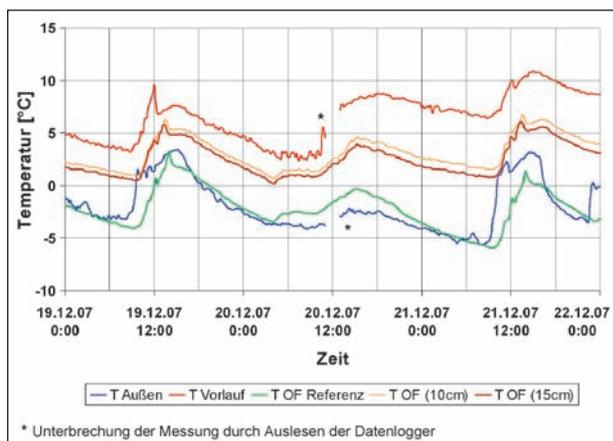


Bild 99: Temperatur-Messwerte vom 19.-21.12.2007

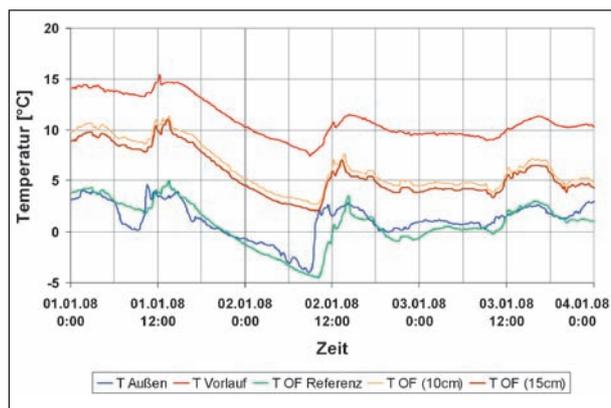


Bild 101: Temperatur-Messwerte vom 01.-03.01.2008

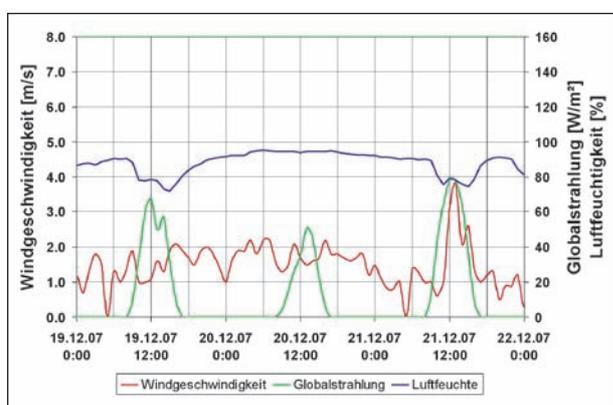


Bild 100: Klima-Messwerte vom 19.-21.12.2007

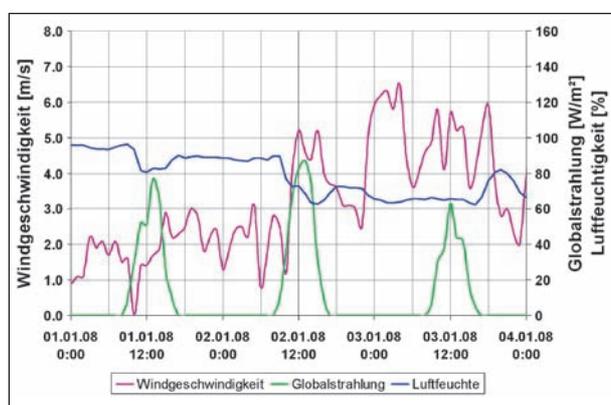


Bild 102: Klima-Messwerte vom 01.-03.01.2008

eignet, die Wirkung der Temperierung in der Fläche darzustellen.

Ein lokaler Temperatursensor kann nicht den Mittelwert einer Oberflächentemperatur ermitteln, wohingegen die Auswertung von Infrarotaufnahmen diese Möglichkeit bietet. In den Infrarot-Aufnahmen in Bild 104 und Bild 103 werden daher die mittlere Oberflächentemperatur X01 eines Moduls und eine exemplarische Messstelle der Oberflächentemperatur P02 an der Position des Temperatursensors verglichen (vgl. Bild 103 und Bild 104, Messwerttabellen rechts). In den Infrarot-Aufnahmen wird sichtbar, dass die Messwerte für die Oberflächentemperatur von der mittleren Oberflächentemperatur zu den Zeitpunkten der Aufnahmen um ca. 0,4 K und 1,3 K abweichen. Der Unterschied entsteht durch ein gut sichtbares Gefälle der Oberflächentemperatur vom Vorlauf zum Rücklauf. Das bedeutet, dass die Messwerte die Leistung der Fahrbahntemperierung wahrscheinlich überschätzen. Eine Annahme des auf dieser Grundlage reduzierten Temperaturhubs von 4 K reicht allerdings

aus, um die Temperatur der Brücken-Fahrbahn an die der übrigen Straßenabschnitte anzupassen, sodass keine frühzeitige Vereisung auf der Brücke auftritt.

Das Bild 105 zeigt den Unterschied zwischen der Temperierung mit 10 cm Rohrabstand auf der linken Seite und 15 cm Rohrabstand auf der rechten Seite. Außerdem wird deutlich, dass nicht nur unter Laborbedingungen, wie in Kapitel 4.1.3 gezeigt, die Temperaturverteilung bei dem Rohrabstand von 10 cm ausreichend homogen ist, sondern auch unter Praxisbedingungen.

Zusammenfassend lässt sich zur thermischen Leistung im Winterfall sagen, dass zu den kritischen Zeiten, in denen die Temperatur unter 5° C sinkt, die Oberflächentemperatur ungefähr um 5 K gegenüber dem nicht temperierten Brückenmodul angehoben werden kann.

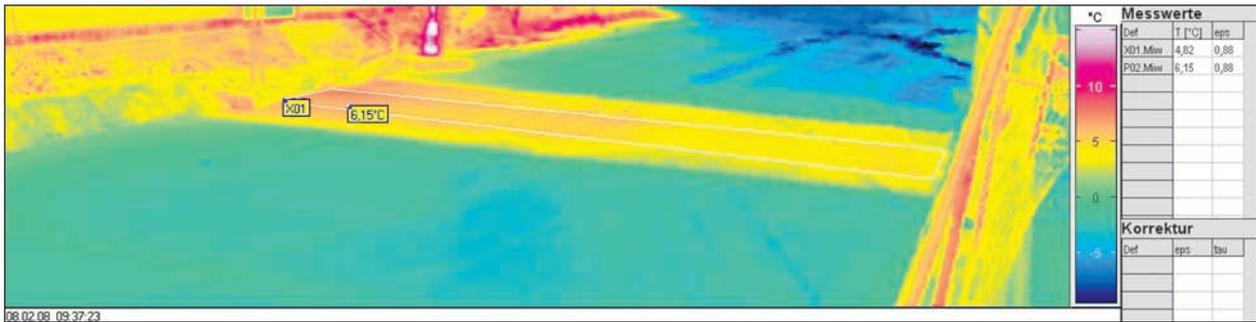


Bild 103: Infrarot-Aufnahme der Testbrücke 08.02.2008 – Vergleich der Temperatur der Messstelle und der mittleren Temperatur des mittleren Moduls

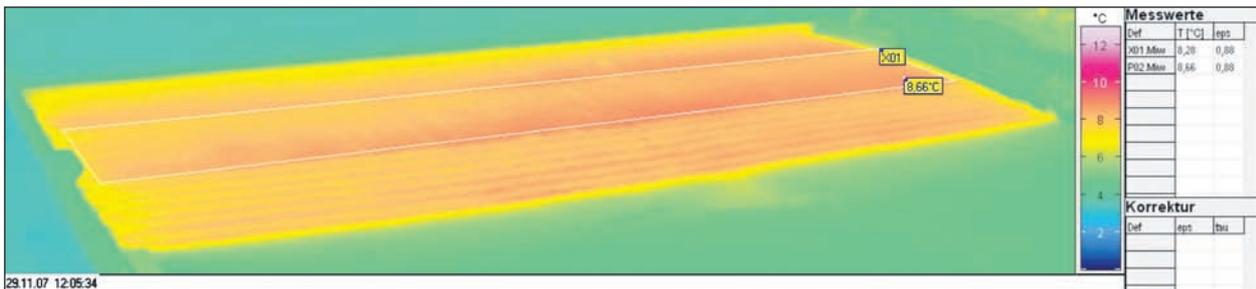


Bild 104: Infrarot-Aufnahme der Testbrücke vom 29.11.2007 – Vergleich der Temperatur der Messstelle und der mittleren Temperatur des mittleren Moduls

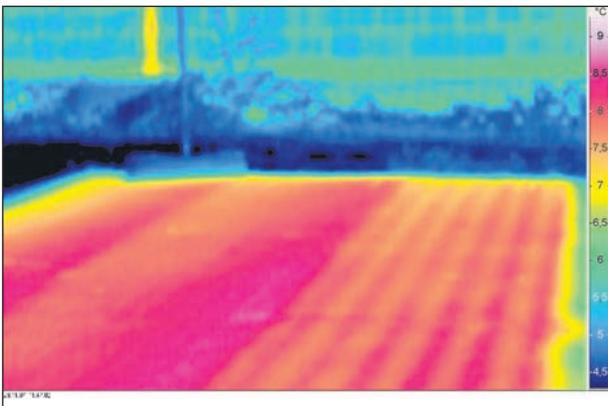


Bild 105: Infrarot-Aufnahme der Testbrücke vom 29.11.2007

5.2.3 Sommerfall

Im Sommer wurde ein Kühlthermostat (Bild 106) in das Temperierungssystem eingebaut und kontinuierlich betrieben. Die Solltemperatur wurde auf 10 °C eingestellt. Dieses Gerät ist aus dem Bestand des ausführenden Forschungsinstituts; es weist eine Kühlleistung von ca. 1.000 W auf. Bezogen auf die Fläche von 18 m² und unter Berücksichtigung von Leitungsverlusten ergibt sich damit eine flächenspezifische Kühlleistung von ca. 50 W/m².



Bild 106: Umwälzthermostat

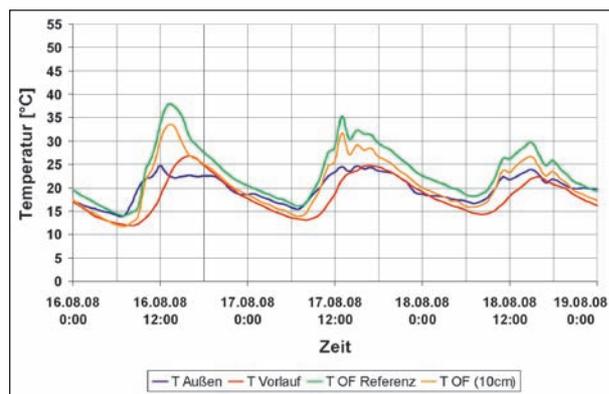


Bild 107: Temperatur-Messwerte vom 16.-18.08.2008

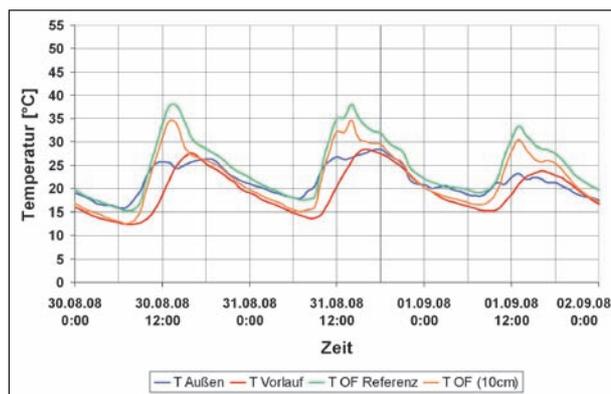


Bild 109: Temperatur-Messwerte vom 31.08.-01.09.2008

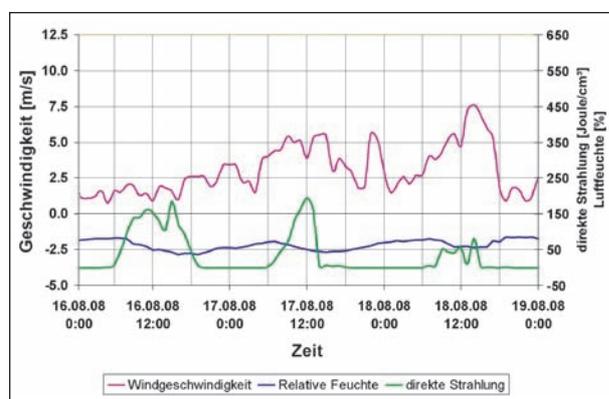


Bild 108: Klima-Messwerte vom 16.-18.08.2008



Bild 110: Klima-Messwerte vom 31.08.-01.09.2008

In den Bildern 107 bis 110 sind exemplarisch die Messwerte für zwei warme Dreitages-Perioden dargestellt.

Am 16. August, dem heißesten Tag in Bild 107, wird die Oberflächentemperatur durch die Kühlung um bis zu 6 K gesenkt. Im Mittel kann am 16.8. tagsüber die Oberflächentemperatur des Asphalts um 4 K reduziert werden. In Bild 108 sind für den entsprechenden Zeitraum die Klima-Messwerte dargestellt.

Man sieht, dass das Kühlthermostat und das Wärmeübertragungssystem zum konstanten Kühlen mit einer Vorlauftemperatur von 10 °C für die Fläche der Testbrücke nicht ausreichen. Daher steigt die Vorlauftemperatur auf etwa 25 °C an, die zur Verfügung stehende Kühlleistung ist zu gering.

Am 31. August konnte die Vorlauftemperatur fast wieder auf 10 °C gesenkt werden (Bild 109). Die Oberflächentemperatur der Straße konnte auch hier wieder um bis zu 6 K gesenkt werden und im Mittel über den Tag um ca. 3,5 K.

Da die Vorlauftemperatur der folgenden Tage (17. und 18. August sowie 01. und 02. September) nicht mehr auf 10 °C gekühlt werden kann und die Außentemperaturen und damit die Kühlmittelunter-

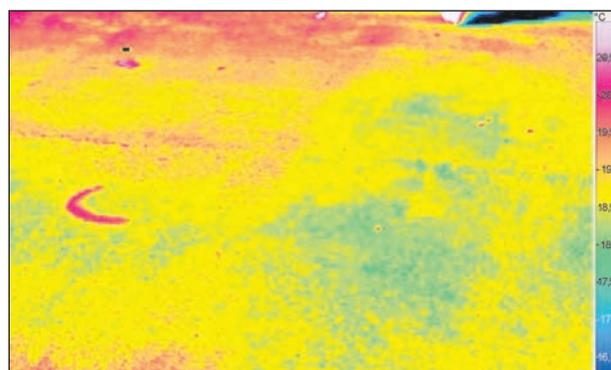


Bild 111: Infrarot-Aufnahme der Testbrücke 25.09.2008 – Vergleich untertemperiertes und temperiertes Modul im Kühlfall

temperatur und der Wärmestrom sinken, gehen an diesen Tagen auch die Leistung und die erreichte Temperaturdifferenz der Oberflächen von dem gekühlten zu dem ungekühlten Brückenmodul zurück.

In Bild 111 ist der Vergleich vom gekühlten zum ungekühlten Brückenmodul in einer Infrarot-Aufnahme zu sehen. Der Effekt der Kühlung (rechte Seite) ist sichtbar, aber bei den relativ niedrigeren Temperaturen ist die mögliche Temperaturdifferenz durch die Kühlung noch nicht sehr groß, wie auch in den Grafiken zu sehen ist.

5.2.4 Zusammenfassung und Bewertung

Wie bei den Vorversuchen zeigte sich auch bei der Testbrücke, dass ein geringer Rohrabstand wichtig ist, um eine homogene Temperaturverteilung zu erzeugen. Es wird deutlich, dass das Temperaturgefälle vom Vorlauf zum Rücklauf nicht außer Acht gelassen werden darf. Durch einen ausreichend hohen Volumenstrom kann dieser Einfluss reduziert werden, Hinweise hierzu enthält RECKNAGEL, H., SPRENGER, E., SCHRAMEK, E. (2005).

Insgesamt lässt sich ein positives Resümee ziehen: Die Oberflächentemperatur lässt sich mit einem relativ kleinen thermischen Speicher und Vorlauftemperaturen von 10 °C bis 15 °C um 4 K (und mehr) gegenüber dem untemperierten Modul anheben. In der Praxis hängt es vom Energieangebot der Energiequelle und der Klimaregion ab, ob sich ein entsprechend erfolgreiches System umsetzen lässt. Die Dimensionierung der Entnahmeanlage an der Wärmequelle und das Zuleitungssystem für die Asphalttemperierung müssen auf diese Randbedingungen abgestimmt werden, um eine ausreichende Leistung zu garantieren. Bei einer Planung des Systems ist auf die niedrigsten lokal auftretenden Oberflächentemperaturen zu achten, die neben den anderen Randbedingungen auch durch das Temperaturgefälle vom Vorlauf zum Rücklauf bestimmt werden, damit es nicht zu lokalen Vereisungen kommt.

Für den sommerlichen Kühlfall lässt sich feststellen, dass sich mit einer relativ geringen Kühlleistung von ca. 50 W/m², wie sie sich aus den vorgegebenen technischen Komponenten ergeben hat, die Oberflächentemperatur deutlich reduzieren lässt. Eine größere Leistung, die betragsmäßig in etwa der winterlichen Heizleistung entspricht, wäre allerdings vorteilhaft. Die Bildung von Spurrinnen lässt sich folglich mit einer zur Glatteisvermeidung ausgelegten Anlage, die im Sommer zum Kühlen verwendet wird, verringern. Weitere Untersuchungen zu Stabilität und Festigkeit befinden sich im Kapitel 5.3.

5.3 Stabilität/Festigkeit

5.3.1 Rohreinbau auf Brücke unter Praxisbedingungen

Zur Beurteilung des Verhaltens von eingebauten Rohrleitungen unter realen Verkehrsbedingungen wurden auf der Brücke über die A 555 im Bereich



Bild 112: Eingebaute Rohre im ersten Abschnitt



Bild 113: Eingebaute Rohre im zweiten Abschnitt

der Aus- und Auffahrt Rodenkirchen in Teilbereichen Rohrleitungen in den Gussasphalt eingebaut. Da die Rohrleitungen allerdings nur der Beurteilung des Einflusses auf die Dauerhaftigkeit der Deckschicht unter realer Beanspruchung dienen, erfolgte keine Temperierung der Teilbereiche. Der Einbau der Rohrregister erfolgte im Rahmen der Instandsetzung der Brücke.

Der Einbau der Rohre (PE-Xa-Rohre mit Aluminiumummantelung) mit jeweils zwei verschiedenen Durchmessern (20 mm und 16 mm) erfolgte in zwei Abschnitten jeweils auf der zuvor eingebauten Schutzschicht. Diese beiden Abschnitte sind in Bild 114 dargestellt.

Im ersten Abschnitt wurden mit den beiden Rohrdurchmessern jeweils Felder von 0,5 m x 3,0 m angelegt. Die Fixierung der Rohre erfolgte dabei durch ein zugeschnittenes Lochband und Schrauben (Bild 40 und Bild 112). Der Rohrabstand betrug bei beiden Rohrdurchmessern jeweils 10 cm.

Im zweiten Abschnitt erfolgte die Befestigung der Rohre mit vorgefertigten und an den Durchmesser der Rohre angepassten Metalllaschen und mit einem Nagelschussgerät (Bild 41 und Bild 113). In diesem Abschnitt wurden die beiden Rohre auf

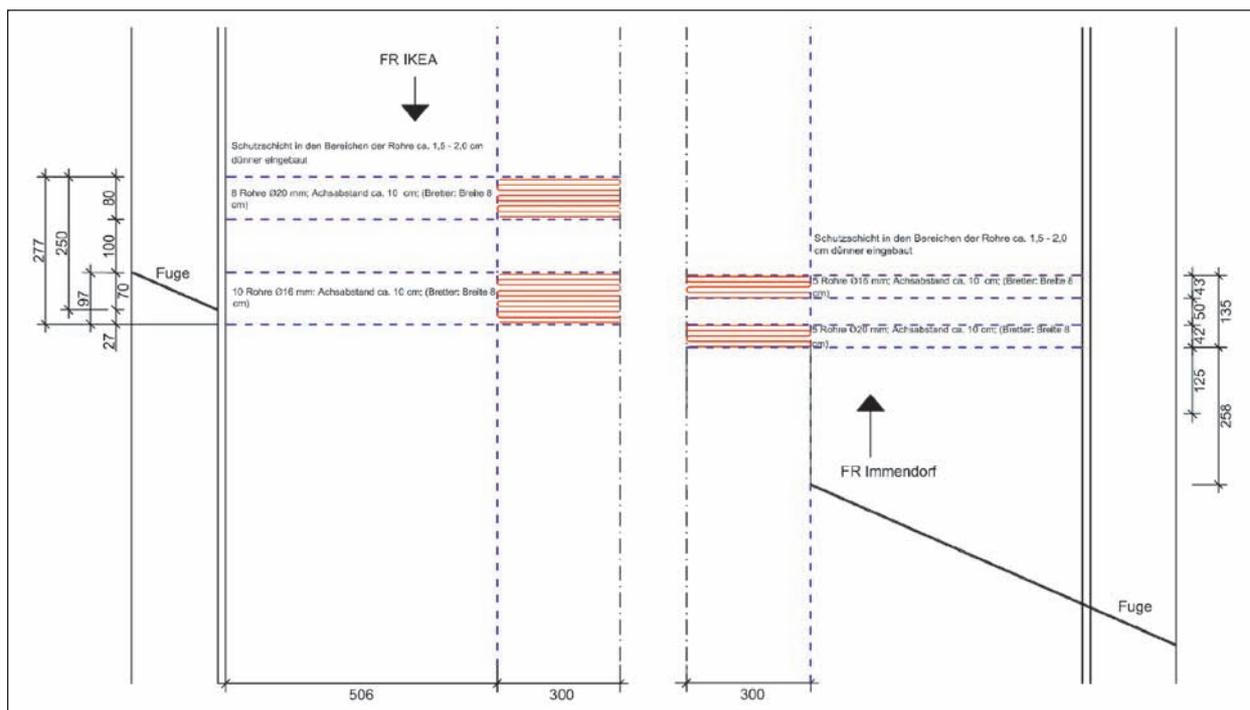


Bild 114: Lageplan der beiden Abschnitte mit den eingebauten Rohren



Bild 115: Einbau der Deckschicht – Anlieferung des Gussasphaltes

einer Fläche von zweimal ca. 1,0 m x 3,0 m eingebaut.

Der Einbau des Gussasphaltes wurde im ersten Abschnitt im Bereich der Rohrleitungen von Hand vorgenommen. Im zweiten Abschnitt wurde der Fertiger eingesetzt, wobei zum Schutz der Rohre beim Anliefern des Asphalttes Holzbretter in die Zwischenräume gelegt wurden (Bild 113 und Bild 115). Diese wurden mit Fortschreiten des Einbaus durch die Arbeiter herausgenommen (Bild 116). Auf diese Weise war ein nahezu praxisgerechter Einbau des Gussasphaltes trotz der vorhandenen Rohre möglich, durch den auch der Bauablauf nicht unnötig



Bild 116: Einbau der Deckschicht mit Fertiger im Bereich der Rohre

verzögert wurde und dieser somit in der Praxis auch bei realen Projekten vorstellbar wäre.

5.3.2 Untersuchung der Testabschnitte auf Brücke unter Praxisbedingungen

Im Bereich dieser Testabschnitte erfolgten sowohl nach dem Einbau als auch nach ca. 7 Monaten unter Verkehr Messungen zur Beurteilung der Ebenheit (Texturmessungen (Bild 117) und Profilo- graf), um Aussagen über Veränderungen der Oberfläche beispielsweise infolge Aufwölbungen über den Rohren machen zu können. Die Texturmessun-



Bild 117: Messungen der Oberflächen Textur im Bereich der Eingebauten Rohre durch die BAST



Bild 118: Parallele Lage der Rohre nach dem Einbau des Gussasphaltes

gen im Bereich der eingebauten Rohre erfolgten durch die BAST.

Des Weiteren war es infolge der Aluminiumummantelung der Rohre mit Hilfe eines Bewehrungssuchgerätes möglich, die Lage der Rohre als auch die Tiefe zu ermitteln. Allerdings zeigten die Ergebnisse der zweiten Messung im Oktober 2008 Ungenauigkeiten bei der Messung, da die Rohre keine Vollquerschnitte aus Metall sind und die Tiefenlage nur ungenau ermittelt werden kann.

Die Ergebnisse zeigten aber unabhängig davon, dass sich die Rohre durch den Einbau des Asphalttes zumindest hinsichtlich der Soll-Lage nicht verändert haben (Bild 118). Das heißt, die Rohre lagen noch parallel zueinander in dem eingebauten Abstand von 10 cm.

Parallel zu diesen Messungen erfolgte in regelmäßigen Abständen von ca. 2 Monaten eine Bege-



Bild 119: Ausgebaute Rohrstücke



Bild 120: Querschnitt des ausgebauten Rohrstückes

hung der Brücke, um auftretende Risse im Bereich der eingebauten Rohre zu erkennen. Dabei wurden keine Risse festgestellt.

Im November 2008 wurden im Bereich der eingebauten Rohre 2 Bohrkerne gezogen, weil aufgrund der unterschiedlichen Ergebnisse hinsichtlich der Tiefenlage der Rohre vermutet wurde, dass sich die Rohre beim Einbau und anschließenden Einwalzen des Splittes verformt haben. Die Entnahme der Bohrkerne gestaltete sich schwierig, da die einzelnen Schichten sowie auch die Rohre aufgrund des guten Verbundes nicht voneinander getrennt werden konnten. Somit konnten nur Bruchstücke der Rohre (Bild 119 und Bild 120) ausgebaut werden. Anhand des im Bild 120 abgebildeten Rohrquerschnittes sowie des anhaftenden Gussasphalttes kann als Ergebnis festgehalten werden, dass die Rohrquerschnitte sich infolge des Gussasphalteinbaus nicht verändert haben und der Verbund zwischen Rohr und Gussasphalt sehr gut ist.

5.3.3 Zusammenfassung

Bei der Erstellung der Abschnitte für die Brücke unter Praxisbedingungen konnten Erfahrungen hinsichtlich der Fertigungstechnik erweitert werden. Durch Festschießen der Befestigungslaschen und Einlegen von Brettern zwischen die Rohre konnte die Fertigung praxisgerechter gestaltet werden.

Als Ergebnis dieser Untersuchung kann festgehalten werden, dass auch mit dieser Methode keine Schwächung des Belags nachgewiesen werden konnte. Es haben sich innerhalb dieses begrenzten Untersuchungszeitraums keine Risse oder Verformungen gezeigt.

6 Numerische Simulation

6.1 Grundlagen zu den Simulationsverfahren

In diesem Kapitel werden zwei Simulationsverfahren betrachtet, zum einen die Finite-Elemente-Simulation (FEM), zum anderen die Gebäude- und Anlagensimulation (eingesetztes Simulationswerkzeug: TRNSYS). Die FEM-Simulation erlaubt eine genaue Nachbildung der Geometrie, in diesem Fall also z. B. Rohrquerschnitt und Fahrbahnplatte. Regelungstechnische Verknüpfungen und Berechnungen von Volumenstrom und Energiebedarf sind nur indirekt möglich. Bei der Gebäude- und Anlagensimulation können die Geometrien nur vereinfacht berücksichtigt werden, dafür sind hier vielfältige Varianten zur Regelungstechnik abbildbar, die Berücksichtigung des Volumenstroms und die Variation von Wetterdaten etc. sind vorgesehen.

6.2 Erstellung und Validierung der Rechenmodelle

6.2.1 FEM-Modelle

Basierend auf den Informationen zur klimatischen Temperaturbeanspruchung von Stahl- und Stahlverbundbrücken (MANGERIG, 1986) wurde ein Programm für die Berechnung des Temperaturverhaltens von beliebigen Fahrbahnplatten – im speziellen der Glatteisgefahr – entwickelt. Das Programm arbeitet nach dem Prinzip der Finite-Elemente-Berechnung.

Zur Validierung des Programms sollte eine bestehende Brücke gefunden werden, die an das Stra-

ßenzustands- und Wetterinformationssystem (SWIS, siehe Kapitel 2.1.1) über einen längeren Zeitraum angeschlossen war, um einen möglichst vollständigen Überblick über die thermischen Randbedingungen und den zugehörigen Zustand der Brücke in den Wintermonaten zu erhalten. Durch die Verwendung einer bestehenden Brücke konnte der Abgleich von Messung und Simulation zu einem recht frühen Zeitpunkt innerhalb des Projektes erfolgen, weiterhin ist von einer guten Qualität der Messdaten auszugehen. Dafür musste in Kauf genommen werden, dass nur Messungen für eine nicht temperierte Brücke zur Verfügung stehen.

Die Dortmund-Ems-Kanal-Brücke der BAB 1 bei Münster erwies sich als geeignet, da Langzeitdatensätze für diese Brücke aus dem SWIS vorhanden waren (Stationsnr. H242, H243). Bei dem Brückenbauwerk handelt es sich um eine Autobahnbrücke im Zuge der A 1 über den Dortmund-Ems-Kanal. In Längsrichtung ist es ein Einfeldträgersystem mit einer Stützweite von 81,0 m. Der Querschnitt ist ein einzelliger Hohlkasten mit orthotroper Fahrbahnplatte. Der Fahrbahnbelag besteht aus Dichtungsschicht sowie Schutz- und Deckschicht aus Gussasphalt.

Die vom SWIS zur weiteren Bearbeitung zur Verfügung gestellten Daten der Glättemeldeanlage beinhalten Informationen über die Lufttemperatur, die Luftfeuchtigkeit ausgedrückt über die Taupunkttemperatur, die Belagstemperatur und den Straßenzustand (Bild 3). Die Messdaten lagen in 15-Minuten-Intervallen für die Winter 1997/1998 bis 1999/2000 vor. Bild 121 zeigt einen Ausschnitt der Belagstemperatur, der Lufttemperatur und der entsprechenden Taupunkttemperatur für den Verlauf von zwei Tagen. Die für die thermischen Untersuchungen der Brückenfahrbahn notwendigen Einstrahlungsintensitäten der Sonne sind nicht von der Glättemeldeanlage aufgenommen worden. Hierfür wurde eine Messstation des DWD in ca. 80 km Entfernung herangezogen (Osnabrück, Stationsnr. 10317). Es liegen stündliche Werte der Einwirkungsgrößen Lufttemperatur in °C, Windgeschwindigkeit in m/s, Globalstrahlung in J/cm² und Diffusstrahlung der Sonne in J/cm² vor. Die Werte der Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit sind stündliche Mittelwerte, die Strahlungsdaten sind Stundensummen der Sonneneinstrahlung. Durch geeignete Interpolation sind diese Daten auf 15-Minuten-Werte umgerechnet.

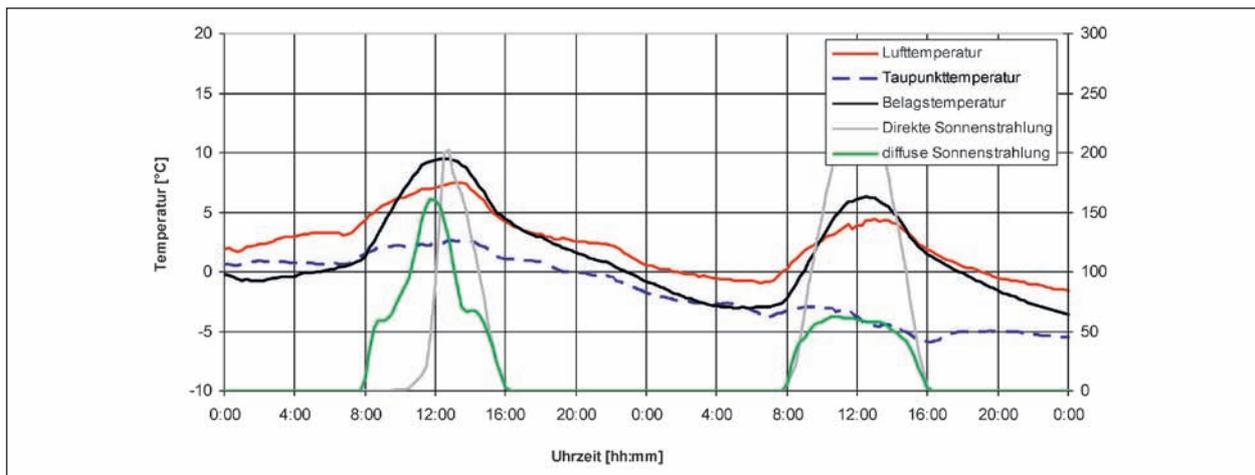


Bild 121: Datensatz vom SWIS mit zusätzlichen Strahlungsintensitäten

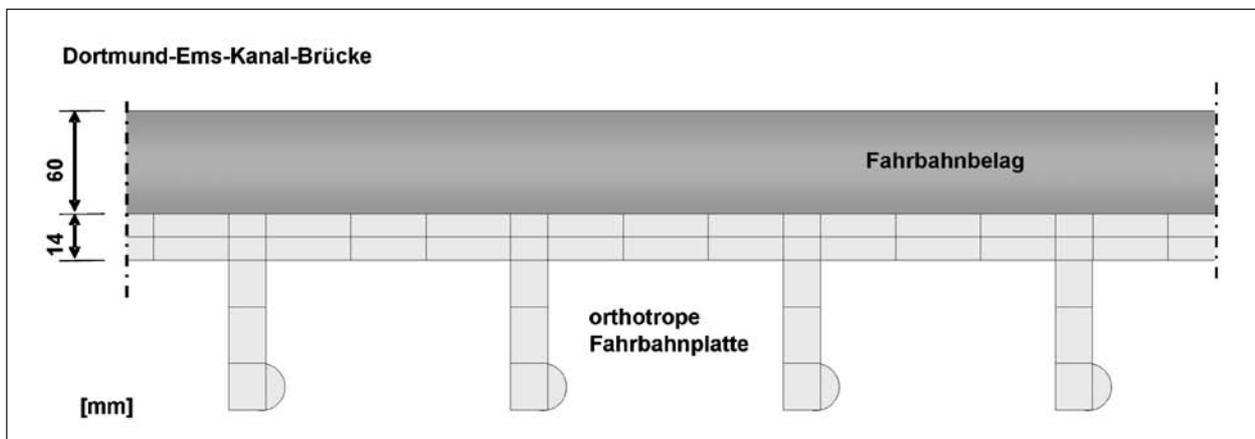


Bild 122: Orthotrope Fahrbahnplatte

Für die thermischen Untersuchungen an der Dortmund-Ems-Kanal-Brücke wurde anhand von Auszügen aus dem Bauwerksbuch ein FEM-Modell erstellt. Es werden die für die thermischen Materialparameter in der Literatur angegebenen Annahmen verwendet. Bild 122 zeigt einen Ausschnitt der orthotropen Fahrbahnplatte mit dem zugehörigen Straßenbelag.

Der Simulation ist der aufbereitete Klimadatenatz des Winters 97/98 für den Zeitraum vom 28. Oktober 1997 bis zum 31. März 1998 zu Grunde gelegt. Im Diagramm in Bild 123 ist die errechnete Temperatur der Oberfläche des Fahrbahnbelags beispielhaft für die Tage 18.-20. November 1997 mit den Messwerten der Belagstemperatur aus der Glättemeldeanlage verglichen. Die Ergebnisse der numerischen Berechnung zeigen mit den Messwerten eine gute Übereinstimmung.

Zur Beurteilung der Glättegefahr können die nun vorliegenden Simulationsergebnisse von der

Oberflächentemperatur der Taupunkttemperatur gegenübergestellt werden. Liegt die Belagstemperatur unterhalb der Taupunkttemperatur der Luft, kondensiert Wasser an der Oberfläche. Die Gefahr von Glätte besteht, wenn das Temperaturniveau des Belags unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt. Somit ist die Glättebildung numerisch erfassbar.

In Bild 124 ist die Oberflächentemperatur des Brückenbelages der Taupunkttemperatur der Luft für den Zeitraum von 2 Monaten gegenübergestellt. Der Detailausschnitt zeigt eine solche kritische Situation, in der die Gefahr der Glättebildung besteht.

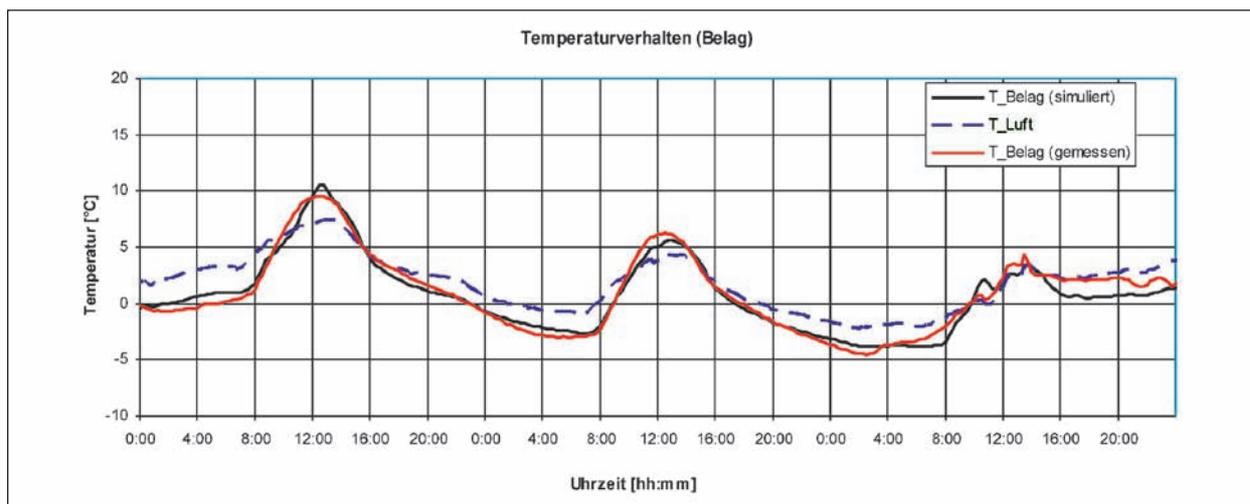


Bild 123: Ausschnitt der Oberflächentemperatur

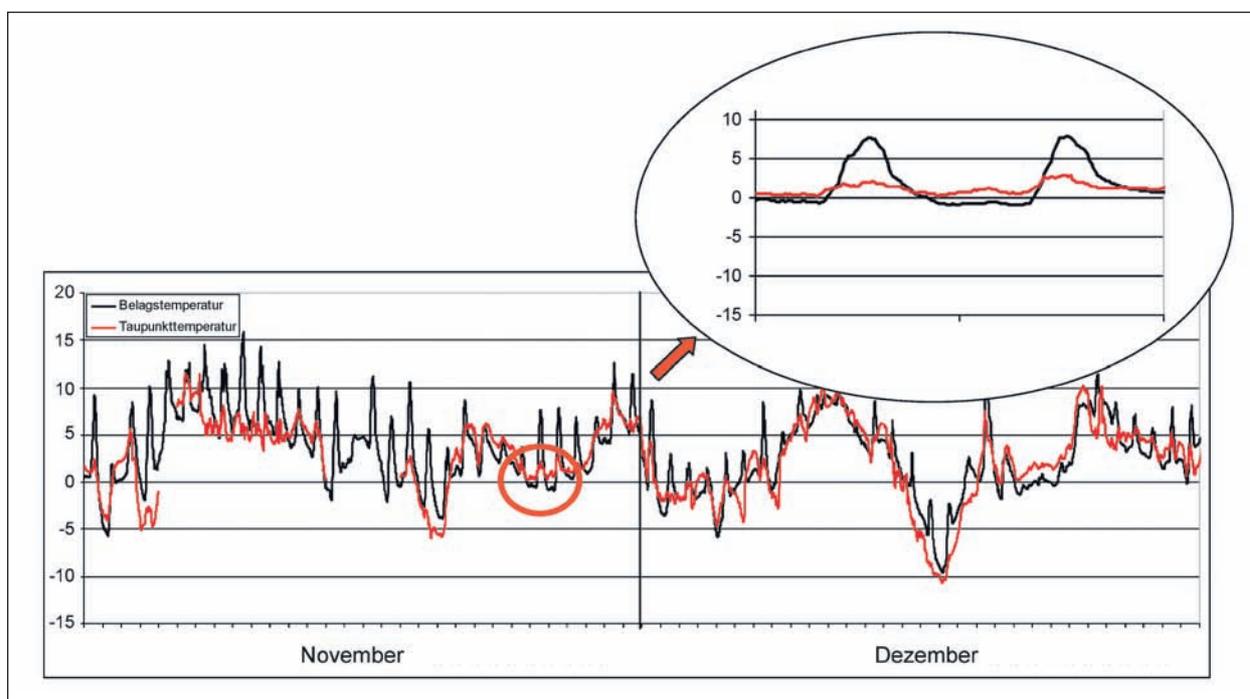


Bild 124: Darstellung der Oberflächentemperatur des Fahrbahnbelages und der Taupunkttemperatur der Luft für den Verlauf von 2 Monaten

6.2.2 TRNSYS-Modelle

TRNSYS ist ein modular aufgebautes, sehr flexibles Simulationsprogramm für thermische und energetische Problemstellungen. Der Prototyp des Programms wurde in den 1970er Jahren in den USA entwickelt. Die für die Simulationen dieses Projektes verwendete Programmversion ist TRNSYS 16.

Einzelne Module eines Systems werden in so genannten „Types“ beschrieben. Das zentrale Modul für die thermische Simulation von Bauwerken

wurde für das Modell der Brücke mit dem Typ für durchströmte temperierte Bauteile erweitert. Die Geometrie der durchströmten Bauteile wird vereinfacht abgebildet, in Bild 125 ist der Aufbau des hier verwendeten Simulationsmodells dargestellt.

Zunächst wurde ein Modell für die Probekörper aus Kapitel 4.1.2 (Kleinteilversuche) erstellt. Das Modell und die auftretenden Wärmeströme sowie die Einflüsse aus Sonneneinstrahlung wurden dann anhand von Simulationen nachvollzogen, um das Modell zu optimieren. Die Simulationen sind teilweise in Kapitel 4.1.3 dargestellt.

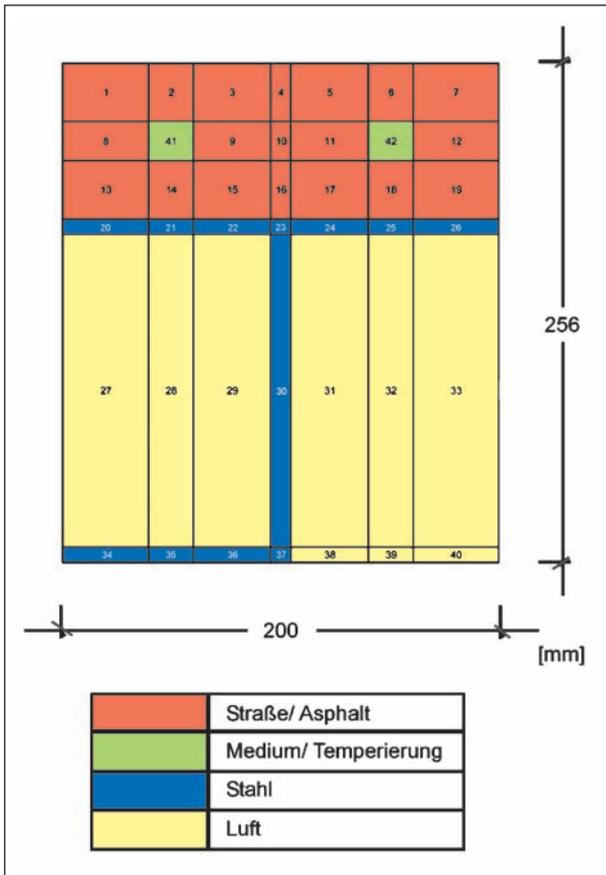


Bild 125: Aufbau der vereinfachten Geometrie für das Simulationsmodell

Für die Testbrücken wird dieses Modell entsprechend angepasst und erweitert. Um den Windeinfluss im numerischen Modell abzubilden, wird für den konvektiven Wärmeübergang an der Straßenoberfläche die Glg. (6.1) nach (LEHNER, G., 1981) verwendet.

$$h_{konv} = 5.7 + 3.8 \cdot v \quad (6.1)$$

v: Windgeschwindigkeit in $\frac{m}{s}$

Das TRNSYS-Modell soll in diesem Kapitel anhand der Messergebnisse der Testbrücke, die in Auszügen in Kapitel 5.2 dargestellt sind, validiert werden.

In Bild 126 bis Bild 129 sind für denselben Zeitraum wie in Kapitel 5.2 die Simulationen den Messwerten gegenüber gestellt. Die Grafiken können erst ab dem 2. Januar betrachtet werden, da am 1. Januar die Simulation anläuft – die Simulationen werden die Randbedingungen Wind, direkte und diffuse Strahlung, Außentemperatur und relative Luftfeuchte einbezogen. Außerdem wird die gemessene Vorlaufemperatur vorgegeben, um

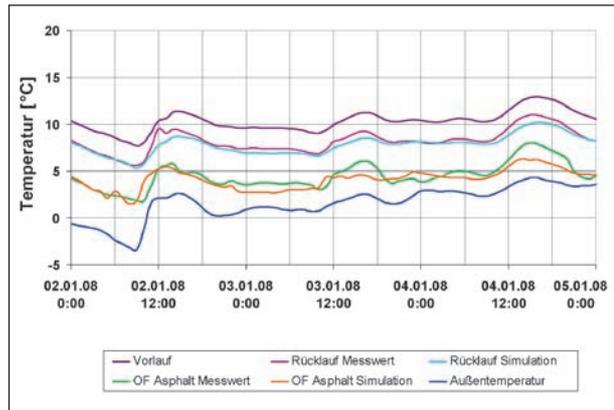


Bild 126: Vergleich der Mess- und Simulationswerte für den 02.-0 4.01.2008 – temperiertes Brückenmodul

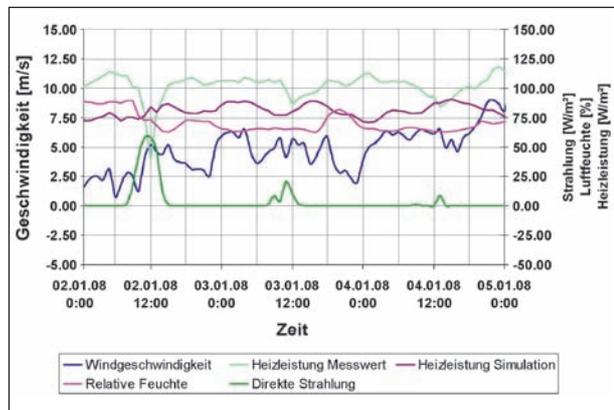


Bild 127: Klima-Messwerte und gemessene und simulierte Heizleistung vom 02.-04.01.2008

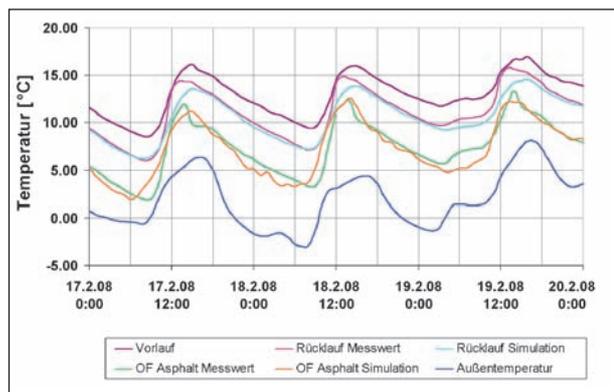


Bild 128: Vergleich der Mess- und Simulationswerte für den 17.-19.02.2008 – temperiertes Brückenmodul

das Simulationsmodell mit den Messwerten zu vergleichen.

Bei der Rücklaufemperatur für beide dargestellten Zeiträume in der Simulation ist eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten zu erkennen, wohingegen bei der Oberflächentemperatur teilweise Abweichungen auftreten. Diese Abweichungen resultieren wahrscheinlich aus Randbedingungen,

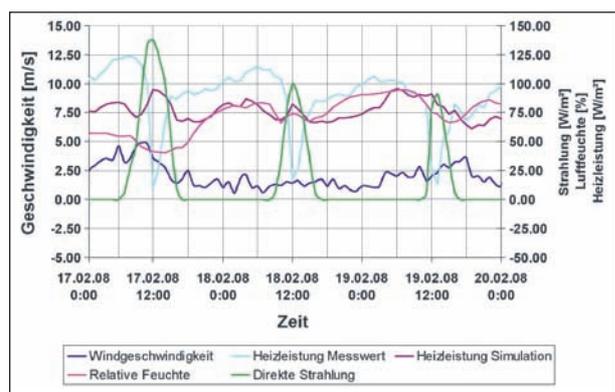


Bild 129: Klima-Messwerte und gemessene und simulierte Heizleistung vom 17.-19.02.2008

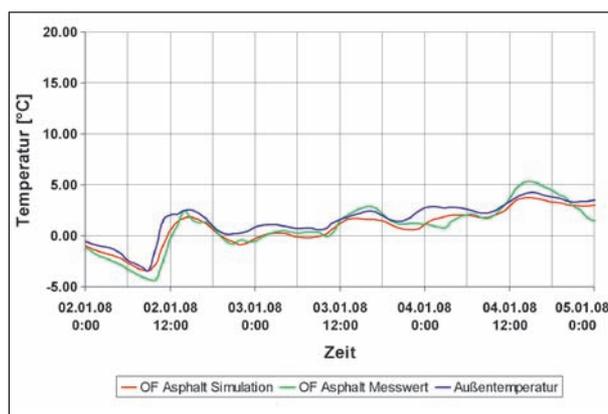


Bild 132: Vergleich der Mess- und Simulationswerte für den 02.-04.01.2008 – untemperiertes Brückenmodul

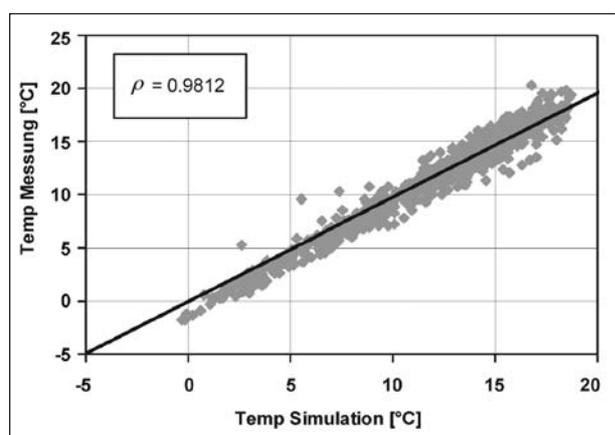


Bild 130: Korrelation von gemessenen und simulierten Rücklufttemperaturen des temperierten Brückenmoduls

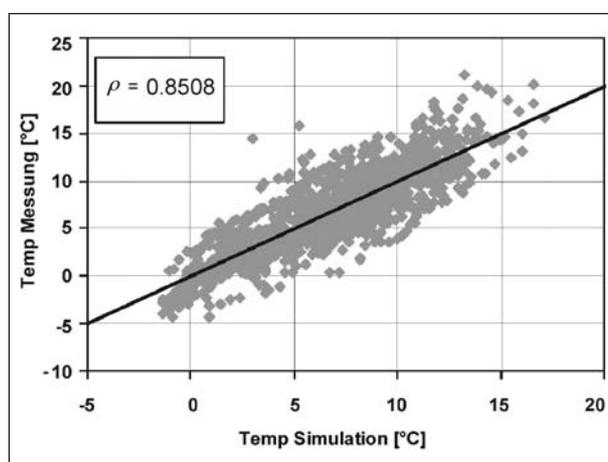


Bild 133: Korrelation von gemessenen und simulierten Oberflächentemperaturen des untemperierten Referenzmoduls

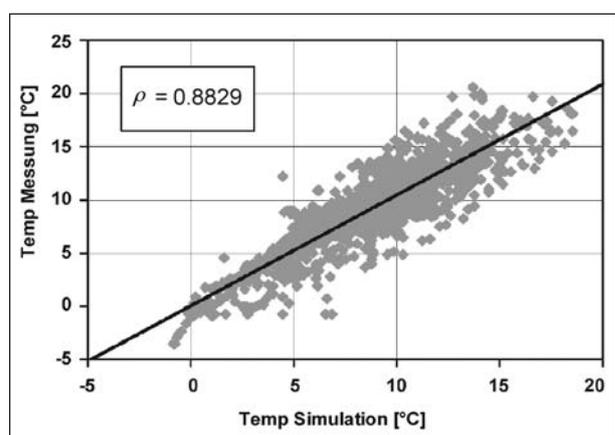


Bild 131: Korrelation von gemessenen und simulierten Oberflächentemperaturen des temperierten Brückenmoduls

die nicht berücksichtigt werden, wie die umgebende Bebauung, und dass die Brücke nur eine eingeschränkte Unterlüftung sowie eine sehr geringe Bauhöhe über dem Erdreich aufweist.

Die Heizleistung wird bei diesem Versuchsaufbau über Wärmemengenzähler ermittelt, der den Volumenstrom und die Temperaturdifferenz zwischen

Vor- und Rücklauf erfasst. Durch Differenzbildung zweier fehlerbehafteter Messwerte und nachfolgende Multiplikation mit einem weiteren Messwert wirken sich Messfehler recht stark aus, in Bild 127 und Bild 129 sind die Abweichungen zwischen Messwerten und Simulationsergebnissen der Heizleistung zu erkennen.

Um die Qualität der Simulationsergebnisse zu überprüfen, wurde in den folgenden Grafiken die Korrelation zwischen den Messwerten und den Simulationsergebnissen der Temperaturen dargestellt (Bild 130 und Bild 131).

Es wird deutlich, dass die Simulation die realen Bedingungen der Wärmeabgabe des Mediums sehr gut widerspiegelt (Bestimmtheitsmaß $\rho = 0,9812$), denn die simulierte Rücklufttemperatur korreliert bei vorgegebener Vorlufttemperatur sehr gut mit der gemessenen Rücklufttemperatur. Die Oberflächentemperaturen werden allerdings nicht ganz so gut abgebildet, was mit den teilweise vereinfachten

und teilweise unbekanntem Randbedingungen zusammenhängt ($\rho = 0,8829$).

Zum Beispiel wird die Entwicklung der Oberflächentemperatur unter dem Einfluss von Verdunstung und Kondensation, wie sie bei Nebel auftritt, im Simulationsmodell nicht berücksichtigt.

Bild 132 zeigt exemplarisch für die gleichen Simulationsparameter wie in Bild 126 die Ergebnisse für das untemperierte Brückenmodul. Auch für die Simulation des untemperierten Referenz-Brückenmoduls ist die Korrelation ausgewertet worden (Bild 133).

Diese Auswertung liefert ein annehmbares Ergebnis für die in Kapitel 6.4 durchgeführten Jahresimulationen. Insgesamt wird das TRNSYS-Simulationsmodell der thermisch aktivierten Fahrbahnplatte als gut und hinreichend genau eingestuft, wenn es um Wärmebedarf geht. Im Einzelfall kann es bei den Oberflächentemperaturen zu größeren Abweichungen kommen.

6.3 Detailuntersuchungen mittels FEM-Berechnungen

6.3.1 Allgemeines

In diesem Kapitel sind die thermischen Berechnungen und Analysen der 6 Ausführungsvarianten, die im Kapitel 3.3.3 definiert wurden, dokumentiert.

Sämtliche Berechnungen wurden unter Berücksichtigung einer konstanten Wärmeträgertemperatur von 10 °C durchgeführt. Hinsichtlich der Wetterda-

ten wurden für diese Simulationsläufe Aufzeichnungen aus den Jahren 1997/1998 verwendet. Der sich durch den konvektiven Wärmeübergang im Innern des durchströmten Rohrquerschnitts einstellende Wärmestrom bewirkt eine Temperaturänderung der direkt angrenzenden Querschnittsbereiche. Innerhalb des Querschnitts stellen sich aufgrund der lokalen Temperaturunterschiede Wärmeleitvorgänge ein, die unter Beachtung der Systemträgheit letztlich auch – wie beabsichtigt – einen Einfluss auf die Oberflächentemperatur haben.

Liegt das Temperaturniveau des Wassers über der Temperatur der Rohrwandung, wird sich ein Wärmestrom zum Querschnitt hin einstellen, der eine Erwärmung der die Rohre umgebenden Querschnittsbereiche bewirkt. Aufgrund der Wärmeleitvorgänge innerhalb des Querschnitts wird folglich auch die Oberflächentemperatur des Belagaufbaus ansteigen. Zur Absenkung des Temperaturniveaus der Oberfläche muss dementsprechend eine Kühlung der die Rohrquerschnitte umgebenden Querschnittsteile durch einen vom Querschnitt weg gerichteten Wärmestrom stattfinden, der sich einstellt, wenn die Temperatur des Wassers unterhalb der Temperatur der Rohrwandung liegt.

Zur Beurteilung der jeweiligen Querschnittsvarianten lässt sich daher eine durch das Wärmeträgermedium eingebrachte bzw. entzogene Energie einem Temperaturunterschied der Oberfläche gegenüberstellen. Aus Voruntersuchungen konnten für unterschiedliche Verlegehöhen und Rohrstände unterschiedliche „Welligkeiten“ der Oberflächentemperatur ermittelt werden (Bild 137). Um für die betrachteten Varianten, die sich in Lage und Ab-

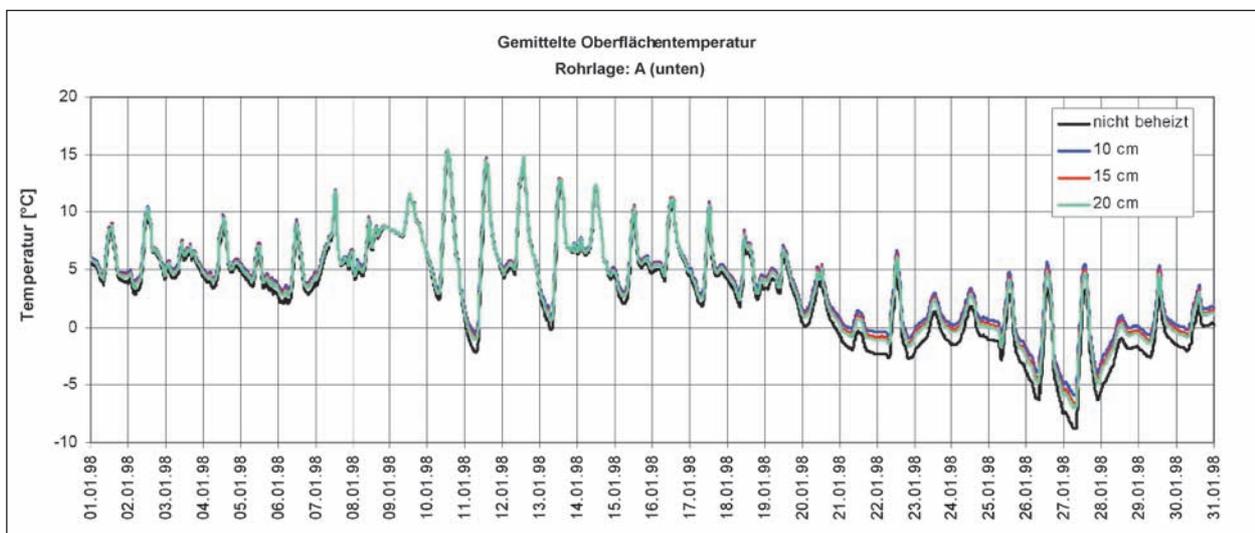


Bild 134: Gemittelte Oberflächentemperaturverläufe (Querschnittsvarianten: A-10, A-15, A-20 cm)

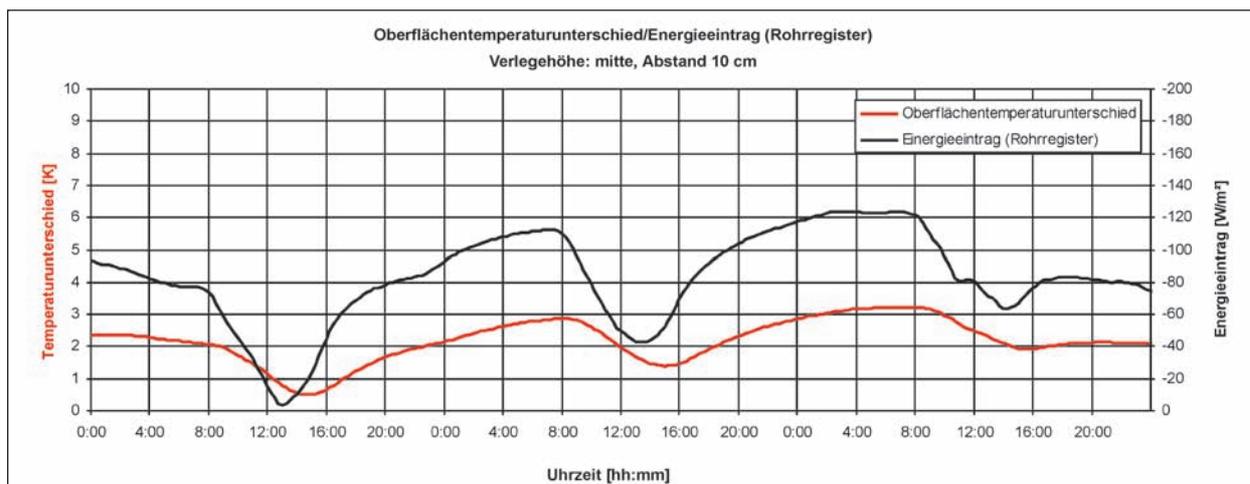


Bild 135: Gemittelter Oberflächentemperaturunterschied im Vergleich zum Energieeintrag für Querschnittsvariante B-10 cm (Rohr-lage Mitte, Abstand 10 cm) am 08.-10.11.1997

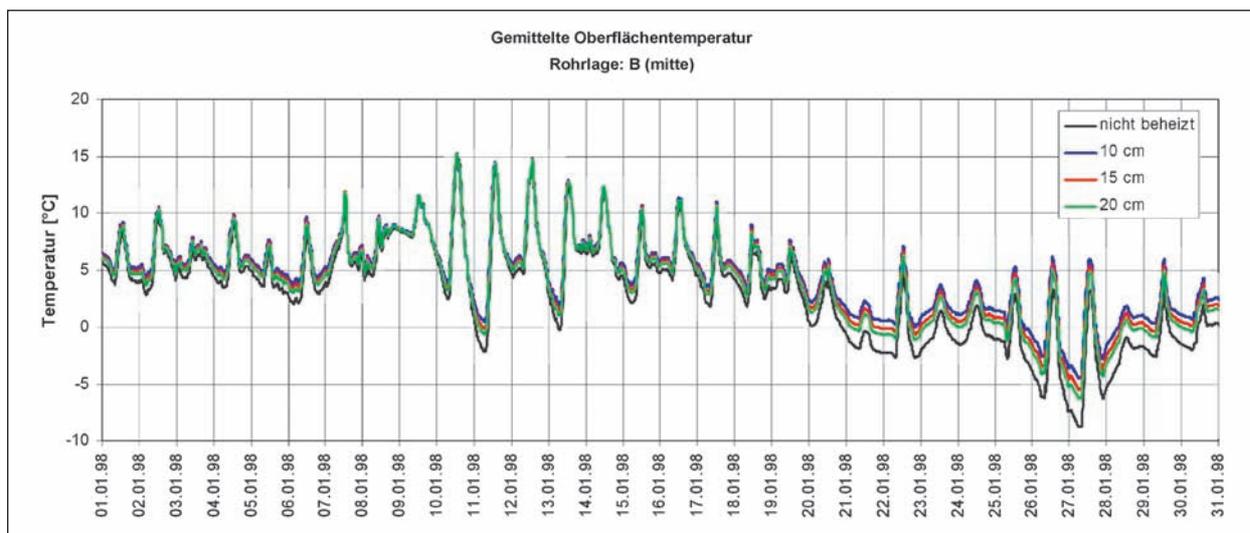


Bild 136: Gemittelte Oberflächentemperaturverläufe (Querschnittsvarianten: B-10 cm, B-15 cm, B-20 cm)

stand der Rohrquerschnitte unterscheiden, vergleichbare Größen zur Beurteilung der Veränderung der Oberflächentemperatur zu erhalten, werden im Folgenden gemittelte Temperaturwerte der Belagsoberflächen angegeben. Dies erscheint auch aus energetischer Sicht sinnvoll, da die Maximaltemperatur die Auswirkungen der Beheizung überschätzen bzw. die Minimaltemperatur die Einflüsse unterschätzen würde.

Die Diagramme in Bild 134 und Bild 136 zeigen für die verschiedenen Querschnittsvarianten (Erläuterung der Varianten siehe Bild 35) die Oberflächentemperaturverläufe bei Energieeintrag durch die Rohrquerschnitte. Es ist zu erkennen, dass die Veränderung der Oberflächentemperatur von der Lage und dem Abstand der Rohrquerschnitte abhängt.

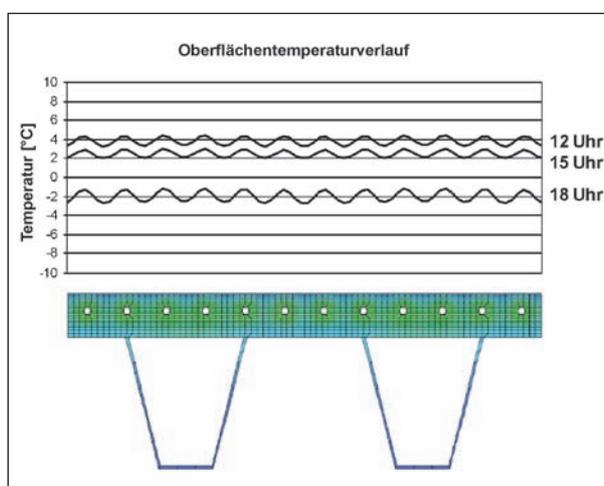


Bild 137: Beispiel eines Oberflächentemperaturverlaufes für Querschnittsvariante B, Abstand 10 cm, für den Verlauf eines Tages

Das Anheben der Temperatur der Belagsoberfläche wird umso größer, je höher das Rohrregister im Querschnitt liegt und je kleiner der Abstand der Rohre untereinander ist. Bei Querschnittsvariante B-10 cm (Verlegung auf Schutzschicht, Abstand 10 cm) beträgt der maximale Temperaturunterschied im Vergleich zur nicht geheizten Situation 5,2 K.

Werden die Temperaturunterschiede der Belagsoberfläche den Energieeinträgen der Rohrquerschnitte gegenübergestellt, zeigt sich unter Berücksichtigung einer konstanten Wassertemperatur, dass aufgrund der Systemträgheit des Querschnitts die maximalen Temperaturunterschiede nicht zeitgleich mit den maximalen Energieeinträgen auftreten. Bild 135 zeigt beispielhaft den Vergleich des Unterschieds der Oberflächentemperatur zu den Energieeinträgen von Querschnittsvariante B-10 cm für den Verlauf von 3 Tagen. Der dargestellte Oberflächentemperaturunterschied ist die Differenz zwischen beheiztem und unbeheiztem Querschnitt. Die Systemträgheit liegt in diesem Beispiel bei ca. 2 Stunden.

6.3.2 Beurteilungskriterium für die thermische Leistungsfähigkeit

Die Belagsoberfläche eines Brückenbauwerks weist in Abhängigkeit der meteorologischen Kenngrößen und des Querschnitts- und Belagsaufbaus einen charakteristischen Temperaturverlauf auf. Die an den Oberflächen des Brückenaufbaus mit der ther-

mischen Umgebung stattfindenden Wärmeaustauschvorgänge definieren durch Strahlungsaustausch und Konvektion (Kapitel 6.2.1) das Temperaturniveau der Belagsoberfläche unter Berücksichtigung des Wärmespeichervermögens des Querschnitts (Bild 138 „out“). Ist nun durch eine Energiequelle im „Innern“ des Belagsaufbaus das Temperaturniveau der Belagsoberfläche angehoben, wird entsprechend diesem Temperaturunterschied mehr Wärmeenergie an die Umgebung abgegeben. Gemäß Bild 138 „out“ wird dieser Energieentzug an der Belagsoberfläche als Energiebedarf definiert. Damit dieses erhöhte Temperaturniveau gehalten werden kann, muss folglich Energie kontinuierlich über Wärmeleitvorgänge innerhalb des Querschnitts zuströmen. Dieser thermische Vorgang wird als Energiezufuhr definiert und erfolgt durch die Rohrregister im Belag (Bild 138 „in“). Zur Beurteilung der thermischen Leistungsfähigkeit (= Effizienz η) kann nun die im Querschnitt durch die Rohrregister eingebrachte Wärmeenergie E_{in} der an der Oberfläche wirksamen Wärmeenergie E_{out} gegenübergestellt werden (Bild 139). Eine hohe Effizienz ist erwünscht, da dadurch die Dimensionierung der Wärmequelle kleiner ausfallen kann, zudem wird der Bedarf an Pumpenstrom reduziert.

Beim Vergleich der durch die Rohrregister eingebrachten Wärmeenergie mit der an der Oberfläche wirksamen Wärmeenergie zeigt sich, dass aufgrund der systembedingten Trägheit ein Zeitversatz in den jeweiligen Tagesverläufen auftritt, der einen direkten Vergleich nicht zulässt.

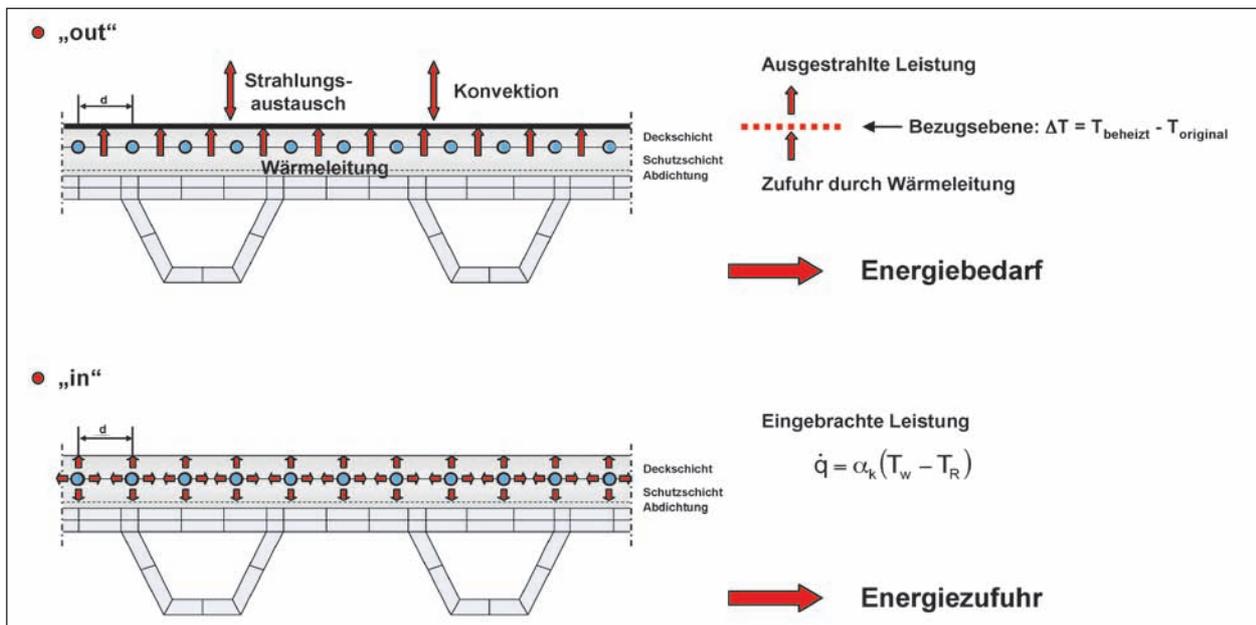


Bild 138: Prinzipskizze für die Beurteilung der thermischen Leistungsfähigkeit

Für die Bestimmung der thermischen Wirksamkeit wurden die Ergebnisse deshalb als Tagessummen pro m² Belagsaufbau gegenübergestellt. Somit ist nun der tägliche Wärmeenergiebedarf eines Quadratmeters Brückenfläche, der durch das Rohrregister im Querschnitt eingetragen wird, mit dem an der Belagsoberfläche durch Wärmeleitung wirkenden Anteil vergleichbar.

In Bild 139 sind die Ergebnisse der sechs unterschiedlichen Querschnittsvarianten (Kapitel 3.3.3) hinsichtlich des Verhältnisses von eingebrachter Wärme E_{in} zur an der Belagsoberfläche wirksamer Wärme E_{out} gegenübergestellt. Anhand der Maxima von Energieentzug und -zufuhr ist zu erkennen, dass Mitte Dezember 1997 und Ende Februar 1998 die kältesten Tage der betrachteten Winterperiode

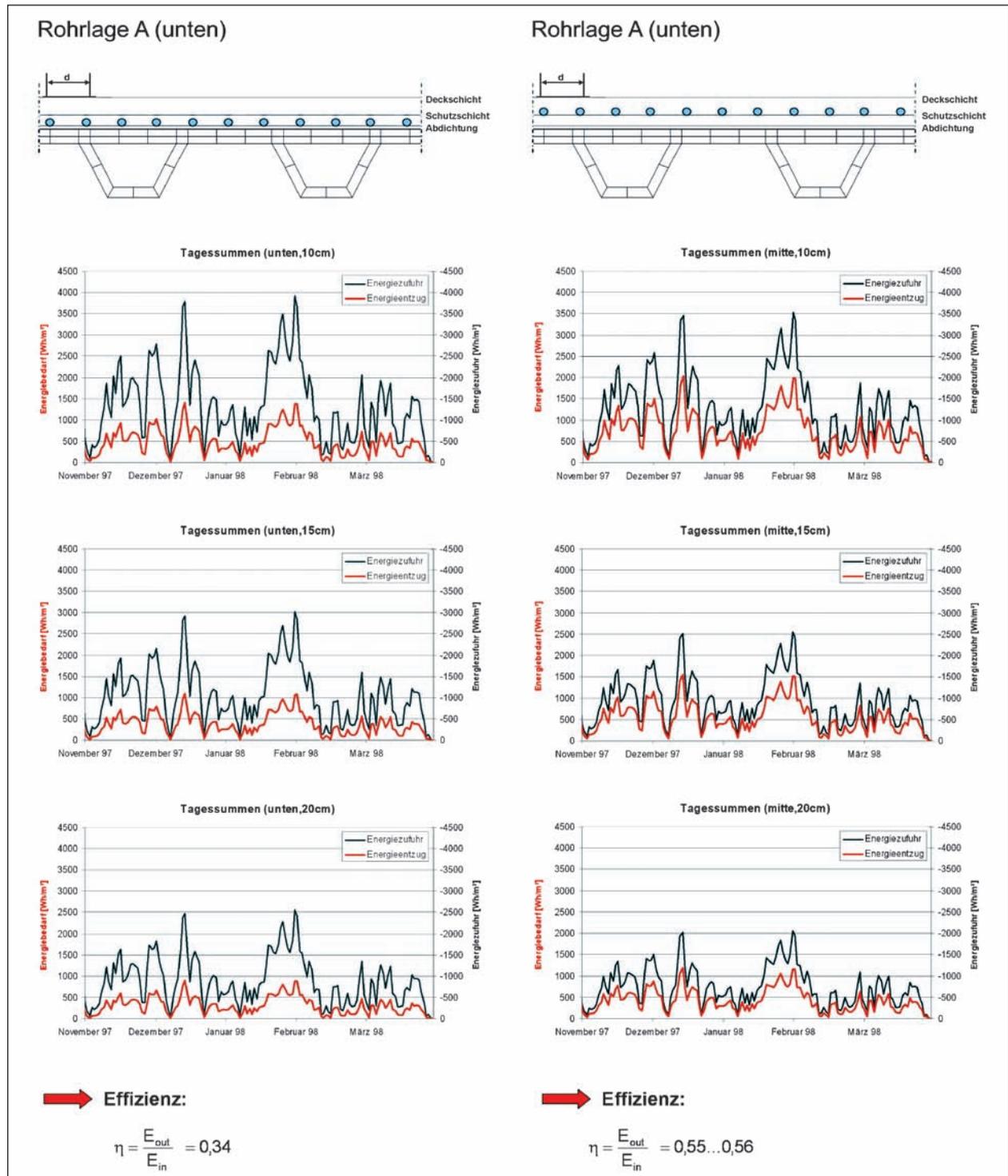


Bild 139: Vergleich eingebrachter Wärmeenergie zu an der Oberfläche wirksamer Wärmeenergie

waren. Im Speziellen führen die klimatischen Randbedingungen an diesen beiden Tagen unter Berücksichtigung der Variante Rohrlage A, Abstand 10 cm, zu einem Energieentzug an der Fahrbahnoberfläche von ca. 1.350 Wh/m^2 . Zur Bereitstellung dieser Wärme an der Fahrbahnoberfläche wird unter den gegebenen thermischen Randbedingungen eine Energiezufuhr in das System von ca. 3.950 Wh/m^2 benötigt. Daraus lässt sich eine Effizienz $\eta = 0,34$ berechnen.

Liegen die Rohre hingegen in der Mitte (Rohrlage B), wird ein größerer Teil der eingebrachten Wärme an der Fahrbahnoberfläche wirksam: Die Effizienz η steigt auf über 0,55.

Den Diagrammen ist weiterhin zu entnehmen, dass sich der Betrag der jeweils eingebrachten Wärmemenge in Abhängigkeit der Rohrabstände ändert: Bei Rohrlage A und 10 cm Abstand ergibt sich wie bereits erwähnt eine maximale Wärmeübertragung von 1.350 Wh/m^2 für den kältesten Tag, bei 15 cm Rohrabstand liegt dieser Wert noch bei 1.100 Wh/m^2 und bei 20 cm schließlich nur noch bei 850 Wh/m^2 .

Wenn sich die Rohre näher an der Fahrbahnoberfläche befinden (Rohrlage B), kann bei gleichem Rohrabstand die Wärmeübertragung an der Fahrbahnoberfläche erhöht werden (Bild 140). Bei dieser Betrachtung wird jedoch die Tatsache, dass die Welligkeit der Temperatur zunimmt, vernachlässigt.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass die Rohrlage B erwünscht ist, um eine gute Effizienz des Systems zu erzielen, andererseits auch ein geringer Rohrabstand (10 cm), um eine möglichst gleichmäßige Erwärmung zu erreichen.

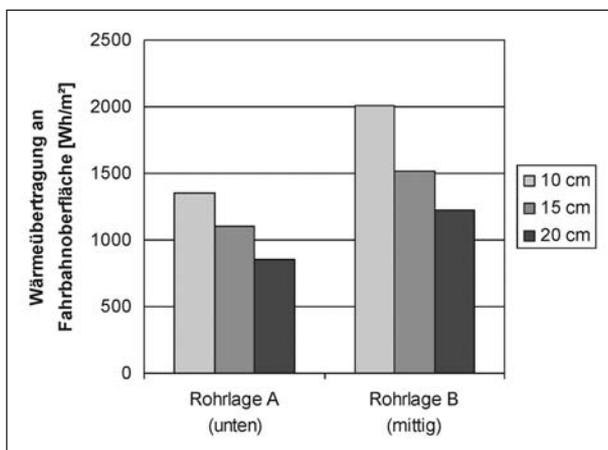


Bild 140: Wärmeübertragung am kältesten Tag, Einfluss von Rohrlage und -abstand

6.3.3 Systembedingte Trägheit (Einschaltssituation)

Durch das Temperierungssystem werden die lokal angrenzenden Querschnittsbereiche des Belagsaufbaus erwärmt. Die Auswirkungen an der Fahrbahnoberfläche sind aufgrund der systembedingten Trägheit zeitlich versetzt (Bild 141).

In den Berechnungen wird für die verschiedenen Querschnittsvarianten der Einschaltzeitpunkt der Fahrbahntemperierung variiert. Die klimatischen Randbedingungen wurden an einem mittleren Wintertag orientiert (Tagestemperatur: $-0,1$ bis $4,4 \text{ }^\circ\text{C}$).

Die Ergebnisse zeigen, dass während der Einschaltvorgänge die maximalen Wärmeleistungen benötigt werden, die in Abhängigkeit der Tageszeit betragsmäßig doppelt so hoch sein können im Vergleich zum temperierten Zustand. Bei Betrachtung der zeitlich verzögerten Auswirkung auf die Oberflächentemperatur des Belagsaufbaus lassen sich nach 1 Stunde ca. 70 % der maximalen Temperaturerhöhung und nach 3 Stunden über 90 % der maximalen Temperaturerhöhung feststellen.

6.3.4 Wärmebedarfsermittlung

Für die Dimensionierung des Erdwärmespeichers ist der Gesamtwärmeenergiebedarf für eine Wintersaison ein wichtiger Parameter. Wie eingangs erwähnt, ist das Ziel der Dimensionierung, die spezifischen Nachteile im Vergleich zum Straßenabschnitt hinsichtlich Glättebildung zu kompensieren, nicht aber eine grundsätzliche Freihaltung von Eis und Schnee.

Die Datenkollektive des Straßenzustands- und Wetterinformationssystems (SWIS) wurden für ein ausgewähltes Brückenbauwerk und den nächstgelegenen Straßenabschnitt zur Verfügung gestellt und sind für die weitere Verwendung im Rahmen dieses Forschungs- und Entwicklungsprojektes aufbereitet. Neben der Verifizierung des Rechen-tools zur Anwendung im Rahmen dieser Aufgabenstellung, sind die Datensätze der Stationen (H242, H243) auch zur Ermittlung des Energiebedarfs für die Beheizung herangezogen worden. Die Temperaturverläufe der Belagsoberflächen – welche im allgemeinen Fall das Ergebnis der Simulationsberechnungen für die Situation Brücke bzw. Straße unter Berücksichtigung der klimatischen Einwirkungen sind – sind für das Referenzbauwerk direkt aus den gemessenen Datensätzen (H242-Brücke; H243-Straße) des SWIS für die Energiebilanzierung der Belagsoberflächen entnommen.

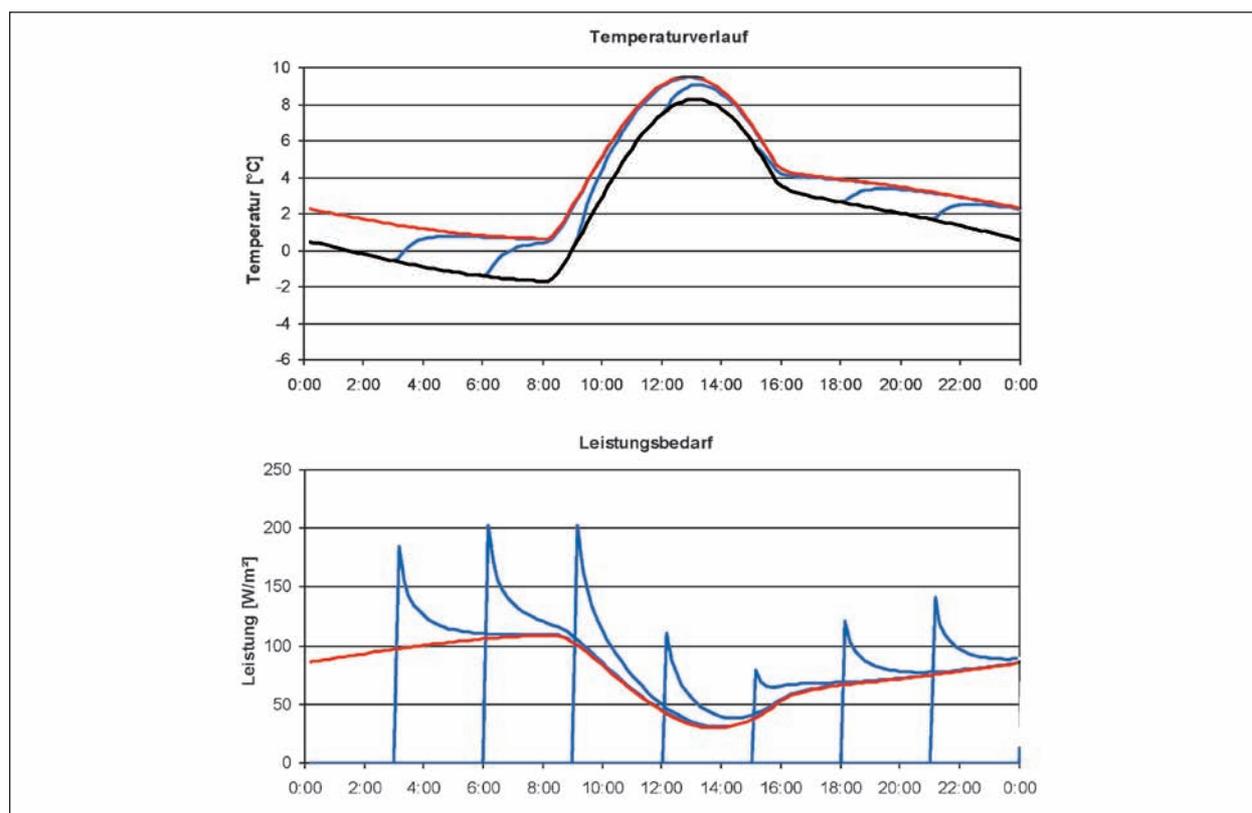


Bild 141: Einschaltvorgänge für Querschnittsvariante B-10 cm (schwarz: ohne Temperierungssystem, rot: permanent ein, blau: Einschaltvorgänge mit unterschiedlichen Einschaltzeitpunkten)

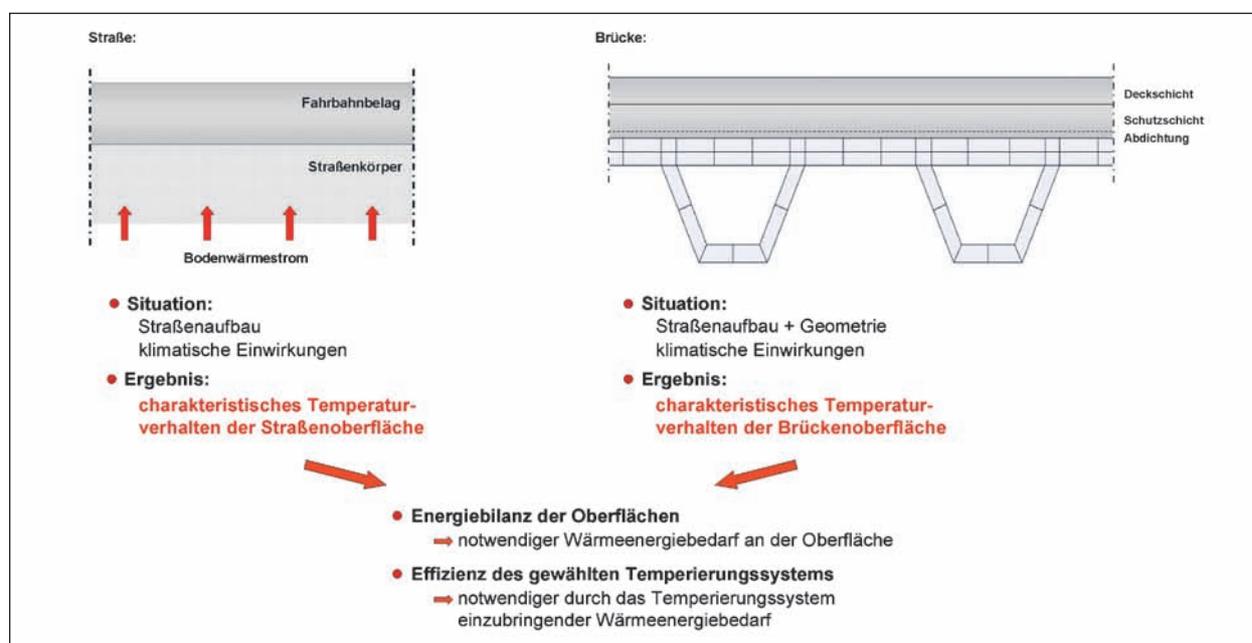


Bild 142: Prinzipskizze für die Ermittlung des Wärmeenergiebedarfs

Zur Bestimmung des notwendigen Wärmeenergiebedarfs wird nun die Temperatur der Belagsoberfläche des Brückenbauwerks der Oberflächentemperatur des Straßenabschnitts gegenübergestellt. Die Oberfläche des Straßenabschnitts gibt auf-

grund der höheren Temperatur mehr Wärmeenergie an die Umgebung ab als die kühlere Oberfläche des Brückenbelags, was zur Angleichung beider Temperaturniveaus genau diesen Unterschied an ausgetauschter Wärmeenergie durch zuströmende

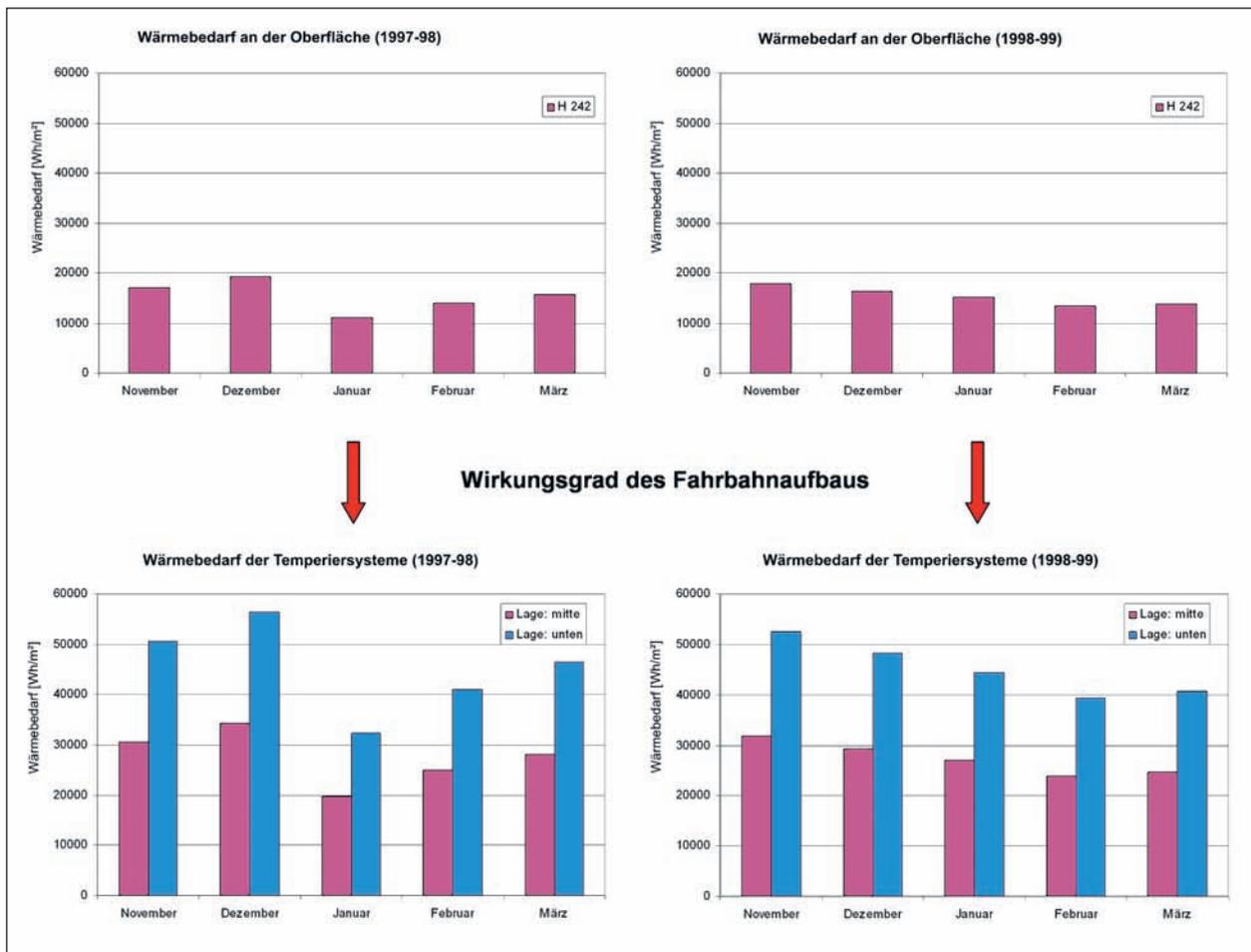


Bild 143: Wärmeenergiebedarf der Brücke (H242) für die Wintersaison 97-98 und 98-99

Wärmeleitung innerhalb des Querschnitts erforderlich macht. Ist durch diese Energiebilanzierung der erforderliche bzw. effektive Wärmebedarf bekannt, kann unter Berücksichtigung des Wirkungsgrads des jeweiligen Belagsaufbaus auf die notwendige durch das Temperierungssystem einzubringende Wärmemenge geschlossen werden (Bild 142).

Die dargestellten Ergebnisse sind beispielhaft für die Dortmund-Ems-Kanal-Brücke bei Münster (Kapitel 6.2.1) ermittelt worden und müssen vor dem Hintergrund der meteorologischen und geometrischen Randbedingungen für das Bauwerk gesehen werden (Bild 143).

6.3.5 Ermittlung der sommerlichen Wärmegewinne

Dem Prinzip eines saisonalen Wärmespeichers liegt die Annahme zu Grunde, dass der während des Winterbetriebs notwendige Energiebedarf unter Berücksichtigung vorhandener Energieverluste während der Sommersaison gewonnen werden kann.

Zur Abschätzung eines möglichen Wärmeenergiepotenzials sind Voruntersuchungen für die sechs definierten Querschnittsvarianten durchgeführt worden. Da die Aufzeichnungen des Straßenzustands- und Wetterinformationssystems sich auf die Wintersaison beschränken, wurden den nachfolgend dokumentierten Berechnungsergebnissen (Bild 144) Datenkollektive der Wetterstation der UniBW München zugrunde gelegt.

Die Untersuchungen zeigen, dass sich generell unter der Berücksichtigung einer Vorlauftemperatur von 10 °C und der thermischen Randbedingungen für die einzelnen Varianten nicht nur in den Sommermonaten, sondern auch in den Frühlings- und Herbstmonaten Energieerträge erzielen lassen. Im Weiteren entsprechen die Ergebnisse der einzelnen Varianten den Erkenntnissen über die thermische Leistungsfähigkeit, die bereits im Kapitel 6.3.2 gewonnen wurden. Je geringer der Rohrabstand und je höher die Lage der Register im Fahrbahnbelag, desto größer ist der Energieertrag.

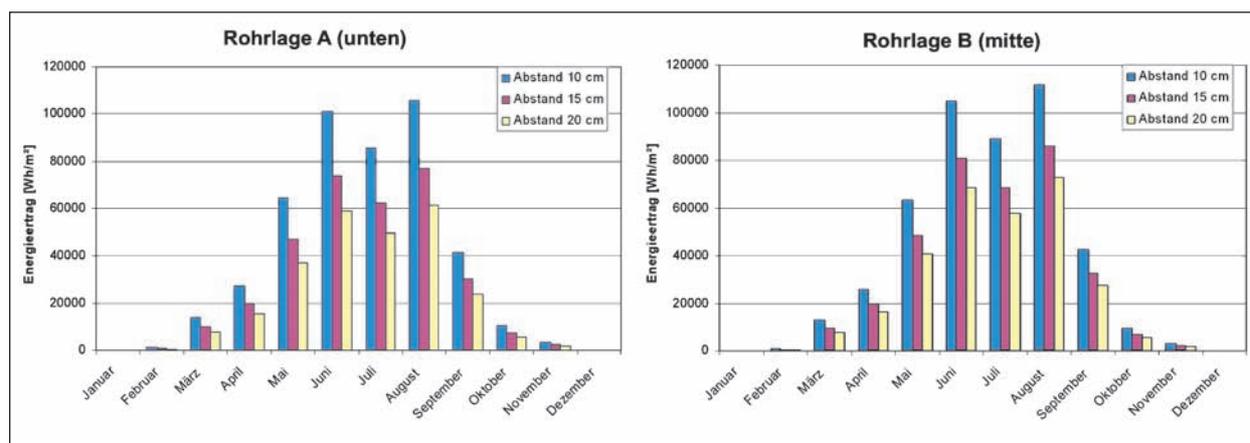


Bild 144: Wärmeenergiepotenzial unter Berücksichtigung von Wetterdaten der UniBW

Dieser Energieertrag ist mit einer Temperaturabsenkung des Belags verbunden. An der Fahrbahnoberfläche konnte eine Abminderung der sommerlichen Aufheizung von typischerweise 5 K ermittelt werden, in bestimmten Einzelfällen auch bis zu 10 K.

6.4 Untersuchungen mittels TRNSYS-Berechnungen

Im Folgenden werden Ausschnitte aus durchgeführten Jahressimulationen mit dem in Kapitel 6.2.2 verifizierten Simulationsmodell für eine thermisch aktivierte Fahrbahnplatte aus D-Brückenmodulen grafisch dargestellt. Es werden die Datensätze der Testreferenzjahre (TRY) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet. Diese enthalten ausgewählte meteorologische Elemente für jede Stunde des Jahres. Der DWD teilt Deutschland in 15 Klimaregionen ein. Der in den vorliegenden Simulationen verwendete Datensatz des TRY05 wurde für Essen aufgezeichnet und gilt für die Niederrheinisch-westfälische Bucht und das Emsland. Für die Simulationen in diesem Kapitel wurde ein modifizierter Datensatz verwendet, der die Extremwerte der ausgedehnten Bezugsperiode für die Testreferenzjahre von 1961 bis 1996 enthält.

In den Grafiken in diesem Kapitel (siehe Bilder 145 bis 150) werden für zwei ausgewählte kritische Zeiträume aus der Jahressimulation verschiedene wichtige Werte dargestellt. Der erste betrachtete Zeitraum (02. bis 08. Januar) beinhaltet die kältesten Tage, der zweite Zeitraum (05. bis 12. Februar) umfasst einen starken Temperaturabfall, beginnend bei etwa + 10 °C sinkt die Temperatur auf -12 °C innerhalb von 5 Tagen.

Die Darstellungen umfassen zunächst einen Vergleich der Oberflächentemperaturen eines beheizten und eines unbeheizten Brückenmoduls und der Taupunkttemperatur sowie der Außentemperatur (Bilder 145 und 148), danach jeweils in Bild 146 und Bild 149 die Energieströme an der Straßenoberfläche und im Heizmedium für das temperierte Modul sowie die Sonneneinstrahlung und die relative Luftfeuchte und als Drittes in Bild 147 und Bild 150 die Vor- und Rücklauftemperaturen für die Simulationen und die Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche des beheizten und des unbeheizten Brückenmoduls.

Die Werte für die normale Oberflächentemperatur und die Taupunkttemperatur können in den Grafiken in Bild 145 und Bild 148 betrachtet werden. Am 03. Januar und am 06. Februar lässt sich hier die Problematik in der Übergangszeit, wo die Brücke kälter ist als die Straße und die Temperaturen sinken, beobachten. Die Taupunkttemperatur wird unterschritten, die Belagsoberfläche auf der Brücke hat Temperaturen unter 0 °C und es bildet sich Glätte, ohne dass es klimatische Randbedingungen wie Niederschlag oder Nebel gegeben hat.

Aus den Temperaturdifferenzen in Bild 147 und Bild 150 wird ersichtlich, dass zu den kritischen Zeiten mit einer Vorlauftemperatur von 10 °C ein Temperaturhub der Belagsoberfläche auf der Stahlbrücke zur normalen Oberflächentemperatur ohne Temperierung von mindestens 4 K erreicht wird.

Bei extrem kalten Temperaturen treten noch deutlich höhere Temperaturdifferenzen zwischen temperiertem und nicht-temperiertem Belag auf. Unter der Vorgabe, dass die so genannten Winterrandzonen entschärft werden sollen, könnte die Anlage zu diesen Zeiten allerdings abgeschaltet oder mit verminderter Leistung betrieben werden (Kapitel 6.5).

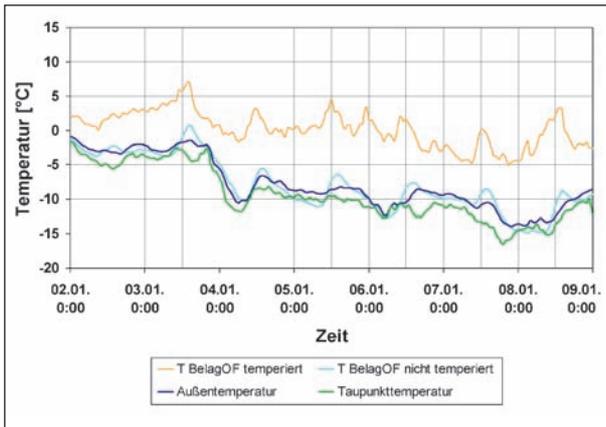


Bild 145: Temperaturverläufe für Oberflächen und Taupunkt für den 02.-08.01. – Ausschnitt aus Simulation für Extremtemperaturen des TRY 05

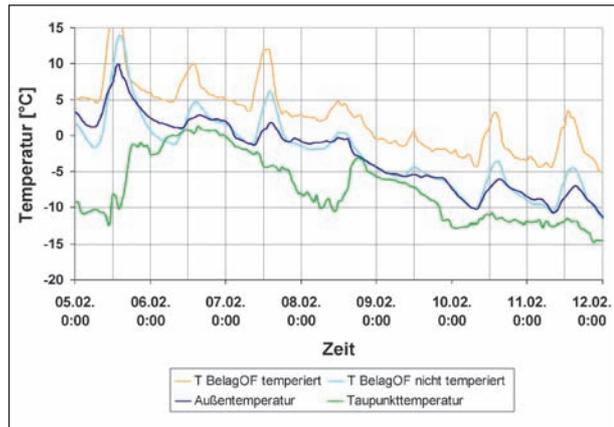


Bild 148: Temperaturverläufe für Oberflächen und Taupunkt für den 05.-12.02. – Ausschnitt aus Simulation für Extremtemperaturen TRY 05

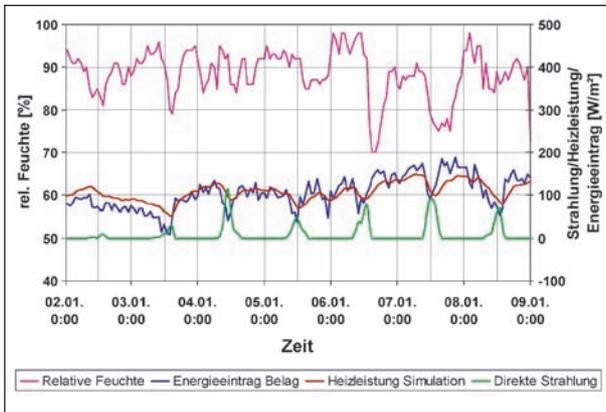


Bild 146: Energieströme und relative Luftfeuchte für den 02.-08.01. – TRY-05-Extremwerte

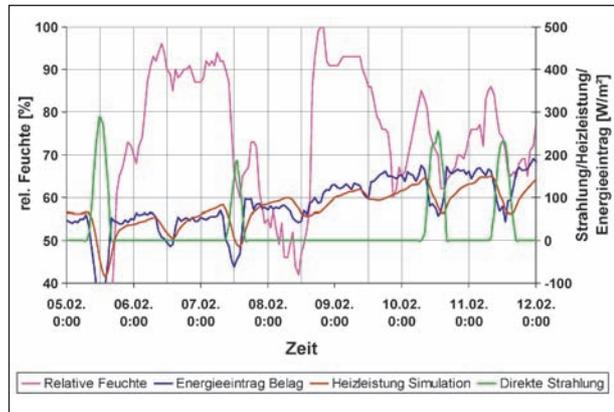


Bild 149: Energieströme und relative Luftfeuchte für den 05.-12.02. – TRY-05-Extremwerte

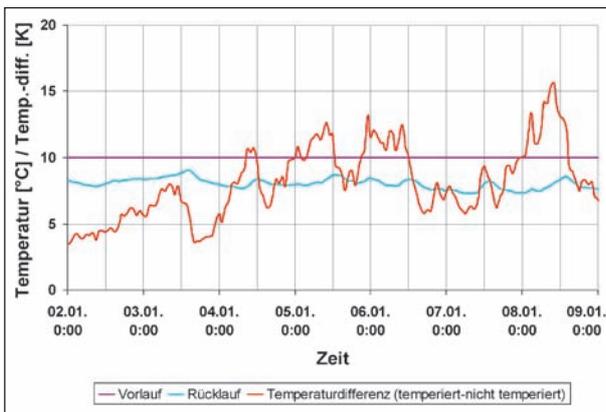


Bild 147: Vorlauf- und Rücklauftemperatur und Temperaturdifferenz zwischen temperiertem und untertemperiertem Brückenmodul für den 02.-08.01. – TRY-05-Extremwerte

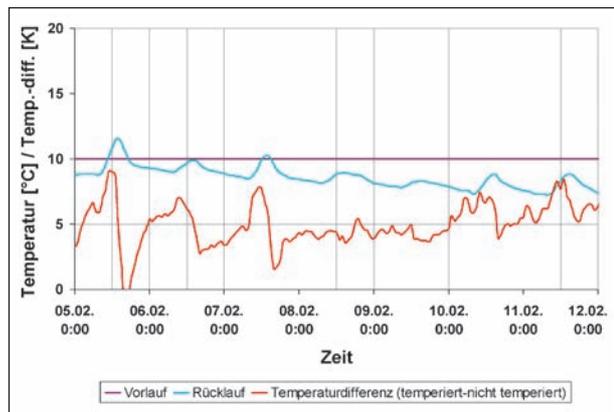


Bild 150: Vorlauf- und Rücklauftemperatur und Temperaturdifferenz zwischen temperiertem und untertemperiertem Brückenmodul für den 05.-12.02. – TRY-05-Extremwerte

6.5 Regelstrategie und Energiebedarf

6.5.1 Allgemeines

In der Vergangenheit hat sich bei Projekten mit Straßentemperierungen gezeigt, dass sehr komplexe Regelstrategien nicht sinnvoll sind (SERSO). Es kommt in erster Linie nicht auf die Energieeinsparung in Übergangszeiten an, sondern auf die Sicherheit des Systems. Daher ist eine einfache, aber effiziente Regelstrategie für ein Mess-, Steuer- und Regelsystem (MSR) einer Asphalttemperierung auf Brücken anzustreben.

6.5.2 Entwicklung von drei Regelstrategien

Die Steuerung der Asphalttemperierung sollte sowohl automatisch als auch manuell möglich sein. Zur Optimierung der automatischen Steuerung sind die gemessenen Daten aufzuzeichnen.

Ziel ist es, für eine Regelstrategie mit einem gewissen Vorlauf auf Klimabedingungen zu reagieren, welche zu Glätte führen können. Glätte soll verhindert, nicht beseitigt werden.

Die unterschiedlichen Formen der Glättebildung wurden in Kapitel 2.2.2 vorgestellt. Diese unterschiedlichen Formen treten bei unterschiedlichen Witterungskonstellationen auf (Tabelle 3), auf die die Regelstrategien reagieren müssen.

Regelstrategie 1 heizt bei Oberflächentemperaturen zwischen -5 °C und 5 °C und bei Lufttemperaturen unter 4 °C . Im sommerlichen Kühlfall wird bei Regelstrategie 1 ab 25 °C Oberflächentemperatur gekühlt.

Regelstrategie 2 heizt bei Oberflächentemperaturen zwischen -4 °C und 4 °C und bei Lufttemperaturen unter 2 °C . Im sommerlichen Kühlfall wird bei Regelstrategie 2 ab 30 °C Oberflächentemperatur gekühlt. Diese Strategie ist für den Heizfall etwas unsicherer als Regelstrategie 1. In den Simulationen zeigt sich jedoch, dass sich Glättebildung in den kritischen Zeiträumen auch mit dieser Strategie mit etwas kürzeren Laufzeiten vermeiden lässt.

Regelstrategie 3 ist eine Erweiterung von Regelstrategie 2. Hier wird zusätzlich bei Außentemperaturen von unter 5 °C bei einer relativen Luftfeuchte von mehr als 80 % geheizt, um z. B. Glatteisbildung durch Nebel zu vermeiden.

6.5.3 Simulation der Regelstrategien für vier Klimazonen Deutschlands

Für eine Auswertung der benötigten Energiemengen und der Wirksamkeit der Regelstrategien wird das TRNSYS-Modell der Testbrücke (Kapitel 6.2.2) für eine Straßenbrücke mit Stahlfahrbahnplatte und für vier Klimadatenätze des DWD angepasst.

Für die folgenden Simulationen wurden die TRY-Wetterdatensätze des DWD (CHRISTOFFER, J., DEUTSCHLÄNDER, T., WEBS, M., 2004) eines gemäßigten maritimen Klimas mit milden Wintern (TRY 01), eines mittleren Klimas mit warmen Wintern und gemäßigten Sommern (TRY 05), eines Klimas mit kühlem und trockenem Winter sowie warmem und trockenem Sommer (TRY 12) und eines kalten Klimas (TRY 14) ausgewählt, um die Spannweite der verschiedenen Klimaregionen in Deutschland abzudecken. Informationen zu den verwendeten Klimadatenätzen finden sich in Tabelle 11. Für das TRY 05 wird wieder zusätzlich der Datensatz mit den Extremwerten verwendet (Kapitel 6.4).

In den Bildern 151 bis 155 werden für die Klimazonen in Tabelle 11 die Simulationsergebnisse dargestellt. In der ersten Grafik für jede Klimaregion wird die Heizenergie verglichen, die für die unterschiedlichen Regelstrategien (Kapitel 6.5.2) benötigt wird (Bild 151 bis Bild 155). Dabei wird immer ein Referenzwert für jede untersuchte Klimazone mit einem durchgehenden Betrieb der Straßenheizung vorweggestellt.

Glättebildung lässt sich mit allen drei Strategien vermeiden. Die Strategie 2 ist allerdings weniger sicher als Strategie 1, die gewisse Reserven aufweist, da das System später auf sinkende Temperaturen reagiert. Bei Strategie 3 hat sich gezeigt, dass in den Simulationen bereits über die Bedingung der Oberflächentemperatur und der Außentemperatur die Stunden mit hoher Luftfeuchte er-

TRY	Standort	Strahlungsdaten	Klima
01	Bremerhaven	Norderney	Gemäßigt mit milden Wintern
05	Essen	Gelsenkirchen	Warme Winter, gemäßigte Sommer
12	Mannheim	Mannheim	Gemäßigte Winter, warme Sommer
14	Stötten	Stuttgart-Schnarrenberg	Kühl

Tab. 11: Verwendete TRY des DWD (CHRISTOFFER, J., DEUTSCHLÄNDER, T., WEBS, M., 2004)

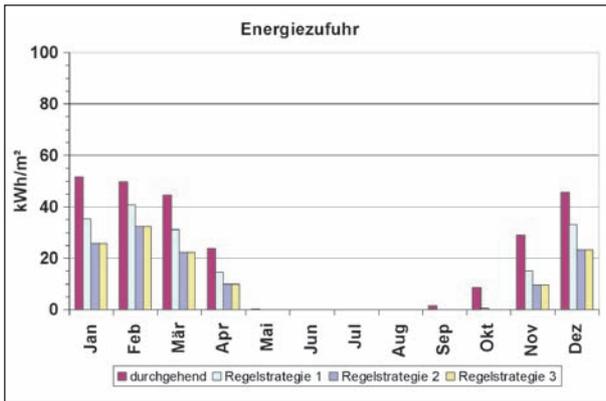


Bild 151: Energiezufuhr bei Variation der Regelstrategien für TRY 01

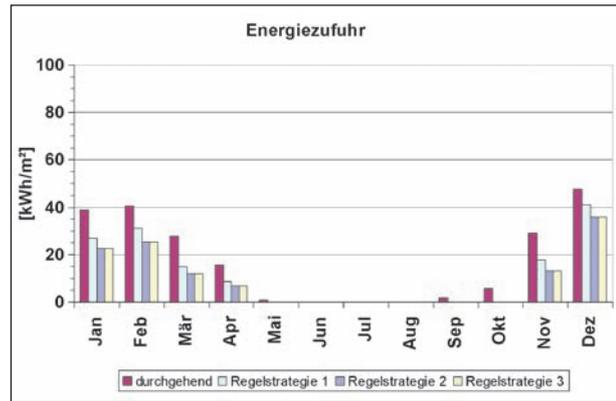


Bild 154: Energiezufuhr bei Variation der Regelstrategien für TRY 12

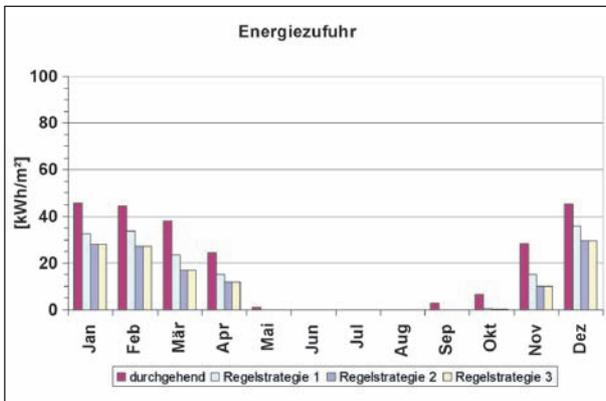


Bild 152: Energiezufuhr bei Variation der Regelstrategien für TRY 05

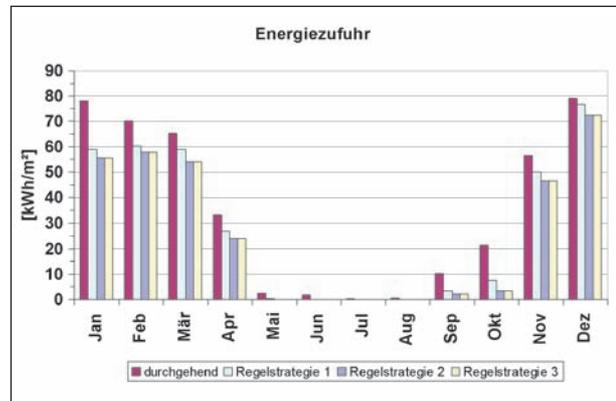


Bild 155: Energiezufuhr bei Variation der Regelstrategien für TRY 14

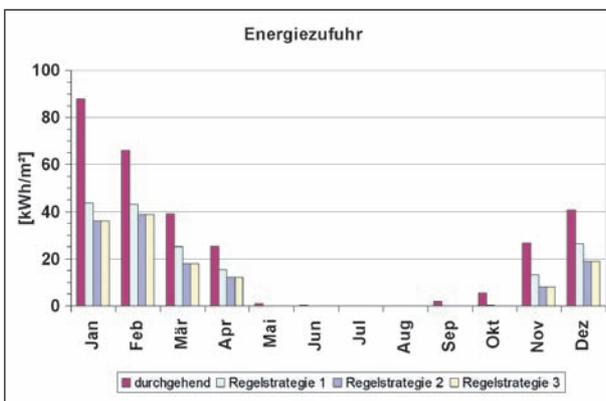


Bild 153: Energiezufuhr bei Variation der Regelstrategien für TRY 05 (extreme Werte)

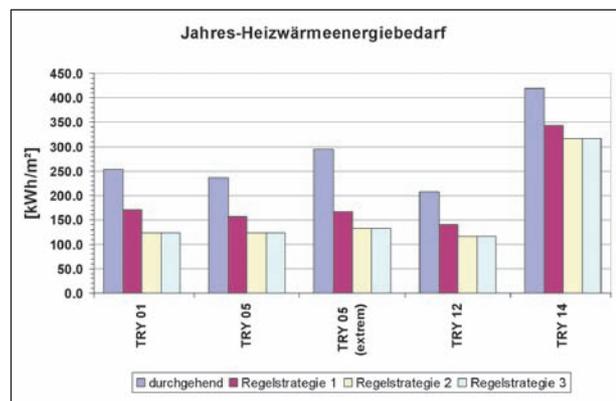


Bild 156: Jahressummen des Heizenergiebedarfs für die Regelstrategien und die vier Klimazonen

fasst sind, da es bei keiner Berechnung eine Steigerung der Heizenergie von Regelstrategie 2 zu 3 gibt.

Die Grafiken für eine einzelne Klimaregion lassen sich gut betrachten und interpretieren. Ein Vergleich der benötigten Energiemengen der unterschiedlichen Klimaregionen ist mit den Grafiken in Bild 156 und Bild 157 möglich. Hier sind die Jah-

ressummen gegenübergestellt. In Bild 156 wird deutlich, dass für die Klimazonen 01, 05 und 12 der Jahres-Heizenergiebedarf der Regelstrategien wenig abweicht, nur bei kaltem Klima in der Zone des TRY 14 liegt die benötigte Energie viel höher.

In Bild 157 ist zu sehen, dass die maximale Heizleistung sich bei den Regelstrategien wenig ändert. Nur bei einem durchlaufenden Betrieb ist sie

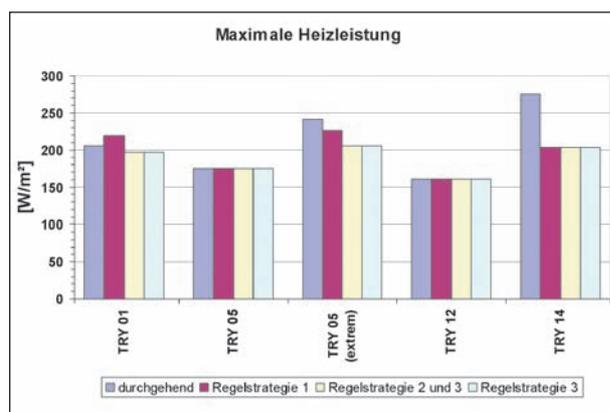


Bild 157: Maximale Heizleistung für die Regelstrategien und die vier Klimazonen

in der Regel höher, da auch noch bei den Tiefsttemperaturen geheizt wird und dann die Leistung aufgrund der höheren Heizmittelübertemperatur größer wird.

6.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die numerischen Untersuchungen mit zwei unterschiedlichen Verfahren aufgezeigt: Die Finite-Elemente-Methode (FEM) bildet die Geometrie sehr genau nach, kann dafür aber das hydraulische System nicht detailliert nachbilden, das Verfahren der Gebäude- und Anlagensimulation kann hingegen nur ein vereinfachtes geometrisches Modell berücksichtigen, dafür wird das wasserführende System genauer beschrieben.

Folgende wesentliche Kenngrößen konnten aus den Simulationen ermittelt werden:

Die Rohrlage B (mittig im Belag) und ein geringer Rohrabstand (10 cm) sind für eine zufrieden stellende Funktion wichtig.

Bei den Witterungsverhältnissen, die hier im Fokus stehen (Winterrandzonen), wird eine Heizleistung von 100 bis 120 W/m² benötigt. Bei tiefen Temperaturen oder durch Einschaltvorgänge können kurzzeitig auch höhere Leistungen von 150 bis über 200 W/m² auftreten.

Hinsichtlich der Dynamik dieses Systems wurde ermittelt, dass etwa eine Stunde nach dem Einschalten 70 % des Endwertes der Temperaturerhöhung erreicht werden, nach drei Stunden sind 90 % der Temperaturerhöhung erreicht.

Für einen mittleren Standort (TRY 05) ergibt sich ein jährlicher Wärmebedarf von 165 kWh/m²a bei einer einfachen Regelstrategie. Durch differenzierte Regelstrategien kann der Wärmebedarf nicht mehr wesentlich reduziert werden.

Der sommerliche Energieeintrag ist deutlich höher als der winterliche Bedarf. Allerdings ist hier zu berücksichtigen, dass im Falle einer Energiespeicherung die Effizienz für die Speicherung begrenzt ist und von den lokalen Bedingungen und der Größe des Speichers abhängig ist.

7 Wirtschaftlichkeitsuntersuchung

7.1 Kosten für das Rohrsystem in der Fahrbahn

Die Kosten für das Rohrsystem in der Fahrbahn ergeben sich zunächst aus den Kosten für das Rohrmaterial und ggf. Hilfsmitteln zur Fixierung. Dieser Betrag lässt sich recht genau angeben. Hinzu kommt der Aufwand für das Einbringen der Rohrregister in den Asphalt (Verlegung, Fixierung, Asphalt einbau). Hier haben die vorliegenden Untersuchungen gezeigt, dass noch weiterer Forschungsbedarf besteht: Kann ein geeignetes Verfahren gefunden werden, mit dem der Einsatz eines Fertigers möglich ist, ohne die Rohrleitungen zu beschädigen, oder ist ein händischer Einbau der Deckschicht erforderlich? Wie groß ist der Mehraufwand, damit ein Fertiger eingesetzt werden kann?

Rohrmaterial

Im Verlauf des Projektes wurden vier Varianten hinsichtlich des Rohrmaterials untersucht (Tabelle 12 und Kapitel 3.1). Die Kosten wurden im September 2008 abgefragt, hier sind z. B. aufgrund der Rohstoffpreise Schwankungen möglich.

Wie in Kapitel 3.3 dargelegt und im Verlauf des Projektes bestätigt, ist ein Rohrabstand von 10 cm empfehlenswert, somit ergibt sich ein Quadratmeterpreis von ca. 20 € (PE-Xa-) bis ca. 35 € (PE-Xa-Rohr mit Aluminiumummantelung) für das Rohrmaterial.

	Bezeichnung	Merkmale	Kosten €/m, ca.
1	Polyethylen (PE-RT)	Einsatz bei Walzasphalt-System (NL), geringe Temperaturbeständigkeit	1,00
2	vernetztes Polyethylen (PE-Xa)	erhöhte Temperaturbeständigkeit, übliches Material für Flächenheizungen	1,70 bis 2,20
3	PE-Xa-Rohre mit Aluminium- ummantelung	PEX-Rohr mit Aluminiumummantelung, auch bei hohen Temperaturen formbeständig	3,00 bis 4,00
4	Edelstahl	Erhöhter Aufwand bei Verlegung, Einfluss auf Asphalt noch unklar	3,10 bis 3,30

Tab. 12: Kostenvergleich Rohrmaterial

Verlegung

Aus den Erfahrungen der Bauteiltemperierung im Hochbau wird die Erstellung von vorgefertigten Registern empfohlen. Dadurch wird der zeitliche Aufwand auf der Baustelle reduziert und die Qualität erhöht. Bei vergleichbarem Rohrabstand liegt der Aufwand zur Fertigung der Register aus vernetztem Polyethylen bei etwa 20 €/m². Bei Verwendung des Aluminium-Verbundrohres könnte hier aufgrund der besseren Formbarkeit und höheren Festigkeit des Rohrmaterials ein etwas geringerer Aufwand möglich sein, geschätzt wird hier ein Betrag von 15 €/m².

Fixierung

Die Fixierung kann bei Verwendung des Aluminiumverbundrohres beispielsweise mit einfachen Blechlaschen erfolgen. Die Materialkosten hierfür sind gering und werden mit 3 €/m² abgeschätzt.

Damit belaufen sich die Kosten für die Rohrregister einschließlich Verlegen und Fixieren auf etwa 43 bis 53 €/m².

Asphalteinbau

Der Asphalteinbau ist bei der Versuchsbrücke (Kapitel 5.1.4) händisch vorgenommen worden, um die lokal eingebrachte Wärmemenge so klein wie möglich zu halten und um die verlegten Rohrregister nicht durch Befahren zu schädigen. Bei den Tests der Versuchsabschnitte unter Verkehr wurden Lösungen eingesetzt, die eine Befahrbarkeit gewährleisten. Der erhöhte Aufwand für den Einbau beträgt geschätzt ca. 10 bis 30 €/m².

7.2 Wärmebereitstellung

Wenn geeignete Bedingungen im Untergrund gegeben sind, stellt die Grundwassernutzung die kostengünstigste Variante der Wärmebereitstellung dar.

Die Kosten werden von den lokalen Gegebenheiten bestimmt:

- In welcher Tiefe steht geeignetes Grundwasser an?
- Wie ergiebig ist ein einzelner Brunnen?
- Welche Auflagen werden von der Genehmigungsbehörde gemacht?

Für einen günstigen Fall lassen sich die reinen Bohrkosten mit etwa 50 €/m abschätzen. Die Bohrtiefe beträgt in diesem Fall z. B. 15 m, hinzu kommt mindestens ein Schluckbrunnen in gleicher Größenordnung, sodass die Untergrenze für die Brunnenbohrung bei 1.500 € liegt. Bei ausreichender Ergiebigkeit reicht ein Brunnen für erhebliche Entnahmemengen, sodass nur ein geringer Anstieg bei größeren Brücken zu berücksichtigen ist. Hinzukommt noch ein so genannter Brunnenkopf, der die Rohrleitung und ggf. weitere Installation aufnimmt und verhindert, dass Oberflächenwasser in das Bohrloch eindringt. Für den günstigsten Fall wird für den Brunnen einschließlich Rohr und Brunnenkopf ein Betrag von 3.500 € angesetzt. Der Brunnenkopf wird durch ein begehbare Bauwerk oder einen verschließbaren Schacht vor Witterung und unbefugtem Zutritt geschützt. Wenn die lokalen Bedingungen es zulassen, könnte dieses z. B. auch das Betriebsgebäude sein, das die weiteren technischen Komponenten aufnimmt.

Liegt das Grundwasser tiefer und/oder ist die Grundwasserschicht weniger ergiebig, können sich die Kosten vervielfachen. Als ungünstiger Fall werden hier eine Verfünffachung der Kosten für einen Brunnen und zudem ein fast proportionaler Anstieg mit der temperierten Fläche angenommen.

Die Kosten für ein Wärmesondensystem liegen im Allgemeinen höher als für Brunnen. Die Abhängigkeit von den lokalen Bedingungen sind bei den Kosten für ein Sondensystem geringer als bei den zuvor erläuterten Brunnen.

Die Kosten für einen Meter Erdreich-Wärmesonde incl. Bohrung liegen in der Größenordnung von 40 bis 65 €, wobei Schwankungen in Abhängigkeit

von der Beschaffenheit des Untergrundes möglich sind.

Wie in Kapitel 2.2.3 dargelegt, ergibt sich die Gesamtlänge der Erdwärmesonden aus der maximal angeforderten Wärmeleistung, aus der Jahressumme der Wärme sowie der Bodenbeschaffenheit.

Als Richtwert sind etwa 2 m Sonden pro m^2 Brücke notwendig (Kapitel 6.5).

7.3 Systemtechnik

Unter Systemtechnik wird hier die Mess-, Steuer- und Regelungstechnik, Pumpen und Zuleitungen verstanden. Die Kosten für die MSR-Technik werden nur in geringem Maße von der Anlagengröße bestimmt, die Pumpen und Zuleitungen hingegen sind in etwa proportional zur Fläche. Ein wichtiger Punkt, der hier unter Systemtechnik behandelt wird, ist das Betriebsgebäude, das für die Unterbringung der Komponenten notwendig ist. Hier besteht eine große Bandbreite an Möglichkeiten vom vorgefertigten Container (ab z. B. 30.000 €) bis zum individuell geplanten und ausgeführten Gebäude (ab ca. 100.000 €), ggf. in Verbindung mit dem Brunnenbauwerk.

7.4 Gesamtanlage

Die Kosten der Gesamtanlage lassen sich aus den einzelnen Komponenten addieren. Hinzu kommt noch ein Betrag für Ingenieurleistungen (Planung, Bauleitung), der mit 10 bis 20 % der Bausumme abschätzt wird. Legt man die genannten Abschätzungen zugrunde, kann ein günstigster und ein maximaler Fall ermittelt werden. Diese beiden Grenzfälle sind für die Variante Grundwasser als Wärmequelle (bzw. Wärmespeicher) durchgeführt worden (Bild 158), bei einer Variation der Anlagengröße von 1.000 bis 5.000 m^2 .

Zum Vergleich wurden auch Berechnungen mit Erdwärmesonden durchgeführt, wobei hier nur ein mittlerer Fall betrachtet wurde (Bild 159).

Die flächenspezifischen Investitionskosten für das Temperierungssystem liegen im Bereich von etwa 90 bis zu 350 €/ m^2 .

Um diese Zahlen einordnen zu können, ist es interessant, einen Vergleich mit den Baukosten für Brücken (ohne Temperierung) anzustellen. In

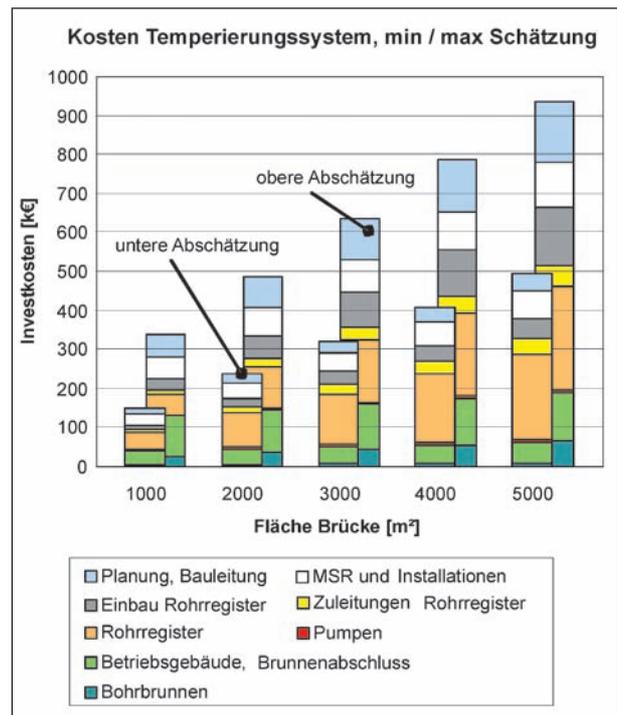


Bild 158: Investitionskosten Fahrbahntemperierung, Abschätzung für unterschiedliche Flächen bei Nutzung von Grundwasser als Wärmequelle

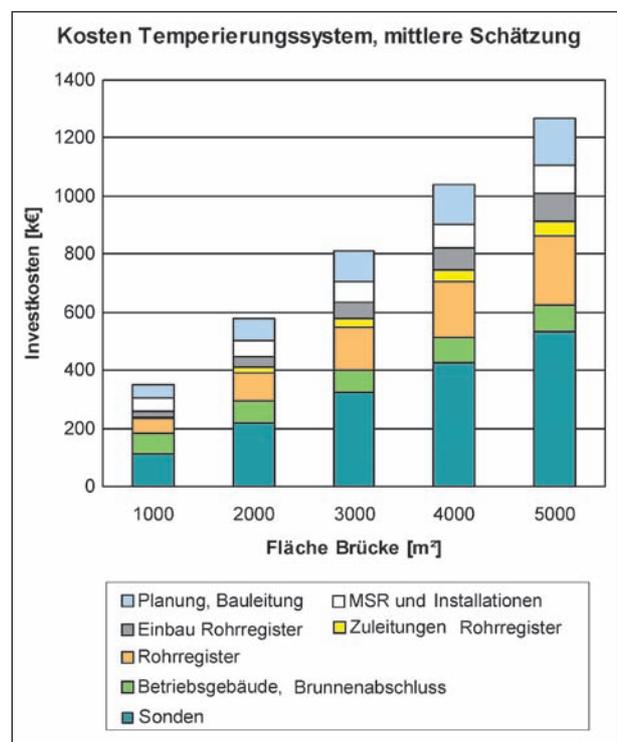


Bild 159: Investitionskosten Fahrbahntemperierung, Abschätzung für unterschiedliche Flächen bei Nutzung von Erdwärmesonden als Wärmequelle

FOSTA werden Kosten für Brückenkonstruktionen aus Stahl angegeben. Die Variationsbreite ist dabei erheblich, sie umfasst etwa eine Zehnerpotenz, als

Mittelwert ergibt sich 1.560 (gemittelt über die Fläche) bzw. 2.380 €/m² (gemittelt über die Bauwerke). Eine andere Quelle für die Kosten von Straßenbrücken stellen NAUMANN, R., HEILFORT, T., SCHACH, R. (2002) dar. Abhängig von Größe und Nutzung wird hier eine Bandbreite von 480 bis 2.610 €/m² aufgezeigt.

Damit können die Kosten für das Temperierungssystem etwa 5 bis 10 % der Baukosten für die Brücke betragen, bei ungünstiger Konstellation kann der Prozentsatz auch noch deutlich darüber liegen.

Weiterhin wurden Vergleichsberechnungen der Jahreskosten durchgeführt. Dabei wurde eine Lebensdauer der Anlage von 15 oder alternativ 30 Jahren angenommen, der Kreditzins sei 5 % bei einer Inflationsrate von 3 %. Damit lassen sich unter Berücksichtigung der Betriebskosten (hier nur Strombedarf) die Annuitäten berechnen, wobei auch hier der günstigste und der ungünstigste Fall berücksichtigt wurden (Bild 160).

Nicht berücksichtigt wurde bei dieser Betrachtung, dass die Fahrbahntemperierung auch für eine Kühlung des Belags im Sommer herangezogen werden kann, wodurch die Lebensdauer des Belages erhöht wird. Eine Quantifizierung dieses Effektes ist derzeit noch nicht möglich.

Zum Vergleich werden hier Daten aus realisierten Taumittelsprühanlagen (TMS) herangezogen, wie sie in einer Studie der BAST zusammengestellt wurden (H. WIRTZ, H., MORITZ, K., THESENVITZ, U., 2006). TMS sind insbesondere bei großen Brücken realisiert worden, daher ist in Bild 160 die betrach-

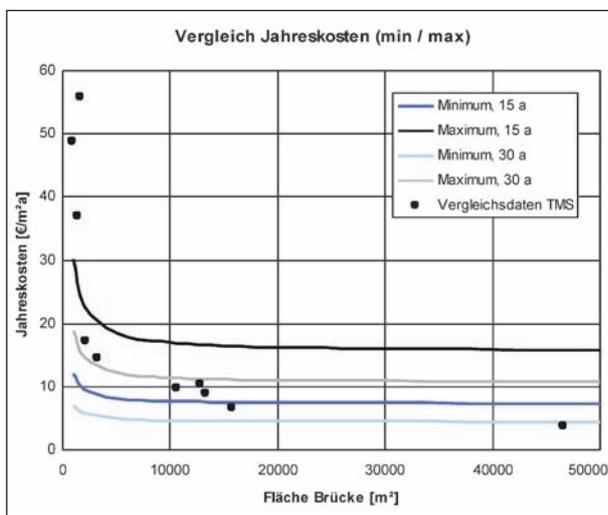


Bild 160: Überblick Jahreskosten Fahrbahntemperierung, zum Vergleich ausgeführte TMS-Anlagen

tete Brückenfläche um den Faktor 10 im Vergleich zu den vorangegangenen Grafiken größer.

Nach dieser Auswahl stellen für große Flächen die TMS die günstigste Lösung dar, bei kleineren Anlagen hingegen kann bei vorteilhaften Gegebenheiten die Temperierung kostengünstiger sein als die TMS.

8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Realisierung eines Brückentemperierungssystems für Stahlbrücken mit den wesentlichen, besonderen Merkmalen

- Verlegung der Rohrleitungen im Asphalt
- und
- Ausnutzung natürlich vorhandener Wärmequellen (Geothermie)

ist basierend auf den Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes „Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie“ technisch möglich.

Als geeignetes Rohrmaterial konnte nach Austesten verschiedener Rohrtypen ein so genanntes Metall-Kunststoff-Verbundrohr (PE-Xa-Rohr mit Aluminiumummantelung) als geeignet identifiziert werden. Es ist ausreichend temperaturstabil und vergleichsweise gut biegsam.

Die numerischen wie auch messtechnischen thermischen Untersuchungen zeigen auf, dass mit dem zur Verfügung stehenden Temperaturniveau der oberflächennahen Geothermie (z. B. 12 °C) bei geringem Rohrabstand (10 cm) und Verlegung im mittleren Bereich des Asphaltaufbaus eine Eisfreiheit in den so genannten Winterrandzonen (d. h. Lufttemperaturen im Bereich um 0 °C) möglich ist. Durch numerische Untersuchungen und Kleinteilversuche konnte herausgestellt werden, dass größere Rohrabstände von z. B. 15 oder 20 cm zu Streifen führen, in denen die Eisfreiheit bei den relevanten Witterungsbedingungen nicht gegeben ist. Weiterhin wurde bei den thermischen Untersuchungen deutlich, dass bei einer tieferen Verlegung der Rohre (auf der Dichtungsschicht) ein zu großer Teil des Wärmestroms über die Unterseite der Fahrbahn verloren geht, sodass die Leistung auf der Fahrbahn zu gering wird und der Energiebedarf des Systems stark ansteigt.

Die durchgeführten mechanischen Tests konnten bislang keine signifikante Schwächung des Asphalts durch den Rohreinbau nachweisen. Die Festigkeit des Belags wurde zunächst mittels Kleinteilversuchen getestet, anhand derer aber kein Einfluss auf die Festigkeit des Asphalts ermittelt werden konnte. Im weiteren Verlauf wurde ein temperiertes Brückenmodul (Testbrücke) auf einem Bauhof erstellt, hier konnte nach etwa einem Jahr kein offensichtlicher Schaden festgestellt werden. Parallel dazu wurden Testfelder auf einer Brücke unter normalem Verkehr (Praxisbedingungen) erstellt und getestet, auch hier konnten innerhalb der begrenzten Zeit keine nennenswerten Schäden ermittelt werden. Hier ist allerdings auf das vergleichsweise knappe Versuchsprogramm hinzuweisen. Diese Aussage wird sich erst nach längeren Untersuchungen im Labor und insbesondere unter Verkehrsbelastung verifizieren lassen.

Anhand einer Vielzahl von numerischen Simulationsläufen wurden Empfehlungen zur Regelstrategie abgeleitet: Danach ist der Betrieb innerhalb einer Außentemperaturbandbreite von etwa -5 °C bis $+5\text{ °C}$ sinnvoll. Bei einem kontinuierlichen Betrieb während der gesamten Winterperiode wird unnötig viel Energie benötigt, wird hingegen ein aufwändigere Regelung mit kleinerem Temperaturband (-4 °C bis $+4\text{ °C}$) und der Feuchte als zusätzlichem Parameter implementiert, ist die zusätzliche Einsparung gering.

Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit kann der Projektbericht wesentliche Kenngrößen liefern, es hat sich aber deutlich gezeigt, dass es einige relevante Positionen bei den Investitionskosten gibt, die stark von den lokalen Bedingungen abhängen, insbesondere der Aufwand für die Wärmebereitstellung variiert innerhalb einer großen Bandbreite (Bodenbeschaffenheit, nutzbare Grundwasservorkommen). Bei günstigen Bedingungen ist die geothermische Brückentemperierung der Taumittelsprühanlage gegenüber wirtschaftlich konkurrenzfähig, wobei ökologische Vorteile durch den reduzierten Taumittelsatz sowie die Option der sommerlichen Fahrbahnkühlung zur Verminderung von Spurrinnen in der Bewertung noch nicht berücksichtigt wurden.

Die rationelle und sichere Fertigung des Asphalts mit Rohrsystem konnte im Rahmen dieses Projektes nicht abschließend gelöst werden. Grundsätzlich erscheinen praxistaugliche Lösungen jedoch möglich.

Als erste Anwendung der hier untersuchten Technik ist der Neubau der Brücke über den Elbe-Lübeck-Kanal in Berkenthin zu erwähnen. Dieses ist deutschlandweit das erste Projekt mit einem Rohrsystem im Belag.

Eine Option für die Zukunft besteht darin, die solaren Energiegewinne, die mit diesem Temperierungssystem erzielt werden können, für andere Anwendungen zu nutzen und so erhebliche Flächen zur nachhaltigen Energieerzeugung aktivieren zu können.

9 Literatur

- BINE, 2003: BINE: Informationsdienst, projektinfo 13/03, Fachinformationszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für wissenschaftlich-technische Information mbH, Eggenstein-Leopoldshafen 2003
- CHRISTOFFER, J., DEUTSCHLÄNDER, T., WEBS, M., 2004: Testreferenzjahre. Offenbach a. Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 2004
- De BOND, A., 2006: Winning en benutting van warmte/koude uit wegen, Vortrag Delft, 23. November 2006, aus: www.roadenergysystems.nl
- DIN EN 15518 (Entwurf 2009): Winterdienstausrüstung – Straßenzustands- und Wetterinformationssysteme, Teil 1 bis 3, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009
- EED: Earth Energy Designer Version 2.0, Oktober 2000, Bezugsquelle: <http://www.buildingphysics.com>
- EWS: EWS Version 3.3, März 2005, Herausgeber: Huber Energietechnik, CH-8032 Zürich, <http://www.igjzh.com/huber>
- FEFLOW 5.2: Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System, WASY Software, WASY GmbH, Berlin 2005
- FGSV, 1992: Technische Lieferbedingungen für Baustoffe der Dichtungsschichten für Brückenbeläge auf Stahl (TL-BEL-ST 92), Köln, 1992
- FGSV, 1992: Technische Prüfvorschriften für die Prüfung der Dichtungsschichten und der Abdichtungs-Systeme für Brückenbeläge auf Stahl (TP-BEL-ST 92), Köln, 1992

- FGSV, 1992: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Herstellung von Brückenbelägen auf Stahl (ZTV-BEL-ST 92), Köln, 1992
- FOSTA, 2010: Forschung für die Praxis P591: Wirtschaftliches Bauen von Straßen- und Eisenbahnbrücken aus Stahlhohlprofilen, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, 2010
- FStrG, 2007: Bundesfernstraßengesetz. P. RUNKEL, [Hrsg.]. Baugesetzbuch. Köln: Bundesanzeiger Verlag, 2007
- Heated Bridge 1999: Heated Bridge Technology, Report on ISTECA Sec. 6005 Program, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, July 1999
- KATZENBACH et al., 2007: Aktuelle Entwicklungen bei Energiepfahl- und Erdwärmesondenanlagen, Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft Nr. 76, 2007
- KLOTZ, S., BALKE, J., 2004: Vermeidung glättebedingter Staus durch Maßnahmen des Straßenwinterdienstes, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 873, 2004
- LEHNER, G., 1981: Solartechnik. Grundlagen – Anwendungen – Zukunftsaussichten. Renningen: Expert Verlag, 1981
- LICHTE, U., 2004: Klimatische Temperatureinwirkungen und Kombinationsregeln bei Brückenbauwerken. Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, 2004
- MANGERIG, I., 1986: Klimatische Temperaturbeanspruchung von Stahl- und Stahlverbundbrücken. Technisch wissenschaftliche Mitteilung des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr Universität Bochum, Nr. 86-4, 1986
- MeteoGroup Deutschland GmbH, 2007: Wetterlexikon. [Online] 2007. [Zitat vom: 07.05.2007], www.glaette24.de
- NAUMANN, R., HEILFORT, T., SCHACH, R., 2002: Kostenkennzahlen für Brückenbauwerke im Autobahnbau, Straße + Autobahn, Heft 09/2002
- OSU: www.smartbridge.okstate.edu
- RECKNAGEL, H., SPRENGER, E., SCHRAMEK, E., 2005: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, 72. Auflage, Oldenbourg Industrieverlag, München, 2005
- REUß, M., 2003: Saisonale Wärmespeicherung im Untergrund – eine Lösung für die effiziente Wärmenutzung auch bei Biogas? ZAE Bayern, Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung, o. J.
- S & H, 1999: Holland ohne Spurrillen-Not, Sanitär- und Heizungstechnik, 1999, Heft 4
- SANNER, B., 2007: EGECE RESTMAC Workshop on Geothermal Snow Melting, Malmö, Sweden, 2.10.2007
- SANNER, B., 1998: Vielfältige Nutzungsmöglichkeiten oberflächennaher Geothermie und die neue Richtlinie VDI 4640, Tagungsband Hagener Bauseminar 1998
- SCHARSCHING, H., 1992: Glatteisfrühwarnsysteme, Test 1990/91, Schriftenreihe Straßenforschung der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen im Österreichischen Ingenieur- und Architekten-Verein, Heft 412, Wien, 1992
- SERSO: Sonnenenergie-Rückgewinnung aus Straßenoberflächen, www.geothermie.de/oberflae chennahe/serso/serso.htm, 16.08.2005
- SHEMAT: Simulator for HEat and MAass Transport Version 7.1, Processing Shemat Version 2.56, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2003, ISBN 3-540-43868-8
- STEINAUER, B.; SCHARNIGG, K., 2005: Gussasphaltbeläge auf Stahlbrücken, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B 47, Bergisch Gladbach
- TRNSYS: A TRaNsient SYstem Simulationprogram, Transsolar Energietechnik GmbH, Stuttgart 2004
- VDI, 1997: VDI-Wärmeatlas – Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. Springer-Verlag; 1997
- VDI 4640-2: VDI-Richtlinien, VDI 4640, Blatt 2, VDI-Gesellschaft Energietechnik, Fachaus-

schuss Regenerative Energien (FA-RE), September 2001

VDI 4640-3: VDI-Richtlinien, VDI 4640, Blatt 3, VDI-Gesellschaft Energietechnik, Fachausschuss Regenerative Energien (FA-RE), Juni 2001

WIRTZ, H., MORITZ, K., THESENVITZ, U., 2006: Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit von Taumittelsprühanlagen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 139, 2005

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2001

- B 28: Erfassung und Bewertung von reaktionsharzgebundenen Dünnbelägen auf Stahl
Eilers € 11,00
- B 29: Ergänzende Untersuchungen zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe und des Chloridgehaltes von Beton
Gatz, Quaas € 12,00
- B 30: Materialkonzepte, Herstellungs- und Prüfverfahren für elutionsarme Spritzbetone
Heimbecher € 11,00
- B 31: Verträglichkeit von reaktionsharzgebundenen Dünnbelägen mit Abdichtungssystemen nach den ZTV-BEL-ST
Eilers, Stoll € 10,50
- B 32: Das Programm ISOCORRAG: Ermittlung von Korrosivitätskategorien aus Massenverlusten
Schröder € 11,50
- B 33: Bewährung von Belägen auf Stahlbrücken mit orthotropen Fahrbahnplatten
Eilers, Sczyslo € 17,00
- B 34: Neue reaktionsharzgebundene Dünnbeläge als Fahrbahnbeläge auf einem D-Brücken-Gerät
Eilers, Ritter € 13,00

2002

- B 35: Bewährung von Brückenbelägen auf Betonbauwerken
Wruck € 11,50
- B 36: Fahrbahnübergänge aus Asphalt
Wruck € 11,00
- B 37: Messung der Hydrophobierungsqualität
Hörner, von Witzhausen, Gatz € 11,00
- B 38: Materialtechnische Untersuchungen beim Abbruch der Talbrücke Haiger
Krause, Wiggenhauser, Krieger € 17,00
- B 39: Bewegungen von Randfugen auf Brücken
Eilers, Wruck, Quaas € 13,00

2003

- B 40: Schutzmaßnahmen gegen Graffiti von Wespennest
von Wespennest € 11,50
- B 41: Temperaturmessung an der Unterseite orthotroper Fahrbahnplatten beim Einbau der Gussasphalt-Schutzschicht
Eilers, Kühler, Quaas € 12,50
- B 42: Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Tunnelbau
Städig, Krocker € 12,00
- B 43: Entwicklung eines Bauwerks Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz – Stufen 1 und 2
Haardt € 13,50
- B 44: Untersuchungen an Fahrbahnübergängen zur Lärminderung
Hemmer-Halswick, Ullrich € 12,50

2004

- B 45: Erfahrungssammlungen:
Stahlbrücken – Schäden – wetterfeste Stähle Seile
Teil 1: Dokumentation über Schäden an Stahlbrücken

Teil 2: Dokumentation und Erfahrungssammlung mit Brücken aus wetterfesten Stählen

Teil 3: Erfahrungssammlung über die Dauerhaftigkeit von Brückenseilen und -kabeln
Hemmer-Halswick € 13,00

B 46: Einsatzbereiche endgültiger Spritzbetonkonstruktionen im Tunnelbau
Heimbecher, Decker, Faust € 12,50

2005

B 47: Gussasphaltbeläge auf Stahlbrücken
Steinauer, Scharnigg € 13,50

2006

- B 48: Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung von Brückenbauwerken
Holst, Streicher, Gardei, Kohl, Wöstmann, Wiggenhauser € 15,00
- B 49: Einfluss der Betonoberflächenvorbereitung auf die Haftung von Epoxidharz
Raupach, Rößler € 13,50
- B 50: Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3
Holst € 13,50
- B 51: Hydrophobierungsqualität von flüssigen und pastösen Hydrophobierungsmitteln
Panzer, Hörner, Kropf € 12,50
- B 52: Brückenseile mit Galfan-Überzug – Untersuchung der Haftfestigkeit von Grundbeschichtungen
Friedrich, Staack € 14,50
- B 53: Verwendung von selbstverdichtendem Beton (SVB) im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen
Tauscher € 14,50
- B 54: Nachweis des Erfolges von Injektionsmaßnahmen zur Mängelbeseitigung bei Minderdicken von Tunnelinnenschalen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Rath, Berthold, Lähler € 12,50

2007

- B 55: Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung von Brückenfahrbahnplatten aus Beton mit Belagsaufbau
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Krause, Rath, Sawade, Dumat € 14,50
- B 56: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expositionsklasse XF2
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Setzer, Keck, Palecki, Schießl, Brandes € 19,50
- B 57: Brandversuche in Straßentunneln – Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Steinauer, Mayer, Kündig € 26,50
- B 58: Quantitative Risikoanalysen für Straßentunnel
Sistenich € 14,50

2008

- B 59: Bandverzinkte Schutzplankenholme
Schröder € 12,50
- B 60: Instandhaltung des Korrosionsschutzes durch Teilerneuerung - Bewährung
Schröder € 13,50

- B 61: **Untersuchung von Korrosion an Fußplatten von Schutzplankenpfosten**
Schröder, Staech € 13,00
- B 62: **Bewährungsnachweis von Fugenfüllungen ohne Unterfüllstoff**
Eilers € 12,00
- B 63: **Selbstverdichtender Beton (SVB) im Straßentunnelbau**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Heunisch, Hoepfner, Pierson (†), Dehn, Orgass, Sint € 17,50
- B 64: **Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an einer Brückenkappe der Expositionsklasse XF4**
Brameshuber, Spörel, Warkus € 12,50

2009

- B 65: **Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1 Hagen/Schwerte**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Frieße, Taffe, Wöstmann, Zoega € 14,50
- B 66: **Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln**
Zulauf, Locher, Steinauer, Mayer, Zimmermann, Baltzer, Riepe, Kündig € 14,00
- B 67: **Brandkurven für den baulichen Brandschutz von Straßentunneln**
Blosfeld € 17,50
- B 68: **Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen – Teile 1-4**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. -
Kaschner, Buschmeyer, Schnellenbach-Held, Lubasch, Grünberg, Hansen, Liebig, Geißler € 29,50
- B 69: **Berücksichtigung der Belange behinderter Personen bei Ausstattung und Betrieb von Straßentunneln**
Wagener, Grossmann, Hintzke, Sieger € 18,50
- B 70: **Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen**
Tauscher € 14,50

2010

- B 71: **Empfehlungen für geschweißte KK-Knoten im Straßenbrückenbau**
Kuhlmann, Euler € 22,50
- B 72: **Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von permanenten Anti-Graffiti-Systemen**
Weschpfennig, Kropf, von Witzhausen € 13,50
- B 73: **Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Dehn, Nause, Juknat, Orgass, König € 21,00
- B 74: **Verwendung von Anti-Graffiti-Systemen auf Mauerwerk**
Müller € 14,00
- B 75: **Sachstand Verstärkungsverfahren – Verstärken von Betonbrücken im Bestand**
Schnellenbach-Held, Peeters, Scherbaum € 13,50

2011

- B 76: **Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbrücken unter Berücksichtigung des Belagssystems**
Sedlacek, Paschen, Feldmann, Geßler, Möller, Steinauer, Scharnigg € 17,00
- B 77: **Anpassung von DIN-Fachberichten "Brücken" an Euro-codes**
Teil 1: DIN-FB 101 "Einwirkung auf Brücken" →
Teil 2: DIN-FB 102 "Betonbrücken" →
Teil 3: DIN-FB 103 "Stahlbrücken" →

Teil 4: DIN-FB 104 "Verbundbrücken"

- Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. -
Freundt, Böning, Maurer, Arnold, Gedwien, Müller, -
Schrick, Tappe, Kuhlmann, Rasche, Froschmeier,
Euler, Hanswille, Brauer, Bergmann € 29,50
- B 78: **Bemessung von Wellstahlbauwerken – Vergleich nach den bisherigen und den neuen Richtlinien**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Kuhlmann, Günther, Krauss € 18,50
- B 79: **Untersuchungen zur Querkraftbemessung von Spannbe-tonbalken mit girlandenförmiger Spann-gliedführung**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Maurer, Kiziltan, Zilch, Dunkelberg, Fitik (in Vorbereitung)
- B 80: **Lautsprecheranlagen und akustische Signalisierung in Straßentunneln**
Mayer, Reimann, Löwer, Brettschneider, Los € 16,00
- B 81: **Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit den Methoden der Systemanalyse**
Müller, Vogel, Neumann € 14,50
- B 82: **Verkehrslastmodelle für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand**
Freundt, Böning € 16,00
- B 83: **Konzeption zur Nachrechnung bestehender Straßenbrücken**
Maurer, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg € 16,00
- B 84: **Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2)**
Gehlen, Lowke, Milachowski € 15,00
- B 85: **Entwicklung von Verfahren einer zuverlässigkeitsbasierten Bauwerksprüfung**
Zilch, Straub, Dier, Fischer € 19,50
- B 86: **Untersuchungen an Bauwerken aus hochfesten Beton**
Nguyen, Freitag € 13,50
- B 87: **Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie**
Feldmann, Döring, Hellberg, Kuhnhenne, Pak, Mangerig,
Beucher, Hess, Steinauer, Kemper, Scharnigg € 17,00

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.