

Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 148

bast

Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken

von

Stephan Freudenstein
Martin Eger

Lehrstuhl für Verkehrswegebau
Technische Universität München

Stefan Pichottka
ABE Bauprüf- und -beratungsgesellschaft mbH
Stahnsdorf

Axel Riwe
Ingenieurbüro A. Riwe, Anklam

Karl Villaret
Stephan Villaret
Bernd Frohböse

Villaret Ingenieurgesellschaft mbH
Hoppegarten

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 148

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 Kommunikation.

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

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

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 08.0237
Informationssystem – Ermittlung und Prognose
von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken

Fachbetreuung
Christoph Becker

Referat
Betonbauweisen

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Kommunikation

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

ISSN 0943-9323
ISBN 978-3-95606-561-3

Bergisch Gladbach, März 2021

Kurzfassung – Abstract

Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken

Die Spannungszustände in Betonfahrbahndecken werden von den Temperaturverläufen über den Querschnitt im Kontext mit den Klimadaten, den Materialkennwerten, der Nullspannungstemperatur und der Reibung zwischen Platte und Unterlage beeinflusst.

Ziel des Projekts war die Entwicklung eines Informationssystems zur Ermittlung und Prognose dieser Spannungszustände.

Zur Realisierung wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Konzipierung eines geeigneten Messverfahrens mit den zu bestimmenden physikalischen Größen,
- Recherche bisher in der Praxis angewendeter Mess- und Aufnahmesysteme,
- messtechnische Ermittlung erforderlicher Daten und rechnerische Ermittlung der Spannungszustände in der Fahrbahn,
- Entwicklung eines Ablaufschemas zur Datenerfassung, -übertragung und -speicherung,
- Entwicklung eines Rechenalgorithmus und Softwaretools zur automatischen Datenauswertung mit Anbindung an Klimaprognosedaten sowie Definition von Grenzen,
- Modul zur automatisierten Umsetzung von Maßnahmen (z. B. Warnsignale an die Autobahnmeistereien),
- Herstellung eines Demonstrators unter Einsatz des gesamten Informations- bzw. Prognosesystems und wissenschaftliche Auswertung.

Nach Eruiierung der erforderlichen Daten wurden als Demonstratoren an drei Standorten Messstationen zur Erfassung von Fugenbewegungen, Betontemperaturen über den Querschnitt und Klimadaten konzipiert und errichtet bzw. erweitert, deren Daten automatisch in eine Datenbank übermittelt, normalisiert und weiter verarbeitet werden.

Es wurde ein Softwaretool für die automatische Datenauswertung entwickelt, das auf Basis von Klima-

daten den Temperaturverlauf und qualitative Spannungszustände in der Betondecke berechnet, um dann eine Risikobewertung durchführen zu können.

Zur Entscheidungshilfe wurde ein Modul entwickelt, das in der Lage ist, aus der Klimaprognose und den vorliegenden Materialparametern realistische Spannungsprognosen zu berechnen und das jeweilige Niveau zu bewerten.

Des Weiteren wurde die Möglichkeit einer automatisierten Deformationsanalyse auf einem 70 m langen Betonfahrbahnabschnitt mit einem Messsystem getestet, mit dem hochauflösende Lasermodelle zur Bewertung der momentanen Deformation im Kontext zu den umgebenden klimatischen Bedingungen erstellt werden.

Determination and prediction of stress states in concrete pavements

Stresses in concrete pavements are influenced by the temperature profile over the cross-section in the context of climatic data, material characteristics, the characteristic zero-tension temperature and the friction between slab and substrate.

The aim of the project was to develop an information system for the identification and prognosis of these climate induced stresses.

The following work steps were carried out:

- design of a suitable measuring method with the physical quantities to be determined,
- research on measuring and recording systems used so far in practice,
- measurement of required data and calculation of the tension states in the pavement,
- development of a flow chart for data acquisition, transmission and storage,
- development of a computing algorithm and software tool for the automatic data analysis with generation of forecast climate data as well as definition of boundaries,
- module for the automated implementation of measures (warning signals to the motorway masters, etc.),
- manufacture of a demonstrator using the entire information and/or forecast system and scientific evaluation.

After assembling the required data measuring stations for the detection of joint movements, concrete temperatures and climatic data have been constructed and rigged up as demonstrators in three locations. The collected data is automatically transferred to a normalized database.

A software tool has been developed for the automatic data analysis, which calculates the temperature profile and qualitative tension states based on the climatic data in order to be able to carry out a risk assessment.

A module has been developed for decision making which is able to calculate realistic tension forecasts from the climate forecast and the available material parameters and which is able to evaluate the respective level.

Furthermore, the possibility of an automated deformation analysis on a 70 m long concrete pavement section was tested using a measuring system, generating high resolution Laser models to rate the current deformation in the context of the ambient climate conditions.

Summary

Determination and prediction of stress states in concrete pavements

1 Task

In 2013, in the context of exceptional climatic situations (heat periods), especially in the state of Bavaria, increased blow-ups occurred on concrete pavements. Mainly affected by the problem are old, thin concrete pavements, which were built according to old RStO and most of which have a construction structure of 22 cm concrete cover layer on hydraulically bound base layer in composite construction.

The obstructed longitudinal extent of the component „concrete pavement“ as a result of intense solar radiation and the associated stress build-up can lead to heat damage in connection with design flaws as well as the imperfections over the long lying time of more than 30 years.

Stresses in the cross-section of concrete road slabs are influenced by the temperature profile over the cross-section in context with climatic data, material characteristics, the characteristic zero-tension temperature and the friction between slab and subgrade.

The aim of the project was to develop an information system for the identification and prognosis of these climate induced stresses in concrete pavements.

2 Type and scope of investigations

In the carried out research project, an information system, which can be used for practical purposes, should be developed for the determination and prognosis of real stress states in concrete pavements. First of all, it was clarified whether and to what extent measuring systems used so far in practice are suitable for the standard determination of necessary data. If necessary, these should be modified or newly developed for the planned application. Furthermore, all necessary tools have been developed, tested and defined, which are

necessary for a self-sufficient, software-supported information system.

The development and testing in a demonstrator included all aspects from the actual acquisition of relevant measurement data to an interface for the automated setup of warning messages and/or speed limits.

The following work steps were carried out:

- design of a suitable measuring method with the determining physical quantities,
- research on measuring and recording systems used so far in practice,
- measurement of required data and calculation of the tension states in the pavement,
- development of a flow chart for data acquisition, transmission and storage,
- development of a computing algorithm and software tool for the automatic data analysis with generation of forecast climate data as well as definition of limits,
- module for the automated implementation of measures (warning signals to the motorway operation centres, etc.),
- manufacture of a demonstrator using the entire information and/or forecast system and scientific evaluation.

3 Examination results

3.1 Required data, measuring stations, database

The relationship between the temperature change and the resulting expansion in the concrete is linear in the practical area. If the longitudinal expansion is prevented, stresses build-up, which are linearly dependent on the temperature difference between the existing concrete temperature and the temperature at which the concrete would be free of stress due to temperature (zero stress temperature). The dimension of the temperature-dependent concrete stresses is thus determined to a great extent by the dimension of the zero stress temperature. So the determination of the zero stress temperature is an essential requirement for the correct calculation of the temperature-induced stresses in the concrete.

A determination of the zero stress temperature can be done by measuring the joint opening width. The compressive stress build-up begins when the joint has closed. This makes it possible to determine the zero stress temperature by simultaneously measuring the joint movement and the concrete temperature. The zero stress temperature is obviously reached when there is no change in the joint width as the concrete temperature rises further.

Therefore, suitable measuring systems had to be designed for the detection of the joint movements and the concrete temperatures over the concrete pavement cross-section.

In the prognostic module to be developed, the temperature conditions of the concrete slabs were to be calculated on the basis of the predicted climatic data. In order to ensure the reliability of the forecasting procedure, it was necessary to record and synchronize the correlation between climatic data and temperature conditions over a long period, both mechanically and measurably. This also required the measurement of all relevant climatic data.

After assembling the required data measuring stations for the detection of joint movements, concrete temperatures and climatic data have been constructed and expanded as demonstrators in three locations. The collected data are automatically transferred to a normalized database.

For the recording, storage and transmission of the measured data, a station with measuring technology, data logger and self-sufficient power supply by a battery and a mast with solar cells was installed. By means of a remote interrogation via a GSM module, the collected measurement data are automatically transmitted to the research participants daily at fixed times and then transferred to the database.

In addition to the structured storage of the measured data, the database serves the storage of relevant information of the measuring stations and their equipment, important information of the respective construction section as well as the calculation results.

3.2 Software tool for climate forecast

A software tool has been developed for the automatic data analysis, which calculates the temperature profile and qualitative tension states based on the

climatic data in order to be able to carry out a risk assessment.

The calculation of the temperature and stress states requires the knowledge of different material parameters.

By using the time step method as an explicit solution approach of the differential equation for describing the heat flux in the pavement and the heat balance equation, it is possible to continuously calculate the temperature state in the concrete slab [KAYSER 2007]. A continuous temperature calculation is carried out on the basis of the climatic values.

The temperature profiles calculated from climatic data are compared with the actual temperature values measured at the measuring stations in the pavement. The calculation process is calibrated until the consistency of calculated and measured values is sufficiently accurate.

For the risk assessment of future temperature and stress states, predicted climatic values are used as input variables. A correlated worst case climate data set for the next 24 hours will be compiled from the measured climatic data of the last three days.

The predicted climate data, the temperature profiles and the corresponding stresses as well as the FEM stress images generated by a calculation model using the finite element method can be displayed in the software tool.

3.3 Decision support module

A module has been developed for decision making which is able to calculate realistic tension forecasts from the climate forecast and the available material parameters and which is able to evaluate the respective level.

For this purpose, this module is linked to the climate forecasting tool. The result is an automatic assessment of the hazard potential without expert assessment.

The researcher then set up a computer workplace, with which the scientific evaluation and evaluation of the data is possible. Access to the receiving software, the evaluation software for the relevant data, the climate forecasting tool and the decision support module in the form of the presented software tool are implemented via a browser-based web service solution.

3.4 Automated deformation analysis

Furthermore an automated deformation analysis of a 70 m long section of a concrete motorway was tested using a Leica measuring system, generating high resolution Laser models to rate the current deformation in context with the ambient climate conditions.

It should be checked first whether the deformations of individual slabs of a concrete pavement system due to temperature effects can be detected without contact by an automatic deformation analysis. In addition, the monitoring of a contiguous concrete pavement section should provide knowledge according to the movement of a defined section.

In addition to reflector-based measurements with permanently installed prisms, which provided relatively accurate results, but with a constant risk of damage (shearing by winter maintenance, etc.), even reflector less measurements were carried out. However, the accuracy of the results is currently outside acceptable tolerances. The measurements are strongly dependent on the respective surface and weather conditions.

4 Conclusions and recommendations

Within the scope of the research project, an information system was developed that measures climatic data, road temperatures and joint movements of concrete pavements in situ and uses these data to carry out a risk assessment of the temperature-induced stress states in the concrete pavement.

On the basis of acquired data, section-specific zero stress temperatures, which have a decisive influence on the temperature-induced stress states in concrete pavements, can be determined.

The developed software tool, in conjunction with the database, allows a further evaluation and analysis of the measurement data to carry out a risk assessment of the stress states in concrete pavements. The user can easily recognize if a critical tensions state in the concrete pavement is present or expected by the colour scale with which monitored stations are marked.

The research topic has shown that the establishment of such measuring systems is a good contribution to

the risk assessment of heat periods and that specific statements can be made. However, the prediction of the exact position and the exact point of time of a heat damage cannot be achieved by such a system, because in addition to the temperature conditions, imperfections in the road play a major role in the occurrence of heat damage.

Rather, it is a system which serves as a source of information as to whether the temperatures necessary for a heat damage in the road construction are present at all or may occur in the next 24 hours.

In addition to the information system, it is also possible to obtain general information about the state of the pavement and its development on the basis of determined data, e. g. the development of the zero stress temperature during the period of use.

The construction of nationwide networked measuring stations and sensor systems represents a great opportunity for evaluating and observing the conditions in road constructions. It is important that, in addition to the data acquisition, also concepts must be developed in order to systematically and extensively evaluate the collected data with regard to specific objectives (for example the substance evaluation).

Inhalt

1	Aufgabenstellung	11	5.7.3	Multi-Ring-Elektroden	30
1.1	Gesamtziel	11	5.7.4	Kapazitive Messungen	31
1.2	Methodik des Vorgehens	12	5.7.5	Mikrowellenmesstechnik	31
2	Schadensmechanismus „Hitzeschaden“	12	5.7.6	TDR-Sensor (Time domain reflectometry)	31
2.1	Temperatur und Spannungen	12	6	Messtechnische Ermittlung erforderlicher Daten und rechnerische Ermittlung der Spannungszustände in der Fahrbahn	32
2.2	Nullspannungstemperatur	15	6.1	Messtechnische Erfassung wesentlicher für den Spannungszustand relevanter Daten	32
2.3	Spannungszustände beim Hitzeschaden	18	6.1.1	Bewertung der bestehenden Messstelle an der A92 bei Freising	32
3	Konzipierung geeigneter Messverfahren	21	6.1.2	Erweiterung der bestehenden Messstelle an der A92 bei Freising	32
3.1	Durch Messung zu bestimmende physikalische Größen	21	6.2	Experimentelle Spannungsermittlung zur Verifizierung des Berechnungsmodells	42
3.2	Prinzipielle Vorgehensweise bei der Auswahl eines Messverfahrens	22	6.2.1	Versuchsaufbau und -durchführung	42
3.3	Messung der Fugenbewegung	22	6.2.2	Ergebnisse der indirekten Spannungsermittlung	45
3.4	Messung der Klimadaten	23	7	Datenerfassung, -übertragung und -speicherung	47
4	Bisher in der Praxis angewendete Mess- und Aufnahmesysteme	23	7.1	Entwicklung eines Ablaufschemas zur Datenerfassung und -speicherung	47
4.1	Weitere Messstellen in Sachsen-Anhalt und Bayern	24	7.2	Konzeption einer normalisierten Datenbank	48
4.2	Einbau von Dehnmessstreifen zur Messung von Querzug- und Längsdruckspannungen (TUM)	26	7.3	Konzipierung einer zentralen Datenspeicherung	49
5	Recherche zu Messsystemen	27	8	Algorithmus und Softwaretools für die automatische Datenauswertung	49
5.1	Kraftmessdosen	27	8.1	Materialparameter für die Berechnungen	49
5.2	Ultraschallsensoren	27	8.2	Berechnung der möglichen Temperaturzustände in der Betonplatte	50
5.3	Akustoelastische Betondehnungsaufnehmer zur Ermittlung der Zug- und Druckspannungen in Beton	27	8.2.1	Beschreibung des Berechnungsverfahrens	50
5.4	Schwingsaitenaufnehmer	28	8.2.2	Softwaretool zur Temperaturverlaufsberechnung	52
5.5	Automatische Deformationsanalyse	28			
5.6	Messstellen des DWD	29			
5.7	Betonfeuchte	30			
5.7.1	Darr-Methode	30			
5.7.2	Carbid-Messung	30			

8.2.3	Kalibrierung und Validierung	54	10	Herstellung eines Demonstrators unter Einsatz des gesamten Informations- bzw. Prognose-systems und wissenschaftliche Auswertung	67
8.2.4	Prognose von Temperaturverläufen	54			
8.3	FEM-System zur Spannungsberechnung	56			
8.3.1	Modellumfang	57	10.1	Anlage eines neuen Demonstrators	67
8.3.2	Platten	57			
8.3.3	Untere Tragschicht	58	10.1.1	Anforderungen an das Messsystem	67
8.3.4	Kontakt zwischen Platten und unterer Tragschicht	58	10.1.2	Einbau des neuen Demonstrators	68
8.3.5	Modellierung der Scheinfuge zwischen den Platten	59	10.2	Aufrüsten bestehender Messstellen	68
8.3.6	Reduktion der Rechenzeit durch Modelloptimierung	60	10.3	Betrieb der Demonstratoren	69
8.3.7	Materialparameter	61	10.4	Auswertung der Daten für kurzfristige Prognosen	69
8.3.8	Softwaretool zur Erstellung des Finite-Elemente-Modells, zur Steuerung der FE-Rechnung und zur Auswertung der Ergebnisse	61	10.4.1	Berechnung der Druckspannung	69
9	Modul zur automatisierten Umsetzung von Maßnahmen	62	10.4.2	Gegenüberstellung der gemessenen und prognostizierten Spannungszustände	71
9.1	Entwicklung eines Moduls zur Entscheidungshilfe	62	10.4.3	Ermittlung der Nullspannungstemperatur	71
9.1.1	Arbeitsplätze bei Forschungsnehmer, BAST und zuständiger Straßenbaubehörde	63	11	Zusammenfassung und Ausblick	72
9.1.2	Anbindung des Softwaretools	63			
9.2	Entwicklung von Schnittstellen zur direkten Anbindung an vorhandene Anlagen der Verkehrsbeeinflussung	63		Literatur	73
9.2.1	Verkehrsmanagementnetz [CONDUCT]	64		Verwendete Regelwerke	74
9.2.2	Kommunikationsnetzwerk [CONDUCT]	64		Software	74
9.2.3	Übersicht der System-Schnittstellen [CONDUCT]	65		Bilder	74
9.3	Status Quo Messsysteme und Informationssystem	66		Tabellen	77
				Anhang	78

1 Aufgabenstellung

Hitzeschäden an Betonfahrbahndecken sind seit Jahrzehnten national sowie international bekannt. In der Vergangenheit traten diese in Deutschland jedoch nur vereinzelt auf. Daher waren die Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit bisher gering. In 2013 traten im Kontext mit außergewöhnlichen klimatischen Situationen (sog. Hitzeperioden) insbesondere im Bundesland Bayern vermehrt Hitzeschäden auf. Von der Problematik hauptsächlich betroffen sind alte, dünne Betonfahrbahndecken, die nach alter RStO errichtet wurden und die i. d. R. einen Konstruktionsaufbau von 22 cm Betondeckschicht auf hydraulisch gebundener Tragschicht in Verbundbauweise haben.

Die behinderte Längsausdehnung des Bauteils Betondecke infolge intensiver Sonneneinstrahlung und dem damit verbundenen Spannungsaufbau kann in Verbindung mit den o. g. Konstruktionsmängeln sowie den über die lange Liegezeit von mehr als 30 Jahren entstandenen Imperfektionen zu Hitzeschäden führen. Bei Überschreitung der maximal aufnehmbaren Spannung des Deckensystems kann dies zu hitzebedingten Schäden der Fahrbahn in verschiedenartigem Ausmaß führen. Auf Grund der vermehrt aufgetretenen Schäden und der damit einhergehenden Verkehrsgefährdung werden durch die Straßenbauverwaltungen der Länder zunächst einfache Vorkehrungen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit getroffen. So werden zur Gefahreinschätzung bei extremen Temperaturereignissen vermehrt Streckenkontrollen durch die zuständigen Autobahnmeistereien durchgeführt. Diese sollen in erster Linie dazu beitragen, einen Hitzeschaden frühzeitig zu erkennen und erforderliche Maßnahmen (z. B. Sicherung und Instandsetzung) schnellstmöglich einleiten zu können. Bei einigen Streckenabschnitten werden zudem temporäre Geschwindigkeitsbeschränkungen eingerichtet. Diese bedeuten einen wesentlichen Eingriff in den Verkehrsablauf. Die Entscheidungsfindung zur Anordnung zuvor genannter Maßnahmen basiert derzeit auf Erfahrungswerten und der an exponierten Stellen messtechnisch ermittelten Lufttemperatur und deren empirische Prognose. Da diese Vorgehensweise nicht die tatsächlich auftretenden Temperaturverhältnisse im zu betrachtenden Streckenabschnitt bzw. in der Betondecke abbildet, können die realen Spannungszustände im Deckensystem nur grob abgeschätzt werden. Für eine genauere Abschätzung der Spannungszustände ist demzufolge zum einen die Kenntnis über die aktuell vorherrschende

Nullspannungstemperatur der Fahrbahndecke erforderlich. In der Praxis sind zum anderen weitere Randbedingungen zu beachten. So ist bekannt, dass sich die Nullspannungstemperatur der Betondecke im Verlauf seiner Liegedauer verändern kann. So kann beispielsweise eine Verschmutzung der Fugen (hier insbesondere der Riss unterhalb des Kerbschnittes) zu einer Absenkung der Nullspannungstemperatur führen. Grundsätzlich wird die Nullspannungstemperatur als die höchste Temperatur der Betondecke bezeichnet, bei der die Normalspannung (Horizontalspannung) gerade noch Null beträgt. Eine Temperatur oberhalb der Nullspannungstemperatur führt folglich zum Aufbau von Druckspannungen im Deckensystem. Grundsätzlich ist anzumerken, dass die hierbei auftretenden Druckspannungen immer im Kontext mit der vorliegenden Längsausdehnungsbehinderung des Gesamtsystems zu sehen sind. Auf Grund der zuvor beschriebenen Tatsachen und der Komplexität des Versagensmechanismus von Hitzeschäden wird deutlich, dass derzeit keine ausreichend sichere Abschätzung der tatsächlich vorherrschenden Spannungszustände von Betonfahrbahndecken möglich ist.

1.1 Gesamtziel

In der hier durchgeführten Forschungsarbeit sollte in einem stufenweisen Vorgehen ein Informationssystem zur Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken entwickelt werden. Dieses System sollte einerseits ein geeignetes Messsystem zur Erfassung der konkret vorherrschenden Spannungen im Deckensystem beinhalten. Andererseits sollte im Rahmen des Projektverlaufes ein Rechenalgorithmus und ein spezielles Software-Tool entwickelt werden. Das Informationssystem sollte letztlich als messtechnisch abgesicherte Entscheidungshilfe zur Anordnung von Maßnahmen – z. B. temporäre Geschwindigkeitsbegrenzungen oder Warnmeldungen im Kontext mit Hitzeschäden an Betonfahrbahndecken – verwendet werden können. Ohne das zu entwickelnde System erfolgte die Entscheidung über die Anordnung von Tempolimits insbesondere auf der Basis von Lufttemperaturen aus der Umgebung und Erfahrungswerten, d. h. die Spannungszustände im Deckensystem wurden nur grob geschätzt. Mithilfe des o. g. Informationssystems sollte nicht nur der Zeitraum optimiert, sondern auch die Notwendigkeit der Einrichtung von Geschwindigkeitsbeschränkungen

gen messtechnisch hinterfragt bzw. bestätigt werden. Zudem sollte eruiert werden, ob und inwieweit mit dem System in Zukunft die Verkehrssicherheit auf Betonautobahnen weiter erhöht und zum anderen volkswirtschaftliche Schäden infolge von Stau minimiert werden können.

1.2 Methodik des Vorgehens

In dem hier durchgeführten Forschungsprojekt sollte ein für die Praxis nutzbares, automatisiert arbeitendes Informationssystem zur Ermittlung und Prognose von realen Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken entwickelt werden. Es wurde zunächst abgeklärt, ob und inwieweit bisher in der Praxis angewendete Messsysteme für die standardmäßige Ermittlung dafür notwendiger Daten geeignet sind. Gegebenenfalls wurden diese für die geplante Anwendung modifiziert oder neu entwickelt. Ferner wurden alle erforderlichen Werkzeuge entwickelt, erprobt und definiert, die für ein autark arbeitendes, softwaregestütztes Informationssystem erforderlich sind.

Die Entwicklung und Erprobung in zwei Demonstratoren sollte dabei alle Punkte von der eigentlichen Erfassung relevanter Messdaten bis hin zur automatisierten Einrichtung von Warnmeldungen bzw. Tempolimits beinhalten. Zur Realisierung des Systems wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Recherche bisher in der Praxis angewendeter Mess- und Aufnahmesysteme und Konzipierung eines geeigneten Systems für die hier geforderte Anwendung,
- Messtechnische Ermittlung erforderlicher Daten und rechnerische Ermittlung der Spannungszustände in der Fahrbahn,
- Entwicklung eines Ablaufschemas zur Datenerfassung, -übertragung und -speicherung,
- Entwicklung eines Rechenalgorithmus und Softwaretools für die automatische Datenauswertung mit Anbindung an Klimaprognosedaten sowie Definition von Grenzen,
- Modul zur automatisierten Umsetzung von Maßnahmen (z. B. Signalschaltung von Wechselverkehrszeichenbrücken, Warnsignale an die Autobahnmeistereien, Radiomeldungen etc.),
- Herstellung zweier Demonstratoren unter Einsatz des gesamten Informations- bzw. Prognosesystems und wissenschaftliche Auswertung.

2 Schadensmechanismus „Hitzeschaden“

2.1 Temperatur und Spannungen

Der Baustoff Beton dehnt sich bei Erwärmung aus und zieht sich bei Abkühlung zusammen. Wird diese Verformung behindert, entstehen Spannungen.

Eine über den Querschnitt konstante Temperaturänderung führt zu einer Längenänderung. Die Temperatur des Betons wird aber normalerweise nicht über die Plattenhöhe konstant sein. Ein linearer Temperaturverlauf über den Plattenquerschnitt bedingt eine Biegung und ein nichtlinearer Verlauf erzeugt eine Verwölbung des Querschnittes (Bild 1).

Der Wölbanteil (W in Bild 1) kann nie vollständig in Verformung umgesetzt werden, weil die Platte selbst die Querschnittsverwölbung behindert. Deshalb erzeugt der nichtlineare Temperaturanteil auch in einer zwängungsfrei gelagerten, unbelasteten Platte Spannungen (Eigenspannungen bzw. Wölbspannungen).

Die Biegung der Platte wird durch die immer vorhandene Schwerkraft behindert. Deshalb erzeugt der Biegeanteil (B in Bild 1) immer Biegespannungen. Das Vorzeichen des linearen Temperaturgradienten bestimmt die Richtung der Plattenwölbung (konkav/konvex, Bild 4/Bild 5).

Auch die Längsdehnung (D in Bild 1) wird in der Praxis mindestens teilweise behindert. So lange sich die Plattenenden frei ausdehnen können, wirkt die Reibung auf der Unterlage der Verformung entgegen. Bezogen auf die Einzelplatten ergibt sich daraus aber noch keine große Spannung. Sobald die Scheinfugen aber geschlossen sind, wird die Längsdehnung vollständig behindert. Damit wird

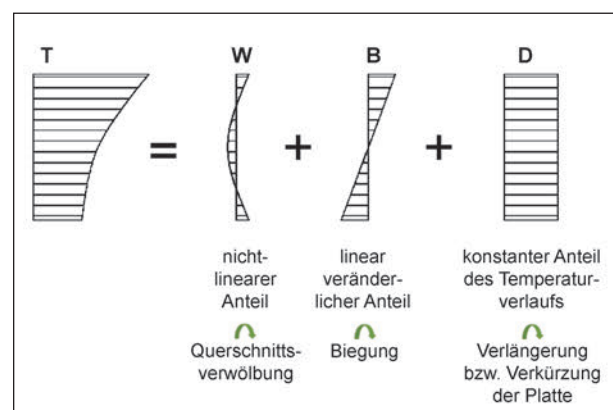


Bild 1: Zerlegung der Temperaturanteile im Plattenquerschnitt

eine Temperaturerhöhung vollständig in Spannung umgesetzt.

Für die Analyse bestimmter Problemstellungen ist es hilfreich, den Temperaturzustand einer Platte in seine Bestandteile aufzuspalten. Die temperaturbedingten Längsdehnungen der Betonfahrbahn werden allein durch den konstanten Temperaturanteil (Anteil D in Bild 1) bestimmt. Für die Untersuchung von Hitzeschäden ist es deshalb zwingend erforderlich, die Größe dieses Temperaturanteils zu kennen. Weil aus den direkten Messungen nur der Gesamttemperaturverlauf bekannt ist, muss die Bestimmung des Anteiles D auf rechnerischem Wege erfolgen.

In der real vorhandenen Platte ist, wie oben erläutert, stets eine teilweise Behinderung der Längsausdehnung vorhanden. Ein Teil der Verformung wird also in Spannung umgesetzt. Für die mathematisch-mechanische Betrachtung ist es hilfreich, eine vollständige Dehnbehinderung in vertikaler und horizontaler Richtung anzunehmen. Damit wären alle Verformungen in Spannungen umgesetzt. Unter dieser Voraussetzung kann die Druckkraft, welche infolge der Erwärmung im Plattenquerschnitt vorliegt, näherungsweise nach Formel 1 berechnet werden:

$$N_T = \sum_{i=1}^n \alpha_T \cdot E_c \cdot \Delta h_i \cdot \Delta b \cdot t_i \quad (\text{Gl. 1})$$

N_T temperaturbedingte Normalkraft

α_T Wärmedehnzahl Beton

E_c E-Modul Beton

Δb Breite des betrachteten Querschnittes

t_i Betontemperatur mit dem Abstand z_i von der Nulllinie der Betonplatte (entsprechend Bild 2 bzw. 3)

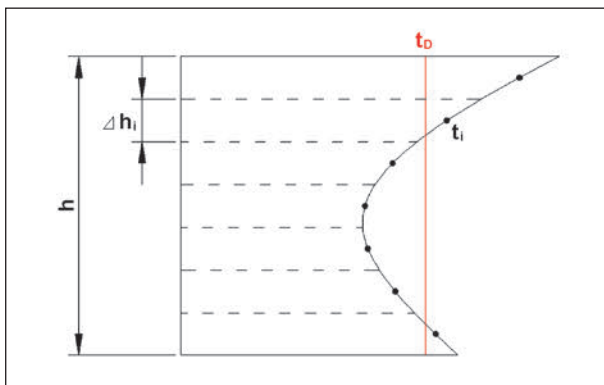


Bild 2: Temperaturzustand im Querschnitt mit Biege-, Wölb- und Dehnanteil

Δh_i t_i zugeordneter Bereich des Betonquerschnittes (Bild 2 bzw. 3)

n Anzahl der Temperaturwerte über den Querschnitt

Der Normalkraft kann man eine mittlere, die Dehnung erzeugende Temperatur zuordnen:

$$N_T = \alpha_T \cdot E_c \cdot h \cdot \Delta b \cdot t_D \quad (\text{Gl. 2})$$

t_D der Plattendehnung zugeordnete Temperatur

Durch Gleichsetzung von Formel 1 und 2 erhält man:

$$t_D = \frac{\sum \Delta h_i \cdot t_i}{h} \quad (\text{Gl. 3})$$

Das Biegemoment im Querschnitt kann berechnet werden mit:

$$M_T = \sum \alpha_T \cdot E_c \cdot \Delta h_i \cdot \Delta b \cdot z_i \cdot t_i \quad (\text{Gl. 4})$$

M_T temperaturbedingtes Biegemoment

z_i entsprechend Bild 3

Weiter gilt für das Biegemoment:

$$M_T = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \sigma_M \cdot \frac{h}{2} \cdot \frac{h}{3} \cdot \Delta b \quad (\text{Gl. 5})$$

σ_M Biegespannung am Querschnittsrand

Der Spannung lässt sich über die Temperaturdehnung eindeutig ein Temperaturwert zuordnen:

$$\sigma_M = \alpha_T \cdot t_M \cdot E_c \quad (\text{Gl. 6})$$

t_M Biegung erzeugende Temperatur am Querschnittsrand

Indem man Gleichung 6 anwendet und anschließend Gleichung 4 und 5 gleichsetzt, gewinnt man:

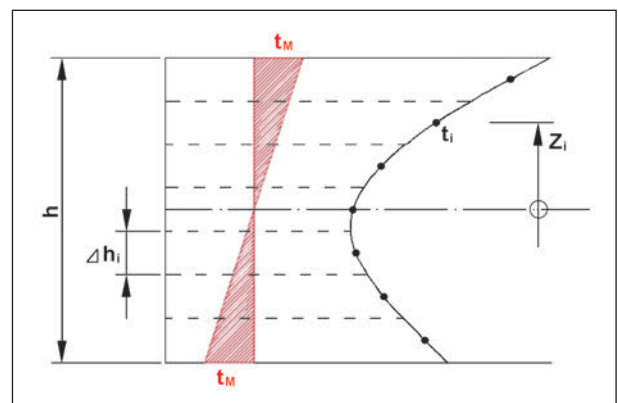


Bild 3: Biegeanteil

$$t_M = \frac{6}{h^2} \cdot \sum \Delta h_i \cdot z_i \cdot t_i \quad (\text{Gl. 7})$$

Der Wölbanteil kann dann durch Subtraktion der Dehn- und Biegeanteile vom Gesamttemperaturverlauf berechnet werden.

$$t_{iW} = t_i - t_{iD} - t_{iB} \quad (\text{Gl. 8})$$

t_{iW} Temperatur in der Schicht i (Wölbanteil)

t_i Temperatur in der Schicht i (Gesamt)

t_{iD} Temperatur in der Schicht i (Dehnanteil)

t_{iB} Temperatur in der Schicht i (Biegeanteil)

Unter Verwendung der Gleichungen 3, 7 und 8 ist es also möglich, die Größe der drei Temperaturanteile eindeutig zu bestimmen. Dies gilt prinzipiell auch, wenn im Querschnitt keine homogenen Materialparameter vorhanden sind (Unterscheidung Ober-/Unterbeton). In diesem Fall müssen schichtbezogene Werte für die Wärmedehnzahl und den E-Modul verwendet werden. Die Gleichungen 3, 7 und 8 sind dann entsprechend zu modifizieren.

Die praktisch im Plattenquerschnitt auftretenden Temperaturverläufe können sehr vielgestaltig sein und unterliegen einer ständigen zeitlichen Veränderung. Dabei gehen die Änderungen normalerweise von der Plattenoberseite aus. Eine Erwärmung des Betons durch Sonneneinstrahlung und Wärmeaustausch mit der Luft, wie sie üblicherweise in den Vormittagsstunden eintritt, führt zu einem positiven Temperaturgradienten im gesamten Querschnitt (Bild 4, oben). Da sich die Oberseite der Platte stärker ausdehnt als die Unterseite, wölbt sich die Platte im mittleren Bereich auf (Bild 4, unten). Eine Abkühlung des Betons an der Plattenoberseite, wie sie typischerweise in den Nachtstunden auftritt, führt zu einer Umkehrung des Temperaturverlaufes. Es stellt sich ein durchgehend negativer Temperaturgradient ein (Bild 5, oben) und die Platte wechselt ihre Verformungsfigur. Es kommt zu einer Aufschüsselung an den Rändern (Bild 5, unten).

Zu besonders hohen Wölbspannungen führen plötzlich auftretende Temperaturänderungen an der Plattenoberfläche. Diese können z. B. durch einen Gewitterregen entstehen, welcher auf eine stark er-

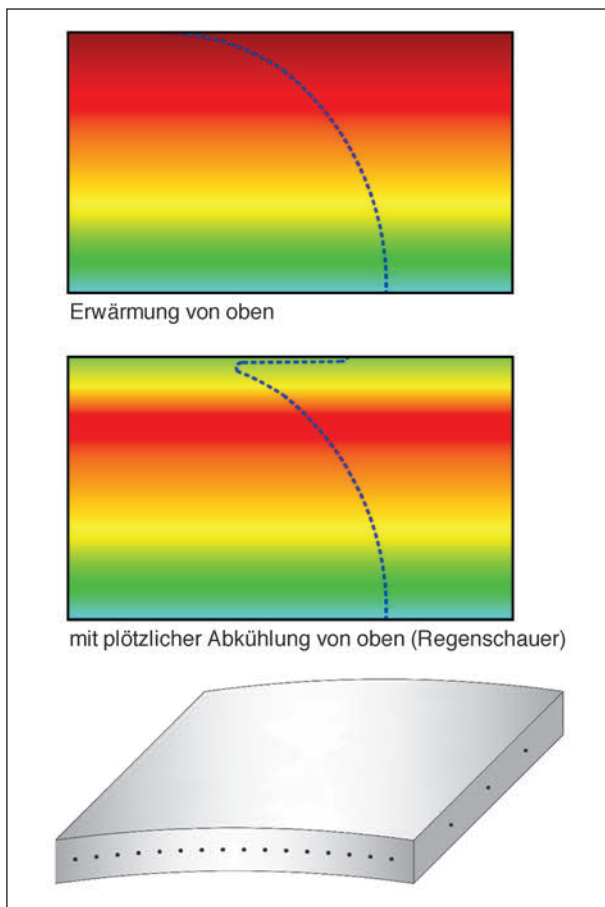


Bild 4: Wesentlicher Temperaturverlauf über die Platte – Aufwölbung (positiver Temperaturgradient)

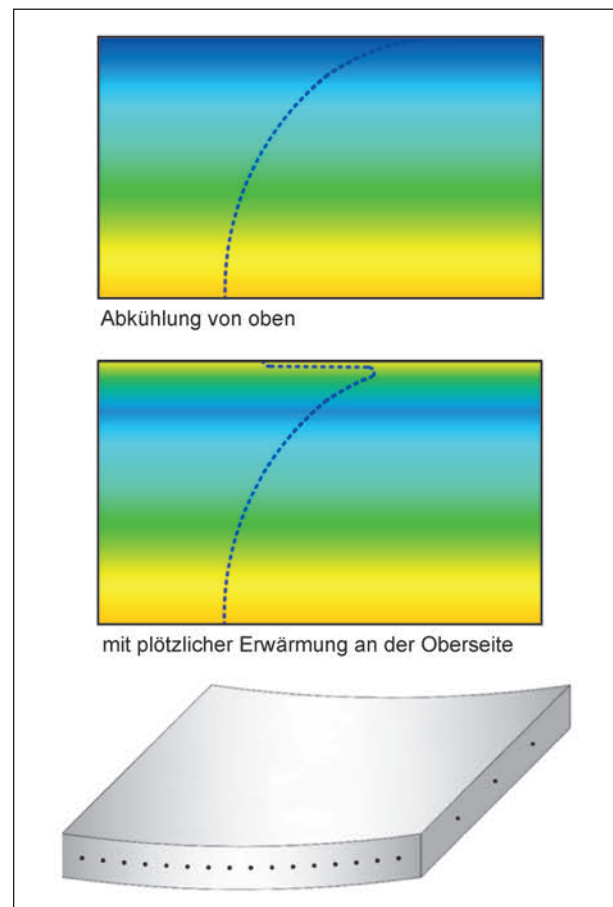


Bild 5: Wesentlicher Temperaturverlauf über die Platte – Aufschüsselung (negativer Temperaturgradient)

hitzte Fahrbahn trifft. In solchen Fällen kommt es zu einer scharfen Umkehrung des Temperaturverlaufs (Bild 4 und Bild 5, Mitte).

Zur Berechnung der Temperaturzustände in den Platten und der daraus resultierenden Spannungen stehen leistungsfähige Verfahren (FEM, Wärmebilanz, Zeitschrittverfahren) zur Verfügung. Eine praktische Nutzung dieser Berechnungsergebnisse ist aber nur gerechtfertigt, wenn ein systematischer Abgleich der Berechnungsergebnisse mit hinreichend verlässlichen Messergebnissen erfolgt ist.

Während die Temperaturmessung im Allgemeinen keine grundsätzlichen Probleme aufwirft, stellt die Spannungsmessung eine Herausforderung dar. Die übliche Methode einer indirekten Spannungsmessung durch Bestimmung von Dehnungen ist nur bedingt anwendbar, weil die Spannungen gerade aus verhinderter Dehnung resultieren.

Die derzeit einzige praktikable Methode zur Ermittlung der temperaturbedingten Spannungen in einer Fahrbahndecke besteht in der Berechnung unter Verwendung eines möglichst realitätsnahen Berechnungsmodells.

2.2 Nullspannungstemperatur

Die Nullspannungstemperatur (T_0) ist die höchste durchschnittliche Plattentemperatur, bei der sich keine aus temperaturbedingter Plattendehnung resultierenden Spannungen ergeben.

Spannungen, welche aus einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung über den Querschnitt ergeben (Anteile B und W, Bild 1), werden hier also nicht in Betracht gezogen.

Eine nähere Betrachtung der zu Grunde liegenden physikalischen Zusammenhänge zeigt die große Bedeutung der Nullspannungstemperatur für die vorliegende Problematik.

Der Zusammenhang zwischen der Temperaturänderung und der dadurch bedingten Dehnung im Beton ist im praxisrelevanten Bereich linear. Dieser lässt sich mit einem einzigen Parameter, dem längenbezogenen Wärmeausdehnungskoeffizienten beschreiben. Eine Erwärmung des Betons führt zur Ausdehnung gemäß Formel 9:

$$\Delta L = \alpha_T \cdot \delta T \cdot L_0 \quad (\text{Gl. 9})$$

ΔL Längsdehnung

α_T Wärmeausdehnungskoeffizient

δT Temperaturerhöhung

L_0 Länge vor der Erwärmung.

Wird die Längsdehnung verhindert, führt dies zum Aufbau von Normalspannungen.

Mit

$$\sigma = \frac{\Delta L_v}{L_0} \cdot E_c \quad (\text{Gl. 10})$$

ΔL_v verhinderte Längsdehnung

E_c E-Modul Beton ($\cong E_{cm}$)

σ Spannung im Betonquerschnitt

ergibt sich:

$$\sigma = \alpha_T \cdot \delta T \cdot E_c \quad (\text{Gl. 11})$$

Die Spannung ist also linear von der Temperaturdifferenz δT abhängig. Diese ist definiert als Differenz zwischen der vorhandenen Betontemperatur und der Nullspannungstemperatur. Die Größe der temperaturbedingten Betonspannungen wird also in entscheidendem Maße von der Höhe der Nullspannungstemperatur bestimmt. Damit ist die Ermittlung der Nullspannungstemperatur eine wesentliche Voraussetzung für die korrekte Berechnung der temperaturbedingten Spannungen im Beton.

Es ist naheliegend, die Nullspannungstemperatur als die Temperatur anzusehen, welche der Beton bei seiner Herstellung aufwies. Da sich im Zuge der Hydratation die Betontemperatur aber dynamisch verändert ist es notwendig, diesen Prozess näher zu betrachten.

Bei der Herstellung der Fahrbahn ist der Beton in einem plastischen Zustand und damit zunächst spannungsfrei. Die Betontemperatur beim Einbau wird deshalb als erste Nullspannungstemperatur T_{01} (Bild 6) bezeichnet.

Mit dem Einsetzen der Hydratation beginnt die Entwicklung von Hydratationswärme. Die Temperatur im Betonquerschnitt steigt an und führt zu einer Materialdehnung. Durch die kontinuierliche Herstellung des Fahrbahnbandes ist diese Ausdehnung vollständig behindert. Weil der Beton sich aber noch im plastischen Zustand befindet, werden zunächst keine Druckspannungen aufgebaut. Erst mit der allmählichen Erhärtung des Betons beginnt auch die Entwicklung der Spannungen. Die Betontemperatur

zu diesem Zeitpunkt wird als erste Nullspannungstemperatur T_{01} (Bild 6) bezeichnet. Wenn die Betontemperatur ihren Höhepunkt erreicht, hat sich aber erst ein relativ geringer Druck aufgebaut. Bei der anschließenden Abkühlung und der damit verbundenen Materialverkürzung wird dieser Druck schnell aufgebraucht und im Betonquerschnitt entwickeln sich Zugspannungen. Der Nullspannungsdurchgang erfolgt aber bei einer anderen (höheren) Temperatur als am Beginn der Hydratation. Diese zweite Nullspannungstemperatur T_{02} (Bild 6) ist für die Größe der temperaturbedingten Spannungen im Betonquerschnitt maßgebend. Laboruntersuchungen haben gezeigt, dass T_{02} nur wenig unterhalb der maximalen Betontemperatur liegt, welche bei der Hydratation erreicht wird (vgl. [HINTZEN 1999]).

Bei einer Reihe von Fahrbahnplatten mit gerissenen Scheinfugen beginnt der temperaturbedingte Spannungsaufbau offensichtlich, wenn sich die Scheinfugen schließen.

Wenn man die Wirkung der Reibung auf das Dehnungsverhalten einer Einzelplatte vernachlässigt, dann ist davon auszugehen, dass sich bei der Betontemperatur T_{02} alle Scheinfugen einer Fahrbahn schließen. Nach der Herstellung der Fahrbahn gilt also zunächst einmal

$$T_0 = T_{02} \quad (\text{Gl. 12})$$

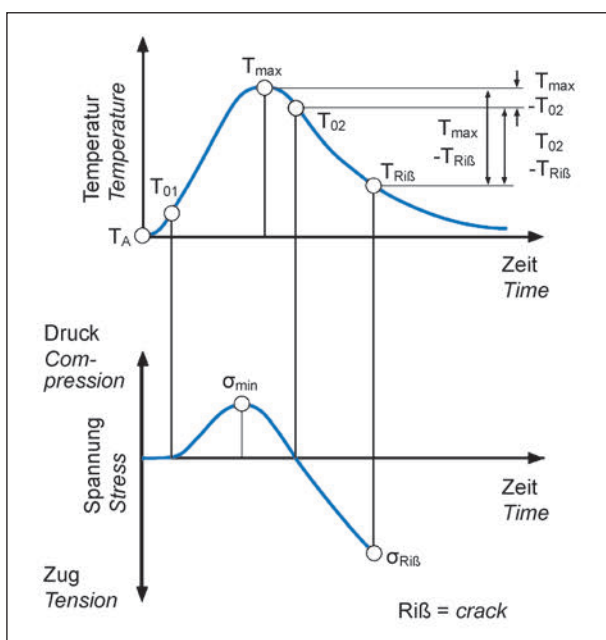


Bild 6: Spannungsentwicklung im Zuge der Hydratation (aus [HINTZEN 1999])

In den folgenden Jahren wird T_0 aber durch verschiedene Einflussfaktoren wesentlich verändert. Am wichtigsten sind in diesem Zusammenhang das Schwinden des Betons und die Fugenschmutzung.

Die Schwindverformung (Schrumpfung) beginnt unmittelbar mit dem Beginn der Hydratation und setzt sich degressiv über viele Jahre fort. Es gibt eine Vielzahl von Verfahren zur rechnerischen Beschreibung dieses Prozesses. In [VILLARET et al. 2013] wurde unter Verwendung typischer Parameter einer Betonfahrbahn eine Schwindberechnung mit dem Berechnungsverfahren aus dem ModelCode 90 durchgeführt. Bild 7 zeigt den berechneten Schwindverlauf über 40 Jahre.

Durch das Schwinden werden die Platten also verkürzt. Das bedeutet, dass die Scheinfugen sich erst bei einer höheren Temperatur schließen. Die Nullspannungstemperatur T_0 wird durch das Betonschwinden also erhöht. Unter Verwendung von Gleichung 1 kann diese Temperatursteigerung berechnet werden. Die Ergebnisse sind in Bild 8 dargestellt.

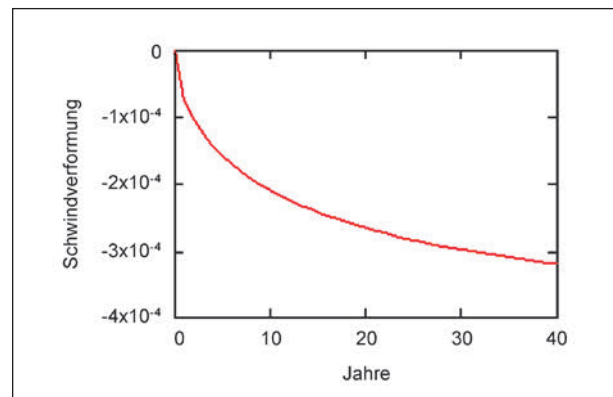


Bild 7: Entwicklung der Schwindverformung über 40 Jahre

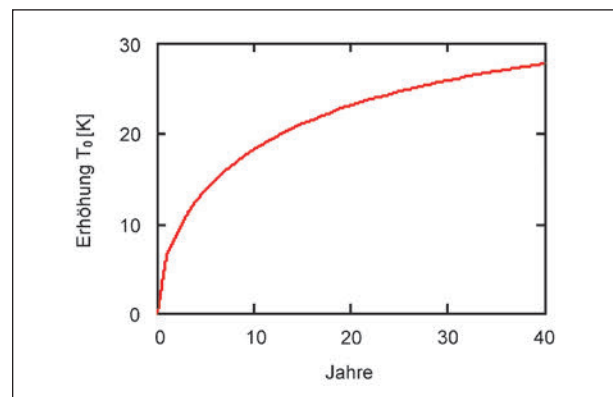


Bild 8: Erhöhung der Nullspannungstemperatur T_0 infolge Betonschwinden

Es zeigt sich, dass der Schwindeinfluss gravierend ist. Allein im ersten Jahr wird die Nullspannungstemperatur um ca. 6 K erhöht. Es sei aber darauf hingewiesen, dass das Schwindverhalten stark von der Betonrezeptur und den Einbaubedingungen abhängig ist. Im konkreten Fall können sich also auch deutlich andere Schwindmaße ergeben. Unabhängig davon bleibt aber festzuhalten, dass das Schwinden wesentlich zur Abnahme der Spannungen in der Fahrbahn beiträgt. In den ersten Jahren nach der Herstellung ist also kaum mit einem Hitzeschaden zu rechnen.

Ein gegenteiliger Effekt ergibt sich aus der Verschmutzung der Querfugen. Bei niedrigen Temperaturen öffnen sich die Querfugen und eindringender Schmutz führt dazu, dass die Fugen teilweise verfüllt werden (Bild 9). Der kraftschlüssige Fugenschluss tritt deshalb bei der Erwärmung ein, bevor die ursprüngliche Nullspannungstemperatur erreicht ist. Die Temperatur T_0 wurde gesenkt und in der Konsequenz ergeben sich höhere Spannungen bei der Maximaltemperatur. Das Risiko für einen Hitzeschaden steigt also. Dieser Prozess setzt sich bei weiteren Abkühlungs- und Erwärmungsphasen fort (Bild 10). Durch die zunehmende Verfüllung der Fugen verläuft der Verschmutzungsprozess degressiv.

In Österreich durchgeführte Messungen (siehe [WICKKE 1983]) zeigten, dass die Nullspannungstemperatur innerhalb weniger Jahre (1975 bis 1981) um fast 30 K abgesenkt wurde. Allein im ersten Jahr war ein Rückgang um ca. 15 K zu verzeichnen. Dabei ist zu beachten, dass die Wirkung des Betonschwindens hier schon enthalten ist.

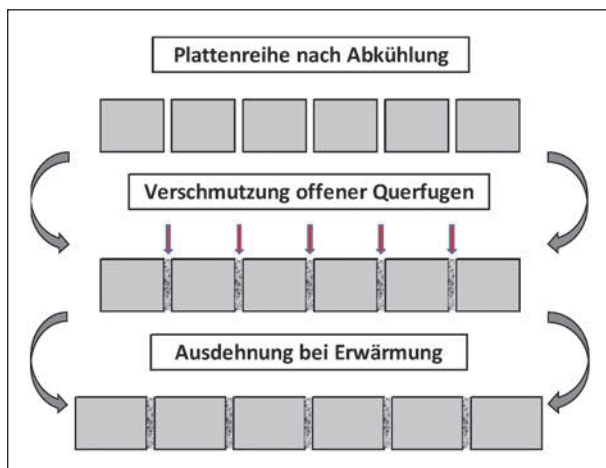


Bild 9: Verhalten des Plattensystems unter Berücksichtigung von Fugenschmutzung ohne Dehnungsbehinderungen

Es ist aber anzumerken, dass die untersuchte Strecke, entsprechend der damals in Österreich üblichen Bauweise, keinen Fugenverguss aufwies. Die Verschmutzung wurde dadurch natürlich stark begünstigt.

Untersuchungen an Strecken mit verschlossenen Fugen liegen derzeit nicht vor. Es ist aber bekannt, dass der Fugenverschluss (Dichtband + Verguss) keineswegs einen dauerhaften Schutz vor Verschmutzung darstellt.

Es liegt auf der Hand, dass die Verschmutzung durch große Fugenöffnungsweiten im Winter begünstigt wird. Hohe Werte für die Nullspannungstemperatur führen dabei zu besonders großen Öffnungsweiten und fördern damit die Fugenverschmutzung. Diese bewirkt wiederum eine Absenkung des T_0 -Wertes.

Allgemein ist festzustellen: Je größer T_0 ist, desto schneller wird T_0 durch die Fugenverschmutzung abgesenkt.

Auch die Schwindschrumpfung, die primär zur Entspannung beiträgt, wirkt an dieser Stelle kontraproduktiv, weil sie die Fugenöffnung vergrößert und damit die Verschmutzung fördert.

Als besonders nachteilig erweisen sich in diesem Zusammenhang die Paketfugen. Da nicht alle Scheinfugen gleichzeitig reißen, verbleiben teilweise über längere Zeiträume zusammenhängende Plattenpakete. Die Fugen an den Enden dieser Pakete weisen entsprechend größere Öffnungsweiten

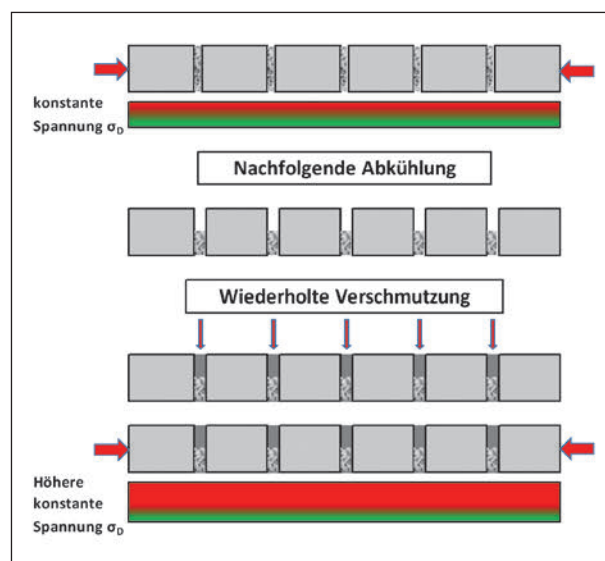


Bild 10: Verhalten des Plattensystems bei Dehnungsbehinderung durch Fugenschmutzung

auf. Eine zuverlässige Abdichtung durch den Fugenverschluss ist hier kaum möglich.

Im Hinblick auf diese Problematik wäre es also wünschenswert, mit einem tieferen Kerbschnitt ein frühzeitiges Reißen aller Scheinfugen zu erzwingen. Dies führt aber bei hohen Betontemperaturen zu einer Erhöhung der Spannungsspitze im Fugenbereich und damit zu einer direkten Vergrößerung des Risikos für einen Hitzeschaden.

Die Bildung von Plattenpaketen wird auch durch schlecht ausgerichtete Dübel begünstigt. Eine signifikante Abweichung von der Fahrbahnachse führt zu Verkantungen, welche die Übertragung von Zugkräften über die Dübel ermöglichen. Damit ist die Öffnung dieser Fuge dauerhaft verhindert.

Die erläuterten Zusammenhänge zeigen, dass die Nullspannungstemperatur starken zeitlichen Veränderungen unterliegt und sich beim gegenwärtigen Kenntnisstand einer rechnerischen Ermittlung weitgehend entzieht. Es sind also Messungen erforderlich.

Eine messtechnische Bestimmung der Nullspannungstemperatur kann über die Messung der Fugenöffnungsweite erfolgen. Es ist evident, dass der Druckspannungsaufbau beginnt, wenn die Fuge sich geschlossen hat. Damit ist die Ermittlung der Nullspannungstemperatur durch gleichzeitige Messung der Fugenbewegung und der Betontemperatur möglich. Die Nullspannungstemperatur ist offensichtlich erreicht, wenn bei weiter steigender Betontemperatur keine Veränderung der Fugenweite mehr stattfindet.

Es ist zu beachten, dass mit der so ermittelten Nullspannungstemperatur der Dehnanteil (Kapitel 2.1) des in der Betondecke gemessenen Temperaturverlaufes gemeint ist. Bei der Auswertung der entsprechenden Messergebnisse muss also zunächst die Berechnung des Dehnanteiles durchgeführt werden.

Praktisch durchgeführte Messungen haben gezeigt, dass die Messwerte erheblichen Streuungen unterliegen, sodass eine eindeutige Zuordnung der Fugenöffnungsweiten zu Temperaturzuständen kaum möglich ist. Eine Analyse der möglichen Ursachen für diese Streuung ergab, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit die Reibung der Dübel im Beton der dominierende Einflussfaktor ist. Die oftmals nicht exakte Ausrichtung der Dübel in Plattenlängsrichtung führt dazu, dass erhebliche Kräfte notwendig

werden um eine Fugenbewegung zu realisieren. Damit entstehen bei der Plattenausdehnung (Erwärmung) Druckkräfte, welche die Platte verkürzen und damit die Fugenöffnung vergrößern. Umgekehrt bewirkt die Dübelreibung im Abkühlungsfall das Entstehen von Zugkräften, welche die Fugenöffnung behindern. Im Ergebnis werden für zwei identische Temperaturzustände unterschiedliche Fugenöffnungsweiten gemessen. Die Nullspannungstemperatur ist nur durch eine sinnvoll zusammengefasste Betrachtung der Messwerte identifizierbar.

2.3 Spannungszustände beim Hitzeschaden

Traditionell wird der Hitzeschaden als Stabilitätsproblem aufgefasst. Es wird davon ausgegangen, dass eine behinderte Längsdehnung bei steigenden Temperaturen dazu führt, dass eine kritische Druckkraft im Beton erreicht wird und das Tragwerk nach oben ausweicht. Die Versatzmomente, welche dadurch entstehen, führen zur lokalen Betonzerstörung. Dieser Betrachtungsweise entsprechend wurden auf der Basis von Differentialgleichungen Lösungen formuliert, welche eine kritische Normalkraft (bzw. Betontemperatur) in Abhängigkeit von der Steifigkeit des Querschnittes angeben (siehe z. B. [KERR 1984]).

Detaillierte Berechnungen mit einem FEM-Volumenmodell, welche im Zuge der Bearbeitung von [Bayern Blow-Up Teil 2] durchgeführt wurden, haben aber gezeigt, dass die Verformung der Betonplatten, welche sich im Zuge der Erwärmung einstellt, diesen Versagensmechanismus verhindern. Der Betonquerschnitt wird im Fugenbereich nach unten gedrückt (Bild 11 und Bild 12). Ein Ausweichen nach oben ist praktisch ausgeschlossen.

Ursächlich für diese Verformungsfigur ist zweifellos die beim Fugenschnitt entstehende Fugenkammer, die ein Versatzmoment erzeugt. Die resultierende Druckkraft in der Platte liegt genau in Plattenmitte. Bei einer Plattendicke von h liegt die Resultierende also im Abstand $h/2$ von der Plattenunterkante. Direkt unter dem Fugenschnitt ist die Platte aber um die Fugentiefe t_f geschwächt. Die Resultierende liegt hier somit im Abstand $(h-t_f)/2$. An der Fuge hat die resultierende Druckkraft also gegenüber dem übrigen Plattenbereich einen Versatz von $e = t_f/2$ (Bild 13). Das sind bei üblichen Plattendicken 3 cm bis 7 cm.

In Verbindung mit großen Druckkräften ergibt sich ein beträchtliches Biegemoment ($M = e \cdot F_T$). Die Herstellung des Gleichgewichts bedingt dann eine Aufwölbung der Platte (Bild 13 bis Bild 15).

Der Aufwölbung entgegen wirkt das Eigengewicht der Platte. Bei hinreichend langen Platten ergeben sich dadurch in der Plattenmitte Einsenkungen (Bild 11 und Bild 12). An den Plattenenden verbleiben

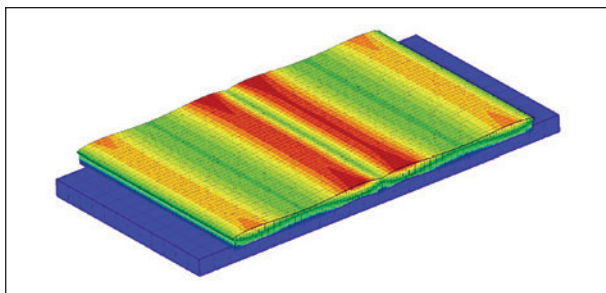


Bild 11: Verformung der Platten bei gleichmäßiger Erwärmung

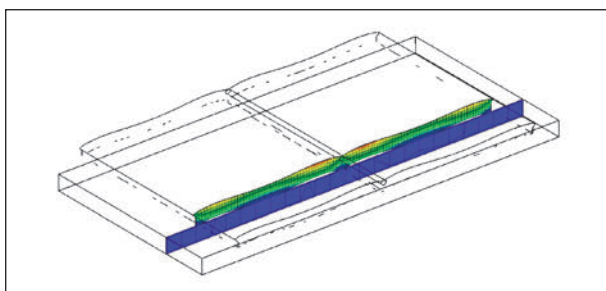


Bild 12: Verformung der Platten bei gleichmäßiger Erwärmung (Schnitt)

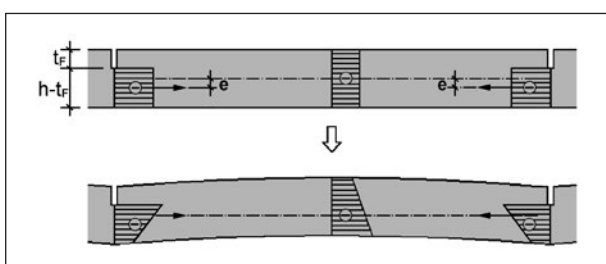


Bild 13: Versatzmoment infolge des Fugenschnittes

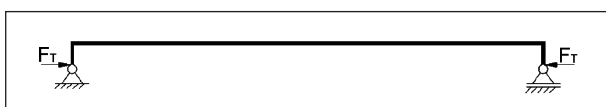


Bild 14: Statisches System

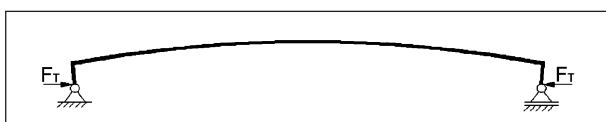


Bild 15: Verformung des statischen Systems

aber die Aufwölbungen. An heißen Tagen ist normalerweise die Oberseite der Betonplatten stärker erwärmt als die Unterseite. Die Aufwölbung wird dadurch noch verstärkt. Einen gegenteiligen Effekt haben eventuell vorhandene Aufschüsselungen, welche durch ein ungleichmäßiges Schwinden des Betons entstehen. Der hieraus resultierende Versatz der Druckkräfte beträgt aber höchstens 1 – 2 mm. Er ist also erheblich kleiner als der Versatz, welcher durch den Fugenschnitt entsteht. Damit gibt es bei Temperaturerhöhung im Ergebnis immer eine Aufwölbung der Platten an den Querfugen.

Korrespondierend mit der Verformungsfigur ergibt sich eine Spannungskonzentration am oberen Ende des Kontaktbereiches (Rissbereich) der Fuge.

In Bild 16 ist diese Spannungsspitze durch die dunkelgrünblaue Färbung erkennbar. Ein direkter Vergleich der Spannungen mit der im Laborversuch ermittelten Druckfestigkeit gibt allerdings keine gesicherte Auskunft über die Sicherheit gegen Betonversagen. Dafür ist der mehrachsige Spannungszustand zu betrachten.

Bild 17 zeigt die Vertikalspannungen an der Fuge. In den rot eingefärbten Bereichen gibt es vertikale Zugspannungen. Die Spannungen quer zur Fahrbahn spielen hier eine untergeordnete Rolle. Es

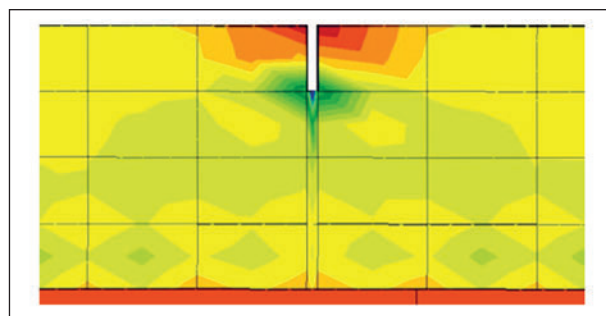


Bild 16: Spannungen in Fahrbahnrichtung (x-Richtung) an der Fuge

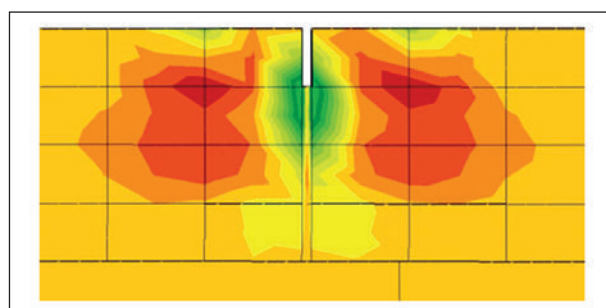


Bild 17: Vertikalspannungen an der Fuge

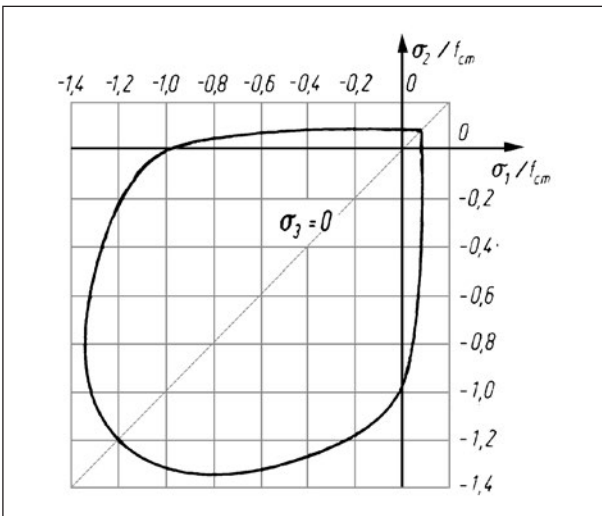


Bild 18: Betonfestigkeit im 2-achsigen Spannungszustand (aus [BK 2001])

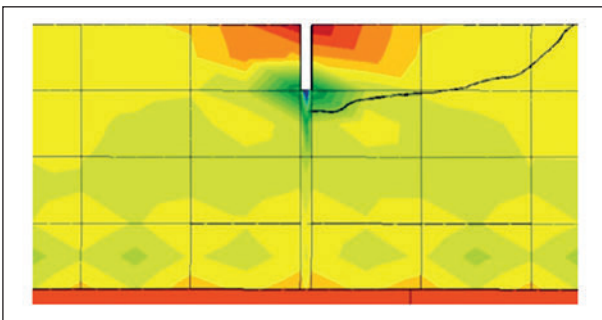


Bild 19: Zu erwartendes Rissbild

kann also vereinfachend von einem zweidimensionalen Spannungszustand ausgegangen werden.

Die Betonfestigkeit im zweiachsigen Spannungszustand kann mit dem Diagramm in Bild 18 abgeschätzt werden.

Es ist deutlich, dass die Druckfestigkeit wesentlich abnimmt, wenn gleichzeitig an einer zweiten Hauptachsenrichtung eine Zugspannung anliegt. Eine besondere Gefährdung liegt also vor, wenn sich die temperaturbedingten Druckspannungen mit vertikalen Zugspannungen überlagern. In diesem Fall ist eine Rissbildung gemäß Bild 19 zu erwarten.

Dieser auf der Basis des Berechnungsmodells hergeleitete Schadensmechanismus mündet in einem Schadensbild, das dem in der Praxis zu beobachtenden typischen Hitzeschaden entspricht (Bild 20).

Der eigentliche Blowup, also das Ausweichen der Fahrbahnplatten nach oben (Bild 21), kommt in der Praxis nur relativ selten vor.



Bild 20: Typischer Hitzeschaden



Bild 21: Hitzeaufbruch mit einem Ausweichen der Platten nach oben

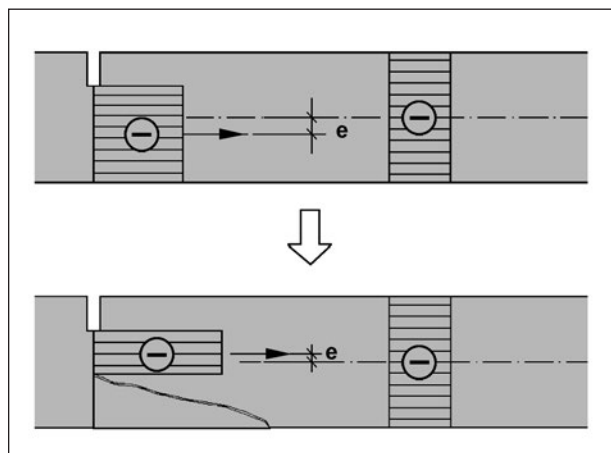


Bild 22: Umkehr des Versatzmomentes bei einem Betonausbruch an der Unterseite

Diese Form des Hitzeschadens kann auftreten, wenn der in Bild 19 dargestellte Riss nicht zur Plattenoberseite sondern nach unten verläuft.

Im Ergebnis ändert sich das Vorzeichen des Versatzmomentes. Die Plattenenden werden im Fugenbereich nicht mehr auf die Unterlage gedrückt, sondern nach oben.

Ursächlich für den geänderten Rissverlauf können Inhomogenitäten im Fugenbereich (z. B. mangelhafte Verdichtung, Vorschädigungen, ungleichmäßige Fugenverschmutzung) sein.



Bild 23: Geschädigter Fugenbereich

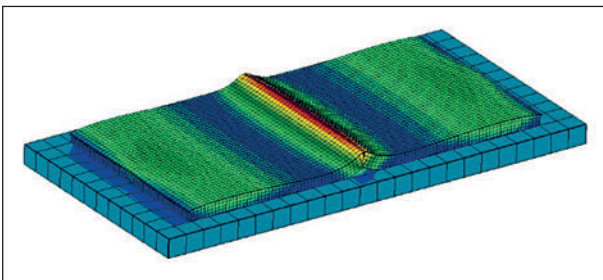


Bild 24: Verformung des Berechnungsmodelles nach Simulation eines Betonausbruchs an der Unterseite

Gelegentlich lassen sich in der Baupraxis Schadensbilder beobachten, die die Fahrbahn für einen derartigen Blowup prädestinieren (Bild 23).

Bei Vorgabe einer entsprechenden Vorschädigung zeigt sich das vertikale Ausweichen der Platten auch im FEM-Modell (Bild 24).

Zusammenfassend ist also festzustellen, dass der Hitzeschaden nicht durch ein Stabilitätsversagen ausgelöst wird, sondern durch eine lokale Überschreitung der Betonfestigkeit. Dies hat weitreichende Konsequenzen. Es ist nicht möglich, auf Basis der Stabilitätstheorie eine kritische Normalkraft (kritische Betontemperatur) zu definieren, welche den sicheren Bereich begrenzt.

Stattdessen ist es erforderlich, den komplexen Spannungszustand im Fugenbereich zu betrachten.

Wie bereits oben erläutert, sind hier zwei- und möglicherweise auch dreidimensionale Spannungen zu analysieren. Unterschiedliche Temperaturverläufe über den Betonquerschnitt führen zu unterschiedlichen Spannungszuständen. So können negative Temperaturgradienten dazu führen, dass vertikale Zugspannungen direkt im Bereich der Druckspannungsspitze auftreten.

Bei der rechnerischen Analyse der Spannungszustände ist zu beachten, dass die kritische Druck-

spannungskonzentration an der Unterseite des Kerbschnittes lokal sehr begrenzt ist. Das bedeutet, dass bei der zu erwartenden Plastifizierung vor dem Materialversagen Potenzial für eine Spannungsumlagerung vorhanden ist. Eine rein elastische Berechnung kann hier also keine exakten Ergebnisse liefern. Gleichzeitig muss auch für die Versagenhypothese ein elastisch-plastisches Materialmodell verwendet werden.

Nach derzeitigem Erkenntnisstand ist es aber fraglich, ob derart komplizierte Berechnungen sinnvoll sind. Die Spannungszustände im Fugenbereich sind in ganz wesentlichem Maße von Faktoren bestimmt, welche von Fuge zu Fuge variieren bzw. kaum kalkulierbar sind. Dies sind:

- die Tiefe des Kerbschnittes,
- die Fugenverschmutzung,
- lokale Unregelmäßigkeiten.

Besonders die Fugenverschmutzung ist in dieser Beziehung problematisch, weil man davon ausgehen muss, dass der Verschmutzungsgrad der einzelnen Fugen sowohl in vertikaler, wie auch in horizontaler Richtung variieren kann. Damit kann es zu gefährlichen Spannungskonzentrationen kommen, welche praktisch nicht berechenbar sind.

Aus diesem Grund wird es nicht als sinnvoll betrachtet, eine genaue Berechnung des Versagenszustandes anzustreben. Stattdessen sollen durch systematische vergleichende Berechnungen potenziell besonders gefährliche Temperaturzustände identifiziert werden.

3 Konzipierung geeigneter Messverfahren

3.1 Durch Messung zu bestimmende physikalische Größen

Das im Rahmen des Forschungsvorhabens zu konzipierende Informationssystem erforderte eine prognostische Berechnung des Temperaturzustandes der Platten. Weil der zukünftige Temperaturzustand in hohem Maße vom aktuellen Temperaturzustand abhängig ist, musste dieser als Grundlage für die Prognose bereitgestellt werden. Dies erforderte die fortlaufende Messung der Plattentemperatur in hinreichend vielen Ebenen.

Messgröße	Auflösung	Toleranz
Fugenbewegung	0,01 mm	$\pm 0,05 \%$
Betontemperatur	1 °C	$\pm 0,30 \text{ K}$
Lufttemperatur	1 °C	$\pm 0,30 \text{ K}$
Luftfeuchte	1 % rel. F.	$\pm 2 \%$
Globalstrahlung	1 W/m ²	$\pm 1 \%$
Windrichtung	0,4°	$\pm 2^\circ$
Windstärke	0,1 m/s	0,3 m/s
Niederschlag	1/0	-

Tab. 1: Messgrößen und Messgenauigkeiten

Im Prognosemodul waren die Temperaturzustände der Betonplatten auf der Basis der prognostizierten Klimadaten zu berechnen. Um die Verlässlichkeit des Prognoseverfahrens zu sichern, war es erforderlich, über längere Zeiträume den Zusammenhang zwischen Klimadaten und Temperaturzuständen sowohl rechnerisch, wie auch messtechnisch zu erfassen und abzugleichen. Dies erforderte die Messung aller hierfür relevanten Klimadaten.

Die betreffenden Messgrößen und die angestrebte Messgenauigkeit sind dafür definiert worden und in Tabelle 1 dargestellt:

Für die rechnerische Bestimmung der aus dem Temperaturzustand resultierenden Spannungen war es außerdem erforderlich, die Nullspannungstemperatur im betreffenden Streckenabschnitt zu kennen. Wie in Kapitel 2 erläutert, war dazu die Messung der Fugenbewegung an den Scheinfugen notwendig.

3.2 Prinzipielle Vorgehensweise bei der Auswahl eines Messverfahrens

Die prinzipielle Vorgehensweise ist in Bild 25 dargestellt. Grundsätzlich wurde bereits bewährten Standardverfahren der Vorzug gegeben, soweit sie im vorliegenden Fall anwendbar und wirtschaftlich realisierbar waren. Dies erleichterte den praktischen Gebrauch, weil bereits Erfahrungswerte vorlagen. Außerdem war die Vergleichbarkeit mit anderen Messungen gegeben.

Grundlage für die Konzipierung eines geeigneten Messsystems war die Definition der Messaufgabe und der hierbei erforderlichen Messgenauigkeit. Besonderes Augenmerk musste auf die Zuverlässig-

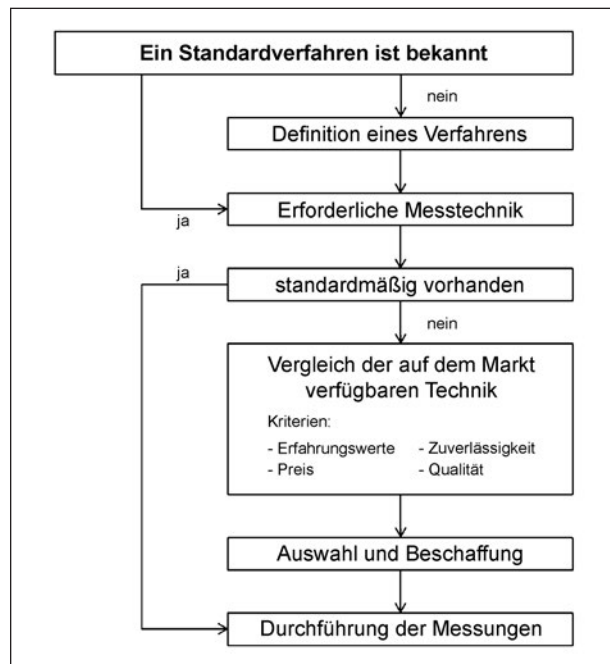


Bild 25: Prinzipielle Vorgehensweise zur Entwicklung eines geeigneten Messverfahrens

keit der Messtechnik gelegt werden, weil bereits der Ausfall eines einzelnen Messgerätes den Wert der Messungen entscheidend schmälert. Eine verlässliche Prognoserechnung war nur mit einem vollständigen Datensatz möglich.

3.3 Messung der Fugenbewegung

Für die Auswahl eines geeigneten Messsystems wurde weiterhin folgendes gefordert:

- energieautarker Betrieb,
- Datenlogger und Messumformer bzgl. der Anzahl und Art der Sensoren offen und erweiterbar,
- Datenübertragung über Funkmodem,
- Einsatz handelsüblicher Sensoren,
- freie Auswahl der Sensoren,
- Datenübertragung via Email/FTP/WEB.

Aufgrund der geforderten Genauigkeit der Messung der Fugenbewegung sowie der Erfassung des Temperaturgradienten in der Betonfahrbahndecke schiedenen berührungslos arbeitende Systeme aus.

Die Umsetzung der Messaufgabe erforderte ein offenes System, das die Austauschbarkeit und wahlfreie Verwendung von Einzelkomponenten erlaubte. Als Schnittstellen für die Messumformer wurden

Standardsignalbereiche (z. B. 0 – 10 V, 4 – 20 mA) zur Verfügung gestellt. Die Erfassung der Messdaten erfolgte über handelsübliche Sensoren mit Industriestandard, z. B. PT1000 Temperatursensoren der Klasse B für die Betondeckentemperatur und potenziometrische Wegsensoren für die Aufnahme der Fugenbewegung. Die Wegsensoren wurden an der Betondeckenflanke gekapselt montiert, um eine dauerhafte Funktion auch unter widrigen Umweltbedingungen sicher zu stellen. Die Kapselung wurde konstruktiv so ausgeführt, dass sie keinen Einfluss auf die Messgröße hat.

3.4 Messung der Klimadaten

Für die Aufnahme der meteorologischen Daten wurden handelsübliche Sensoren für die Ausstattung industrieller Wetterstationen eingesetzt. Die Anordnung der Messstation erfolgte in einem Abstand von ca. 3 m zur Betonfahrbahndecke. Die Masthöhe über Oberkante Gelände beträgt ca. 2,5 m. Gegründet wurde die Messstation auf einem Betonfundament. Die Messumformer und Datenlogger/Übertragungsmodem wurden neben den meteorologischen Sensoren direkt am Mast der Messstation montiert. Zusätzlich befinden sich am Mast ein Solarpanel zur batteriegepufferten Energieversorgung der Messstation (Bild 26). Die Kabellänge der Sensoren zur Messstation beträgt 10 m. Dies war bei der Auswahl des Standortes und der Anordnung der Komponenten zu beachten.

Das Zeitintervall der Datenerfassung und -übertragung war in situ wie auch über einen Fernzugriff konfigurier- und damit auf die jeweilige Messsituation hin anpassbar. Die Art der Datenübergabe

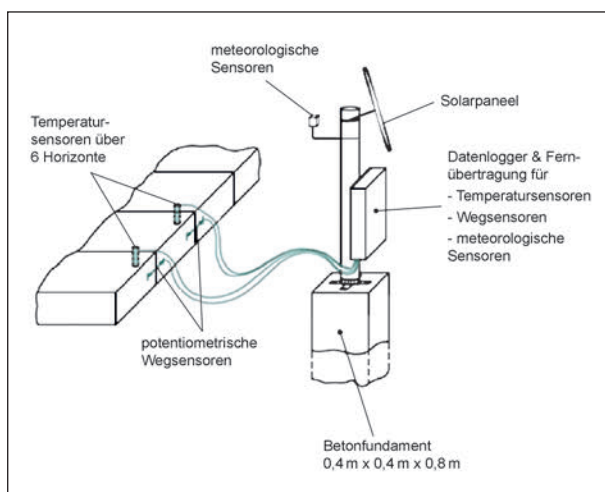


Bild 26: Skizze der Messstation

(Email/FTP/WEB) konnte wahlweise bei offener Datenstruktur konfiguriert werden. Zur Sicherstellung der Funktion der Messstation konnten für relevante Parameter (z. B. Energieversorgung) Alarmschwellen eingerichtet werden.

4 Bisher in der Praxis angewendete Mess- und Aufnahmesysteme

Bereits im Jahr 2014 wurde in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), dem Prüfamts für Verkehrswegebau der Technischen Universität München (TUM) und der Villaret Ingenieurgesellschaft mbH an der BAB A92 im Freistaat Bayern eine erste Messstation zur Erprobung von Messverfahren zur Ermittlung von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken errichtet.

Die dort durchgeführten Messungen und Datenerhebungen sollten als erste Grundlage für ein Prognosesystem zur Auftretenswahrscheinlichkeit von Hitzeschäden dienen.

Basis für die Auswahl des bisher für die Messung des Temperaturgradienten in der Betonfahrbahndecke sowie der Fugenbewegung an der Betondeckenflanke eingesetzten Messsystems war die energieautarke und kostengünstige Umsetzung der Messaufgabe.

Aufgrund der technischen Voraussetzungen ließen sich an einer Messstation bis zu 10 Temperatursensoren und 5 Sensoren für die Fugenbewegung parallel betreiben. Die Messfrequenz konnte zwischen 1 Sekunde und 24 Stunden gewählt werden. Die Datenübertragung wurde mittels GSM Modem realisiert. Hier war eine Übertragung der Daten im Rhythmus von 1 bis 99 Tagen möglich. Eine höhere Frequenz der Datenübertragung konnte nicht gewählt werden. Alternativ konnte das GSM Modem in einen stets aktiven Zustand zur ständigen Erreichbarkeit versetzt werden. Dies hatte gegenüber dem Schlafmodus zwischen 2 Sendeintervallen einen wesentlich höheren Energiebedarf zur Folge, wodurch der energieautarke Einsatz eingeschränkt wurde.

Bezüglich der einzusetzenden Sensoren war das Messsystem herstellerspezifisch geschlossen, was die Erweiterungsfähigkeit naturgemäß deutlich einschränkte. Durch die Fixierung auf herstellerseitig

vorgegebene Sensorgeometrie war die Anpassung an die Messaufgabe, z. B. Wegmessung, erschwert und erforderte im Hinblick auf die Bereinigung der Messdaten wegen auftretender Überlagerungen, z. B. aus der Wärmedehnung von Installationskomponenten, einen deutlich erhöhten Aufwand.

Der dauerhafte Betrieb war bei ausreichender Kapselung der Komponenten gegenüber Umwelteinflüssen möglich. Für den Intervallbetrieb, mit z. B. täglicher Übertragung der Messdaten bei stündlicher Messwertaufnahme, war der energieautarke Betrieb für ein Jahr sichergestellt. Darüber hinaus war die Energieversorgung z. B. über ein Solarpanel sicher zu stellen oder die Messstation zu warten.

Eine Zeitsynchronisation der Datenlogger z. B. über das GSM Signal war nicht vorgesehen, was die Ganggenauigkeit der internen Uhr negativ beeinflusste.

4.1 Weitere Messstellen in Sachsen-Anhalt und Bayern

Zur Erfassung des Temperatur- und Längsdehnungsverhaltens an Betonfahrbahndecken von Bundesautobahnen wurden bisher an 11 Standorten Temperaturmessstationen sowie Messstationen zur Erfassung der Bewegungen an Querscheinfugen bzw. Raumfugen eingerichtet (Tabelle 2).

Die zu erfassenden Temperaturen waren in einem Bereich von -20 °C bis +50 °C und die Fugenbewegungen in Abhängigkeit von der Fugenart im Bereich von 1 mm bis 20 mm zu erwarten.

Bundesland	BAB	RF	km	Einbaudatum
Sachsen-Anhalt	A9	Berlin	152,750	06.11.2014 11.11.2014
	A9	Berlin	160,670	29.10.2014
	A2	Hannover	109,300	27.04.2015
	A14	Halle	180,400	28.04.2015
	A9	Berlin	59,600	29.04.2015
	A14	Magdeburg	106,500	30.04.2015
Bayern	A92	München	26,700	02.12.2014
	A93	München	206,600	KW 19/2015
	A93	München	229,300	KW 19/2015
	A93	Regensburg	229,300	KW 20/2015
	A93	Regensburg	222,050	KW 20/2015

Tab. 2: Standorte der Messstellen

Die Temperaturen wurden in 5 Horizonten in der Fahrbahndecke, gleichmäßig über die Deckendicke verteilt, erfasst. Die Auflösung der Temperaturmessung betrug 0,1 °C, die Messtoleranz ± 1 K. In den gewählten Stationierungsbereichen wurden je 2 Messstellen mit jeweils 5 Messfühlern (für die 5 Horizonte) angeordnet (Bild 27 bis Bild 29). Das heißt, in jedem Stationierungsbereich wurden inklusive der Lufttemperatur die Temperaturdaten von 12 Messfühlern stündlich erfasst.

Die zu erfassenden Fugenbewegungen in Abhängigkeit von der Fugenart sind im Bereich von 0 mm bis 20 mm zu erwarten.

Die Ermittlung der Fugenbewegung ist durch das Aufbringen induktiver Wegaufnehmer, die an den Seiten der Betondecke über dem Fugenbereich angebracht wurden, ermöglicht worden (Bild 30). Die induktiven Wegaufnehmer wurden so modifiziert, dass eine witterungsunabhängige Funktion gewährleistet wird. Zudem war der mögliche Arbeitsbereich eines Wegaufnehmers zu ermitteln und der Einbau entsprechend anzupassen. Dabei sollten die Wegaufnehmer eine Auflösung von 0,01 mm besitzen.

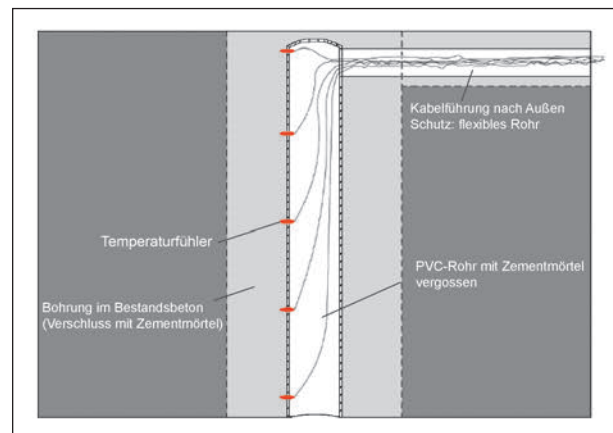


Bild 27: Skizze einer Einrichtung zur Temperaturmessung im Bestandsbeton

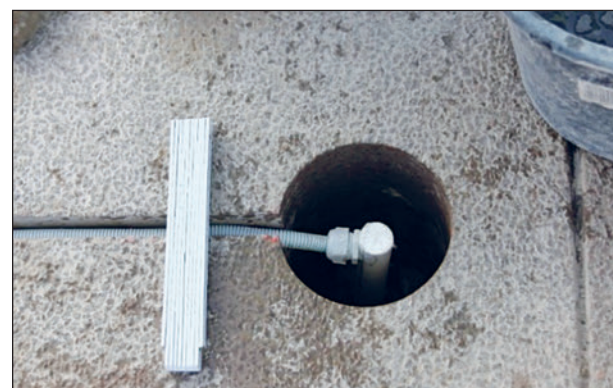


Bild 28: Verlegebeispiel Temperaturmessung, Einbauzustand



Bild 29: Verlegebeispiel Temperaturmessung, Lage der Sensoren

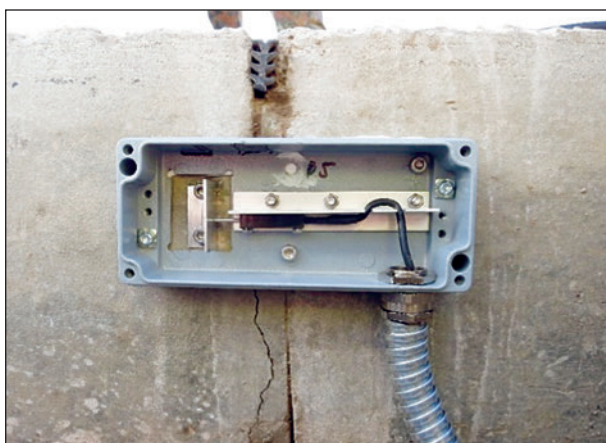


Bild 30: Sensor zur Messung der Fugenbewegung

Der Datenlogger zeichnete in einem den Anforderungen entsprechenden Rhythmus die Messdaten der Sensoren auf. Der Analyse-Sensor wurde mechanisch vom L-Profil Anschlag entkoppelt, sodass es zu keinerlei Verspannungen des Sensors kommen konnte.

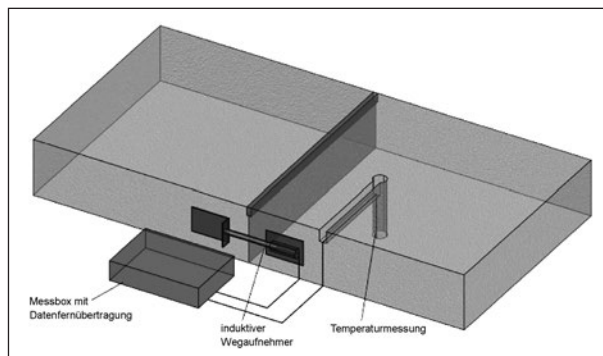


Bild 31: Skizze des Systems zur Erfassung der Fugenbewegung und Temperatur in der Betondecke



Bild 32: Aufbau einer Übertragungsstation

Zur zeitgleichen Bestimmung von Temperatur und Fugenbewegung wurde eine Messanordnung gemäß Bild 31 angewandt.

Die Daten aus Fugenmessung und Temperaturermittlung wurden zu einer Übertragungsstation weitergeleitet, die die Messergebnisse zu der entsprechenden weiterverarbeitenden Stelle überträgt. Dafür war der Aufbau eines Messschrankes neben der Fahrbahn vorzusehen, in dem die einzelnen Kabel zusammenlaufen und die Energieversorgung und Datenübertragung angeschlossen sind (Bild 32). Aufgrund der Lage fern von Versorgungseinrichtungen wurde die Übertragung per Funk (GSM) gewählt.

Die Messstation musste über eine ausreichende Energieversorgung verfügen, die ständig gewährleistet sein musste. Eine Bereitstellung von Energie über Batterien bzw. der Einsatz von Akkus war möglich, hätte jedoch für die hohe Anzahl von Datenübertragungen, wie sie in einem Prognosesystem notwendig wären, nicht ausgereicht. Zur ständigen Messwerterfassung und Verarbeitung der Daten war demnach eine entsprechende Stromquelle zu wählen und einzubauen, die eine kontinuierliche Energieversorgung gewährleisten kann. Da für ein späteres Prognosesystem die Aufrechterhaltung eines ständigen Funkkontakts und die Stromversorgung der Messsysteme immer gegeben sein musste, war es sinnvoll, vor Ort ein autarkes System zu errichten, das mithilfe von Solarzellen und Brennstoffzellen zuverlässig Energie zur Verfügung stellen und den erhöhten Energiebedarf decken konnte (Bild 33).

Der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Messungen der Temperatur und der Fugenbewegungen sowie der Messwertübertragung zur weiteren Auswertung war frei bestimmbar. Für ein Prognosesystem ist eine ständige Datenabfrage und -übertragung unumgänglich. Deshalb war es Ziel, kurze Mess- und Übertragerhythmen einzurichten, sobald ein noch festzulegender kritischer Temperaturbereich erreicht wird. Die Messwerte mussten dafür in einem Abstand von ca. 5 min auch in Zeiten unkritischer Temperaturbereiche übertragen werden können. Dies hatte sich jedoch wegen des enorm hohen Energieaufwandes als nicht praktikabel herausgestellt.

Zur schnellen Datenverarbeitung hatte die Bereitstellung der Daten so zu erfolgen, dass diese reibungslos in die Berechnungen und Systeme übertragen werden können.



Bild 33: Stromversorgung des Messsystems mithilfe von Solarzellen

Die Daten wurden wöchentlich via Datenfernübertragung übermittelt. Hierdurch wurde im Wochenrhythmus die Kontrolle der Funktion der Messstellen gesichert.

Die Programmierung und Auswertung des Datenloggers erfolgt über die vom Hersteller der Messsysteme bereitgestellte Software (Bild 34).

4.2 Einbau von Dehnmessstreifen zur Messung von Querzug- und Längsdruckspannungen (TUM)

Eine Möglichkeit zur indirekten Erfassung von Spannungen in einer Betonfahrbahnplatte sind Verformungsmessungen. Die durch Temperaturänderungen induzierten Verformungen (Dehnungen oder Stauchungen) des Fahrbahnplattenbetons können hierbei über Dehnmessstreifen (DMS) gemessen werden. Diese wurden – wie bei einem anderen Forschungsvorhaben bereits praktiziert – an die Flanken eines Bohrloches horizontal, vertikal und diagonal angebracht, um den dreidimensionalen Spannungszustand erfassen zu können (siehe Bild 35). Durch die Situierung im Fugenbereich ei-

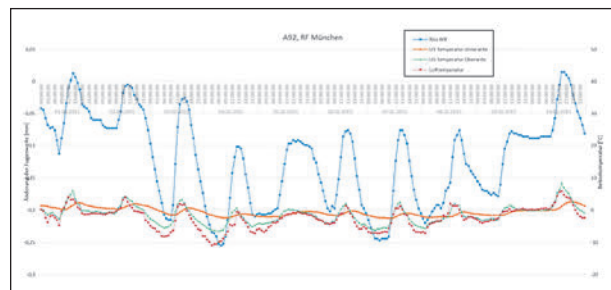


Bild 34: Auswertung Temperatur- und Fugenmessung

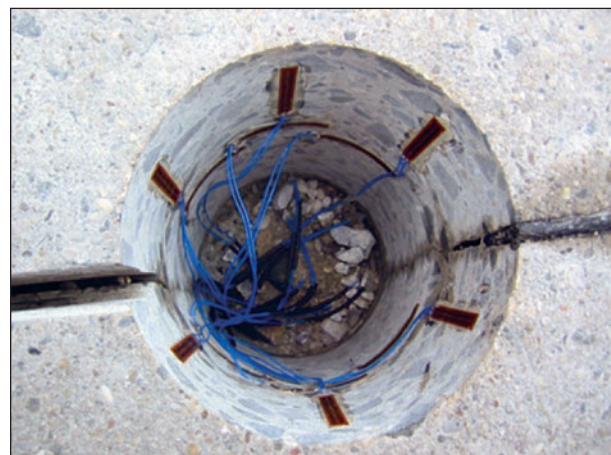


Bild 35: Dehnmessstreifen in einem Bohrloch (Quelle: TU München)

nes Betonfahrbahndeckensystems können die für die Beurteilung der Auftretenswahrscheinlichkeit von Hitzeschäden erforderlichen Spannungen (Längsdruck- und Querkzugspannungen) abgeleitet werden. In Bild 35 ist ein Bohrloch im Querscheinfugenbereich mit den entsprechenden Dehnmessstreifen dargestellt. Die Situierung der DMS korrespondiert mit der Richtung der Spannungen (vertikal: Querkzugspannungen; horizontal: Längsdruckspannungen).

Auf Grund der positiven Erfahrungen aus vorangegangenen Forschungsvorhaben und des vergleichsweise sehr geringen finanziellen und arbeitstechnischen Installationsaufwandes wurde die Implementierung derartiger Messeinrichtungen im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens an der Messstelle „A92 – Freising“ empfohlen und umgesetzt.

5 Recherche zu Messsystemen

5.1 Kraftmessdosen

Anders als unmittelbar auf den Fahrbahndeckenbeton aufgebrachte Dehnmessstreifen geben Kraftmessdosen (siehe Bild 36) die Beanspruchung direkt in der entsprechenden Einheit über ein Auslesegerät aus. Die prinzipielle Eignung von Kraftmessdosen zur Erfassung der Längsdruckkräfte zwischen zwei einzelnen Betonfahrbahnplatten in situ ist kritisch zu hinterfragen, da zum Einbau ein definierter Spalt mit genauen Abmessungen herzustellen ist. Eine alternative Möglichkeit besteht



Bild 36: Druckmessdose (Quelle: TU München)

durch den Einsatz von Betonfertigteilen, in die die Kraftmessdose unter Laborbedingungen vorab eingebaut werden können. Auf Grund der umfangreichen Kalibrierungsarbeiten wurde nicht empfohlen, die Kraftmessdosen im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens einzusetzen.

5.2 Ultraschallsensoren

Während Dehnmessstreifen in den Fugenbereich des originären Betonfahrbahndeckensystems integriert werden können, sind für eingebettete Ultraschallsensoren umfangreichere Installationsarbeiten erforderlich. Ultraschallsensoren werden heutzutage in den Frischbeton eingebracht, um z. B. Beanspruchungen permanent erfassen und in Echtzeit auswerten zu können. Da ein nachträgliches Einbringen der Ultraschallsensoren in die Zementsteinmatrix des bestehenden Fahrbahndeckenbetons unmöglich ist, müssen die Sensoren in z. B. kleineren Bohrlöchern integriert werden.

Die Schwierigkeit besteht bei nachträglich eingebauten Ultraschallsensoren darin, nicht die Eigenschaften der Vergussmasse, sondern des Fahrbahnbetons zu detektieren. Fraglich ist zudem, ob die Messsignale der Ultraschallsensoren die umgebende Vergussmasse für Messungen an der Zementsteinmatrix des originären Fahrbahndeckenbetons überbrücken können. Auch hier sind umfangreiche Kalibrierungs- und Verifikationsmessungen unter Laborbedingungen erforderlich. Wie bei allen anderen zerstörungsfrei messenden Verfahren ist auch bei den Ultraschallsensoren der Aspekt „Stark befahrene Autobahn“ bei der Bewertung der Messergebnisse zwingend zu berücksichtigen. Da aus derzeitiger Sicht die Brauchbarkeit der Ergebnisse zur Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit von Hitzeschäden anzuzweifeln ist, wurde eine Berücksichtigung von Ultraschallsensoren im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens nicht empfohlen.

5.3 Akustoelastische Betondehnungsaufnehmer zur Ermittlung der Zug- und Druckspannungen in Beton

Die Sensoren für Detektion von Zug- und Druckspannungen erfassen Dehnungen und Stauchungen eines Metallstabes. Die Messung erfolgt hierbei nicht über Dehnmessstreifen, sondern durch Ultra-

schall nach der Impuls-Echo-Methode. Parallel hierzu erfolgt eine konstante Messung der Betontemperatur über eingebaute Temperaturfühler.

Analog den Ultraschallsensoren kann auch bei diesen Sensoren eine eindeutige Messung nur dann erfolgen, wenn der Messkörper allseitig kraftschlüssig mit der Zementsteinmatrix des zu untersuchenden Betons verbunden ist.

Auf Grund dessen wurden die Sensoren für Zug- und Druckspannungen – analog den Ultraschallsensoren – von den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen.

5.4 Schwingsaitenaufnehmer

Bei Schwingsaitenaufnehmern ist zwischen den beiden Spannungspunkten der Messapparatur eine Stahlsaite gespannt, welche durch einen Elektromagneten zum Schwingen angeregt wird. Durch Wegänderungen der in den Enden des Bauteils integrierten Messpunkte ändern sich die Spannung und auch die Eigenfrequenz der gespannten Saite. Über einen Frequenzzähler kann die Veränderung der Eigenfrequenz und somit die Verschiebung der Messpunkte ermittelt werden.

In der praktischen Anwendung erfolgt die Vorspannung der Saiten meistens so, dass sie im Tonfrequenzbereich zwischen 700 und 2.000 Hz schwingen. Es sind zwei Betriebsarten möglich:

- Erregung mit einem Impuls und anschließende Aufnahme der freien Schwingung,
- kontinuierlicher Betrieb mit erzwungenen Schwingungen.

Zur Anwendung in der Verformungsmessung ist auch ein Schwingsaitendoppelaufnehmer entwickelt worden, der mit einer anschließenden Berechnung die Aufnahme des kompletten Verformungszustandes über den Bauteilquerschnitt und damit die Bestimmung der Lage der Nulllinie bei Biegung gestattet.

Dieses Verfahren hat eine zum Dehnmessstreifen vergleichbare Genauigkeit, allerdings einen wesentlich höheren Energieverbrauch, da die Saite dauerhaft zum Schwingen angeregt werden muss. Dieser vor allem in der Bauwerksüberwachung eingesetzten Geräte zeigen ein stabiles Langzeitmessverhalten und sind wiederverwendbar. Bei Deh-

nungsmessungen an dynamisch beanspruchten Bauteilen, wie z. B. an von Verkehrslasten überrollten Fugen, kann es zu Messungenauigkeiten kommen. Eine parallele Erfassung der Temperatur ist ebenfalls möglich.

5.5 Automatische Deformationsanalyse

Das Ziel einer automatisierten Deformationsanalyse besteht darin, die absoluten und relativen Bewegungen eines Bauwerkes kontinuierlich zu messen, in Echtzeit zu übertragen und mit einem vorab definierten Sollwert abzugleichen. Während die bisherigen Messsysteme nur das Monitoring von zwei einzelnen Betonfahrbahnplatten ermöglichen, können durch automatisierte Deformationsanalysen ganze Abschnitte einer Richtungsfahrbahn überwacht werden.

Durch die nachgeschaltete Deformationsanalyse können in kürzester Zeit – bestenfalls in Echtzeit – die Abweichungen erkannt und entsprechende Warnungen (z. B. an die Verkehrsleitzentralen) übermittelt werden. Automatisierte Deformationsmessungen werden im Tunnelbau oder zur Überwachung von sensiblen Bauwerke (Talsperren, Brücken etc.) bereits seit vielen Jahren angewandt.

Die Kenntnis über die Bewegungen erleichtert die Beurteilung der Deformationen des Betondeckensystems:

- Relative Horizontalbewegungen der Einzelfahrbahnplatten

Hierdurch kann erkannt werden, welche Fugenkonstruktionen inaktiv sind und wann die aktiven Querscheinfugen bei steigender Fahrbahndeckentemperaturen geschlossen sind. Die Daten aus der automatisierten Deformationsanalyse können zur Verifizierung der Messwerte von Induktivwegaufnehmern und Präzisions-Neigungsmessern – und somit zur Bestimmung der Nullspannungstemperatur – herangezogen werden.

- Relative Vertikalbewegungen der Einzelfahrbahnplatten

Vertikale Bewegungen von Einzelfahrbahnplattenrändern im Fugenbereich gelten als deutlicher Warnwert für das unmittelbare Auftreten von Hitzeschäden.

- Hochwölben der einzelnen Betonfahrbahnplatten bei ungleichmäßiger Erwärmung

Im Zuge der wissenschaftlichen Aufarbeitung der Hitzeschäden an bayerischen Autobahnen des Jahres 2013 konnte nicht abschließend geklärt werden, welchen Einfluss der starke Anstieg der mittleren Tagestemperatur auf die Auftretenswahrscheinlichkeit der Schadensfälle hat [Hitzeschäden ABD SB].

Nach erster Bewertung erschienen nur die Systeme der Firma Leica Geosystems als brauchbar für die gestellte Monitoringaufgabe. Hier bestehen bereits ausreichend bewährte Systemkomponenten und Softwareprodukte für eine Datenübertragung und Datenauswertung in Echtzeit.

Ein Beispiel hierfür ist das System GeoMoS. Die sensorgesteuerte Datenerfassung vereint eine Vielzahl geodätischer und meteorologischer Messsensoren [LEICA]. Die Erfassung der Messdaten erfolgt über eine eigene Software. Die Messwerte werden durch eine Auswertesoftware in einer offenen SQL-Datenbank gespeichert. Diverse Auswertelgorithmen ermöglichen eine automatisierte Messung und eine umfangreiche Datenvalidierung (Erkennen von Fehlmessungen, Filterung und Nachmessungen). Eine weitere Auswertesoftware stellt die Ergebnisse in Echtzeit grafisch und numerisch dar [LEICA]. Zur Sensorsteuerung und Datenerfassung stehen diverse Kommunikationsmöglichkeiten – wie z. B. Kabel, Bussystem, Funk, LAN, WLAN, GSM/GPRS und UMTS zur Verfügung [LEICA]. Bei Überschreiten einer vordefinierten Toleranz oder anderen Ereignissen erfolgt eine Benachrichtigung über E-Mail, SMS oder ein Auswertetool [LEICA].

Seitens der Firma Leica-Geosystems wurden für Testzwecke an einem realen Autobahnabschnitt die Systemkomponenten zur Verfügung gestellt.

Im Zuge der in-situ-Messungen sollte die prinzipielle Eignung des Verfahrens verifiziert werden. Auf Grund dessen musste auch die grundsätzliche Situierung des rotierenden Scanlasers vorab in Abstimmung mit den zuständigen Behörden festgelegt werden.

5.6 Messstellen des DWD

Seitens des Deutschen Wetterdienstes DWD werden Klimadaten für meteorologische Belange zur

Verfügung gestellt. Diese Daten werden in unterschiedlichen Umfängen an diversen Messstellen in Deutschland ermittelt. Bereits bei der wissenschaftlichen Untersuchung der Schadensfälle infolge hoher Temperatureinwirkungen in Bayern 2013 zeigte sich, dass diese Messstellen im Regelfall nicht im unmittelbaren Umfeld des Bundesautobahnnetzes liegen und daher nur bedingt für die Beurteilung der Auftretenswahrscheinlichkeit von Hitzeschäden herangezogen werden können.

Die nebenamtlichen Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes werden einheitlich nach der folgenden Regelzeichnung (Bild 37) umgesetzt.

Die „Richtlinie für automatische Klimastationen für nebenamtliche Stationen und Partnernetze“ [DWD] des DWD definiert die folgenden Randbedingungen für die Ermittlung der Klimaparameter.

- Lufttemperatur in 2 m Höhe über GOK
Momentan- und Extremwerte
(1-min-Mittel, 10-min-Max. und 10-min-Min.)
- Lufttemperatur in 5 cm Höhe über GOK
Momentan- und Extremwerte
(1-min-Mittel, 10-min-Mittel)
- Luftfeuchte in 2 m Höhe über GOK
Momentanwerte (1-min-Mittel)
- Niederschlagshöhe
Momentanwert der letzten 10 Minuten
(1-min-Summen)

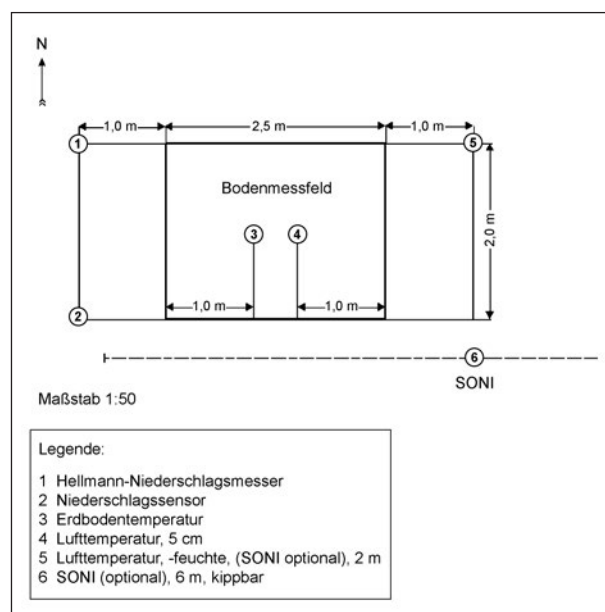


Bild 37: DWD-Mustermessfeld (aus [DWD])



Bild 38: Messung der Globalstrahlung an der BAB A92 bei Freising-Ost (Quelle: TU München)

- Sonnenscheindauer
Summenwert der letzten 10 Minuten
(10-min-Summen)
- Windrichtung und Windgeschwindigkeit
Mittel- und Extremwerte
- Erdbodentemperatur
Momentanwerte (1-min-Mittel)

Im Rahmen der wissenschaftlichen Untersuchung der Hitzeschäden in Bayern 2013 konnte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Lufttemperaturen und den Schadensfällen hergestellt werden. Es wurde trotzdem empfohlen, die „klassischen“ Klimaparameter des DWD oder einer nebenamtlichen Klimastation für die weiteren Untersuchungen zu erfassen und zu bewerten. Hierzu empfahl sich die Installation einer nebenamtlichen Klimastation gemäß den Vorgaben des DWD im unmittelbaren Umfeld des Demonstrators.

Der hohe Platzbedarf, die erforderliche Hindernis- und Erschütterungsfreiheit des Feldes sowie das Betretungsverbot (siehe Bild 38) war bei der Situierung des Demonstrators zu berücksichtigen. Ebenso sind Einflüsse wie Wärmeabstrahlung der Betonfahrbahndecke, Fahrtwind etc. bei der Auswertung der Klimaparameter zu beachten. Die Auswirkungen der Einflüsse sind derzeit noch nicht bekannt und waren gesondert zu ermitteln.

Die Globalstrahlung (direkte und diffuse Strahlung der Sonne) hat einen weitaus höheren Einfluss auf die Temperaturentwicklung in der Betonfahrbahndecke als die Lufttemperatur an sich. Die Messung der Globalstrahlung wurde bereits bei vorangegangenen Forschungsvorhaben durchgeführt und sollte auch Bestandteil der weiteren Untersuchungen sein.

5.7 Betonfeuchte

Zur Bestimmung der Feuchte in Beton stehen unterschiedlichste Methoden zur Verfügung. Es wird dabei zwischen zerstörenden und zerstörungsfreien Methoden unterschieden. Zerstörende Verfahren sind für eine automatisierte Langzeitüberwachung jedoch nicht geeignet und werden deshalb hier nur ergänzend aufgeführt.

5.7.1 Darr-Methode

Die Darr-Methode nach DIN 52183 ist eine gravimetrische Feuchtemessmethode und gehört zu den zerstörenden Messverfahren. Die Materialprobe darf nicht durch Bohren mit hoher mechanischer Energie entnommen werden, da sonst ein Teil des Wassergehaltes durch die hohe Wärmeentstehung verdunsten würde.

Im Labor ist anschließend das Probegut zu zerkleinern, in einem feuerfesten Schälchen zu wiegen und in einem Trocknungsschrank auf 105 °C zu erhitzen, bis nach DIN 1048-5 die Masse des Probekörpers innerhalb von 24 Stunden um nicht mehr als 0,1 % abnimmt. Aus dem Masseunterschied vor und nach dem Trocknen ergibt sich der Feuchtegehalt als Masseanteil in Prozent. Die Trocknungstemperatur liegt in der Regel bei 105 – 110 °C.

5.7.2 Carbid-Messung

Die Carbid-Messung ist ebenfalls eine zerstörende Messmethode. Bei dieser Methode wird mittels Calciumcarbid und Wasser Acetylgas freigesetzt. Der so in einer Stahlflasche erzeugte Druck wird für die Berechnung des Feuchtigkeitsgehaltes im Baustoff genutzt.

5.7.3 Multi-Ring-Elektroden

Mehrere übereinander angeordnete Edelstahlringe, die durch Kunststoffringe voneinander getrennt sind, bilden den Aufbau der Multi-Ring-Elektroden (Bild 39). Bei diesem indirekten Messverfahren wird die Betonfeuchte durch Ermittlung des Elektrolytwiderstandes im Beton bestimmt.

Der Baustoff Beton weist bezüglich seiner elektrischen Eigenschaften ein besonderes Verhalten auf, da er je nach Feuchtigkeitsgehalt ein Isolator oder ein guter elektrischer Leiter sein kann.

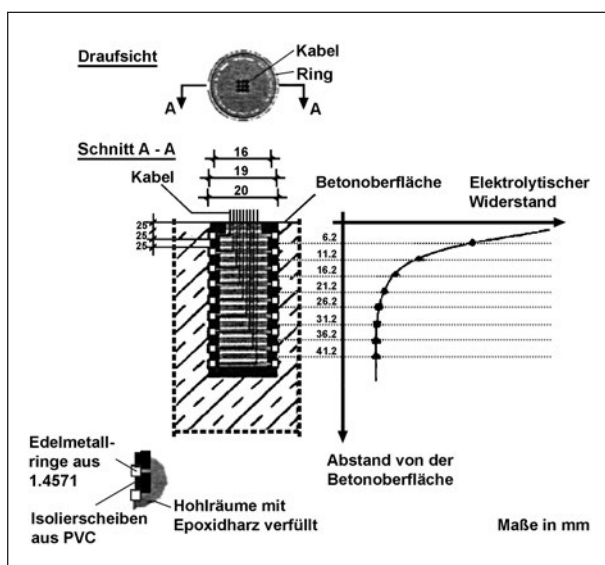


Bild 39: Schematische Darstellung der Multi-Ring-Elektrode (Quelle: Bestimmung der Feuchteverteilung in der Betonrandzone mit Multi-Ring-Elektroden, W. BREIT, M. RAUPACH)

Mithilfe einer Multi-Ring-Elektrode kann die Verteilung des elektrolytischen Widerstandes, die im Wesentlichen durch die Feuchteverteilung im Beton beeinflusst wird, in der Randzone bestimmt werden.

Die Multi-Ring-Elektroden werden so einbetoniert, dass sich der oberste Ring im Abstand einer Isolierschicht von der Betonoberfläche befindet. Zwischen jeweils zwei benachbarten Edelmetallringen können nun von außen die elektrolytischen Widerstände des Betons mit einem geeigneten Wechselstromwiderstandsmessgerät bestimmt werden, bis schließlich ein Widerstandsprofil vorliegt. Durch entsprechende Kalibrierung an Vergleichsbetonen kann vom elektrischen Widerstand auf die Betonfeuchte geschlossen werden.

5.7.4 Kapazitive Messungen

Dies ist ein Messverfahren, bei dem die Dielektrizitätskonstante des Baustoffes über das Hochfrequenzfeld eines Kondensators bestimmt wird. Es wird an zwei Elektroden, zwischen denen sich der Beton als Dielektrikum befindet, eine Spannung angelegt. Die Kapazität des sich ausbildenden Kondensators ändert sich mit steigender Betonfeuchte.

5.7.5 Mikrowellenmesstechnik

Das polare Molekül H_2O erfährt durch Mikrowellen eine Schwingungsanregung. Gemessen werden die

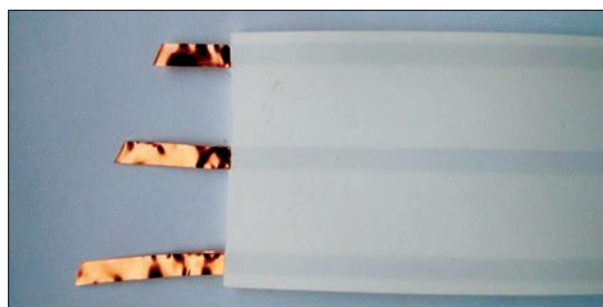


Bild 40: Beispiel für einen TDR-Wellenleiter

erzeugten dielektrischen Verluste, die den Wassermolekülen quantitativ zugeordnet werden können.

5.7.6 TDR-Sensor (Time domain reflectometry)

Die Zeitbereichsreflektometrie kann ebenfalls zur Messung der Materialfeuchte eines Stoffes dienen.

Durch Laufzeitmessungen eines elektrischen Signals kann der durchschnittliche Feuchtegehalt entlang eines Sensors ermittelt werden. Um den punktuellen Feuchtegehalt zu bestimmen, muss der Sensor angepasst, ein entsprechendes Rekonstruktionsverfahren verwendet und komplexe Algorithmen angewendet werden (Profilmessung).

Der für die Laufzeitmessung benutzte Wellenleiter wird in dem untersuchten Material als zwei- oder dreiadrigen Flachbandkabel in elektrisch leitfähigen Streifenleitungen oder Stäben platziert. Die Verbindung des Wellenleiters zum TDR-Messgerät (beinhaltet Impulsgenerator und Oszilloskop) erfolgt über ein Koaxialkabel.

Zum Start der Messung sendet der Impulsgenerator ein Impuls oder Spannungssprung durch das Koaxialkabel. Sobald der Impuls den Wellenleiter erreicht, erfolgt eine Teilreflexion des Signals. Dadurch kann der Beginn des Sensors ermittelt werden. Die Feuchtigkeit beeinflusst Ausbreitungsgeschwindigkeit des Impulses entscheidend. Die vollständige Reflexion des Impulses erfolgt am Sensorende. Über den Zeitbereich kann die Sprungantwort des Wellenleiters berechnet werden.

Durch das Oszilloskop wird eine TDR-Kurve sichtbar, die durch die verschiedenen Reflexionen entsteht. Durch die TDR-Kurve ist eine Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen möglich. Rückschlüsse auf die elektrische Leitfähigkeit und somit auf den gemittelten Feuchtegehalt lassen sich über das Vergleichen des ursprünglichen Impulses mit dem reflektierten Signal schließen.

6 Messtechnische Ermittlung erforderlicher Daten und rechnerische Ermittlung der Spannungszustände in der Fahrbahn

6.1 Messtechnische Erfassung wesentlicher für den Spannungszustand relevanter Daten

Wesentliche Daten, welche die Spannung im Plattenquerschnitt beeinflussen, sind nicht oder nur unzureichend bekannt. Dies betrifft insbesondere die Temperaturverteilung über den Querschnitt im Kontext zu den Klimadaten, den Materialkennwerten, der Nullspannungstemperatur und der Reibung zwischen Platte und Unterlage. Diese Daten sollten in mehreren Platten verschiedener Strecken messtechnisch erfasst werden.

6.1.1 Bewertung der bestehenden Messstelle an der A92 bei Freising

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Konzept und Ausführung eines Demonstrators für ein Messsystem zur künftigen Prognose kritischer Spannungszustände“ der Autobahndirektion Südbayern wurde 2014 an der Bundesautobahn A92 in der Nähe der Anschlussstelle Freising-Ost (Messstelle „A92 – Freising“) eine Messstation eingerichtet. Zusammen mit der Villaret Ingenieurgesellschaft wurden durch das Prüfamts für Verkehrswegebau der Technischen Universität München diverse Messsysteme im Betonfahrbahndeckensystem integriert. Entsprechend dem Forschungsvertrag wurde die Datenerhebung, -übermittlung und -auswertung Ende 2015 beendet.

Die bestehende Messstelle an der A92 bei der Anschlussstelle Freising-Ost wurde auf Grund der folgenden Faktoren im Rahmen des Forschungsvorhabens weiter verwendet und ausgebaut:

- Betonfahrbahndeckensystem

Das Betonfahrbahndeckensystem im Bereich der Anschlussstelle Freising-Ost zeigte sich weitestgehend im Originalzustand des Herstellungsjahres 1978. Die Betonfahrbahndecke wies eine Dicke von 22 cm auf. Eine Vielzahl der Schadensfälle an bayerischen Autobahnen des Jahres 2013 traten an 30 bis 40 Jahre alten Fahrbahndecken mit einer Dicke von 22 cm auf.

- Datenpool des Deutschen Wetterdienstes

Bedingt durch die unmittelbare Nähe zum Münchener Flughafen (Luftlinie 3 km) lagen somit auch für den Bereich um die Messstelle umfangreiche Daten des Deutschen Wetterdienstes vor, die zur Referenzierung und Plausibilitätsprüfung eigener Messsysteme herangezogen werden konnten.

- Bestehende digitale Infrastruktur

Zentrales Element der Messstation an der A92 war ein Fernabfragemodul, welches die Daten über GSM übermittelte. Die Energieversorgung wurde hierbei – autark jeglicher Stromversorgungsnetze – über eine Brennstoffzelle sowie ein Solarpanel sichergestellt.

- Erreichbarkeit durch Forschungsnehmer

Die Lage der Messstelle hatte den Vorteil, dass sie vom Forschungsnehmer schnell erreicht werden konnte. Dies war insbesondere bei technischen Problemen essentiell. Des Weiteren wurde die automatische Deformationsanalyse durch die Firma Leica Geosystems mit Sitz in München betreut.

- Brückenbauwerk in unmittelbarer Nähe

Ein weiterer Vorteil der Messstelle war die unmittelbare Nähe zu einem Überführungsbauwerk.

Ein Brückenbauwerk war Voraussetzung für die Verwendung einer Totalstation zur automatischen Deformationsanalyse. Am Brückenwiderlager wurde die Totalstation witterungsgeschützt unterhalb des Brückenüberbaus angeordnet.

6.1.2 Erweiterung der bestehenden Messstelle an der A92 bei Freising

Wie bereits in Kapitel 5.5 ausgeführt, ermöglicht eine automatisierte Deformationsanalyse die absoluten und relativen Bewegungen eines Bauwerkes kontinuierlich zu messen, in Echtzeit zu übertragen und mit einem vorab definierten Sollwert abzugleichen.

Im Zuge des Forschungsvorhabens ist an der bestehenden Messstelle an der BAB A 92 bei Freising eine Totalstation der Firma Leica Geosystems für einen Zeitraum von 3 Monaten installiert worden.

Die 3-monatige Testphase sollte die grundsätzliche Eignung der Totalstation und der Auswertetools hinsichtlich des Einsatzes an Bundesautobahnen kritisch hinterfragen. Hierbei sollten drei verschiedene

Anwendungsbereiche des Messsystems näher untersucht und bewertet werden:

- Anwendungsbereich 1
Erfassung von Verformungen einzelner Platten eines Betonfahrbahndeckensystems infolge Temperatureinwirkungen,
- Anwendungsbereich 2
Erfassung von Bewegungen eines definierten Betonfahrbahndeckenabschnittes,
- Anwendungsbereich 3
Erkennung von Hitzeschäden im Entstehen.

Funktionsweise der automatischen Deformationsanalyse

Zentrales Element der automatischen Deformationsanalyse ist eine Totalstation (elektronischer Tachymeter) mit eingebautem Scanmodul, in diesem Fall die Leica Nova MS 60 Multistation. Die maximale Reichweite des Scanners beträgt laut Herstellerangaben bis zu 500 m bei einer Messgenauigkeit von 0,6 mm. Dies bedeutet, dass beim Scanprozess eine dreidimensionale Punktwolke mit einem räumlichen Punktabstand von 0,6 mm entsteht.

Im Dezember 2015 wurden bei Leica Geosystems die Funktionalitäten der automatischen Deformationsanalyse im Rahmen eines Modellversuches näher erläutert. Als Messfläche dienten Tischoberflächen, die in diesem Fall ein nachgestelltes Betonfahrbahndeckensystem aus 4 Einzelplatten darstellten (Bild 41). Die Multistation, wurde in einem Abstand von ca. 5 m zur Messfläche aufgestellt.

Zunächst wurde ein Nullscan (Nullmessung) der Fugenbereiche und des zentralen Fugenkreuzes durchgeführt. Parallel hierzu wurde die absolute Lage der Fahrbahnplatten durch drei zusätzliche Referenzpunkte (Reflektorprismen) eingemessen.

In Bild 41 ist eine starke vertikale Auslenkung des zentralen Fugenkreuzes dargestellt. Bild 42 zeigt bereits einen ersten Screenshot der Auswertesoftware. Hier ist ein Foto des vordefinierten gescannten Bereiches dargestellt, welcher mit einer 3D-Punktwolke überlagert wurde. Durch die Farbgebung der Punktwolke kann bereits der Betrag der vertikalen Auslenkung abgelesen werden. Grün eingefärbt sind die Bereiche, die dem Nullscan entsprechen.

In einem weiteren Schritt analysiert die Auswertesoftware das Ergebnis des Scans. Da die zu scannenden Bereiche vorab definiert werden, ist es möglich, die einzelnen 3D-Punktwolken übereinander zu legen und somit die Abweichung zu detektieren. Im simulierten Fall wurde ein zulässiger Abwei-



Bild 41: Erste Versuchsreihe mit Tischoberflächen



Bild 42: Screenshot der Auswertesoftware, Überlagerung eines Fotos des Scanbereiches mit einer 3D-Punktwolke

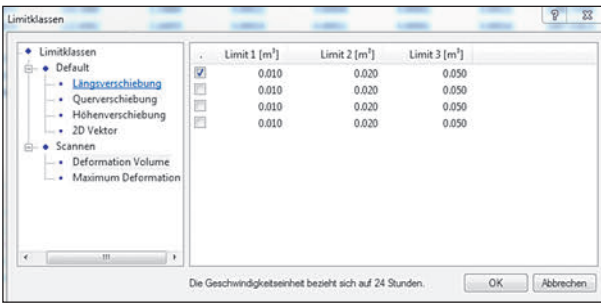


Bild 43: Screenshot der Auswertesoftware, Definition der Grenzen

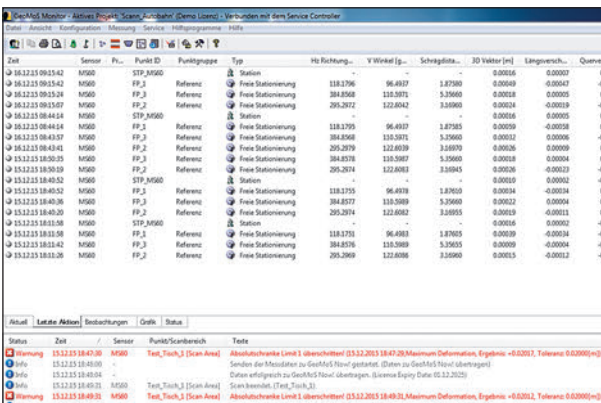


Bild 44: Screenshot der Auswertesoftware, Das Überschreiten der vorab definierten Grenzen erfolgt über eine Alarmmeldung (rote Textzeilen)

chungsbereich bis 1,0 cm definiert, siehe Bild 43. Additiv wurden zwei weitere Grenzen „2 cm“ und „5 cm“ eingerichtet, um die Alarmgrenzen zusätzlich zu intensivieren.

Anzumerken ist hierbei, dass im Rahmen der ersten Vorversuche der Verwendungszweck 3 (Prognose-system bei auftretenden Hitzeschäden) im Fokus stand.

Für den in Bild 41 dargestellten Bereich benötigte die Multistation weniger als eine Minute für den Scanvorgang. Die Wiederholungsrate, d. h. die Häufigkeit der Messungen, konnte frei definiert und beispielsweise über ein Smartphone jederzeit auch im laufenden Betrieb verändert werden.

Um Fehlmessungen und dadurch induzierte Fehlalarme weitestgehend auszuschließend, scannte die Multistation einen als kritisch detektierten Bereich mehrfach. Erst nach mehrmaligem Überschreiten der definierten Grenzbereiche erfolgte eine Alarmmeldung. Im Anwendungsfall Bundesautobahn sicherte dieses zusätzliche Sicherheitsmodul, dass z. B. ein während der Messung durchfahrendes Fahrzeug keinen Alarm auslöst.

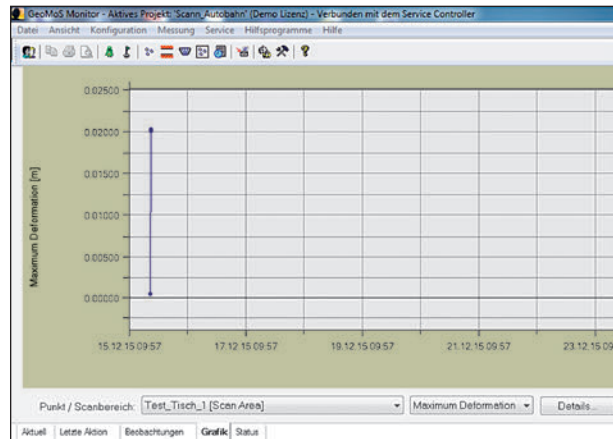


Bild 45: Screenshot einer nachgeordneten Software zur grafischen Darstellung der Messergebnisse

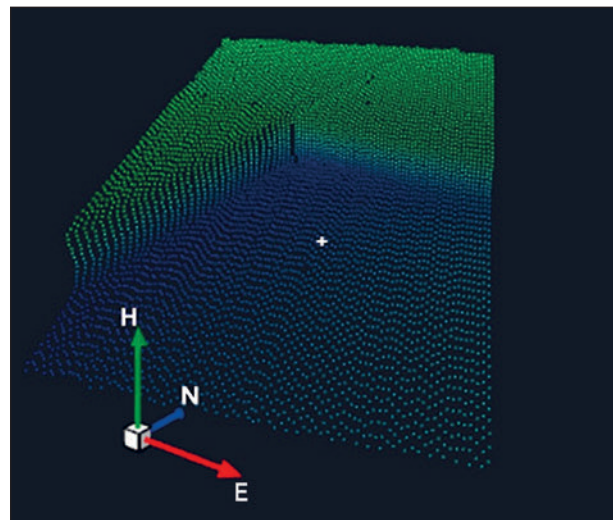


Bild 46: Screenshot aus AutoCAD 2016, Integration der 3D-Punktwolke

Nachgeordnet konnten die erhaltenen Ergebnisse in zusätzlichen Programmen grafisch aufgearbeitet werden (Bild 45). Ebenso bestand die Möglichkeit, die erhaltenen Ergebnisse in einem CAD-Programm darzustellen (Bild 46).

Mögliche Erkenntnisse und Nutzen der automatischen Deformationsanalyse

Wie bereits ausgeführt wurde, sollten im Rahmen der 3-monatigen Erprobungsphase drei verschiedene Anwendungsbereiche bei Betonfahrbahn-deckensystemen näher untersucht und bewertet werden.

Im Hinblick auf das Forschungsziel wurde zunächst überprüft, ob durch automatische Deformations-analysen Verformungen von einzelnen Platten eines Betonfahrbahndeckensystems infolge Tempe-

atureinwirkungen berührungslos detektiert werden können (Anwendungsbereich 1). Der Fokus liegt hierbei auf der Aufwölbung der Einzelplattenmitte infolge ungleichmäßiger Erwärmung. Anhand der erhaltenen Verformungswerte konnten Aussagen hinsichtlich maßgeblicher Beanspruchungszustände bei Schadensfällen infolge hoher Temperatur getroffen werden. So zeigte die Auswertung der Hitzeschäden an bayerischen Autobahnen im Sommer 2013, dass den Schadensfällen eine Wetterperiode mit kühlen Temperaturen und hohen Niederschlagsmengen vorausging. Eine Überlagerung der Beanspruchungen infolge gleichmäßiger und ungleichmäßiger Erwärmung wurde seinerzeit als mögliche Schadensursache genannt.

Der zweite Anwendungsbereich sah das Monitoring eines zusammenhängenden Betonfahrbahndeckenabschnittes (ca. 50 m Länge) vor. Durch dieses Monitoring sollten Erkenntnisse hinsichtlich der Bewegung eines definierten Abschnittes gewonnen werden. Eine mögliche Erkenntnis hieraus sind Informationen über inaktive Fugen (Paketreißen), die bei solitärer Betrachtung einer Querscheinfuge nicht detektiert werden können. Additiv zu den Induktivwegaufnehmern an den Flanken der Betonfahrbahndecke im Querscheinfugenbereich sollte das Monitoring eine Verifizierung der Nullspannungstemperatur ermöglichen.

Der dritte Anwendungsbereich sollte das Monitoring eines längeren Betonfahrbahndeckenabschnittes (ca. 250 m Länge) beinhalten, um mögliche Hitzeschäden in diesem Bereich bereits in der Entstehung (Stufenbildung, Oberbetonabplatzungen) zu erkennen und notwendige Gegenmaßnahmen wie z. B. Geschwindigkeitsreduzierung oder Sperren rechtzeitig einleiten zu können.

Versuchsaufbau der automatischen Deformationsanalyse

Die Multistation wurde unterhalb des Überführungsbauwerkes am Brückenwiderlager installiert. Die Energieversorgung wurde hierbei zwischen dem Messschrank (Brennstoffzelle und Solarpanel) und der Multistation per Kabel hergestellt. Die Installation an einem Brückenwiderlager war erforderlich, um eine Entkoppelung zwischen der Betonfahrbahndecke und der Multistation zu gewährleisten und um eine verformungsarme Basis für das Messgerät sicherzustellen.



Bild 47: Am Widerlager montierte Multistation

Bild 47 zeigt die am Widerlager montierte Multistation MS 60 der Firma Leica Geosystems zur automatischen Deformationsanalyse der Fahrbahn.

Zur absoluten Geokodierung benötigt die Multistation drei Referenzpunkte (Festpunkte FP). Diese wurden in Fahrtrichtung gelegen nach dem Brückenbauwerk angeordnet. Zusätzlich wurde ein weiterer Festpunkt am Schrank für die autarke Stromversorgung errichtet.

An die Multistation wurde eine Kommunikationseinheit (hier: ComBox Custom mini) angeschlossen. Die Kommunikationseinheit beinhaltet einen Mobilfunksensor und mehrere Meteosensoren. Die Meteosensoren haben kontinuierlich die Lufttemperatur, den Luftdruck sowie die Luftfeuchte gemessen und waren für eine Kalibrierung der Multistation erforderlich.

Per Internet (mobiler Datenfunk) wurden die Messwerte kontinuierlich in Echtzeit an einen Computer übertragen. Die eigentliche Auswertung erfolgte über einen Rechner mit entsprechender Auswertesoftware (hier: GeoMoS). Die ausgewerteten Daten konnten über ein Web-Portal eingesehen werden.

Optional bestand die Möglichkeit, die ausgewerteten Daten – z. B. die Alarmmeldung – in Echtzeit auf ein Mobilgerät zu übertragen (z. B. Smartphone).

Zur Verifizierung des Anwendungsbereiches 1 wurden in unmittelbarer Nähe zur Multistation einzelne Querscheinfugenkreuze benachbarter Fahrbahnplatten gescannt, siehe Bild 48. Durch die geringe Distanz zur Multistation konnte die Messgenauigkeiten deutlich erhöht werden. Insgesamt sind vier Scanbereiche mit den Abmessungen 200 x 200 mm definiert worden.

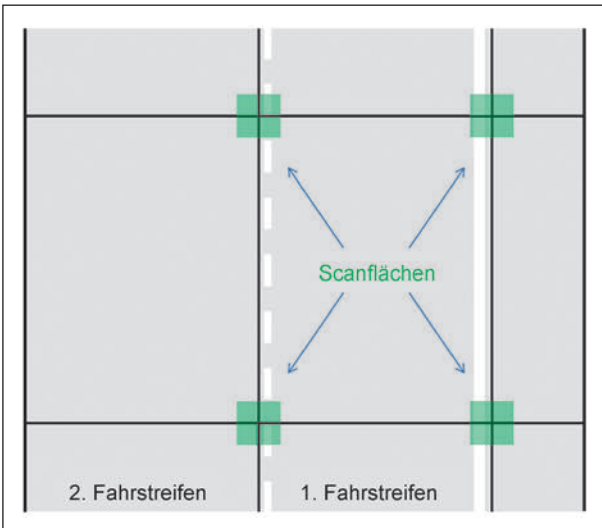


Bild 48: Schematische Darstellung der Scanbereiche zur Verifizierung des Anwendungsbereiches 1 und 2; die zu scannenden Bereiche sind grün dargestellt (eigene Darstellung)

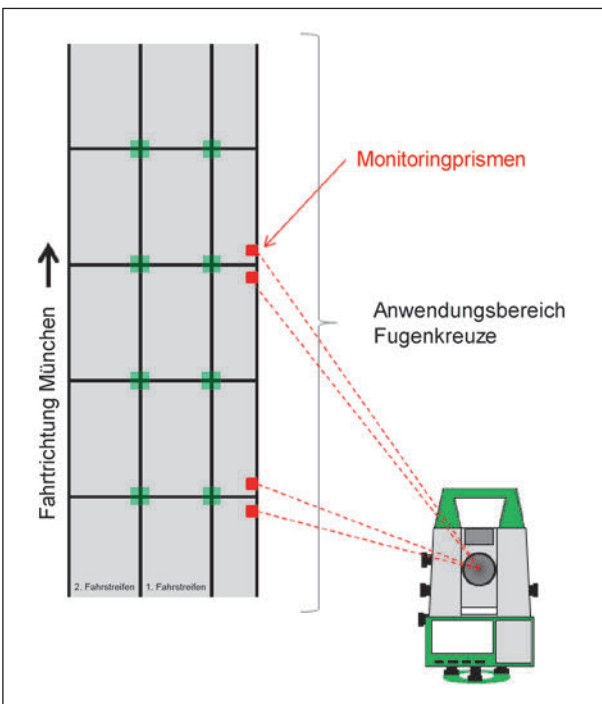


Bild 49: Schematische Darstellung der Scanbereiche zur Verifizierung des Anwendungsbereiches 2; die zu scannenden Bereiche sind grün dargestellt; die Monitoringprismen sind rot dargestellt (eigene Darstellung)

Für den Anwendungsbereich 1 war eine sehr hohe Detaillierung der 3D-Punktwolke erforderlich, um die sehr kleinen Verformungen der Fugenränder der einzelnen Fahrbahnplatten detektieren zu können. Die Messungen erfolgten nur in Fahrtrichtung, um eine Beeinträchtigung oder Gefährdung der Verkehrsteilnehmer durch den zum Scannen verwendeten Laser gänzlich auszuschließen.

Für den Anwendungsbereich 2 wurde der zu überwachende Abschnitt auf eine Länge von ca. 50 m vergrößert. Hierzu wurden 14 Scanbereiche mit den Abmessungen 200 x 200 mm definiert (Bild 49).

Es wurden zudem an einer Querscheinfuge zwischen zwei Betonfahrbahnplatten des Seitenstreifens zwei Monitoringprismen installiert. Durch die Anordnung dieser beiden Monitoringprismen war es möglich, die horizontalen und vertikalen Plattenbewegungen an der Oberfläche der Querscheinfuge genauer zu erfassen und zu überwachen. Diese Prismen gewährleisteten eine weitaus höhere Genauigkeit (Bild 50).

Der dritte Anwendungsfall – die Früherkennung von Hitzeschäden – benötigte eine weitaus geringere 3D-Punktwolkendichte als die anderen Anwendungsfälle. Vorgesehen war, einen ca. 250 m langen Abschnitt in Teilflächen hinter dem Brückenbauwerk zu scannen. Monitoringprismen waren hierzu nicht vorgesehen.

Zur Erprobung der beiden Anwendungsfälle 1 und 2 wurden die Scanflächen gemäß Bild 51 angeordnet.



Bild 50: Auf der Fahrbahn montierte Monitoringprismen

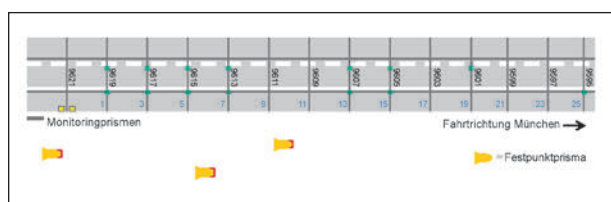


Bild 51: Übersicht der Scanflächen in der Erprobungsphase für Anwendungsfall 1 & 2

Anfangs wurde ein Nullscan“(Nullmessung) der Fugenbereiche durchgeführt und die absolute Lage der Fahrbahnplatten durch die drei zusätzlichen Referenzpunkte (Reflektorprismen) eingemessen.

Nach erfolgreicher Erprobung der Anwendungsfälle 1 und 2 sollten die Scanflächen auf den oben genannten 3. Anwendungsfall erweitert werden.

Die von der Multistation erfassten Daten wurden über eine LAN-Verbindung an einen Rechner übermittelt. Dort wurden die ankommenden Daten in einem Programm mit dem Namen GeoMoS mit definierten Sollwerten automatisch verglichen und bei Bedarf wurde eine Warnmeldung angezeigt. Die Ergebnisse dieser Auswertung konnten in Echtzeit in einem dafür eingerichteten Web-Portal (Bild 52 und Bild 53) eingesehen werden.

In Bild 53 wird die Benutzeroberfläche des Web-Portals dargestellt. Dort sind zum einen unterschiedliche Grafiken der automatisierten Deformationsanalyse, wie z. B. horizontale und vertikale Plattenbewegungen, mit entsprechend farbig hinterlegten Warnstufen (Bild 54), aber auch Bilder der definierten Scanflächen (Bild 55) sichtbar.

Aber auch eine Anbindung und Darstellung eigener Sensoren, die bei der Datenaufzeichnung ein csv-Datenformat haben müssen, war möglich.



Bild 52: Startseite des Web-Portals



Bild 53: Benutzeroberfläche des Web-Portals

Die Anbindung einer Web-Cam oder einer Kamera des Verkehrsleitsystems (Bild 56) war in diesem Portal ebenfalls möglich.

Das Anbinden und Darstellen von Wetterdaten einer eigenen oder einer DWD-Wetterstation konnte genauso erfolgen.

Eine Übersicht der Messstelle mit allen Festpunkten und Prismen sowie der definierten Scanflächen

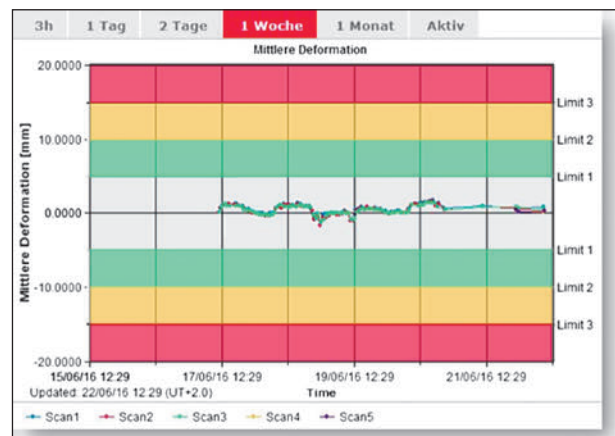


Bild 54: Beispielhafte Anzeige der automatisierten Deformationsanalyse mit Warnstufen

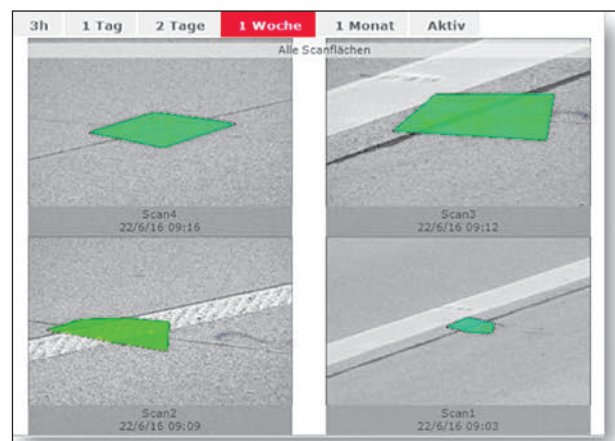


Bild 55: Anzeige der definierten Scanflächen



Bild 56: Anbindung einer Kamera in das Web-Portal

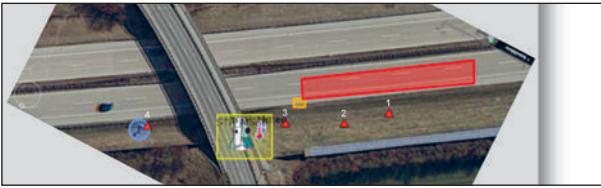


Bild 57: Übersicht der Messstelle im Web-Portal

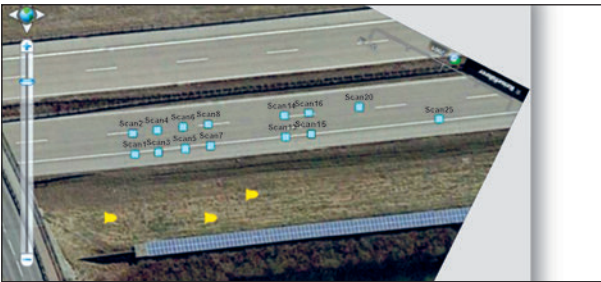


Bild 58: Übersicht der Scanflächen im Web-Portal

konnte im Web-Portal erzeugt und hinterlegt werden (Bild 57 und Bild 58).

Ergebnisse der Testmessungen zur automatisierten Deformationsanalyse

Um die Eignung eines Laserscannersystems zur automatisierten Deformationsanalyse und Überwachung der Fahrbahnoberfläche zu testen, wurde eine Multistation MS60 (eine Kombination aus Laserscanner und Tachymeter) der Firma Leica Geosystems an einem Brückenwiderlager in etwa 5 m Höhe an der BAB A92 bei Freising Ost montiert. Das Gerät wurde dem Prüfamt für Verkehrswegebau der Technischen Universität München für den Zeitraum von ca. drei Monaten von der Firma Leica Geosystems im Rahmen des Forschungsprojekts kurzfristig zur Verfügung gestellt.

Von den in Kapitel 6.1.2 genannten drei Anwendungsbereichen des Messsystems konnten Anwendungsbereich 1, das Erfassung von Verformungen einzelner Platten eines Betonfahrbahndeckensystems infolge Temperatureinwirkungen, und Anwendungsbereich 2, Erfassung von Bewegungen eines definierten Betonfahrbahndeckenabschnittes, im Zuge der Testphase untersucht werden.

Der Anwendungsbereich 3, Erkennung von Hitze-schäden im Entstehen, konnte aufgrund der kurz vor Inbetriebnahme der automatisierten Deformationsanalyse durchgeführten Maßnahmen zur Entspannung der Fahrbahn bei hohen Temperaturen (Herstellung von Asphaltentlastungstreifen) nicht durchgeführt werden.

Während der dreimonatigen Testphase traten verschiedene Probleme mit der Hardware und vor allem der Anbindung der Multistation MS60 und der Meteosensoren an die vorhandene Stromversorgung der Messstelle (Gleichstrom, 12 V) auf. Entgegen der ursprünglichen Aussagen des Herstellers, konnte ein Dauerbetrieb der Multistation nur mit 230 V Wechselstrom durchgeführt werden. Hierfür musste erst ein Stromwandler in das System integriert werden und mehrfach einige grundlegende Einstellungen am System und den Sensoren vor Ort, über einen längeren Zeitraum hinweg, vorgenommen werden. Ohne die korrekte Anbindung der Meteosensoren konnten klimatisch bedingte Kippachsenfehler der Multistation MS60 nicht zuverlässig korrigiert werden, was zu erheblichen Messfehlern führte.

Durch bodennahen Bewuchs wurde anfangs auch die Sichtlinien zwischen den Prismen der Referenzpunkte und der Multistation blockiert. Dies konnte durch regelmäßige Mäharbeiten im Bereich der Messstelle behoben werden.

Als Folge der oben genannten Probleme und deren Behebung verkürzte sich der Zeitraum zur Durchführung aussagekräftiger und dauerhafter Messungen unter den gegebenen Randbedingungen, wie unterschiedliche Witterung und Verkehr, auf etwa vier Wochen.

In der dreimonatigen Testphase sollte festgestellt werden, ob die Totalstation und die Auswertetools grundsätzlich für den Einsatz an Bundesautobahnen geeignet sind. Die Messdaten waren während dieser Zeit über ein Web-Portal in Echtzeit einsehbar.

Die durchgeführten Analysen der Messdaten zeigten, dass das System Messungen unter den gegebenen Randbedingungen (Verkehr und unterschiedliche Witterung) durchführen kann. Es wurden relative Fugenbewegungen in vertikaler und in horizontaler Richtung durch Spanmaßkontrolle zwischen jeweils zwei auf der Oberfläche, am Rand der Betonfahrbahnplatten, montierten Monitoringprismen gemessen. Diese Prismen haben eine Höhe von etwa drei Zentimetern und können gelegentlich, z. B. im Pannenfalle, von einem Fahrzeuggrad überrollt werden.

Bild 59 bis Bild 62 zeigen die relative horizontale und vertikale Fugenbewegung im etwa vierwöchigen Messzeitraum (Mitte Juli bis Mitte August 2016) sowie im Zeitraum 10.08.2016 bis 17.08.2016 in detaillierterer Darstellung.

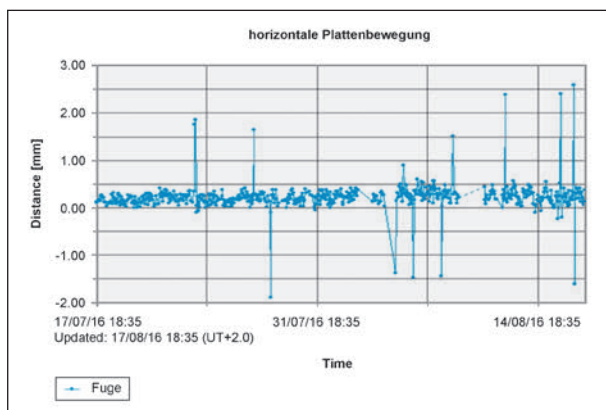


Bild 59: Relative Fugenbewegung horizontal, Mitte Juli bis Mitte August 2016

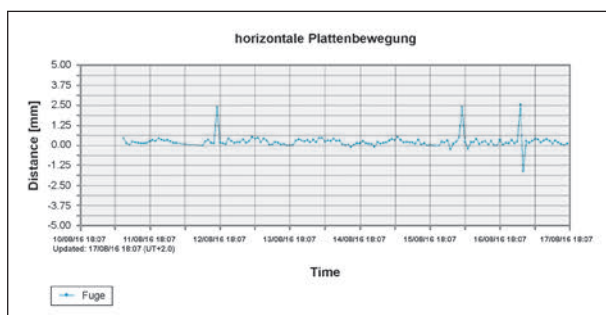


Bild 60: Relative Fugenbewegung horizontal, 10.08.2016 bis 17.08.2016

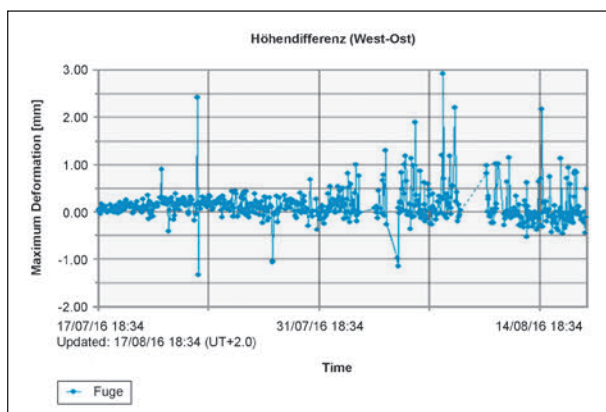


Bild 61: Relative Fugenbewegung vertikal, Mitte Juli bis Mitte August 2016

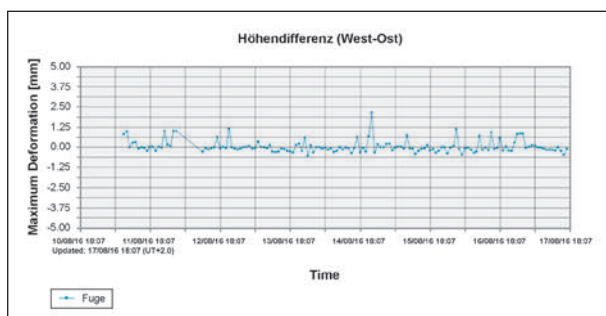


Bild 62: Relative Fugenbewegung vertikal, 10.08.2016 bis 17.08.2016

Die Auswertung der Messungen mit Monitoringprismen an den Querscheinfugen lieferten relativ genaue Ergebnisse. Die Messwerte der relativen Verformung der Plattenränder liegen in horizontaler Richtung zwischen $-0,3$ mm und $+0,7$ mm und in vertikaler Richtung zwischen $-0,5$ mm und $1,2$ mm. Es wurden jedoch vereinzelte Ausreißer mit einer relativen Verformung von fast 3 mm aufgezeichnet, die auch nach Rücksprache mit dem Hersteller des Messgeräts nicht erklärbar waren.

Eine dauerhafte Umsetzung der Messanordnung, mit auf der Fahrbahn fest verbauten Prismen, ist in Bezug auf den Winterdienst aber nochmals zu überdenken, da Räumfahrzeuge eventuell eine Beschädigung oder ein Abscheren der Prismen durch den Pflug verursachen könnten. Hier wäre eine Lösung mit demontierbaren Prismen denkbar. Die Prismen müssten dann im zu überwachenden Abschnitt im Herbst vor dem ersten Schneefall demontiert und in Frühjahr vor der ersten Hitzeperiode wieder am Rand der Fahrbahn montiert werden. Nach der Prismenmontage im Frühjahr musste allerdings eine erneute Kalibrierung der Messanordnung durch einen Techniker erfolgen, da sich minimale Verschiebungen der Messachsen bei der erneuten Anordnung der Prismen ergeben können. Nur so können dauerhaft vergleichbare Messwerte über mehrere Jahre hinweg erzeugt werden. Bei der Durchführung der Messungen ist auf stetiges Grasmähen und Freihalten der Sichtachsen zwischen Tachymeter und Prisma zu achten, um einen störungsfreien Messbetrieb zu gewährleisten.

Neben den reflektorgebundenen Messungen wurden auch reflektorlose Messungen durchgeführt. Dabei wurde eine auf der Oberfläche der Fahrbahn definierte Scanfläche (siehe Bild 63) durch einen hochfrequenten Laserstrahl abgetastet und die dabei entstehende Punktwolke (siehe Bild 64) mit der anfangs gespeicherten Nullmessung verglichen. Die dabei detektierten Verschiebungen werden anschließend in einer Grafik (siehe Bild 65 bis Bild 69) ausgegeben.

In Bild 65 bis Bild 69 sind die maximalen Deformationen der Scanflächen über den Messzeitraum aufgetragen.

Die Bilder (diese sind in Anlage 1 in vergrößerter Darstellung zu sehen) zeigen, dass die maximal detektierte Deformation der Plattenränder mit Zunahme der Messdistanz zwischen Gerät und Scanfläche größer wird. Bei einer Messdistanz von 30 m

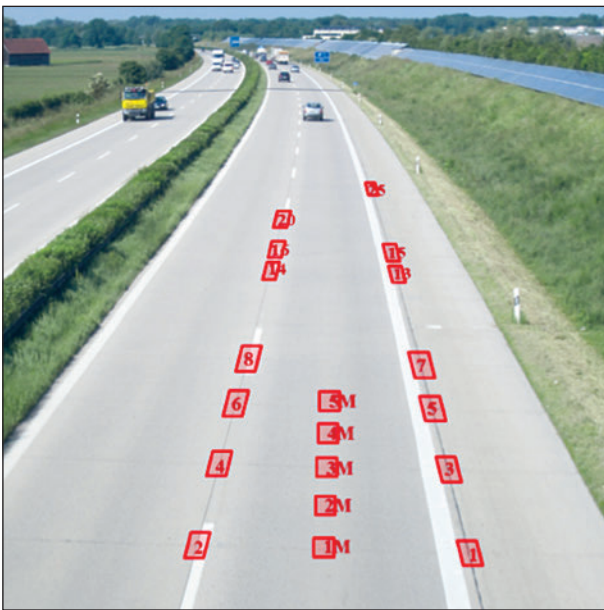


Bild 63: Scanflächen auf der Betonfahrbahn im Bereich 35 m bis 70 m

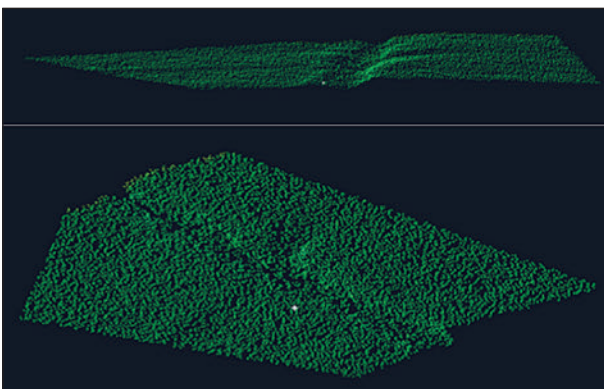


Bild 64: Beispielhafte Darstellung von Punktwolken am Fugenkrenz

liegt die max. Deformation im Mittel im etwa bei ± 3 mm. Bei einer Messdistanz von 65 m beträgt diese im Mittel bereits mehrere Zentimeter. Vereinzelt treten auch Ausreißer mit einer gemessenen max. Deformation des Plattenrandes von bis zu 15 cm auf. Die Größenordnung dieser Messwerte liegt weit über den real zu erwartenden Werten einer Deformation der Plattenränder.

Die Genauigkeit der reflektorlosen Messungen ist stark von der jeweiligen Witterung sowie Oberflächenstruktur und -zustand abhängig. Es zeigte sich, dass Niederschlagsereignisse eine starke Abweichung der Genauigkeiten ergaben, da der dünne Wasserfilm auf der Fahrbahnoberfläche das Reflexionsverhalten beeinflusst. Dieser Sachverhalt wurde zur Veranschaulichung in Bild 70 nochmals dargestellt.

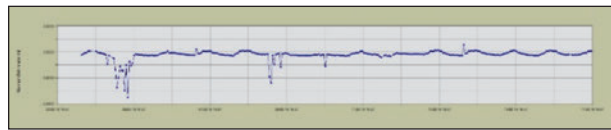


Bild 65: Max. Deformation der Scanfläche, Messdistanz 30 m

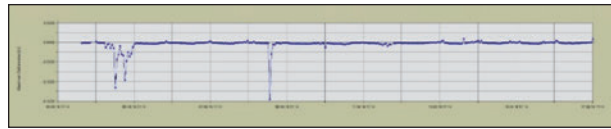


Bild 66: Max. Deformation der Scanfläche, Messdistanz 35 m

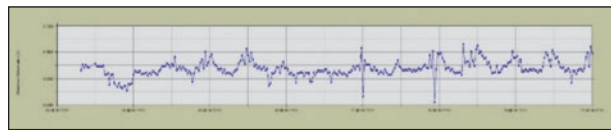


Bild 67: Max. Deformation der Scanfläche, Messdistanz 40 m

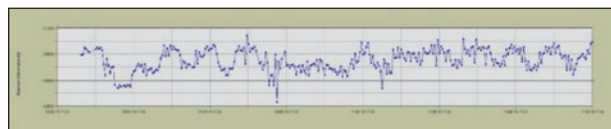


Bild 68: Max. Deformation der Scanfläche, Messdistanz 45 m

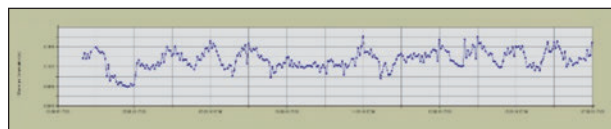


Bild 69: Max. Deformation der Scanfläche, Messdistanz 65 m

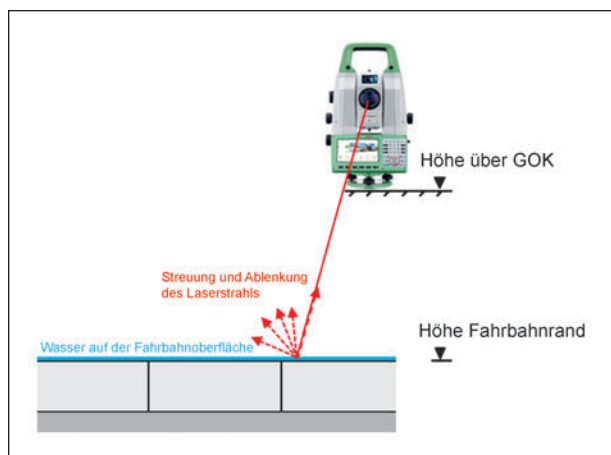


Bild 70: Streuung des Laserstrahls z. B. durch Wasser auf der Fahrbahnoberfläche

Die Montagehöhe der Multistation und damit der gewählte Einfallwinkel des Lasers auf die Fahrbahn haben ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf die Messergebnisse. Besonders bei größere Distanzen ist dies entscheidend (siehe Bild 71).

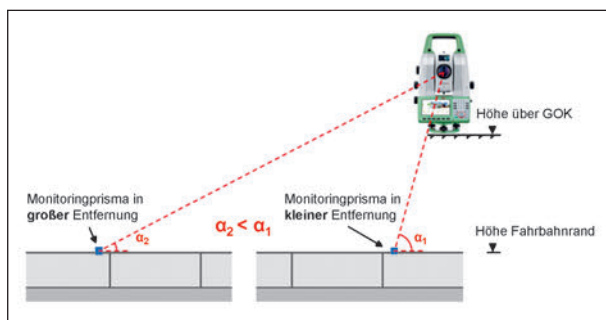


Bild 71: Veränderung des Lasereinfallswinkels auf die Fahrbahnoberfläche



Bild 72: Scannende Prüfverfahren (v.l. Ultraschall, Radar und Impact-Echo)

Die Auswertung der reflektorlosen Messungen hat gezeigt, dass die Genauigkeit der Ergebnisse, für den bisher angedachten Anwendungsfall, derzeit noch außerhalb der brauchbaren Toleranzen liegt. Die Messungen sind stark vom jeweiligen Oberflächenzustand und der Witterung abhängig. Aufgrund der für diesen Anwendungsfall nötigen Scangeschwindigkeit, um an den festgelegten Scanflächen Punktwolken mit ausreichender Auflösung zu erhalten, war während der Testphase nur eine Überwachung eines Streckenabschnitts von 70 m realisierbar.

Anlegen eines neuen Bohrlochs mit Dehnmessstreifen zur indirekten Spannungsermittlung

Das Nachbarinstitut Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München hat im Vorfeld der Erweiterung der Messstelle an der BAB A92 bei Freising Ost sondierende Messungen entlang der Querscheinfugen des Standstreifens und des ersten Fahrstreifens im Bereich der alten Messstelle im Rahmen des BAST Forschungsvorhabens [FE 08. 238/2015/CRB] „Scannendes Prüfgerät zur Detektion von Delaminationen in Betonfahrbahndecken“ durchgeführt.

Mit unterschiedlichen zerstörungsfreien Messmethoden wie Ultraschall, Radar und einem Impact-Echo-System (Bild 72) wurde im Bereich der Querscheinfugen nach horizontalen Delaminationen in der Betonfahrbahndecke gesucht.



Bild 73: Horizontalschnitt im Bereich der Querscheinfuge

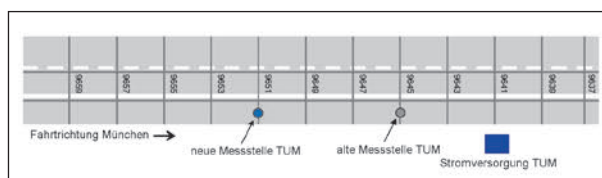


Bild 74: Lage der Bohrlochmessstellen

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigten, dass im Bereich des Standstreifens an beinahe allen Querscheinfugen horizontale Risse in einer Tiefe von ca. 7 cm in Richtung Plattenmitte verlaufen (Bild 73).

Einzig die Querscheinfuge an der Plattennummer 9651 konnte als rissfrei detektiert werden. In vorangegangenen Untersuchungen an der alten Messstelle wurden die Ergebnisse der indirekten Spannungsmessung mittels Dehnmessstreifen durch den im Bohrloch vorhandenen Horizontalschnitt stark gestört. Daher wurde das neue mit Messtechnik instrumentierte Bohrloch an genau der oben genannten rissfreien Querscheinfuge gemäß der alten Anordnung angelegt (Bild 74).

Die Erweiterung der Messstelle erfolgte Ende April 2016. Nach Herstellung des Bohrlochs wurden Dehnmessstreifen in horizontaler und vertikaler Richtung gemäß der Anordnung in Kapitel 6.2 an die Bohrlochwandung geklebt (Bild 75 und Bild 76).

Nach Fertigstellung des Einbaus der Dehnmessstreifen wurde das Bohrloch zur Sicherung der verbauten Messtechnik und zur Wiederherstellung der Verkehrssicherheit durch eine demontierbare und befahrbare Abdeckung verschlossen und gegen eindringendes Wasser abgedichtet (Bild 77).

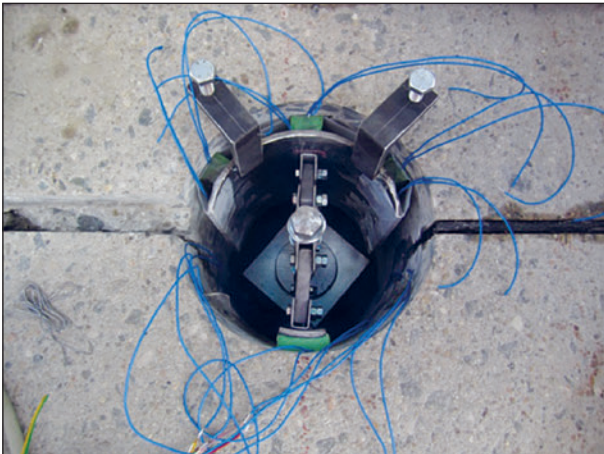


Bild 75: Kleben der Dehnmessstreifen im Bohrloch

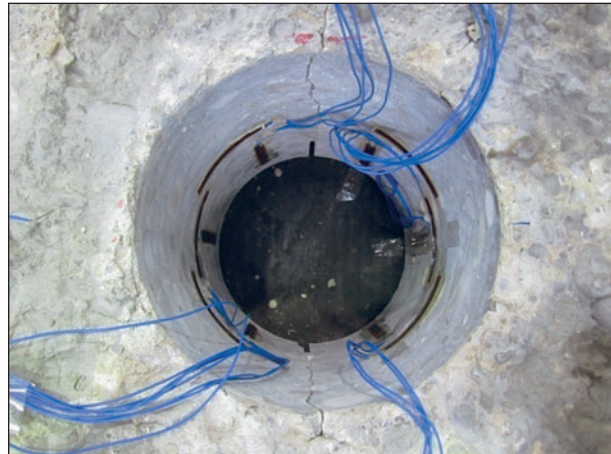


Bild 78: Dehnmessstreifen im Bohrloch eines Modells (Originalmaßstab), vorhergehendes Forschungsvorhaben

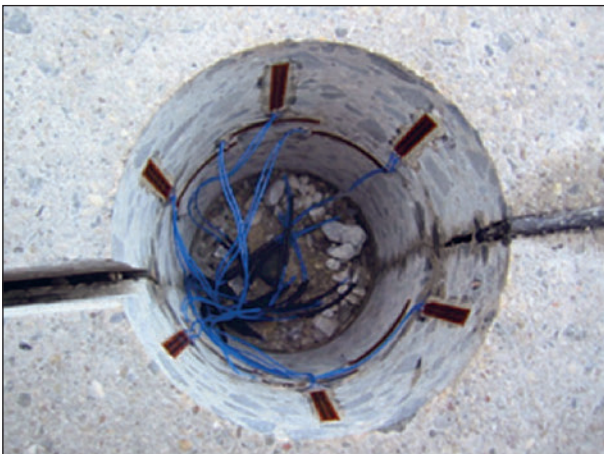


Bild 76: Mit Dehnmessstreifen instrumentiertes Bohrloch



Bild 79: Modell des Fugenbereiches im Prüfstand (Originalmaßstab), vorhergehendes Forschungsvorhaben



Bild 77: Demontierbarer und befahrbarer Bohrlochverschluss

6.2 Experimentelle Spannungsermittlung zur Verifizierung des Berechnungsmodells

6.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Die im Fugenbereich des Betonfahrbahndeckensystem angebrachten Dehnmessstreifen boten die Möglichkeit, die Beanspruchungen (Längsdruck- und Querspannungen) im Beton indirekt über

die detektierten Stauchungen und Dehnungen zu bestimmen.

Zur widerspruchsfreieren Deutung der in-situ erhaltenen Messwerte war eine additive Kalibrierung erforderlich. Hierzu wurde ein Modell des Fugenbereiches im Originalmaßstab in einem Prüfstand unter gesteuerten und reproduzierbaren Bedingungen beansprucht. Die Anordnung der Dehnmessstreifen entsprach hierbei der im realen Fahrbahndeckensystem (Bild 78).

Essentiell für die Kalibrierung der in-situ – Messungen waren die Abmessungen und die betontechnologischen Eigenschaften des Modells. Im Zuge der Aufarbeitung der Hitzeschäden des Jahres 2013 wurde deutlich, dass sich die betontechnologischen Eigenschaften der seit mehr als 25 Jahren unter Verkehr befindlichen Betonfahrbahndeckensysteme signifikant von denen eines neuen Fahrbahnbetons unterscheiden. Zu nennen ist an dieser Stel-

le der um teilweise mehr als 50 % höhere Elastizitätsmodul und der um nahezu 30 % höhere Wärmeausdehnungskoeffizient.

Zu Beginn der Forschungstätigkeiten wurde angedacht, ein Modell im Originalmaßstab mit neuem Fahrbahndeckenbeton herzustellen. Der Vorteil hierbei wäre durch die einfachere Implementierung von Messinstrumenten (z. B. Ultraschall-Sensoren) gewesen, die dann kraftschlüssig mit dem umhüllenden Beton verbunden wären. Der klare – und letztendlich entscheidende – Nachteil ist die komplexe Gewährleistung bestimmter Materialkennwerte des Festbetons. Sofern nicht nahezu die identischen Werte wie beim realen Betonfahrbahndeckensystem erreicht werden, ist eine Kalibrierung und letztendlich Verifikation äußerst schwierig.

Die Abmessungen (Dicke Ober- und Unterbeton) und die Materialkennwerte des Probekörpers waren bei den Kalibrierungsversuchen im Prüfstand zwingend an die Verhältnisse in-situ anzugleichen. Zur Gewährleistung dieser Verhältnismäßigkeit waren zwei verschiedene Optionen denkbar.

1. Verwendung einer Teilfahrbahnplatte der A3 mit einer Gesamtdicke von 22 cm (6 cm Ober- und 16 cm Unterbeton); dieser und andere Probekörper wurde im Rahmen der Sanierung eines Hitzeschadens im Jahr 2013 entnommen und lagert im Prüfamts für Verkehrswegebau der TU München.

2. Entnahme einer Teilfahrbahnplatte aus der A92 in unmittelbarer Nähe zum Messfeld.

Bei Verwendung einer Teilfahrbahnplatte aus der A92 konnte eine höchstmögliche Genauigkeit bei der Kalibrierung erreicht werden.

Am 13.04.2016 wurden im Zugesein des Prüfamtes für Verkehrswegebau der Technischen Universität München drei Plattensegmente mit den Abmessungen 1,50 m x 1,50 m aus der südlichen Richtungsfahrbahn der Bundesautobahn A92 östlich der Anschlussstelle Freising-Ost (Fahrtrichtung Deggendorf) entnommen (Bild 80 und Bild 81). Die Betonfahrbahndeckendicke betrug in diesem Bereich 22 bis 24 cm. Die bereits existierende Messstelle „A 92 Freising“ befindet sich westlich der Anschlussstelle Freising-Ost (Fahrtrichtung München) in einer Entfernung von ca. 2 km. Beide Richtungsfahrbahnen der A 92 wurden zwischen April und Juni 1978 hergestellt und sind heute 40 Jahre unter Verkehr. Die Fahrbahndeckendicke ist bei beiden



Bild 80: Entnahme der Plattensegmente für die Kalibrierungsversuche



Bild 81: Entnahme der Plattensegmente für die Kalibrierungsversuche

Stellen – Messstelle „A92 Freising“ und Plattenentnahmestelle – identisch. Auf Grund der eben bezeichneten Randbedingungen kann von ähnlichen betontechnologischen Parametern ausgegangen werden.

Die Plattensegmente wurden mit einem Schneidegerät vom verbleibenden Betonfahrbahndeckensystem getrennt und mit einem Vakuumhebergerät einzeln entnommen. Hierdurch konnten schädigende Einflüsse auf die Probekörper weitestgehend vermieden werden.

Anschließend wurden die Plattensegmente auf das Maß 1,40 m x 1,00 m zurechtgeschnitten (Bild 82). In Segmentmitte wurde ein 5 cm tiefer Kerbschnitt vorgenommen, um eine Querscheinfugenbereich abzubilden. Mittig wurde in voller Deckendicke ein Bohrloch (Durchmesser 150 mm) zum Anbringen der Dehnmessstreifen hergestellt. Bedingt durch den avisierten Prüfmechanismus – Aufbringen von

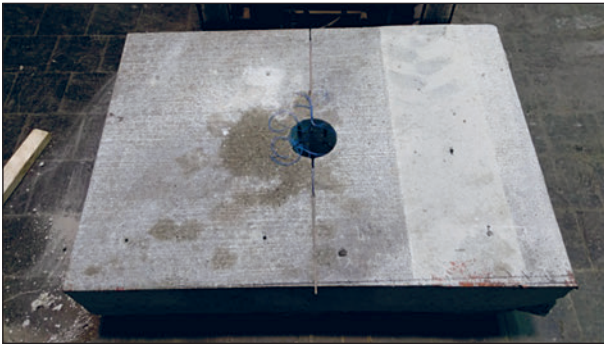


Bild 82: Probekörper mit den Abmessungen 1,40 m x 1,00 m



Bild 83: Anordnung des Probekörpers unterhalb des Prüfrahmens

Längsdruckkräften – wurde auf ein Durchreißen der Platte unterhalb des Kerbgrundes verzichtet. Somit konnte im Bereich unterhalb des Kerbschnittes und neben dem Bohrloch eine ungestörte Lastkonzentration erreicht werden.

Damit im Großprüfstand eine maximale Last von ca. 1.500 kN horizontal auf den Probekörper ohne Gefährdung eingeleitet werden konnte, wurde dieser unterhalb des Prüfrahmens situiert. Durch die Stahlträger oberhalb des Probekörpers konnten somit unvermittelte vertikale Auslenkungen abgefangen werden (Bild 83).

Die 12 Dehnmessstreifen wurden erneut horizontal und vertikal an den Bohrlochflanken angebracht (Bild 84).

Die Prüflasten wurden über drei parallel geschaltete Hydraulikzylinder mit konstanten Lastanstieg eingeleitet. Als Maximalwert wurde vorab eine Last $P_{\max} = 1.600$ kN definiert. Diese entspricht – bei einem Querschnitt $1,00 \text{ m} \times 0,24 \text{ m}$ – einer maximalen Längsdruckspannung im ungestörten Bereich von $p_{\max} = 6,7 \text{ N/mm}^2$.

In Bild 85 sind die gemessenen Dehnungen bzw. Stauchungen der horizontal angebrachten Dehnmessstreifen in Abhängigkeit der aufgebrachten Last

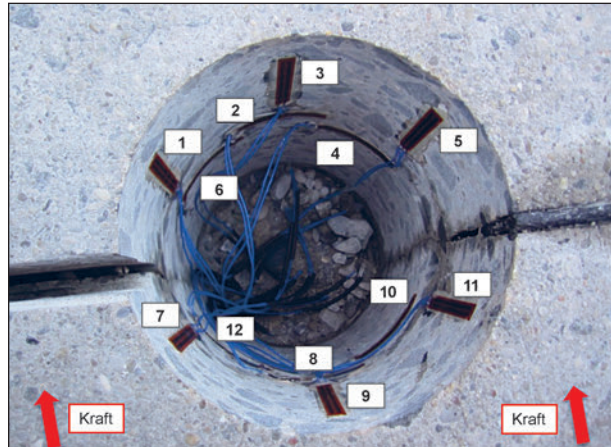


Bild 84: Anordnung der Dehnmessstreifen im Bohrloch, hier: Prüffeld „A92 Freising“

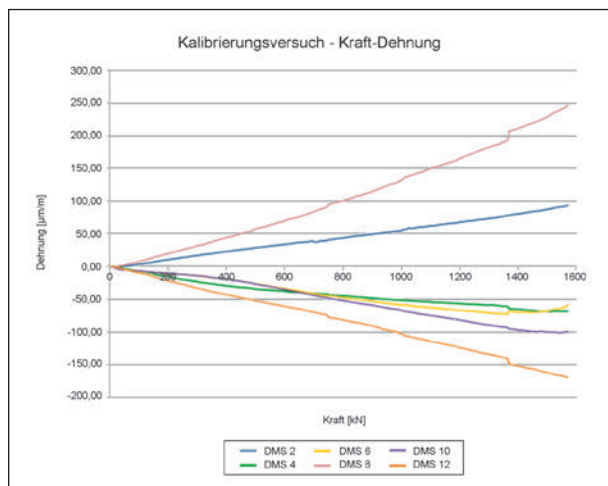


Bild 85: Kraft-Dehnungs-Diagramm der horizontal angebrachten Dehnmessstreifen

dargestellt. Erwartungsgemäß zeigten die beiden gegenüberliegenden DMS Nr. 2 und 8 eine eindeutige Dehnung, die DMS Nr. 4, 6, 10 und 12 eine Stauchung. Es zeigte sich ebenfalls, dass die Dehnungen/Stauchungen auf der lastzugewandten Seite (DMS 8, 10 und 12) deutlich höher sind, als auf der lastabgewandten Seite (DMS 2, 4 und 6). Der Anstieg der Kraft-Dehnungs-Linien der horizontal angebrachten DMS kann als weitestgehend linear bewertet werden.

In Bild 86 ist hingegen kein linearer Anstieg der Kraft-Dehnungs-Linien erkennbar. Es zeigt sich ebenfalls, dass im Fahrbahndeckenbeton auf der lastabgewandten Seite erst ab einer Prüflast $P = 1.200$ kN erkennbare Querkzugspannungen auftreten. Dieser Effekt konnte auch bei den DMS 1 und 5 beobachtet werden. In Bild 86 ist daher nur der DMS Nr. 3 – stellvertretend für die lastabgewandte Seite des Plattensegmentes – dargestellt. Auf der

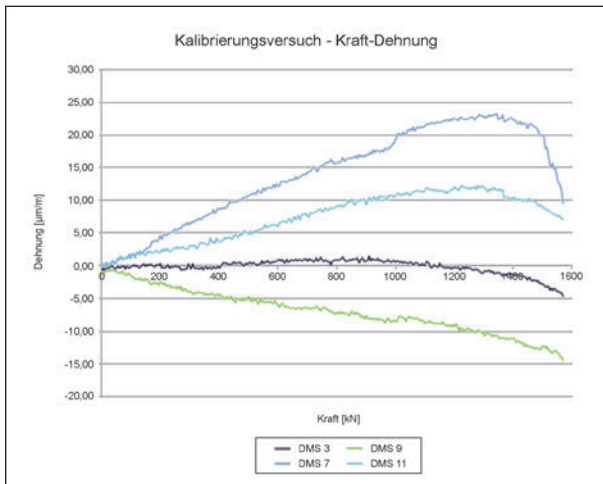


Bild 86: Kraft-Dehnungs-Diagramm der vertikal angebrachten Dehnmessstreifen

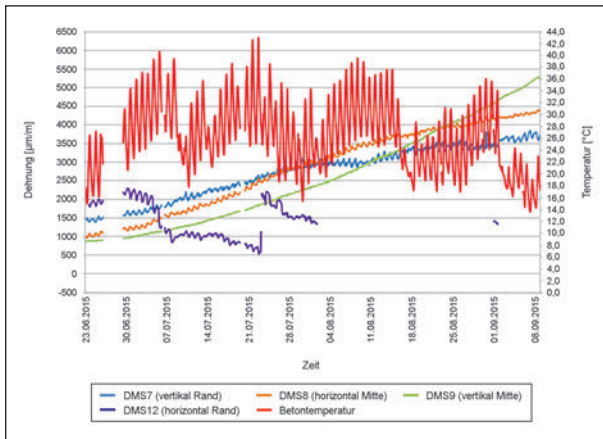


Bild 87: Verlauf der Dehnungen der DMS im Bohrloch in Bezug zur Betontemperatur im Jahr 2015

lastzugewandten Seite sind hingegen Querspannungen bereits bei deutlich geringeren Prüflasten detektierbar.

Die erhaltenen Ergebnisse dienen im Weiteren als Nullmessung. Anhand dieser wurden im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens die Werte aus der Messstelle A92 bei Freising Ost verifiziert.

6.2.2 Ergebnisse der indirekten Spannungsermittlung

Bild 87 zeigt den Verlauf der Kerntemperatur der Betonfahrbahnplatten sowie der aufgezeichneten Dehnungsänderungen der an die Bohrlochwand geklebten Dehnmessstreifen (DMS) im Zeitraum Ende Juni bis Anfang September 2015. Auswertungen der ebenfalls aufgezeichneten Globalstrahlung haben gezeigt, dass die Entwicklung der Kerntemperatur des Betons maßgeblich vom Energieeintrag

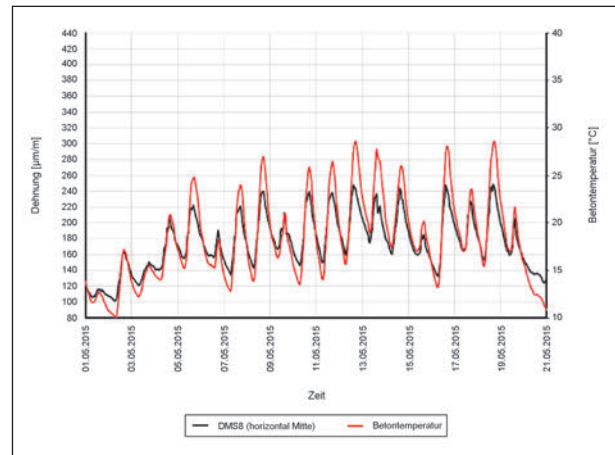


Bild 88: Verlauf der Dehnungsänderungen eines horizontalen DMS in der Bohrlochmitte im Jahr 2015

der Sonne über den Tag hinweg abhängt. Die Daten in Bild 87 stammen vom ersten Demonstrator an der A92 bei Freising Ost und sind in vergrößerter Darstellung der Anlage 2 zu entnehmen.

Ausfälle sowie Sprünge im Verlauf der DMS sind durch den im Nachgang detektierten Horizontalriss im Bereich des Bohrlochs zu erklären. Eine Betrachtung der Messwerte über die Zeit zeigt, dass sich ein Abwandern (laufende Zunahme) der Messwerte der Dehnmessstreifen einstellt. Dies kann z. B. durch das Vorhandensein von Feuchte, Tausalz und Korrosion oder teilweise Flankenablösung der Dehnmessstreifen im Bohrloch erklärt werden. Da das Bohrloch mit extrudiertem Polyurethan abgedichtet und verschlossen wurde, kann im Nachgang hierzu leider keine genaue Aussage getroffen werden.

Eine genaue Betrachtung der einzelnen Messwerte in einem kleineren Zeitraum zeigt aber, dass die aufgezeichneten Dehnungsänderungen synchron zur Änderung der Kerntemperatur der Fahrbahnplatten verlaufen. Dies zeigt sich sowohl bei den horizontalen, wie auch bei den vertikal im Bohrloch angeordneten Dehnmessstreifen (siehe hierzu beispielhaft Bild 88).

Wegen eines Horizontalrisses an der Messstelle des Demonstrators aus dem Jahr 2015 wurde Ende April 2016 ein neues Bohrloch in der Fahrbahnplatte der BAB A92 bei Freising Ost angelegt und nochmals mit Messtechnik ausgestattet. Dies wurde bereits in Kapitel 6.1.2 beschrieben. Die Betonfahrbahn wurde kurz vor dem Einbau der neuen Messtechnik durch die Herstellung von Asphaltentlastungsstreifen im Bereich der neuen Messstelle entspannt. Im Vergleich zur alten Messstelle wur-

den geringere Dehnungsänderungen der DMS erwartet. Bild 89 zeigt den Verlauf der Dehnungsänderungen und der Betonkerntemperatur für den Zeitraum Ende Juni bis Anfang September 2016 (siehe auch Anlage 3).

Es zeigt sich auch hier ein leichtes Abwandern der Messwerte, allerdings liegt dieses nicht in der Größenordnung der Werte des Vorjahres an der alten Messstelle.

Eine erneute Betrachtung der einzelnen Messwerte in einem kleineren Zeitraum zeigt wiederum den synchronen Verlauf der aufgezeichneten Dehnungsänderungen und der Fahrbahnkerntemperatur (siehe hierzu Bild 90).

In den betrachteten Zeiträumen traten maximale Temperaturänderungen von 15 K pro Tag auf. Diese bewirkten jeweils eine maximale Dehnungsänderung des jeweiligen Dehnmessstreifens, die messtechnisch aufgezeichnet wurde. Durch die im Labor durchgeführten Versuche zur Kalibrierung der

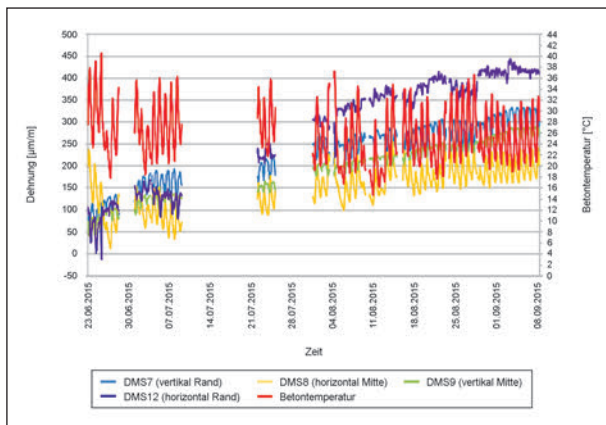


Bild 89: Verlauf der Dehnungen der DMS im Bohrloch in Bezug zur Betontemperatur im Jahr 2016

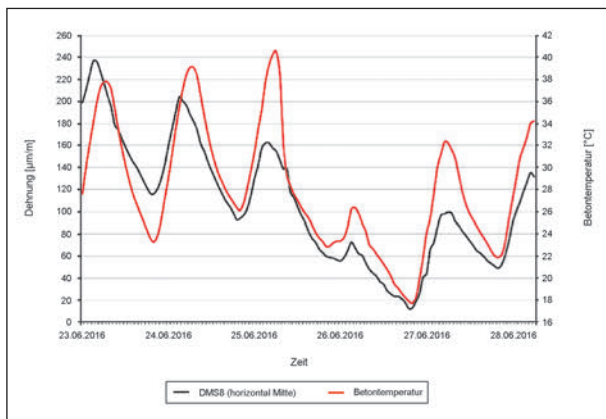


Bild 90: Verlauf der Dehnungsänderungen eines horizontalen DMS in der Bohrlochmitte im Jahr 2016

Messwerte (siehe Kapitel 6.2.1) und die in situ im Bohrloch aufgezeichneten Dehnungsänderungen an der BAB A92 konnte die im Deckensystem auftretende Längsdruckkraft bzw. Spannung ermittelt werden. Bild 91 zeigt nochmals die im Labor aufgezeichneten Dehnungsänderungen bei entsprechender Längsdruckkraft im Deckensystem (siehe auch Anlage 4).

Die Analyse der Messdaten des horizontal angeordneten Dehnmessstreifen in der Mitte des Bohrlochs ergab, dass hier Aussagen über die Längsdruckkraft gemacht werden können. Durch die vertikal am Bohrlochrand geklebten Dehnmessstreifen konnte die Querdehnung der betrachteten Fahrbahnplatte im Fugenbereich unter Längsdruckkraft erfasst werden.

Tabelle 3 zeigt die mittlere Dehnungszunahme bei 15 K Erwärmung sowie die sich daraus ergebende Längsdruckkraftzunahme im Deckensystem. Über den Querschnitt der betrachteten Fahrbahnplatte konnte auch die daraus resultierende Spannungszunahme ermittelt werden. Die sich einstellende Querspannung an der Querscheinfuge wurde ebenfalls angegeben.

Ein direkter Vergleich der beiden Jahre zeigt, dass die Entspannung des Deckensystems durch das Einbringen von Asphaltentlastungsstreifen auch an

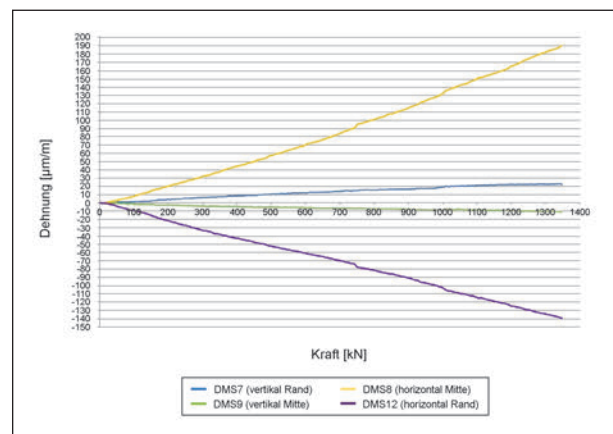


Bild 91: Verlauf der aufgezeichneten Dehnungsänderungen im Laborversuch

Jahr	Dehnungszunahme [µm/m]	Zunahme der Längsdruckkraft [kN]	Zunahme der Normalspannung [N/mm ²]
2015	115	900	2,0
2016	30	280	0,6

Tab. 3: Längsdruckkraftzunahme in der Fahrbahnplatte bei einer Erwärmung von 15 K

den Werten abzulesen ist. Die Werte sind im Jahr 2015 fast vierfach so groß wie im Jahr 2016.

Die oben ausgeführten Auswertungen zeigen, dass das am Prüfamts für Verkehrswegebau der Technischen Universität München entwickelte indirekte Messverfahren zur Bestimmung von Längsdruckkraft durch Aufzeichnung der Bohrlochverformungen unter Last mittels Dehnmessstreifen funktioniert.

Durch die Verwendung von Glasfasern zur Detektion der auftretenden Dehnungsänderungen und der Weiterleitung der Messsignale könnten bei zukünftigen Projekten, über einen längeren Zeitraum hinweg, stabile Messwerte erzeugt werden. Diese Art der Messtechnik ist allerdings sehr kostenintensiv und bedarf einer guten Planung und präzisen Ausführung, da die Glasfasern stets genau für diesen einen Messaufbau gefertigt und kodiert werden müssen.

7 Datenerfassung, -übertragung und -speicherung

Zu diesem Bearbeitungspunkt wurden durch Aufstellung eines Demonstrators u. a. im Auftrag des Freistaats Bayern an der BAB A 92 zur Ermittlung von Temperatur- und Spannungszuständen sowie

Messung von Fugenöffnungsweiten in Betonfahrbahndecken bereits Erfahrungen gewonnen. Zur Aufzeichnung, Speicherung und Übermittlung der Messdaten wurde neben der Fahrbahn eine Streckenstation mit Messtechnik, Datenlogger und autarker Stromversorgung durch eine Brennstoffzelle sowie einen Mast mit Solarzellen aufgestellt. Mittels Fernabfrage über ein GSM-Modul wurden die gesammelten Messdaten zur weiteren Auswertung täglich zu festgelegten Zeitpunkten automatisch an die Forschungsnehmer übermittelt.

7.1 Entwicklung eines Ablaufschemas zur Datenerfassung und -speicherung

Es wurde ein Ablaufschema (Bild 92) zur Erfassung der Daten entwickelt. Im Folgenden soll das dargestellte Ablaufschema erläutert werden. Sensoren (Nr. 1) registrieren Änderungen der Messgrößen und senden diese als Signal an den Messverstärker (Nr.2). Dort werden die Signale verstärkt, gefiltert und an den Messcomputer (Nr. 3) weitergeleitet. Im Computer werden diese Signale erfasst, verarbeitet und nach einem vorgegebenen Speicherintervall als Rohdaten in einem gängigen Datenaustauschformat wie ASCII oder XML gespeichert. Die Datenerfassung sollte in Zeiträumen mit hohen zu erwartenden Temperaturen in kürzeren Zeitabständen er-

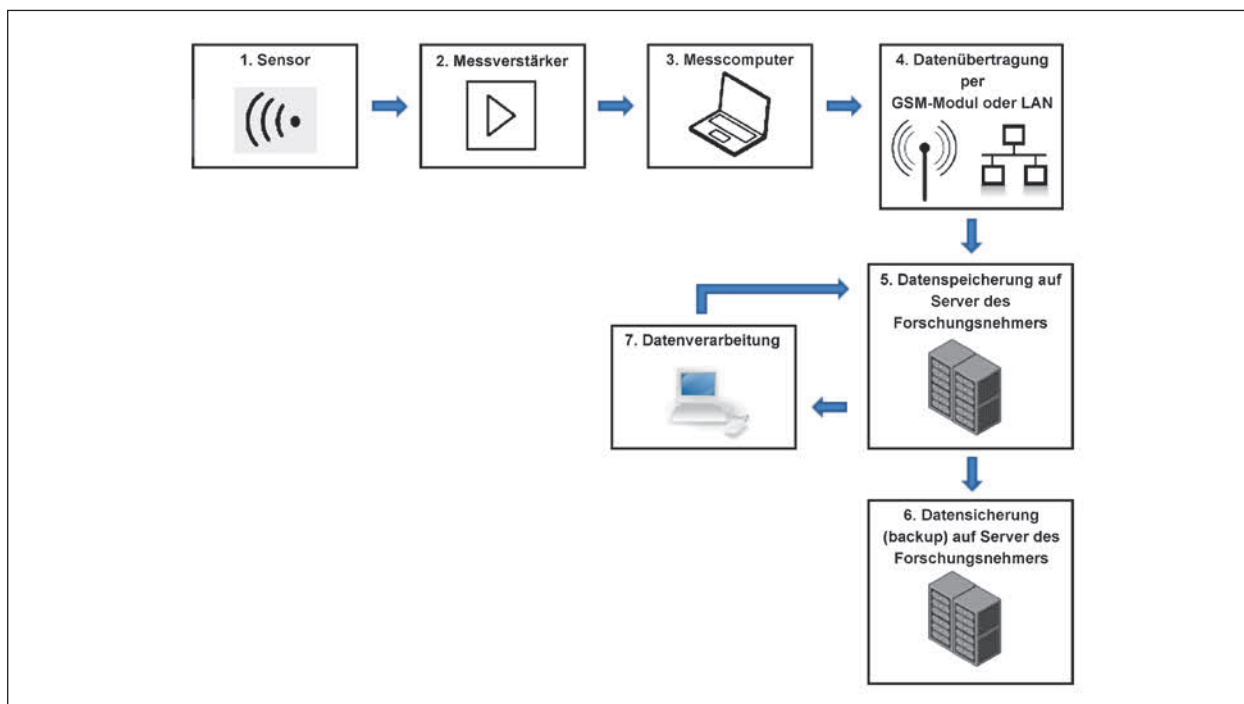


Bild 92: Ablaufschema

folgen. In Wintermonaten kann ein längeres Intervall gewählt werden. Diese Rohdaten werden vom Messcomputer in Datenpakete mit geeigneter Dateigröße zusammengefasst und über eine LAN-Verbindung oder ein GSM-Modul (Nr. 4) an einen Server des Forschungsnehmers (Nr. 5) übermittelt. Auf dem Server werden die Rohdaten eingespeichert und über eine Backupfunktion (Nr. 6) zusätzlich gesichert. Zur Weiterverarbeitung der Rohdaten werden diese in eine Datenbank eingelesen. Diese Datenbank mit Rohdaten befindet sich in einer nicht normalisierten Form, dies erschwert die Weiterverarbeitung und kann infolge strukturbedingter Redundanz der Daten zu Fehlern bei der weiteren Verarbeitung führen. Zur weiteren Verarbeitung wird die Rohdatenbank in eine normalisierte Datenbank überführt, die in ihrer Form keine vermeidbaren Redundanzen enthält.

7.2 Konzeption einer normalisierten Datenbank

Die in Bild 94 skizzierte Datenbank dient neben der strukturierten Ablage der Messdaten (violett hinterlegte Tabellen) der Ablage relevanter Informationen zu den Messstationen und deren Ausstattung (gelb hinterlegte Tabellen), wichtiger Informationen zur je-

weiligen Strecke (grün hinterlegte Tabellen) sowie der Berechnungsergebnisse (rot hinterlegte Tabellen).

Dies ist notwendig, da für einen automatisierten Prozess alle relevanten Daten zur Verfügung gestellt werden müssen. Die in Bild 94 dargestellte Tabellenstruktur gewährleistet eine nicht-redundante Speicherung der Daten, da die Tabelle in der vierten Normalform aufgestellt worden ist.

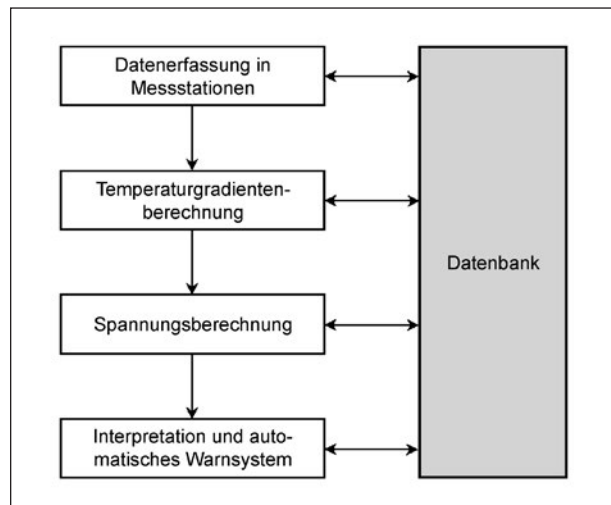


Bild 93: Einordnung in Übersicht

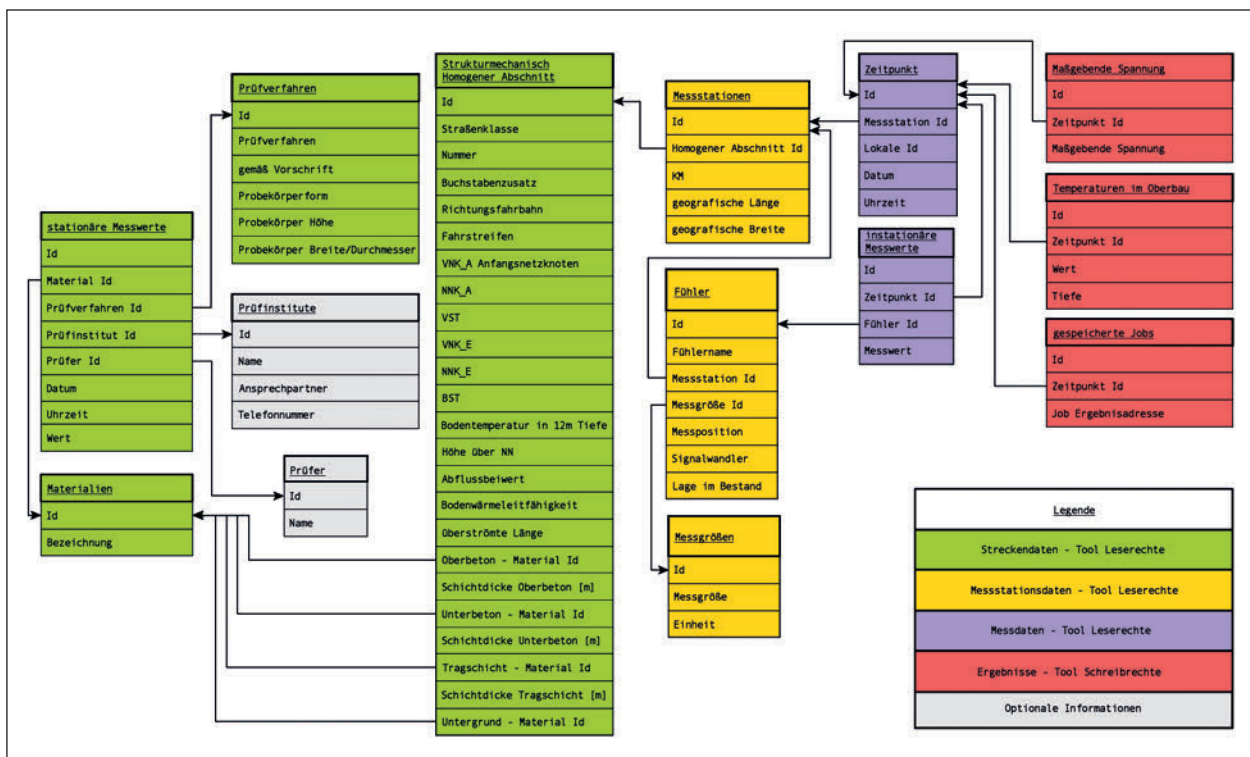


Bild 94: Normalisierte Datenbankstruktur

7.3 Konzipierung einer zentralen Datenspeicherung

Die Übertragung und Speicherung der gesamten Rohdaten erfolgte auf einem Server des Forschungsnehmers. Ein entsprechendes Datensicherungssystem wurde für diesen Server erstellt und betrieben. Es wurde der BAST ermöglicht, auf sämtliche Rohdaten via Internet zugreifen zu können. Eine entsprechende elektronische Freigabe hierfür wurde der BAST vom Forschungsnehmer über ein Tool zur Verfügung gestellt.

Des Weiteren sollte während der Hitzeperioden eine Übertragung aller relevanten Daten auf einen von der zuständigen Straßenbaubehörde dafür bereitgestellten Computer erfolgen. Die erhöhten IT-Sicherheitsvorkehrungen hatten die Installation und den Betrieb des Softwaretools in der Straßenbaubehörde jedoch verhindert, da hierfür die ständige Kommunikation mit dem Datenbankserver über einen Port benötigt wurde. Dies war trotz Verschlüs-

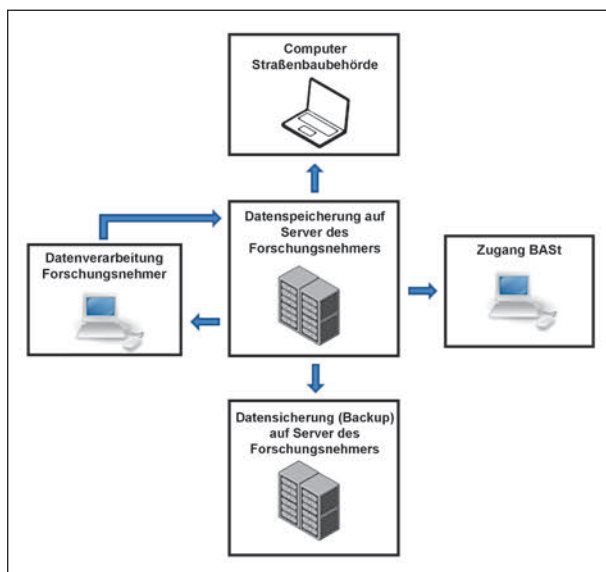


Bild 95: Konzept der zentralen Datenspeicherung

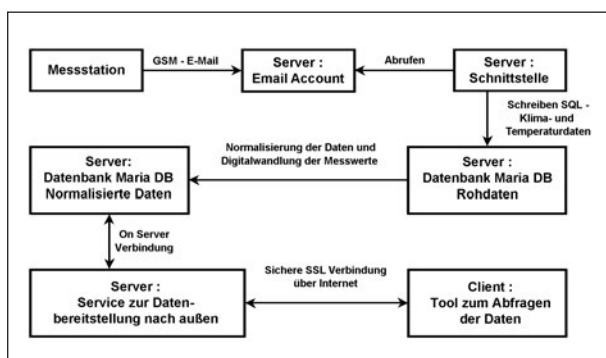


Bild 96: Konzept der Absicherung der Daten

selung nicht mit den Sicherheitsvorschriften der Straßenbaubehörde vereinbar.

Eine Hauptaufgabe bei der Bereitstellung von Daten über das Internet stellte die Absicherung nach Außen dar. Dies erfolgt nach zwei Grundsätzen: Minimierung der auszutauschenden Daten und Verschlüsselung.

In Bild 96 wird ersichtlich, dass der Client auf dem PC des Nutzers nur mit einem Service auf dem Server über eine gesicherte SSL Verbindung kommuniziert. Dieser Client dient dem Abfragen von Messdaten sowie der Steuerung der zugehörigen Temperaturgradienten- und Spannungszustandsberechnungen. Des Weiteren gibt der Client die Berechnungsergebnisse an den Server zurück und steuert auch das Modul zur Automatischen Umsetzung von Maßnahmen.

8 Algorithmus und Softwaretools für die automatische Datenauswertung

In diesem Kapitel wird die Entwicklung der Algorithmen und Softwaretools für die automatische Datenauswertung erörtert. Diese ermöglicht auf Basis von Klimadaten den Temperaturverlauf und qualitative Spannungszustände in der Betondecke zu berechnen, um anschließend eine Risikobewertung durchführen zu können.

Nach der Kalibrierung und Validierung über den im Projekt vorgesehenen Probezeitraum kann, mit Anbindung an Klimaprognosedaten sowie die Definition von Grenzen, eine Risikobewertung der Temperatur- und Spannungszustände infolge des prognostizierten Klimas erfolgen, um ein automatisches Warnsystem zu betreiben.

8.1 Materialparameter für die Berechnungen

Die Berechnung der Temperatur- und Spannungszustände erfordert die Kenntnis verschiedener Materialparameter. Die Werte einiger dieser Parameter werden in der Baupraxis nur sehr selten bestimmt. Auch für die hier zu untersuchenden Betonfahrbahnen liegen teilweise keine Angaben vor. Aus diesem Grund wurden Werte aus der Literatur entnommen.

Konkret werden die folgenden Parameterwerte für die Berechnungen verwendet:

- Dichte: 24 kN/m³
- Wärmeleitfähigkeit: 2,1 W/(m • K)
- Spezifische Wärmekapazität: 879 Ws/(kg • K)
- Temperaturleitfähigkeit: 35,84 cm²/h
- Albedo: 0,3 (grau)
- Emissionskoeffizient: 0,95
- Reflexionskoeffizient für langwellige Strahlung: 0,04 (grau)
- Elastizitätsmodul: 40.000 N/mm²
- Querdehnzahl: 0,2
- Wärmedehnzahl: $11 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$

Die genannten Parameterwerte wurden während der Bearbeitung einer Grenzbetrachtung unterzogen und teilweise im Rahmen der Kalibrierung der Temperaturverlaufsrechnung der jeweiligen Stationen angepasst.

Wie bereits in Kapitel 7.2 erörtert, ist die Datenbank in der Lage, diese Materialparameter differenziert für jede Aufbauschicht der einzelnen Strecken abzubilden und die Parameter (insofern vorhanden) für die Berechnungen zur Verfügung zu stellen.

8.2 Berechnung der möglichen Temperaturzustände in der Betonplatte

Durch die Nutzung des Zeitschrittverfahrens als expliziten Lösungsansatz der Differentialgleichung zur Beschreibung des Wärmeflusses im Straßenoberbau und der Wärmebilanzgleichung ist es möglich, den Temperaturzustand in der Betonplatte fortlaufend zu berechnen [KAYSER 2007]. Es wird eine kontinuierliche Temperaturberechnung auf Basis der Klimamesswerte durchgeführt.

8.2.1 Beschreibung des Berechnungsverfahrens

Der Temperaturzustand der Platte ist nicht primär von der Lufttemperatur abhängig, sondern wird in entscheidendem Maße durch die Sonneneinstrahlung und eine Vielzahl weiterer Faktoren (Wind, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Materialparameter usw.) beeinflusst. Für eine realistische Kalkulation der Betontemperatur sind alle diese Einflüsse zu

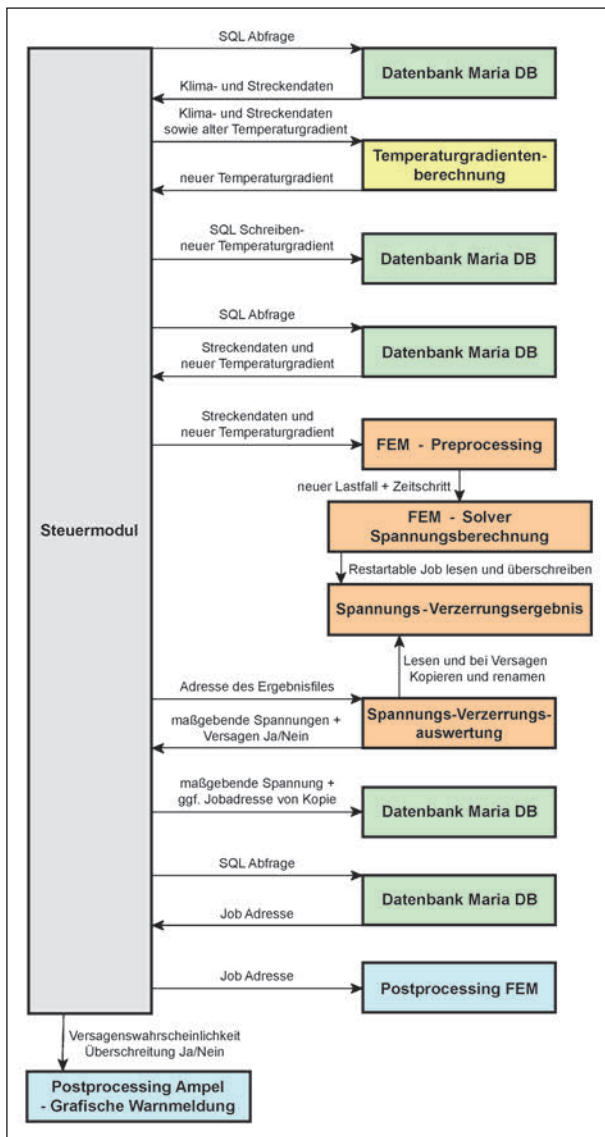


Bild 97: Prozessablauf der Algorithmen

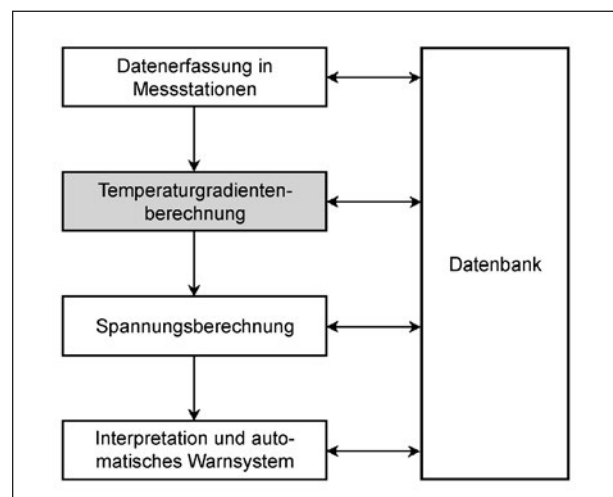


Bild 98: Einordnung in Übersicht

berücksichtigen. Ein bereits veröffentlichtes praktikables Berechnungsverfahren ([VILLARET et al. 2010] und [KAYSER 2007]) basiert auf der Wärmebilanzgleichung und nutzt das Zeitschrittverfahren.

Dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik folgend, gibt es in der Betonplatte einen ständigen Wärmefluss von wärmeren zu kälteren Bereichen. Das System strebt dem Gleichgewicht zu. Die Randbedingungen bilden dabei die Temperaturen an den Rändern des Systems. Bleiben diese konstant, ist der Temperaturzustand im System konstant. Der Wärmefluss von wärmeren zu kälteren Bereichen lässt sich mit der Formel 13

$$q_A = -\lambda_w \cdot \frac{d\vartheta}{dx} \quad (\text{Gl. 13})$$

q_A Wärmestrom

λ_w Wärmeleitfähigkeit

$d\vartheta$ Temperaturschritt

dx Wegschritt

beschreiben.

Im stationären Zustand gibt es also einen linearen Temperaturverlauf zwischen Ober- und Unterseite. Dieser Zustand kommt in der Praxis allerdings kaum vor. Vielmehr ist mit einer ständigen Veränderung der Temperatur an der Oberseite und in schwächerem Maße auch an der Unterseite zu rechnen. Das Gleichgewicht wird also ständig gestört, worauf das System entsprechend Formel 13 mit einer Steigerung oder Abschwächung des Wärmestroms reagiert. Das System befindet sich also in einem dynamischen Zustand. Der Temperaturverlauf in der Platte ist von den vorhergehenden Temperaturzuständen abhängig.

Die Geschwindigkeit der Temperaturänderung in einem bestimmten Punkt hängt vom Material und vom Maß der Änderung des örtlichen Temperaturgefälles ab. Es gilt:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = a_\vartheta \cdot \frac{d^2\vartheta}{dx^2} \quad (\text{Gl. 14})$$

a_ϑ Temperaturleitfähigkeit

dt Zeitschritt

Ein stabiler Temperaturzustand (keine zeitliche Änderung, $d\vartheta/dt=0$) liegt also vor, wenn der räumliche Temperaturgradient konstant ist, d. h. der räumliche Temperaturverlauf linear ist. Je mehr der Tempera-

turverlauf von dieser Bedingung abweicht, desto schneller ändern sich die örtlichen Temperaturen. Das System strebt wieder dem stabilen Zustand entgegen (siehe Bild 81).

Näherungsweise lassen sich die Differentialquotienten auch als Differenzenquotienten darstellen:

$$\frac{d\vartheta}{dx} \approx \frac{\Delta\vartheta}{\Delta x} \quad (\text{Gl. 15})$$

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} \approx \frac{\Delta(\Delta\vartheta)}{\Delta x^2} = \frac{\vartheta_{n+1,k} - 2\vartheta_{n,k} + \vartheta_{n-1,k}}{\Delta x^2} \quad (\text{Gl. 16})$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} \approx \frac{\Delta\vartheta}{\Delta t} = \frac{\vartheta_{n,k+1} - \vartheta_{n,k}}{\Delta t} \quad (\text{Gl. 17})$$

$\vartheta_{n,k}$ Temperatur am Punkt n zum Zeitpunkt k

Durch Einsetzen von (16) in (14) ergibt sich:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = a_\vartheta \cdot \frac{\vartheta_{n+1,k} - 2\vartheta_{n,k} + \vartheta_{n-1,k}}{\Delta x^2}$$

Unter Verwendung von (17) gewinnt man nach elementarer Umstellung:

$$\vartheta_{n,k+1} = \vartheta_{n,k} + a_\vartheta \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \cdot (\vartheta_{n+1,k} - 2\vartheta_{n,k} + \vartheta_{n-1,k}) \quad (\text{Gl. 18})$$

Mit Gleichung 18 kann der Temperaturverlauf zum Zeitpunkt k+1 aus dem jeweils vorhergehenden Temperaturverlauf (Zeitpunkt k) berechnet werden. Es ist einleuchtend, dass das Verfahren bei vielfacher Wiederholung nur stabil bleiben kann, wenn die Zeitschritte nicht zu groß werden. In [KAYSER 2007] wird als Stabilitätskriterium

$$a_\vartheta \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{2} \quad (\text{Gl. 19})$$

angegeben.

Offensichtlich ist es zur Erfüllung des Stabilitätskriteriums notwendig, für kleine Wegschritte auch kleine Zeitschritte zu verwenden. In Abhängigkeit der Dicke der Betonplatte sind unterschiedliche cm-Schritte erforderlich. Für die Zeitschritte wird ein Minutentakt notwendig sein (Bild 99).

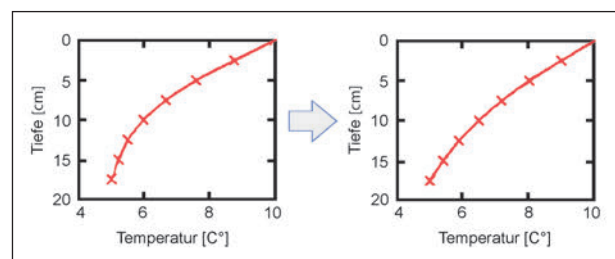


Bild 99: Zeitschrittverfahren

Der in jedem Zeitschritt berechnete Temperaturzustand ist in hohem Maße abhängig vom Temperaturzustand im vorhergehenden Zeitschritt. Mit wachsendem zeitlichem Abstand verringert sich jedoch die Abhängigkeit. Wenn eine hinreichende Zeitspanne zwischen zwei Temperaturzuständen liegt, dann können sie als unabhängig angesehen werden. Das bedeutet, dass für eine hinreichend lange Berechnungsreihe die Ergebnisse vom Anfangszustand unabhängig sind. Die Berechnung kann also mit einem beliebigen Anfangszustand beginnen.

Die Ermittlung der Oberflächentemperatur gelingt über die Betrachtung der Wärmebilanz. Diese besagt, dass die in einem Zeitschritt in einem System gespeicherte Energie gleich der Differenz aus zugeführter und abgegebener Energie ist.

$$dU = dE_i - dE_a \quad (\text{Gl. 20})$$

dU pro Zeiteinheit im System gespeicherte Energie

dE_i pro Zeiteinheit zugeführte Energiemenge

dE_a pro Zeiteinheit abgegebene Energiemenge

Bei der Berechnung von Wärmeströmen im Materialpaket kann näherungsweise von einer Eindimensionalität ausgegangen werden. Es wird also nur der vertikale Energieaustausch betrachtet. Damit ergibt sich eine flächenbezogene Energiebilanzgleichung. Die zufließende bzw. abfließende Energie (Wärme) ist von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig. Es gilt:

$$q_u = q_G - q_{k,reflex} + q_{AG} - q_{FO} - q_{l,reflex} + q_V + q_H + q_B \quad (\text{Gl. 21})$$

q_u flächenbezogene gespeicherte Energiemenge

q_G Globalstrahlung

q_{AG} atmosphärische Gegenstrahlung

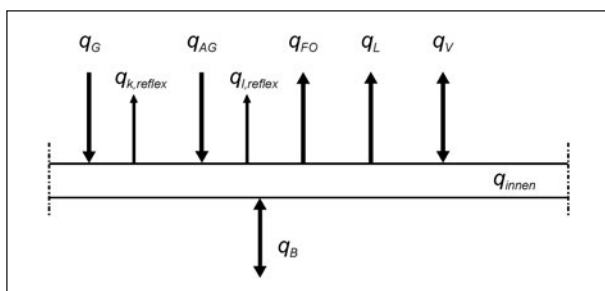


Bild 100: Wärmeströme an der Betondecke (aus [KAYSER 2007])

q_{FO} Abstrahlung der Fahrbahnoberfläche

$q_{k,reflex}$ kurzwellige Reflexionsstrahlung

$q_{l,reflex}$ langwellige Reflexionsstrahlung

q_V latenter Wärmestrom

q_H sensibler Wärmestrom

q_B Bodenwärmestrom

Zur Berechnung der einzelnen Terme der Wärmebilanzgleichung wird auf [VILLARET et al. 2010] und [KAYSER 2007] verwiesen.

Ist ein Ausgangszustand bekannt, so kann der Temperaturverlauf im nächsten Zeitschritt mit dem oben beschriebenen Zeitschrittverfahren berechnet werden. Als zusätzliche Bedingung ist die Einhaltung der Wärmebilanzgleichung erforderlich. Diese Zusatzbedingung determiniert den einzigen unbestimmten Parameter: die Oberflächentemperatur. Für praktische Berechnungen ist die Oberflächentemperatur iterativ zu ermitteln. Weil die Berechnung in Zeitschritten erfolgt, steht immer ein geeigneter Anfangswert für die Iteration zur Verfügung. Der betreffende Wert kann in hinreichend kleinen Schritten so lange erhöht bzw. vermindert werden, bis die Wärmebilanzgleichung erfüllt ist. In jedem Iterationsschritt ist der Temperaturverlauf im System komplett zu berechnen. Aus der Differenz zum Verlauf im vorherigen Zeitschritt ergibt sich die Menge der im Zeitschritt gespeicherten Energie.

8.2.2 Softwaretool zur Temperaturverlaufsberechnung

Die Temperaturverlaufsberechnung ordnet sich gemäß des Prozessablaufs in Bild 97 bzw. Bild 101 in die Live-Berechnung der Spannungszustände von Betondecken ein.

Zunächst wurden für die Entwicklung der Oberfläche des Programms zur Temperaturverlaufsberechnung (Bild 102) Schnittstellen zum Laden von Straßenmodellen im XML Format und dem Generieren von Testdaten (Bild 103) angelegt, um den Berechnungsalgorithmus noch vor Anbindung an die Datenbank für Ein- und Ausgabe validieren zu können.

Bedingt durch kurzfristige Störungen können die Messdaten gegebenenfalls Fehlstellen aufweisen. Vor Einleitung der Simulation wird deshalb über-

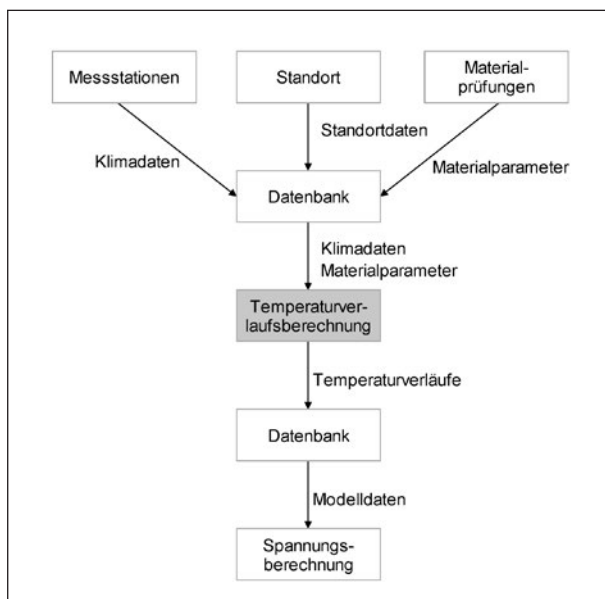


Bild 101: Einordnung der Temperaturverlaufsberechnung in den Berechnungsalgorithmus

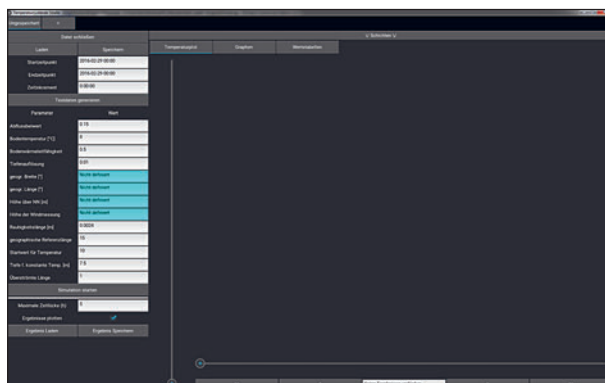


Bild 102: Oberfläche des Programms zur Temperaturverlaufsberechnung

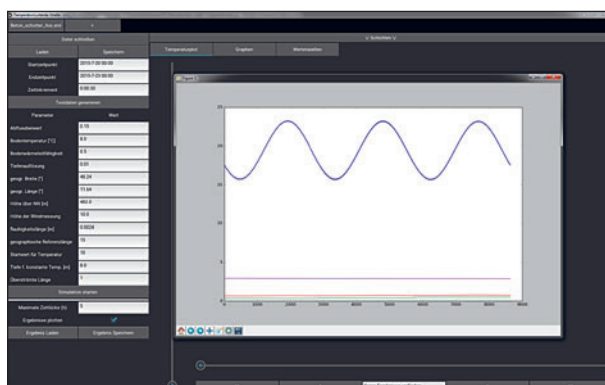


Bild 103: Generieren von Testdaten zur Validierung der Temperaturverlaufsberechnung

prüft, ob der Messdatensatz vollständig ist. Sind Fehlstellen vorhanden, wird überprüft, ob die Simulation über die vorhandenen Fehlstellen hinweg er-

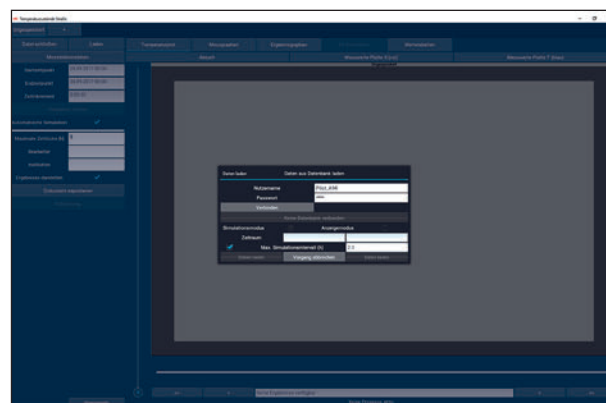


Bild 104: Login-Fenster im Softwaretool

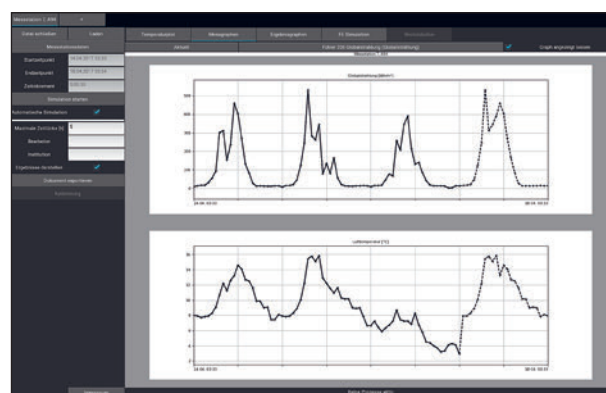


Bild 105: Abrufen der Messdaten der jeweiligen Station

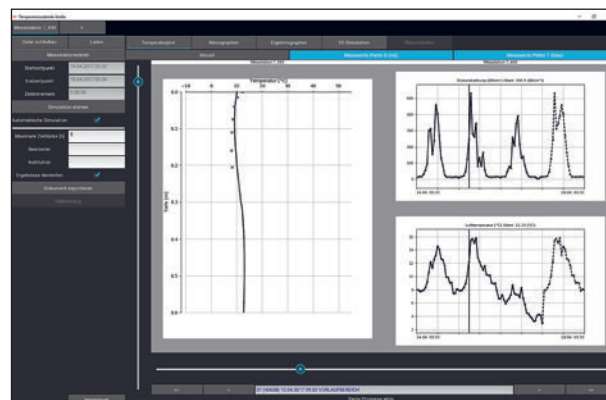


Bild 106: Berechnung der Temperaturverläufe

folgen kann oder ob die Simulation nur über einen Teil des Messzeitraums erfolgen kann.

Im weiteren Verlauf wurde das Datenmanagement komplett auf ein MySQL Datenbanksystem umgestellt. Der Nutzer kann sich mit in der Datenbank hinterlegten Login-Daten auf den für ihn relevanten Messstationen einloggen (Bild 104), die vorhandenen Messdaten abrufen (Bild 105) und Temperaturverlaufsberechnungen (Bild 106), die dazugehörigen Spannungen (Bild 107) berechnen sowie die

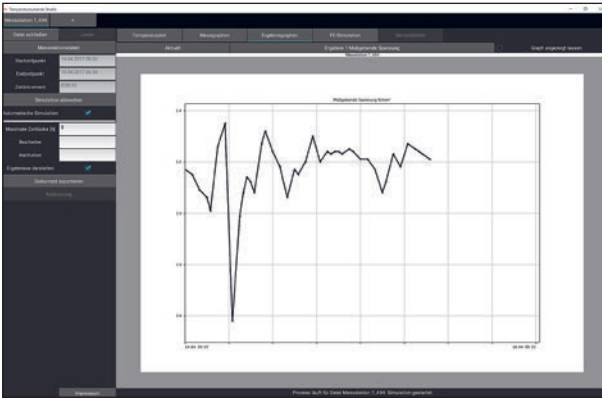


Bild 107: Ausgabe der Maßgebenden Spannungen

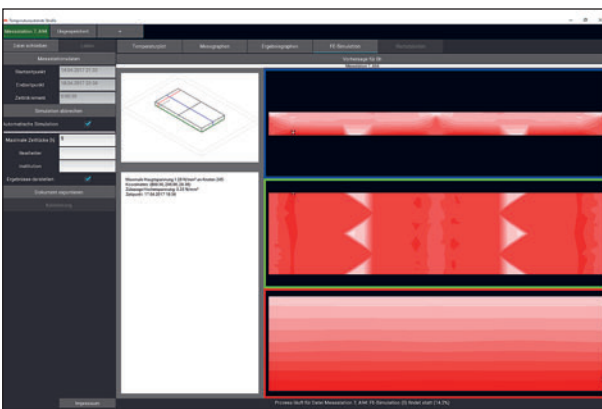


Bild 108: Grafische Darstellung der FEM-Spannungsbilder, farbliche Markierung der Station (oben links, Grün = unkritisch) entsprechend der aktuellen Spannungsauslastung

Spannungsbilder der FEM Berechnung darstellen lassen (Bild 108).

Die Stationen werden im kontinuierlich laufenden Simulationsmodus farblich entsprechend der derzeitigen Spannungsauslastung markiert. Hierfür wurde eine leichtverständliche Farbskala gewählt, die von Grün (unkritisch) bis Rot (kritisch) reicht (vgl. Bild 108, obere linke Ecke).

8.2.3 Kalibrierung und Validierung

Im weiteren Verlauf werden die aus Klimadaten berechneten Temperaturverläufe und die im Rahmen dieses Projekts an den Messstationen real gemessenen Temperaturwerte in der Fahrbahndecke verglichen. Das Berechnungsverfahren wird so lange kalibriert, bis die Übereinstimmung von berechneten und gemessenen Werten hinreichend genau ist.

Die Messdaten werden kontinuierlich erhoben. Demnach ist es möglich, in einem ersten Schritt das Verfahren an Messwerten einer Station 1 über ei-

nen Zeitraum X zu kalibrieren und an Messwerten derselben Station 1 über einen Zeitraum Y zu validieren. Ist dies erfolgt, wird versucht, das an Station 1 kalibrierte und validierte Verfahren an weiteren Stationen für unterschiedliche Zeiträume zu validieren. Dies ist ggf. nicht direkt möglich, da die Sensitivität des Berechnungsverfahrens bezüglich der Materialdaten der jeweiligen Strecke ggf. zu groß ist. Diese Information ist eine wesentliche Entscheidungsgrundlage für die Bildung zusammenhängender Bewertungsabschnitte. Sobald eine hinreichende Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung erreicht ist, hängt die Genauigkeit einer Prognose nur noch von den als Eingangswert genutzten Klimadaten ab.

Als Kalibrierparameter werden für die Temperaturverlaufsrechnung relevante, nicht experimentell bestimmte Materialparameter, verwendet und im möglichen Wertebereich bestimmt.

8.2.4 Prognose von Temperaturverläufen

Ein automatisches Warnsystem benötigt idealerweise eine Risikobewertung von in der Zukunft liegenden Temperatur- und Spannungszuständen.

In diesem Zusammenhang sind Prognosen auf Basis des Ist-Zustandes und der zu erwartenden Klimaentwicklung erforderlich. Die Temperatur- und Spannungszustände leiten sich entsprechend Kapitel 8.2 und 8.3 direkt aus den Klimadaten ab.

Es werden prognostizierte Klimawerte als Eingangsgröße für die Risikobewertung von in der Zukunft liegenden Temperatur- und Spannungszuständen genutzt. Die Prognoserechnungen werden für unterschiedliche Zeiträume von 3, 6, 12 und 24 Stunden realisiert.

Für die Prognoserechnungen wird das oben beschriebene Berechnungsmodul für die Fahrbahntemperaturgradienten benutzt. Der Ausgangszustand ergibt sich aus den laufenden Berechnungen mit den gemessenen Klimadaten. Als Eingangsgrößen für die weitere Berechnung dienen prognostizierten Klimadaten.

Diese werden auf Grundlage der Praxiserfahrungen mit einem vereinfachten Modell erzeugt.

Im Rahmen der Arbeiten an diesem Forschungsprojekt konnten Erkenntnisse hinsichtlich des Auftretens von Hitzeschäden zusammengetragen werden. Es hat sich gezeigt, dass Hitzeschäden in der

Praxis nach mehreren Tagen mit nahezu identischen ungünstigen Klimateinwirkungen auftreten. Hohe Temperaturen bei gleichzeitig hoher Globalstrahlung können bei konstant hohem Niveau über mehrere Tage zu einem Aufschaukeln der Fahrbahndeckentemperatur führen.

Das Modell für die Erzeugung von prognostizierten Klimadaten bedient sich zwei der wesentlichen Erkenntnisse aus der Praxis:

- Hitzeschäden treten nicht am ersten Tag einer Hitzeperiode auf,
- das Klima an den Tagen einer Hitzeperiode ist jeden Tag nahezu gleich.

Somit kann aus den letzten drei Tagen ein korrelierender Worst-Case-Klimadatensatz für die nächsten 24 Stunden zusammengestellt werden. Am ersten Tag einer Hitzeperiode werden die Temperaturen in der Fahrbahndecke zwar unterschätzt, jedoch ist dies nicht relevant, da mehrere Tage mit ungünstigem Klima zusammenhängend erst die relevanten Temperaturverläufe in der Fahrbahndecken erzeugen. Bereits der zweite Tag einer Hitzeperiode wird ausreichend gut beschrieben.

Im Ergebnis ergibt sich über den gesamten Prognosezeitraum für jeden Zeitschritt ein Temperaturverlauf über den Betonquerschnitt. Diese Temperaturverläufe können dann zur Spannungsberechnung und Risikobewertung herangezogen werden.

Für jeden Zeitpunkt werden die Klimaprognosedaten, die sich daraus ergebenden prognostizierten Temperaturverläufe sowie die damit korrespondierenden prognostizierten Spannungen in der Betonfahrbahn ermittelt und gespeichert. Hierfür wurde das in Kapitel 7.2 vorgestellte Datenbankmodell erweitert (Bild 109). Die prognostizierten Klimadaten (Bild 110), die darauf basierenden Temperaturverläufe (Bild 111) und die korrespondierenden Spannungen sowie FEM-Spannungsbilder (Bild 112) können im Softwaretool eingeblendet werden.

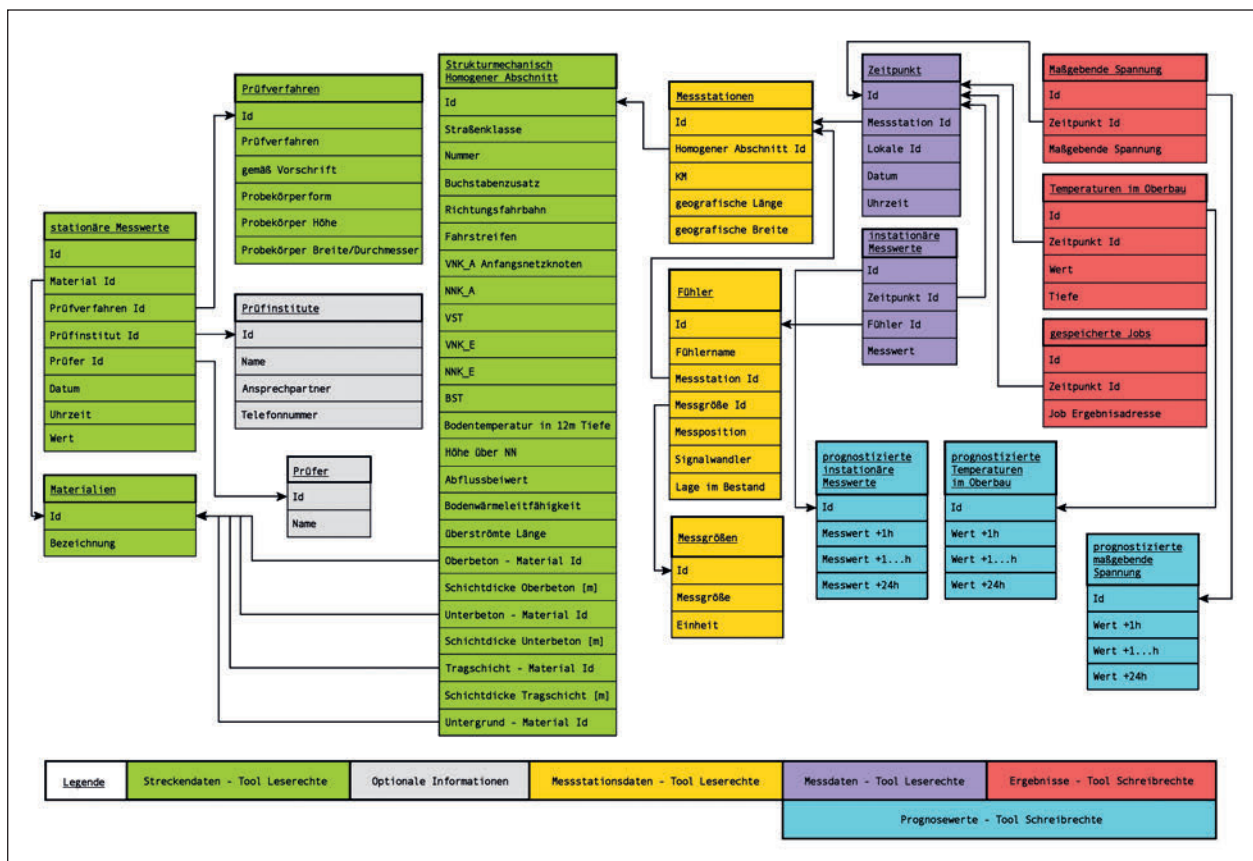


Bild 109: Normalisierte Datenbankstruktur mit Prognosedaten

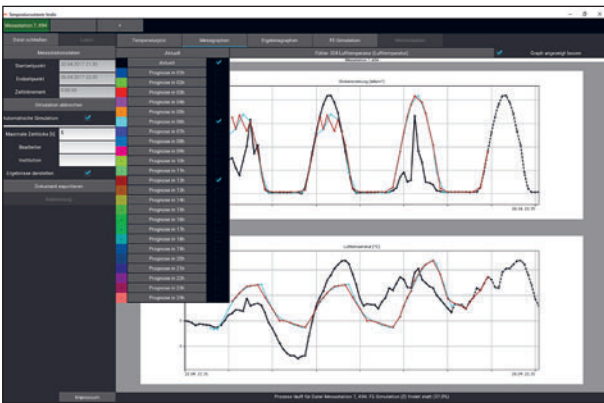


Bild 110: Klimadaten mit eingeblendeten Prognosedaten

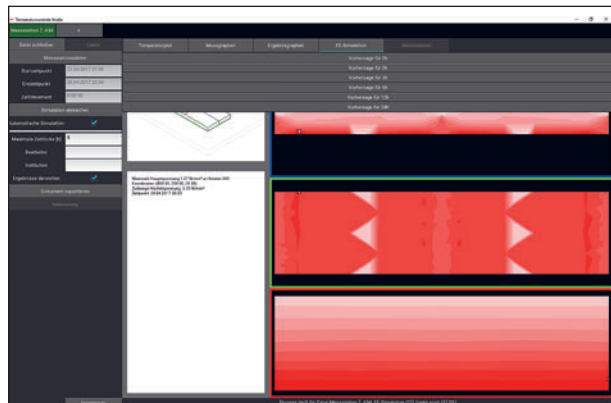


Bild 113: FEM-Spannungsbilder für die prognostizierten Temperaturverläufe

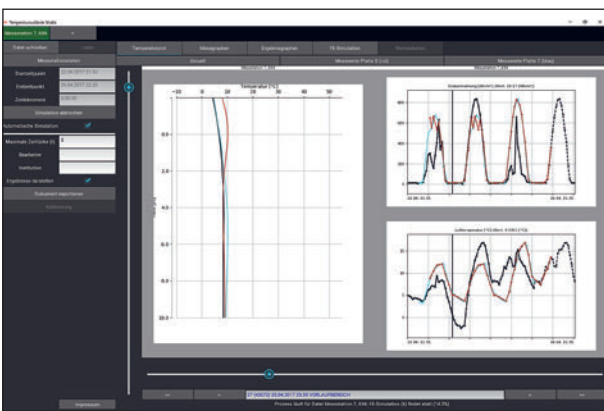


Bild 111: Temperaturverläufe mit eingeblendeten prognostizierten Temperaturverläufen über den Straßenaufbau

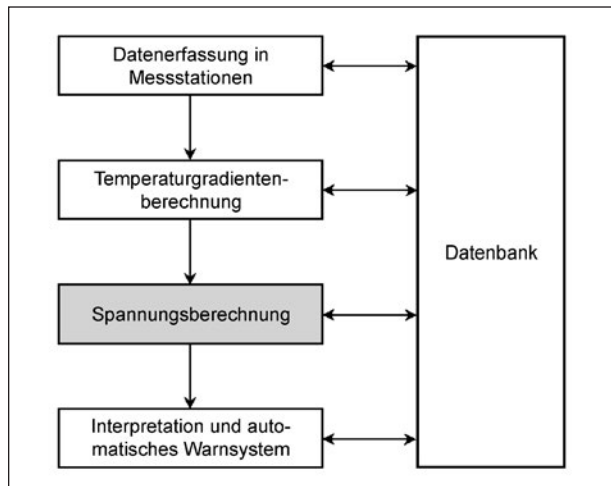


Bild 114: Einordnung in Übersicht

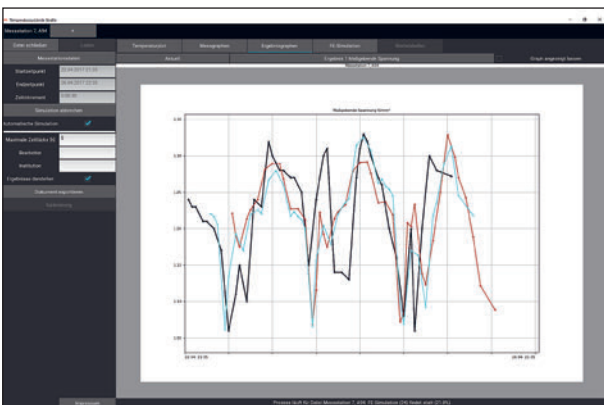


Bild 112: Maßgebende Spannungen mit eingeblendeten prognostizierten maßgebenden Spannungen

8.3 FEM-System zur Spannungsberechnung

Die realitätsnahe Berechnung des Spannungszustandes im Querfugenbereich ist nach jetzigem Erkenntnisstand nur mit der Finite-Elemente-Methode möglich. Das entsprechende Berechnungsmodell ist so zu definieren, dass eine hinreichende Genauigkeit der Berechnungsergebnisse möglich wird.

Entsprechend ergeben sich einige konkrete Anforderungen an das Modell:

- Berücksichtigung von Verkehrslasten,
- Berücksichtigung nichtlinearer Temperaturverläufe über den Plattenquerschnitt,
- Modellierung des Fugenschnittes,
- realitätsnahe Modellierung der Interaktion zwischen Platte und Unterlage (mögliches bereichsweises Abheben),
- Berücksichtigung der Mitwirkung der angrenzenden Bereiche der Unterlage,
- detaillierte Ermittlung des Spannungszustandes im Fugenbereich,
- hinreichend genaue Erfassung des Materialverhaltens.

Die Erfüllung dieser Anforderungen ist nur mit einem Volumenmodell möglich.

Von besonderer Bedeutung für die Beurteilung des temperaturinduzierten Gefährdungspotenzials ist die hinreichend genaue Berechnung der Spannungsspitze, welche sich an der Unterseite des Kerbschnittes ausbildet. Dies erfordert eine besonders feine Elementierung im betreffenden Modellbereich. Die Ausprägung der Spannungsspitze wird maßgeblich von der Plattenverformung neben der Querschnittsverformung an dieser Stelle zu simulieren. Das Berechnungsmodell muss also lang genug sein, um eine realistische Plattenverformung an dieser Stelle zu simulieren. Dies führt in Kombination mit der schon erwähnten Notwendigkeit einer feinen Elementierung zu erheblichen Modellumfängen.

Die unterschiedlichen Temperaturzustände führen zu wechselnden Plattenverformungen (Aufwölben, Aufschüsseln), welche mit einem bereichsweisen Abheben der Platten von der Unterlage verbunden sind. Dies hat einen wesentlichen Einfluss auf den jeweiligen Beanspruchungszustand der Platte. Entsprechend ist die Interaktion zwischen Platte und Unterlage so zu beschreiben, dass ein Abheben einzelner Plattenbereiche von der Unterlage auch im Berechnungsmodell möglich ist. Damit ergibt sich ein nichtlineares Modellverhalten, welches mit langen Rechenzeiten verbunden ist.

Die FEM-Berechnung erfordert also ein relativ komplexes Berechnungsmodell, welches eine Optimierung hinsichtlich Modellumfang und Rechenzeit notwendig macht.

Für die Durchführung der Berechnungen wird der im Open Source Bereich verfügbare FEM-Solver [CalculiX] verwendet. Das zugehörige Input Deck Format ist kompatibel zum kommerziellen System [ABAQUS].

8.3.1 Modellumfang

Das Berechnungsmodell umfasst 2 Platten und einen Volumenblock für die Auflagerung der Platten (Bild 115). Die Plattengeometrie (Länge, Breite, Höhe) kann entsprechend den konkreten Gegebenheiten gewählt werden.

Die Unterlage wird in beiden Richtungen jeweils 1 m über die Plattenränder hinausgeführt.

8.3.2 Platten

Die Platten werden vollständig aus 20-Knoten-Brickelementen aufgebaut. Diese haben eine Qua-

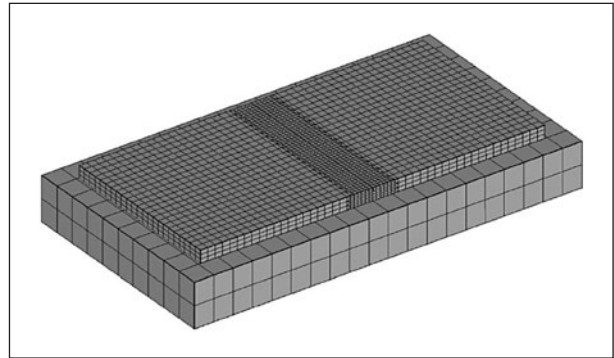


Bild 115: Basismodell mit 2 Platten und einem Volumenblock für die Auflagerung

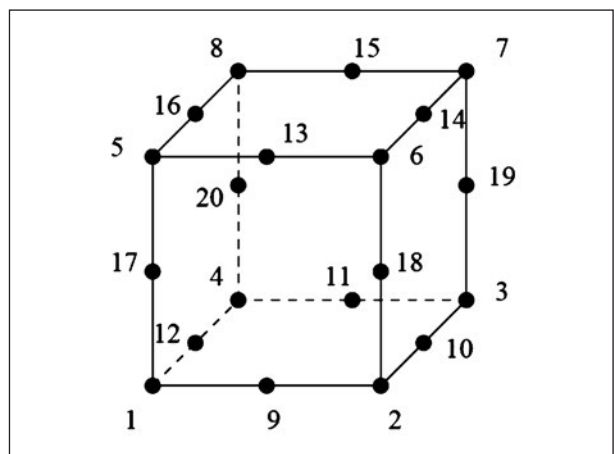


Bild 116: 20-Knoten-Brickelement

derform. Zusätzlich zu den Eckknoten gibt es in der Mitte jeder Kante einen Knoten (Bild 116).

Der Spannungsverlauf im Element wird mit einer quadratischen Ansatzfunktion beschrieben.

Die Modellierung kann wesentlich vereinfacht werden, wenn statt der 20-Knotenelemente 8-Knotenelemente verwendet werden. Es zeigte sich aber, dass ein solches Plattenmodell keine korrekten Ergebnisse liefert. Die Ursache ist darin zu sehen, dass für die 8-Knotenelemente nur eine lineare Ansatzfunktion möglich ist. Dies führt rechnerisch zu hohen Schubspannungen, welche einen vorzeitigen Abbruch der Iteration im Berechnungsprozess verursachen. Die Platte wirkt dadurch rechnerisch steifer. Der Effekt ist als Shearlocking bekannt. Die Verwendung der 8-Knoten-Elemente war damit ausgeschlossen.

Um die Situation an der Scheinfuge hinreichend detailliert zu erfassen, ist die Platte über die Querschnittshöhe in mehrere Elemente zu unterteilen. Die Kantenlängen der einzelnen Elemente sollten sich maximal im Verhältnis 2:1 unterscheiden. Da-

mit ergeben sich bei einer feinen Elementierung über die Querschnittshöhe auch viele Elemente in Längs- und Querrichtung. Um eine hinreichende Genauigkeit zu erzielen und gleichzeitig die Anzahl der Elemente auf ein vernünftiges Maß zu begrenzen, wurden vier Elemente übereinander im Plattenquerschnitt definiert. Die Elementhöhe liegt damit im Bereich zwischen 7,5 cm (bei 30 cm Plattendicke) und 5 cm (bei 20 cm Plattendicke). Die Horizontalausdehnung der Elemente wurde mit 10 cm x 10 cm festgelegt. Damit liegen die Seitenverhältnisse in einem günstigen Bereich (4:3 bis 2:1). Die Festlegung der Horizontalausdehnung der Elemente beschränkt die Modellierungsgenauigkeit für die Länge und Breite der Platten auf das Dezimeterniveau. Für die konkret vorliegenden Berechnungsaufgaben ist dies aber hinreichend genau.

An den freien Enden der Platten werden alle Knoten der unteren drei Elementlagen in Plattenlängsrichtung festgehalten. Es wird also vorausgesetzt, dass sich die Fugen zu den jeweils anschließenden Plattenbereichen nicht bewegen. Diese Annahme ist zulässig, weil im konkret vorliegenden Fall nur die Temperaturzustände interessieren, die hohe Druckspannungen erzeugen. Es ist also davon auszugehen, dass die Fugen geschlossen sind.

Um die Wärmedehnung in Querrichtung nicht zu behindern, wird die Knotenverschiebung quer zur Fahrriichtung zugelassen. Nur ein einziger Knoten in Plattenmitte wird hier in beiden Richtungen festgehalten. Damit wird das System insgesamt horizontal fixiert.

8.3.3 Untere Tragschicht

Mit der Modellierung der Tragschicht unter der Betondecke wird eine elastische Bettung simuliert. Diese Schicht wird in der Realität wenig (gebundene Tragschicht) oder gar nicht (ungebundene Tragschicht) auf Biegung beansprucht. Der oben beschriebene Shearlockingeffekt ist damit von untergeordneter Bedeutung. Die untere Tragschicht konnte deshalb aus 8-Knoten-Brickelementen (Bild 117) mit linearer Ansatzfunktion modelliert werden.

Um die Wirkung der unteren Tragschicht auf das Verhalten der Betonplatten hinreichend genau zu berücksichtigen, ist eine weniger detaillierte Elementierung erforderlich. Die Elemente werden als Würfel mit ca. 50 cm Seitenlänge angenommen. Die gesamte Dicke der Unterlage wird mit 2 dieser

Elemente modelliert. Damit hat die untere Tragschicht im Modell eine Dicke von ca. 1,0 m.

Alle Knoten an der Unterseite der Elemente werden in allen drei Richtungen festgehalten. Damit wird der Volumenblock für die untere Tragschicht insgesamt fixiert.

Insgesamt ist festzuhalten, dass die Parameter der unteren Tragschicht für das Berechnungsergebnis nur eine untergeordnete Bedeutung haben. Es ist deshalb nicht notwendig, einen geschichteten Unterbau zu definieren.

8.3.4 Kontakt zwischen Platten und unterer Tragschicht

Die Platten liegen im Berechnungsmodell frei auf der darunterliegenden Tragschicht auf. Die Interaktion zwischen Platten und Unterlage wird im Berechnungsmodell über eine Kontaktformulierung erfasst. Diese beschreibt den Spannungszustand zwischen den Kontaktflächen in Abhängigkeit vom gegenseitigen Abstand (Bild 118). Programmintern

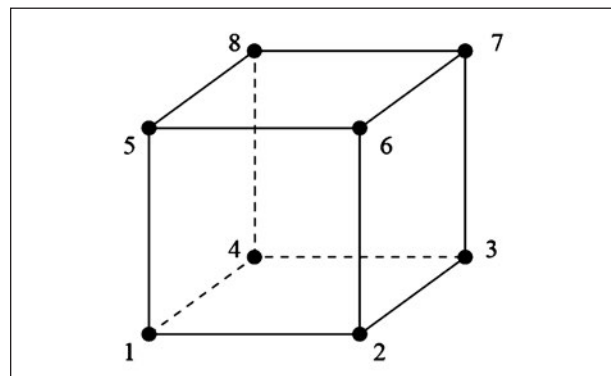


Bild 117: 8-Knoten-Brickelement

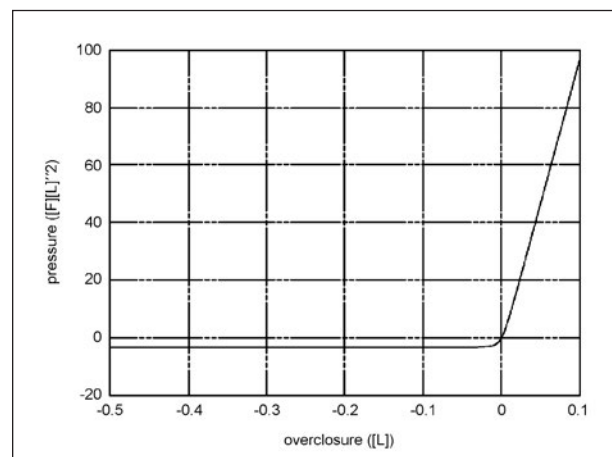


Bild 118: Kontaktspannung in Abhängigkeit vom Abstand der Kontaktflächen

werden Federelemente generiert, sobald ein bestimmter Mindestabstand der Kontaktflächen unterschritten wird. Wenn eine rechnerische Durchdringung der Flächen erfolgt, erhöht sich die Federkonstante auf einen vorher definierten Wert (Bild 91).

Eine Durchdringung der Körper in der Kontaktzone wird also rechnerisch zugelassen. Ebenso eine Übertragung von Zugspannungen über einen Spalt hinweg. Um hinreichend korrekte Berechnungsergebnisse zu erzielen, muss der Anstieg der Druckspannungen bei der Durchdringung der Körper so eingestellt werden, dass die resultierende Durchdringung sehr klein bleibt. Ebenso muss die Übertragung von Zugspannungen so weit begrenzt werden, dass im Ergebnis keine relevanten Zugkräfte in der Sohlfuge übertragen werden.

In der Kontaktfläche werden neben den senkrecht zur Auflagerfläche wirkenden Druckkräften auch horizontal wirkende Reibungskräfte übertragen. Die Reibung wird durch Relativbewegungen zwischen Betonplatten und Unterlage aktiviert. Entsprechend sind die aus der Reibung resultierenden Spannungen als Funktion der Relativverschiebung und der Druckspannung definiert (Bild 119). Die der Reibung entsprechende Horizontalspannung steigt zunächst mit der Verschiebung linear an (Haftreibung) und bleibt dann auf konstantem Niveau (Gleitreibung). Die hier interessierenden hitzebedingten Druckspannungen treten allerdings nur dann auf, wenn eine Plattenausdehnung verhindert wird, d. h. eine Horizontalverschiebung findet nicht statt. Entsprechend tritt auch keine Reibung auf. Diese wird erst aktiviert, wenn ein Hitzeschaden (Blowup) tatsächlich eingetreten ist und sich die Plattenreihe durch Horizontalverschiebung entspannt. In dieser Situation wird die Höhe der Plattenauslenkung beim Blowup entscheidend durch die Reibung an der Plattenunterseite beeinflusst. Die Spannungsbe-

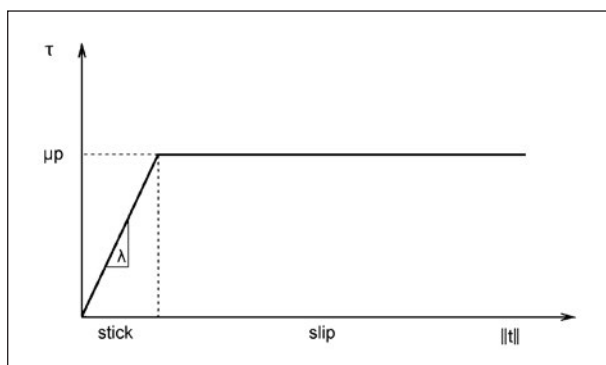


Bild 119: Reibung in Abhängigkeit von der Relativverschiebung zwischen Platten und Unterlage

rechnung im FEM-Modell bezieht sich aber auf die Situation vor einem Blowup. In diesem Fall sind die Horizontalverschiebungen noch blockiert und somit entsteht auch keine Reibung. Die Reibung braucht also im Modell nicht berücksichtigt werden.

Die Kontaktformulierung führt zu einem hochgradig nichtlinearen Modellverhalten. Entsprechend sensibel reagiert der Berechnungsalgorithmus auf die Kontaktparameter. Die Eliminierung des Reibungsparameters wirkt sich diesbezüglich positiv aus. Aber auch der Parameter für die Federkonstante ist sorgfältig zu wählen. Je weicher der Kontakt definiert wird, desto besser ist die Konvergenz des Lösungsalgorithmus. Damit einhergehend steigt aber auch die Durchdringungstiefe der Kontaktflächen. Die Federkonstante ist also so zu wählen, dass die gegenseitige Durchdringung der Kontaktflächen im realitätsnahen Bereich bleibt und gleichzeitig die Konvergenz des Berechnungsverfahrens gesichert bleibt.

8.3.5 Modellierung der Scheinfuge zwischen den Platten

Die Modellierung der Scheinfuge ist von besonderer Bedeutung, weil in diesem Bereich i. d. R. der Hitzeaufbruch stattfindet. Für eine hinreichend zutreffende Abbildung des Beanspruchungsverhaltens in Fugennähe ist es notwendig, den Fugenschnitt zu modellieren. Dies wurde realisiert, indem im Fugenbereich das obere Plattenelement aus dem Modell entfernt wurde. Die Tiefe der Fuge beträgt damit ca. 25 % der Plattendicke. Wenn konkrete Angaben zur Schnitttiefe vorliegen, kann das Modell entsprechend angepasst werden. Die Breite des Schnittes wurde auf 1 cm festgesetzt. Der Wert ist allerdings von untergeordneter Bedeutung. Entscheidend ist, dass hier kein Kontakt zwischen den Platten stattfindet. Ebenso ist eine Unterscheidung in Kerbschnitt und Aufweitungsschnitt nicht erforderlich. In beiden Bereichen gibt es keinen wirksamen Kontakt. Eine eventuell vorhandene kraftübertragende Verschmutzung ist gleichzusetzen mit einer Verringerung der Schnitttiefe und kann entsprechend durch Variation des Basismodells simuliert werden. Die Beschreibung der Interaktion der Betonplatten in der Scheinfuge über eine Kontaktformulierung erwies sich als nicht praktikabel. Durch die hohen Druckspannungen in der Fuge ergeben sich rechnerisch unrealistisch große Durchdringungen der Platten. Dies kann zwar mit einer entsprechend harten Einstellung der Kontaktparameter

verhindert werden, derartige Kontaktparameter führen aber zu einer deutlichen Verschlechterung der Konvergenz. Die Scheinfuge wurde deshalb so modelliert, dass die Platten prinzipiell verbunden sind. Diese Annahme ist zulässig, weil bei den zu berechnenden Temperaturlastfällen immer von einer geschlossenen Fuge auszugehen ist. Damit ist eine volle Übertragung der Druckspannungen ohne Durchdringung gegeben. Für die Elemente im Fugenbereich wurde das Material als pressure-only definiert. Das Material kann also nur Druckspannungen übertragen. Damit öffnen sich Fugenbereiche, in denen infolge von Querschnittsverdrehungen Zugspannungen auftreten. Eine Übertragung von Biegemomenten ist also nur sehr eingeschränkt möglich, was auch den realen Verhältnissen entspricht. Die Steifigkeit der Elemente im Fugenbereich (E-Modul) wurde so eingestellt, dass sich der Wirksamkeitsindex für die Querkraftübertragung im Wertebereich zwischen 90 % und 95 % bewegt.

Auf eine Modellierung der Dübel wurde verzichtet, weil diese keinen relevanten Einfluss auf die Schadensentstehung beim Hitzeaufbruch haben.

8.3.6 Reduktion der Rechenzeit durch Modelloptimierung

Der numerische Aufwand zur Berechnung des FE-Modells ist vergleichsweise hoch, was zu entsprechend langen Rechenzeiten führt. Für das Funktionieren des Gesamtsystems ist aber eine Begrenzung der Rechenzeit zwingend erforderlich. Damit ergibt sich die Notwendigkeit einer Optimierung des Modells, um eine Reduzierung des Rechenaufwandes zu erreichen.

Die Reduktion der Freiheitsgrade ist in diesem Zusammenhang besonders effektiv, da der Rechenaufwand in etwa quadratisch mit der Anzahl der Freiheitsgrade ansteigt.

Unter Ausnutzung der Symmetrie kann das Modell mit entsprechender Lagerung entlang der Längsachse (Bild 120) halbiert werden.

Für die Optimierung des Modells kann weiterhin die Tatsache benutzt werden, dass die feine Elementierung im Fugenbereich für andere Plattenabschnitte nicht notwendig ist. Hier können größere Elemente verwendet werden, ohne die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse merklich zu beeinflussen. Die Gesamtzahl der notwendigen Elemente wird dadurch entsprechend reduziert. Bei der Modellierung des Übergangsbereichs zwischen kleineren und größeren Elementen ist darauf zu achten, dass keine freien Elementknoten entstehen. Dies gilt auch für die Mittelknoten auf den Elementkanten. Diese Bedingung führt dazu, dass sich die Konstruktion eines Übergangsbereiches vergleichsweise aufwendig gestaltet. Bild 121 zeigt die schrittweise Realisierung eines Übergangsbereiches unter Ver-

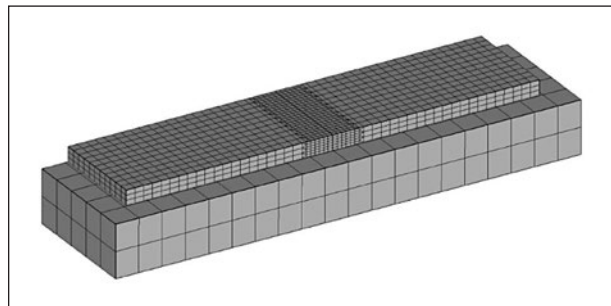


Bild 120: Basismodell mit 2 Platten unter Ausnutzung der Symmetrie

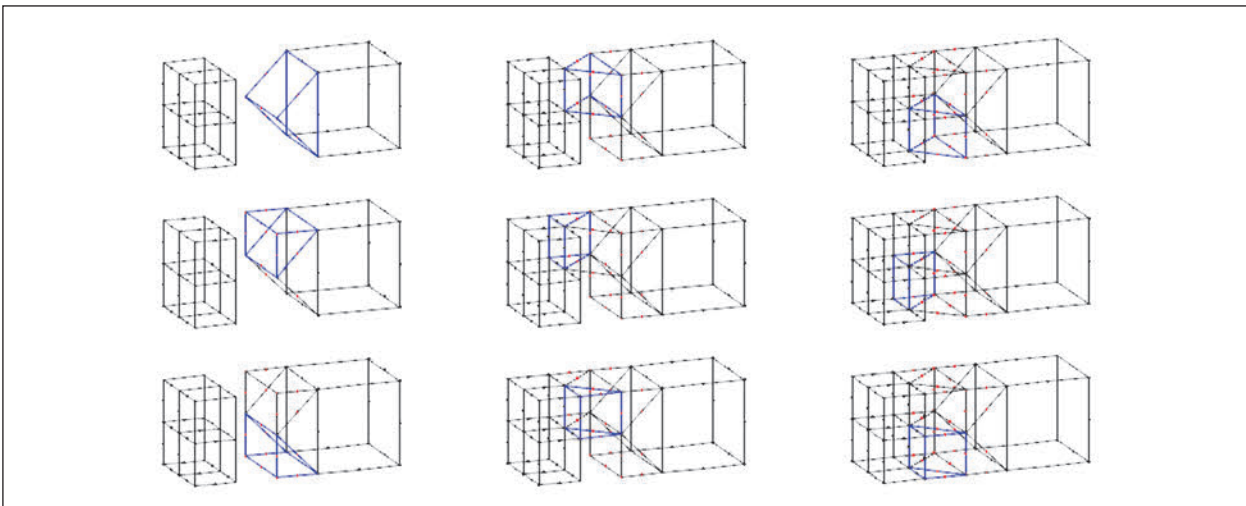


Bild 121: Übergang mit Wedge-Elementen zur Netzverfeinerung im Bereich der Querfuge

wendung von 15-Knoten-Wedge-Elementen, wie sie im Modell umgesetzt wurde. Um den Übergang von jeweils 4 kleinen zu einem großen Brick-Element regelgerecht herzustellen, ist die Anordnung von 9 Wedge-Elementen notwendig.

8.3.7 Materialparameter

Für die korrekte Festlegung der im Modell zu verwendenden Materialgesetze ist es erforderlich, das Ziel der Berechnungsaufgabe klar zu definieren. Da die Zielstellung des Gesamtprojektes in der Vermeidung von Hitzeschäden besteht, ist es naheliegend, einen beginnenden Hitzeschaden rechnerisch nachzuvollziehen um damit den zu vermeidenden Grenzfall zu identifizieren. Dieses Ziel ist mit realistischem Aufwand jedoch nicht erreichbar. Bei Annäherung an den Versagensbereich ändert sich das zunächst linear elastische Materialverhalten. Es kommt zu lokalen Plastifizierungen, Mikrorissbildungen und Spannungsumlagerungen. Dieses Materialverhalten kann nur mit äußerst komplizierten Materialgesetzen approximiert werden, deren Anwendung die Bestimmung spezieller Parameter erfordert. Eine zusätzliche Schwierigkeit besteht darin, dass die Versagensfläche im dreidimensionalen Spannungsraum nicht mit hinreichender Genauigkeit bekannt ist. Eine experimentelle Bestimmung der entsprechenden Festigkeitswerte für den konkret vorliegenden Fall ist sehr aufwendig. Weiter ist zu beachten, dass wesentliche Einflussfaktoren weitgehend unbekannt bleiben und von Fuge zu Fuge stark variieren können (Maß und Verteilung der Fugenverschmutzung, örtliche Fehlstellen, Tiefe der Kerbschnitte). Es ist also festzustellen, dass die Berechnung des tatsächlich eintretenden Hitzeschadens in der Praxisanwendung nicht realisierbar ist. Sinnvoller ist es, mit linear elastischen Materialgesetzen die Betonspannungen zu berechnen, welche sich bei bestimmten Temperaturzuständen ergeben und durch Vergleich mit bereits aufgetretenen Spannungszuständen sichere und unsichere Bereiche zu identifizieren.

Entsprechend wird im Modell generell mit linear-elastischen Materialgesetzen gerechnet.

Dies gilt auch für den Unterbau. Dieser soll, um seine Aufgabe dauerhaft zu erfüllen, durch einen einzelnen Lastübergang nicht verändert werden. Dies ist aber gerade das Kennzeichen eines elastischen Verhaltens. Der Unterbau ist also als elastischer Volumenblock zu definieren. Der E-Modul wird so

gewählt, dass sich realistische Werte für die Vertikalverformung ergeben. Wenn entsprechende Messwerte vorliegen kann die Kalibrierung an diesem Punkt verbessert werden.

Für den Fugenbereich (Elemente unterhalb des Kerbschnittes) werden die die Steifigkeitswerte so festgelegt, dass sich ein realistisches Fugenverhalten (geringe Übertragung von Biegemomenten, Wirksamkeitsindex zwischen 90 % und 95 %) ergibt.

Ein wichtiger Parameter für den Beton ist außerdem die Wärmedehnzahl. Sofern hier keine durch Laborversuche ermittelten Werte vorliegen wird mit Standardwerten aus den [RDO Beton 09] gerechnet.

8.3.8 Softwaretool zur Erstellung des Finite Elemente Modells, zur Steuerung der FE-Rechnung und zur Auswertung der Ergebnisse

Das Modell ist vollständig durch eine Input-Datei zu beschreiben und an den FEM-Solver zu übergeben. Die Inputdatei ist eine Textdatei, die das Modell und die einzelnen Berechnungsschritte vollständig beschreibt. Sie ist so umfangreich, dass eine automatische Generierung erforderlich ist. Das hierfür geschriebene Präprozessormodul wird über das Steuermodul gesteuert. Dieses fragt die notwendigen Geometrien, Material und Temperaturdaten aus der Datenbank ab und übergibt sie dem Präprozessor. Dieser erstellt das Finite Elemente Modell und startet den FEM-Solver.

Nach erfolgter Berechnung greift der Postprozessor auf die Ergebnisse zu, liest sie ein, filtert nicht relevante Spannungsspitzen heraus und sucht die maßgebenden Spannungen heraus.

Diese Spannung wird zurück an das Steuermodul übergeben, das sie in die Datenbank einträgt.

Prä- und Postprozessor sowie die Ansteuerung des FEM-Solvers [CalculiX] sind in dem in Kapitel 8.2.2 beschriebenen Softwaretool integriert.

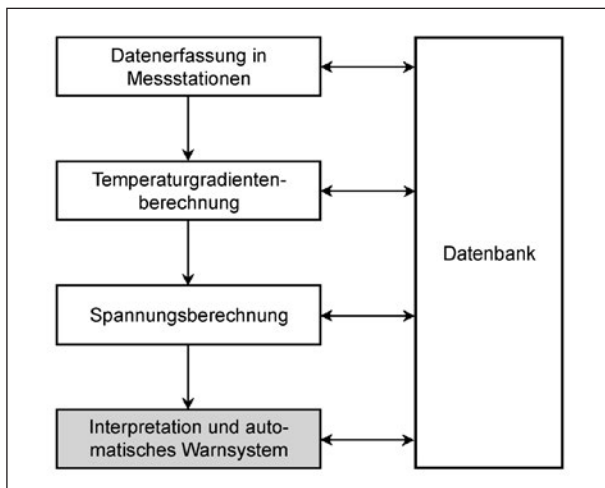


Bild 122: Einordnung in Übersicht

9 Modul zur automatisierten Umsetzung von Maßnahmen

Konzeptionell war vorgesehen, aus den gesammelten Daten Schwellenwerte abzuleiten, bei deren Überschreitung eine Maßnahme eingeleitet wird. Diese Berechnung liefert ausgehend vom vorliegenden Temperaturzustand der Platte und auf der Basis der prognostizierten Klimadaten die zukünftigen Temperaturwerte für die Fahrbahnplatte und eine Risikobewertung.

Eine wesentliche Aufgabe bestand darin, die kritischen Schwellenwerte für die berechneten Betonspannungen zu definieren. Das Auftreten von Hitzeschäden hängt wesentlich vom Auftreten lokaler Unregelmäßigkeiten ab. Es ist aber weder möglich, diese vollständig zu detektieren, noch in ihren Auswirkungen umfassend zu berechnen. Damit ist es praktisch unmöglich, im interessierenden Temperaturbereich eine definitive Grenze anzugeben, welche gefährliche Hitzeschäden ausschließt. Um zu sinnvollen und praktikablen Festlegungen zu kommen, kann es sinnvoll sein, an dieser Stelle Risikobetrachtungen anzustellen.

Zunächst wurden als Kriterien für die Risikobewertung ein Vergleichsspannungsniveau zu einem uns bekannten kritischen Zustand (z. B. der sich am dritten Tag über 30 °C im Mai einstellt) und die Relation zur Betonfestigkeit ermittelt.

Auf der Basis der innerhalb des Forschungsthemas gewonnenen Erkenntnisse wurde festgelegt, dass derzeit die Gefahrenmeldungen nicht automatisch durch die Software erzeugt werden, sondern dass das Informationssystem Daten generiert, auf deren

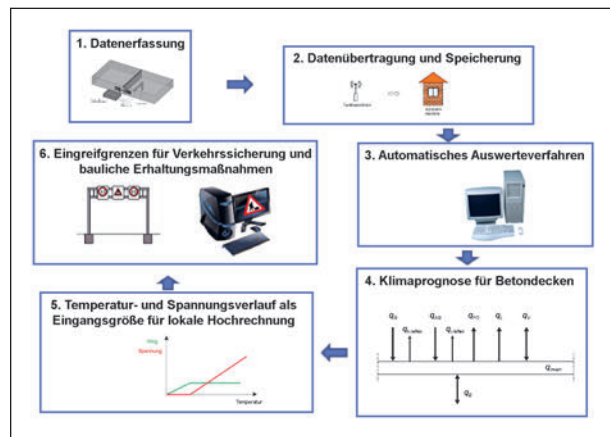


Bild 123: Prinzipielle Vorgehensweise für Prognosesystem und Eingreifgrenzen

Grundlage ein verantwortlicher Mitarbeiter über Maßnahmen entscheiden kann. Zum derzeitigen Zeitpunkt wurde auch in Rücksprache mit verantwortlichen Vertretern der Straßenbauverwaltungen beschlossen, dass das Informationssystem zunächst bei Bedarf als zusätzliche Informationsquelle für das Einleiten von Maßnahmen heranzuziehen ist.

Basierend auf der entwickelten Software wurde in diesem Schritt eine Empfangs- und Auswerteeinheit erarbeitet und eingerichtet, mit deren Hilfe ein automatisiert ablaufendes Entscheidungstool zur Anwendung kommen könnte. Aufgrund der sehr starken IT-Sicherheitsbestimmungen bestand keine Möglichkeit, das Softwaresystem bei der verantwortlichen Straßenbaubehörde einzurichten.

Die Bild 123 zeigt die prinzipielle Vorgehensweise zum Aufbau eines Prognosesystems.

9.1 Entwicklung eines Moduls zur Entscheidungshilfe

Die Dateneingangssoftware wird mit dem Klimaprognosetool verknüpft, sodass automatisierte Prognoserechnungen erfolgen können. Es wurde ein Modul zur Entscheidungshilfe entwickelt, das in der Lage ist, aus der Klimaprognose und den vorliegenden Materialparametern realistische Spannungsprognosen zu berechnen und das jeweilige Niveau zu bewerten. Zu diesem Zweck wird dieses Modul ebenfalls mit dem Klimaprognosetool verknüpft. Im Ergebnis erfolgt zunächst eine automatische Einschätzung des Gefährdungspotenzials ohne gutachterliche Bewertung (siehe Farbliche Markierung der Station in Bild 108 für den Ist-Zustand und Bild 111 für den prognostizierten Zustand).

9.1.1 Arbeitsplätze bei Forschungsnehmer, BAST und zuständiger Straßenbau-behörde

Der Forschungsnehmer richtete einen Computer-arbeitsplatz ein, mit dem die wissenschaftliche Auswertung und Bewertung der Daten möglich ist. Die erhöhten IT-Sicherheitsvorkehrungen haben die Installation und den Betrieb des Softwaretools in der Straßenbaubehörde verhindert, da hierfür die ständige Kommunikation mit dem Datenbankserver über einen Port benötigt wird. Dies ist trotz Verschlüsselung nicht mit den Sicherheitsvorschriften der Straßenbaubehörde vereinbar.

Der Forschungsnehmer hat auf einem vorhandenen Rechner der BAST die Empfangssoftware, die Auswertesoftware für die relevanten Daten, das Klimaprognosetool und das Modul zur Entscheidungshilfe installiert. Es erfolgte eine Einweisung vor Ort.

Voraussetzungen durch die BAST: Der Rechner kann in ein LAN-Netzwerk integriert und per Kabel an das Telefon-Festnetz angeschlossen werden. Ein geeignetes Mail-Konto zum Empfang der Daten wird vorausgesetzt. Die Netzkonfiguration des PC für ein vorhandenes lokales Netzwerk erfolgt durch einen Netzwerkadministrator.

9.1.2 Anbindung des Softwaretools

Die Anbindung des Softwaretools kann direkt in den Straßenbauverwaltungen über die CSI-Schnittstelle erfolgen. In den Straßenbauverwaltungen stehen dann folgende Aktionen zur Verfügung:

- Aktivieren eines Handprogrammes zur Regelung des Verkehrs mithilfe der angeschlossenen Verkehrsbeeinflussungsanlagen,
- Dialogmeldung an den Operator, damit dieser entsprechende Aktionen veranlasst,
- Abspielen eines Soundfiles, um den Operator auf ein Gefahr aufmerksam zu machen,
- bei Bereitstellung eines Mailservers wäre auch das Absenden einer Email möglich.

Weitere Aktionen könnten bei Bedarf hinzugefügt werden. Für die Weitergabe von Daten an externe Systeme könnten zusätzliche Schnittstellen konfiguriert werden.

9.2 Entwicklung von Schnittstellen zur direkten Anbindung an vorhandene Anlagen der Verkehrsbeeinflussung

Falls eine Verkehrsbeeinflussungsanlage im Bereich der Messstationen vorhanden ist, besteht die Möglichkeit, die automatische Einschätzung des Gefährdungspotenzials direkt in Maßnahmen einer Geschwindigkeitsbegrenzung umzusetzen. Dazu wäre es erforderlich, dass entsprechende Schnittstellen der Software für die Verkehrsbeeinflussungsanlagen offen gelegt werden und ein Übergabecode vereinbart wird.

Zur Überwachung, Steuerung und Datenerfassung technischer Prozesse im Netzwerk der Verkehrsbeeinflussungsanlagen (VBA) wurde das Konzept SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) definiert. Ein SCADA-System hat eine hierarchische Struktur und gliedert sich in drei Funktionsebenen:

- die Bedien- und Leitebene für die Systemvisualisierung, die Datenprotokollierung und den manuellen Betrieb,
- die Automatisierungsebene für die Datenerfassung und -verarbeitung sowie die Berechnung automatischer Ereignisse zur Prozesssteuerung,
- die Feldebene für die Erfassung von Messvariablen und der Steuerung von Endgeräten.

Die Bedien- und Leitebene ist mit ihren Komponenten in der Verkehrsleitzentrale untergebracht. An diese Verkehrszentralen können unterschiedlichste Geräte (wie z. B. Wechselverkehrszeichengeber, Lichtsignalanlagen usw.) entsprechend den Systemanforderungen angeschlossen werden.

Auf der Leitebene (Bedienrechner) erledigen diese Rechner folgende Aufgaben:

- Visualisierung des aktuellen Zustands,
- manuelle Bedienereingriffe,
- Datenprotokollierung,
- Datenarchivierung,
- Erstellung von Statistiken und Protokollen.

Die Rechner der Automatisierungsebene (Verkehrrechner) erhalten alle Daten der Feldebene (Streckenstationen) und haben die folgenden Aufgaben:

- Datenerfassung,
- Datenaufbereitung,
- Steuerung (Verkehr über Wechselverkehrszeichengeber),
- Datenarchivierung.

Die Daten der Streckenstationen auf Feldebene werden per Inselbus (TLS, TLSoverIP) auf die Automatisierungsebene (Server) übertragen.

Die Streckenstationen der Feldebene sind für die Erfassung der Verkehrs- und Umfelddaten und der Befehlsausgabe an die Aktoren zur Steuerung der Wechselverkehrszeichen-/Signalgeber zuständig.

9.2.1 Verkehrsmanagementnetz [CONDUCT]

Verkehrsbeeinflussungsanlagen (Bild 124) werden durch Verkehrszentralen gesteuert. In größeren Verkehrsmanagementnetzen werden die Verkehrszentralen an übergeordneten Verkehrsmanagementzentralen angeschlossen. Mit einer Verkehrszentrale sind sogenannte Kommunikationsrechner (KRI) verbunden. Über Inselbusse (seriell, TCP/IP) werden die Streckenstationen angeschlossen.

Auf der Feldebene ist die Streckenstation die zentrale Steuereinheit, die vor Ort an der Strecke installiert wird und dort die Daten- und Energieverteilung sichergestellt. Über ein Steuergerät sind alle Datenendgeräte, also die Sensoren und Aktoren, auf Feldebene verbunden. Die Kommunikation zwi-

schen dem Steuergerät und den Datenendgeräten erfolgt über den sogenannten Feldbus.

Die Anforderungen zur Anbindung von Sensoren und Daten an eine Verkehrsbeeinflussungsanlage (VBA) im Bereich der Feldebene wurden von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) in einem Dokument „Feldbus-Spezifikation im Testfeld des AK 3.2.1 Umfelddatenerfassung in VBA“ eines Arbeitskreises festgelegt und niedergeschrieben.

9.2.2 Kommunikationsnetzwerk [CONDUCT]

Grundsätzlich erfolgt die Kommunikation zwischen Streckenstation und Zentrale nach Vorgabe der jeweils den aktuellen technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS). Es werden allerdings auch ältere Versionen unterstützt. Abhängig von der Einsatzart kommt das TC57-Protokoll oder das TLSoverIP-Protokoll zum Einsatz. Die Streckenstation kommuniziert hierbei direkt oder über ein sogenanntes Kommunikationsrechnerinterface (KRI) mit der Zentrale.

Das Kommunikationsrechnerinterface (KRI) stellt ein zentrales Bindeglied zwischen Zentrale und Streckenstationen dar. Über die Inselbusse kann ein KRI mit nahezu beliebig vielen Streckenstationen kommunizieren und vermittelt die komprimierten Nutzdaten an eine oder mehrere Zentralen. Ein KRI dient somit als zentraler Vermittlungsknoten zwischen der Zentrale und der Außenanlage.

Zusätzlich zu der bewährten Übertragung über Draht kann die Streckenstation auch über Lichtwellenleiter mit der Verkehrsleitzentrale oder den Feldbusgeräten kommunizieren. Darüber hinaus kann die Datenübertragung auch über Funk erfolgen. Hierbei stehen ebenfalls mehrere Varianten zur Verfügung (z. B. lokaler/gebührenfreier Funk, WLAN, GPRS oder UMTS).

Die Kommunikation zwischen der Streckenstation und den Datenendgeräten kann auf vielfältige Weise erfolgen. Neben einer seriellen Kommunikation auf Basis des SiTOS-Protokolls (Siemens Traffic Outdoor Station) können auch Feldgeräte mit analogen Signalen oder potenzialfreien digitalen Kontakten angeschlossen werden. SiTOS ist ein proprietäres Siemens Kommunikationsprotokoll, das mit allen führenden Herstellern von Feldgeräten abgestimmt und implementiert ist. Darüber hinaus sind diverse weitere serielle und parallele Protokol-

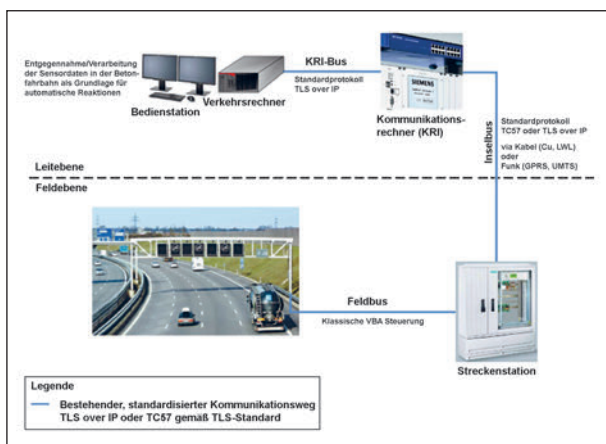


Bild 124: Aufbau einer Verkehrsbeeinflussungsanlage (eigene Darstellung nach Siemens AG)

le zur Kopplung von Feldgeräten realisiert. Auch die Kommunikation via Netzwerkprotokolle (TCP/IP, FTP etc.) ist möglich (Bild 125).

Zur Einbindung von Feldgeräten (Streckenstationen) an eine Verkehrszentrale gemäß den Vorschriften der BASt oder ASFINAG wird eine Kommunikationsschnittstelle nach TLS (technische Lieferbedingungen für Streckenstationen) benötigt. Das TLS Modul ist die Schnittstelle zwischen den Streckenstationen und allen weiteren an den Streckenstationen angeschlossenen Sensoren. Die im TLS Format von den Streckenstationen übertragenen Daten und die zu den Streckenstationen zu übertragenen Schaltbefehle werden in der Verkehrszentrale in das interne Format konvertiert oder vom internen Format in das TLS Format umgewandelt.

Das TLS Kommunikationssystem basiert auf dem OSI 7 Schichtenmodell gemäß DIN/ISO 7498. Das OSI Referenzmodell ist eine abstrakte Definition eines Kommunikationssystems. Die TLS beschreibt die Implementierung auf Basis dieses Modells und stellt somit ein offenes, kompatibles System für die Kommunikation mit Komponenten der unterschiedlichen Hersteller bereit. Das Modell basiert auf einer Schichtenhierarchie. Jede Schicht realisiert bestimmte Dienste. Die Dienste einer Schicht werden durch Protokolle realisiert. Die TLS hat hier die OSI Schichten 2 (Sicherheitsschicht), 3 (Vermittlungsschicht) und 7 (Anwendungsschicht) festgelegt.

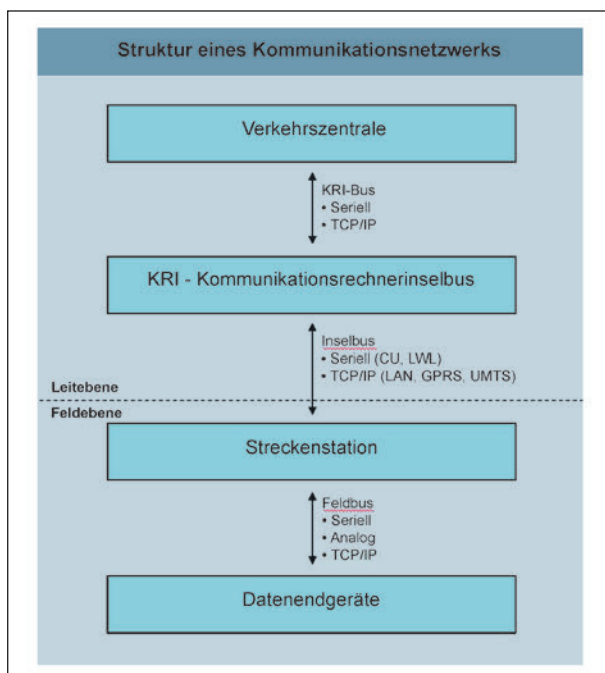


Bild 125: Struktur eines Kommunikationsnetzwerks (eigene Darstellung nach Siemens AG)

Ein TLS-Telegramm besteht prinzipiell aus einer Sicherungs- (OSI2), einer Vermittlungs- (OSI3) und einer Anwendungsschicht (OSI7). Definitionen für die Schichten 4, 5 und 6 des OSI Referenzmodells sind nicht vorgesehen. In der Schicht 3 werden die einzelnen Vermittlungsabschnitte definiert, über die ein Telegramm übertragen wird. Die Reihenfolge dieser Adressen gibt an, welchen Weg das Daten-telegramm durchlaufen muss, um an das Ziel zu gelangen.

Das TLS-Protokoll wurde ursprünglich für die Datenübertragung über serielle Leitungen konzipiert. Dabei wurden die Streckenstationen über eine Modem-Verbindung mit einem Kommunikationsrechner in der Unterzentrale verbunden. In der Protokolldefinition spiegelt sich dies durch die Verwendung der Start- und Stop-Bytes in der OSI2-Schicht wieder. Bedingt durch den technischen Fortschritt der Kommunikationsinfrastruktur werden heutzutage vermehrt TCP/IP-Netze (z. B. Glasfaser-Ethernet) als Kommunikationsmedium zwischen Streckenstationen und Unterzentralen eingesetzt.

9.2.3 Übersicht der System-Schnittstellen [CONDUCT]

Eine Recherche ergab, dass in Deutschland für Steuerzentralen zur Streckenüberwachung und -beeinflussung zum Großteil das Produkt Conduct+ der Siemens AG verwendet wird. Zur Interaktion mit internen und externen Systemen benötigt eine Steuerzentrale in einem Automatisierungssystem unterschiedliche Kommunikationskanäle. Bild 126 gibt einen Überblick über die verschiedenen Systemschnittstellen.

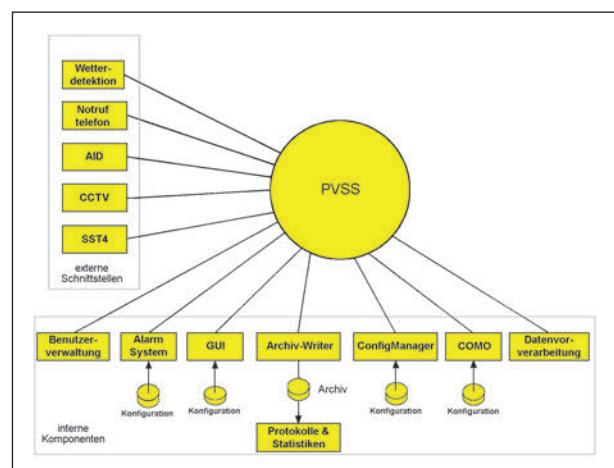


Bild 126: Systemschnittstellen (aus [CONDUCT])

PVSS Module stellen dabei eine Middleware dar, die über IP-Verbindungen kommunizieren.

PVSS-Anwendungen sind in einer hierarchischen Struktur aufgebaut und bestehen aus Managementkomponenten, die über einen Datenverteiler kommunizieren.

Jedes PVSS Modul kann lokal oder auf einem entfernten Rechner ausgeführt werden, solange es eine gültige Verbindung zum Ereignismanager hat. Die gesamte Kommunikation wird über diesen Ereignismanager abgewickelt, der die TCP/IP Nachrichten überprüft, als Puffer dient und verteilt.

PVSS stellt hierzu eine Anzahl von Standardschnittstellen (APIs) bereit:

- Modbus TCP,
- Modbus RTU,
- Profibus (Automationstechnik Siemens AG),
- TLS (TLSoVerIP),
- SNMP (Simple Network Management Protocol),
- Applicom Interface (Automationstechnik Allen Bradley etc.),
- OPC Client/Server,
- OPC Alarms & Events,
- IEC 60870-5-104 (Standard Fernwirktreiber).

Es gibt auch ein C++ API (Application Program Interface), das zur Entwicklung von Treibern genutzt werden kann.

Zur einfachen und problemlosen Anbindung von externen Systemen gibt es noch weitere Standardschnittstellen, wie z. B.:

- CSI (Conduct+ Standard Interface) mit Austausch von XML-Dateien,
- NTCIP (Nation Transportation Communication for ITS Protocols),
- WANCOM (WAN Kommunikation) mit Austausch von TLS-Daten.

Mit der CSI-Schnittstelle (Conduct+ Standard Interface) der Firma Siemens wird ein einfaches Applikationsinterface zur Anbindung von Fremdsystemen bereitgestellt. Über diese offene Schnittstelle können Daten zwischen dem Steuersystem der Verkehrszentrale (CONDUCT+ - System) und jeglichen anderen Systemen ausgetauscht werden. Hierzu

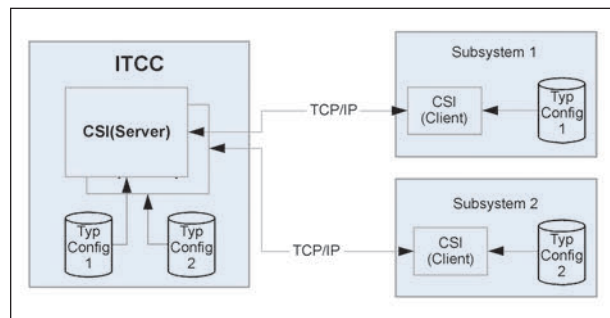


Bild 127: Kommunikation über die CSI-Schnittstelle (aus [CONDUCT])

wird dem Kommunikationspartner der Source code (Java, C++, VisualBasic (OCX), Perl) mit Musterapplikationen übergeben (Bild 127).

9.3 Status Quo Messsysteme und Informationssystem

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Aufwand, ein wissenschaftlich nutzbares Messsystem mit automatisierter Auswertung aufzubauen, auf ein vielfaches steigt, wenn es in einen praxisrelevanten Dauerbetrieb überführt werden soll.

Trotz sorgfältig ausgewählter Sensorik und Messtechnik sowie intensiv ausgearbeiteter Softwarekonzepte stellt der nicht-fachbezogene Aufwand einen Großteil der zu erbringenden Leistungen dar.

Die Herausforderungen reichen hierbei von möglichen Softwarefehlern in den Steuergeräten der verwendeten Messtechnik, der Sicherstellung der autarken Stromversorgung, der Beschädigung der Messtechnik durch den Straßenbetrieb bis hin zum Diebstahl von Solarpanels.

Im Softwarebereich lassen die IT-Sicherheitsbestimmungen in den Bundes- und Landesbehörden eine mit vernünftigen Aufwand erstellbare Software mit Datenbankanschluss über das Internet in Zukunft nicht mehr zu. Browserbasierte Webservice-Lösungen sind in Zukunft anzustreben. Dies führt zu einer Verlagerung der benötigten Rechenleistung und des Speicherbedarfs sowie der hierbei anfallenden Hardware und der Stromkosten von der Client- auf die Serverseite. Insbesondere im langfristigen Betrieb wird dies zu einem maßgeblichen Kostenfaktor.

Insgesamt ist bei Messsystemen im Straßenbetrieb mit erhöhten Erhaltungs- und Wartungskosten zu rechnen.

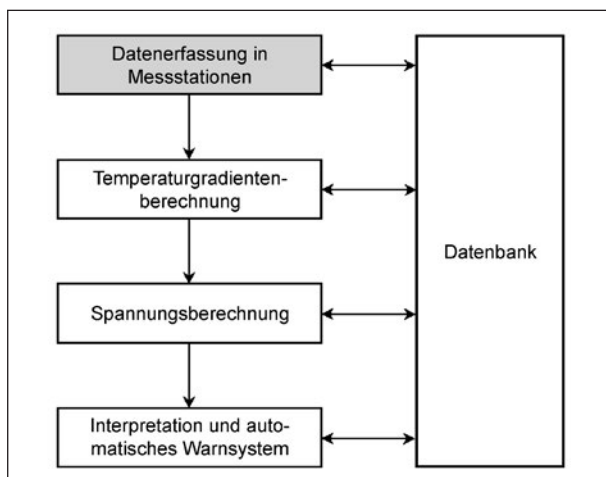


Bild 128: Einordnung in Übersicht

10 Herstellung eines Demonstrators unter Einsatz des gesamten Informations- bzw. Prognosesystems und wissenschaftliche Auswertung

Im Rahmen des Projekts wurde ein neuer Demonstrator angelegt sowie zwei bestehenden Messstellen aufgerüstet.

10.1 Anlage eines neuen Demonstrators

10.1.1 Anforderungen an das Messsystem

Die Bestandteile des Demonstrators sind vom Forschungsnehmer beschafft und im Prüflabor für den Verwendungszweck modifiziert und vormontiert worden. Dabei handelte es sich um die Temperaturmessung der Luft, der Fahrbahnoberfläche und der Betontemperatur über den Querschnitt (an zwei Stellen) in 4 bis 6 Ebenen. Des Weiteren wurde die Fugenöffnungsweite an zwei aufeinanderfolgenden Querscheinfugen (mittels potenziometrischer Wegaufnehmer) gemessen. Gleichzeitig erfolgte die messtechnische Ermittlung der temperaturinduzierten Dehnung innerhalb einer Betonplatte mittels horizontal und vertikal angeordneter Dehnmessstreifen als weiteren Ansatz zur Spannungsermittlung in der Betondecke. Um die in der Betondecke auftretenden temperaturinduzierten Spannungen rechnerisch ermitteln zu können, wurden die relevanten straßenbauspezifischen Baustoffkennwerte ermittelt, indem an zuvor entnommenen Bohrkernen

Mess-			
größe	bereich	auflösung	toleranz
Fugenbewegung	10 mm	0,01 mm	± 0,05 %
Beton-temperatur	-50 bis + 200 °C	0,1 °C	±0,30 K bei 60 °C
Lufttemperatur	-30 bis 70 °C	0,1 °C	±0,20 K
Luftfeuchte	0 bis 100 % rel. F.	1 % rel. F.	± 2 % rel. F.
Globalstrahlung	0 bis 1.300 W/m ²	1,5 W/m ²	± 1 %
Windrichtung	0 + 360 °	2,5 °	± 2,5 °
Windstärke	0,3 bis 50 m/s	0,1 m/s	± 0,3 m/s
Niederschlag	-	1/0	-

Tab. 4: Zu erfassende Messgrößen

Laborprüfungen vorgenommen wurden. Diese betrafen insbesondere die Wärmedehnzahl, den Elastizitätsmodul sowie die Druck- und Spaltzugfestigkeit. Der Temperaturverlauf in der Betondecke ist nicht nur von der Lufttemperatur abhängig, sondern vielmehr von mehreren klimatischen Parametern wie z. B. der Globalstrahlung, den Windverhältnissen, den Niederschlagsereignissen und dem Reflexionsvermögen der Betonoberfläche. Demzufolge wurde die Messstation mit weiteren Messsystemen ausgerüstet, um diese Kenngrößen näherungsweise berücksichtigen zu können.

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.1 definierten Messtoleranzen wurden zur Erfassung der Messgrößen am Markt verfügbare Sensoren mit Industriestandard und der Messgröße angepasster Auflösung eingesetzt (Tabelle 4).

Weitere Anforderungen an das Messsystem waren:

- energieautarker Betrieb,
- Datenlogger und Messumformer sollten bzgl. der Anzahl und Art der Sensoren offen und erweiterbar sein,
- Datenübertragung über Funkmodem,
- Einsatz handelsüblicher Sensoren,
- freie Auswahl der Sensoren,
- Datenübertragung via Email/FTP/WEB.

Als ein geeignetes System hatten sich Komponenten des GO Wireless Connect der Firma wireless netcontrol GmbH herauskristallisiert.

Das GO Wireless Connect ist ein modular erweiterbares System, das über eine Busverbindung den Anschluss von bis zu 12 Erweiterungsmodulen ge-

stattet, über die bis zu 48 analoge Eingänge für Messsensoren realisiert werden konnten. Das Zentralmodul übernahm hierbei die Steuerung und Kommunikation mit dem Mobilfunknetz, über die analogen Eingänge konnten Standardsignale 0-1 V, 0-10 V, 4 – 20 mA mittels 10 Bit analog/digital Wandler verarbeitet werden. An separat zur Verfügung stehenden Pt1000 Modulen konnten Temperatursensoren in Zwei-, Drei- und Vierleitertechnik direkt angeschlossen werden.

Die Auswahl der Sensorik für Temperatur-, Weg- sowie Klimadaten konnte wahlfrei erfolgen, sofern die Sensoren o. g. Standardschnittstellen zur Verfügung stellen. Für die Ausrüstung der Messstation wurde der Einsatz von Pt1000 Temperatursensoren in Dreileitertechnik mit dem Schutzgrad IP68 vorgesehen.

Für die Erfassung der Fugenbewegung kamen potenziometrische Wegaufnehmer der Firma Wacon mit dem Schutzgrad IP 67 zum Einsatz. Mit potenziometrischen Sensoren ist im Messsystem eine Auflösung von 1/1.000 des Messbereiches realisierbar. Das heißt, für einen Messbereich von 10 mm ergibt sich eine Messwertauflösung von 0,01 mm.

Für die Aufnahme der Klimadaten war der Einsatz von Wettersensoren der Firma Adolf Thies GmbH & Co. KG vorgesehen.

Der Energiebedarf der Messstation ließ sich unter Einsatz der o. g. Komponenten (ohne Winterbetrieb der Sensoren für Niederschlag und Wind) mittels einer handelsüblichen Inselanlagenrealisierung realisieren. Freien Zugang in Südrichtung vorausgesetzt, war eine Leistung von 85 Wp ausreichend. Für einen eingeschränkten Zugang in Südrichtung war die Leistung der Solaranlage entsprechend zu erhöhen. Planmäßig sollte eine jährliche Wartung der Anlage erfolgen.

In Abhängigkeit von den einzusetzenden Wettersensoren war eine Masthöhe von bis zu 4 m erforderlich. Das erforderliche Fundament wurde seitens der zuständigen Straßenverwaltung erstellt. Am Mast wurden ebenfalls der Schaltschrank inklusive der Messtechnik sowie die Energieversorgung über die Inselanlagen angebracht. Der Anschluss der straßenseitig zu installierenden Sensorik erfolgte über Kabel mit einer Länge von bis zu 15 m.



Bild 129: Installation des Messsystems auf der A5

10.1.2 Einbau des neuen Demonstrators

Zunächst erfolgte die Standortwahl im deutschen BAB-Netz unter Berücksichtigung maßgebender Randparameter, wie z. B. die vorhandene Bauweise (Schichtenaufbau), der Zustand und das Alter des Oberbaus, die spezifischen Materialkennwerte sowie die klimatischen Bedingungen des Standorts (Globalstrahlung, Regenhäufigkeit etc.). Die Standortwahl erfolgte in Abstimmung mit der BAST.

Für die Installation der komplett neuen Messstation wurde der Standort am km 640,0 der A5 RF Basel gewählt.

Die Verkehrssicherung und die Herstellung des Fundamentes für die Streckenstation sind von der zuständigen Straßenbaubehörde gestellt worden.

Die Installation der Messsysteme und der Streckenstation mit Energieversorgungs- und Datenübertragungsmodul erfolgte in situ am 03.05.2016 (Bild 129).

Nach Fertigstellung wurden alle Messsysteme auf ihre Funktion hin geprüft, gegebenenfalls justiert und kalibriert. Das Datenspeicherungssystem vor Ort und die Datenfernübertragung wurden getestet. Ebenfalls wurde das Energieversorgungssystem geprüft.

10.2 Aufrüsten bestehender Messstellen

Neben der Fertigstellung des zuvor beschriebenen neuen Demonstrators war vorgesehen, an zwei bestehenden Messstellen einen ebenso großen Messumfang zu gewährleisten.



Bild 130: Messstation auf der A48

Es wurde beschlossen, eine Messstelle im Bundesland Rheinland-Pfalz (BAB A48) und eine Messstelle im Freistaat Bayern (BAB A92) aufzurüsten, sodass der oben beschriebene Standard für den neu zu errichtenden Demonstrator erreicht wird.

Die Erweiterung des bestehenden Messsystems auf der A48 an der Station km 76,76 der RF Koblenz erfolgte durch Installation von Sensoren für die Oberflächentemperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeit und Windrichtung am 06.04.2016 (Bild 130).

Wegen der Erweiterung der bestehenden Messstelle der A92 mit weiteren Komponenten durch die TU München war es aus Platzgründen und Gründen der Energieversorgung nicht mehr möglich, die geplante Aufrüstung vorzunehmen.

Stattdessen wurde die Neuinstallation einer kompletten Messstation auf der A92 am km 26,5 der RF München am 27.04.2016 durchgeführt (Bild 131).

10.3 Betrieb der Demonstratoren

Es war vorgesehen, innerhalb der Projektlaufzeit diese drei Demonstratoren für zwei Sommerperio-



Bild 131: Vorhandener (vorn) und neuer (hinten) Demonstrator auf der A92

den und die dazwischen liegende Winterperiode zu betreiben und eine Wartung und Pflege vorzunehmen. Dabei wurden die in den Datenloggern vor Ort gespeicherten Daten per Funk an den Server des Forschungsnehmers übertragen, gespeichert und gesichert. Bei Ausfall einzelner Komponenten wurden diese ersetzt, soweit es sich um funktionsbedingte Ausfälle der Technik selbst handelt. Schäden infolge von Unfällen, Diebstahl, Vandalismus oder besondere Naturereignisse sowie Schäden durch unsachgemäße bauliche oder betriebliche Erhaltungsmaßnahmen und/oder durch den Betriebsdienst traten während der Projektlaufzeit nicht auf.

10.4 Auswertung der Daten für kurzfristige Prognosen

Neben der direkten Nutzung der Daten erfolgte an dieser Stelle eine wissenschaftliche Analyse der gesammelten Daten. Durch die Auswertung und Bewertung sollte insbesondere geklärt werden, inwieweit diese Daten für die Bewertung der temperaturinduzierten Spannungszustände herangezogen werden können und hinreichende realistische Aussagen zum Gefährdungspotenzial während einer Hitzeperiode geben können. Dabei war nicht nur die grundsätzliche Aussage von Belang, sondern auch die kurzfristige Prognosefähigkeit auf dieser Datenbasis, um gegebenenfalls Vorwarnsysteme zu aktivieren oder andere Maßnahmen einleiten zu können.

10.4.1 Berechnung der Druckspannung

Am Beispiel der Temperaturdaten der Messstation an der A92 wurde für vier Perioden eines Jahres mit

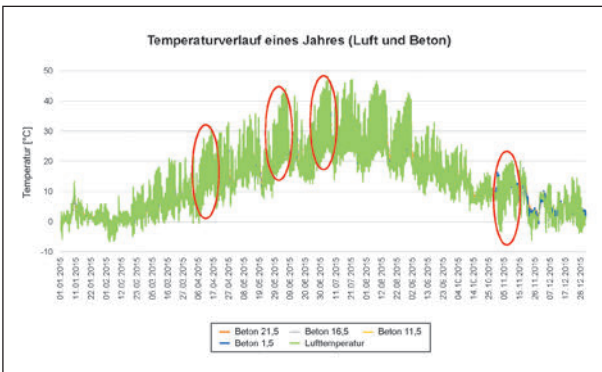


Bild 132: Temperaturverlauf gesamtes Jahr mit Betrachtungszeiträumen (rot hervorgehoben) in den folgenden vier Abbildungen

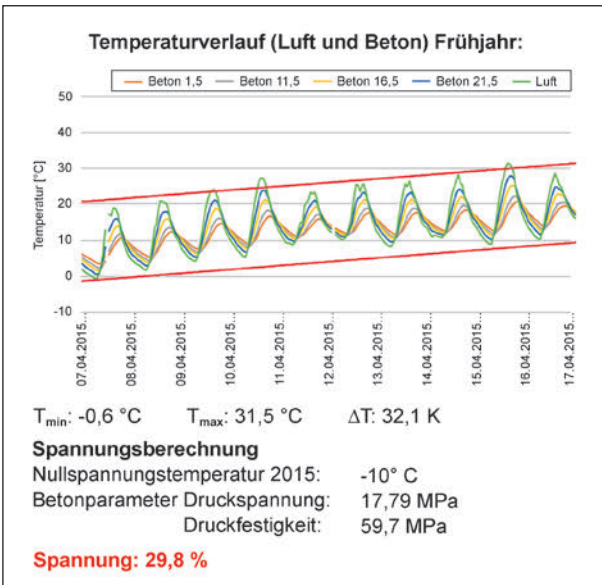


Bild 133: Spannungszustand Frühjahr 2015

ausgeprägten Temperaturverläufen, in denen eine stetige Erwärmung zu beobachten war, die jeweils maximale Druckspannung im Beton errechnet und das erreichte Spannungsniveau ausgewiesen (Bild 132 bis Bild 136).

Die beiden Hitzeperioden im Frühsommer (28.5. bis 6.6.2015) und im Sommer (26.6.2015 bis 5.7.2015) liegen jeweils zeitlich in der Nähe des Globalstrahlungsmaximums. Entsprechend ergeben sich starke Aufheizungen der Betondecke, welche mit relativ hohen Druckspannungen verbunden sind.

Die maximale Betontemperatur am 5.7. ist dabei noch etwas höher als am 6.6. Trotzdem ergeben

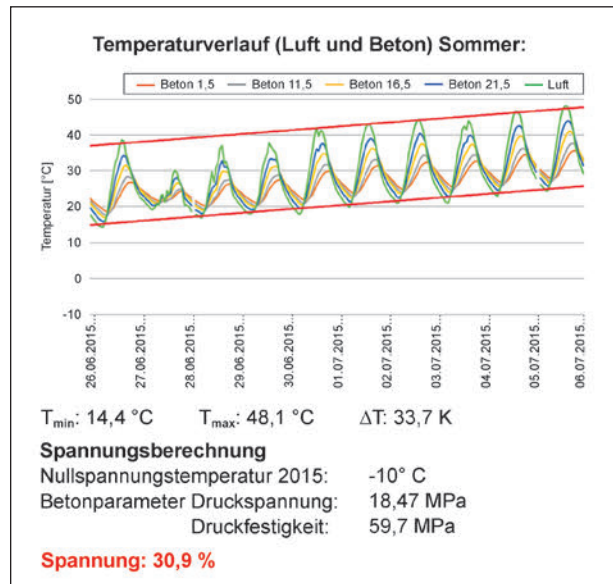


Bild 135: Spannungszustand Sommer 2015

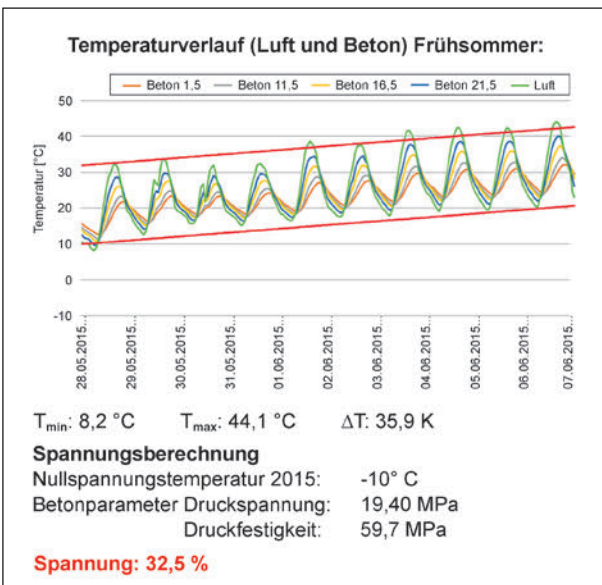


Bild 134: Spannungszustand Frühsommer 2015

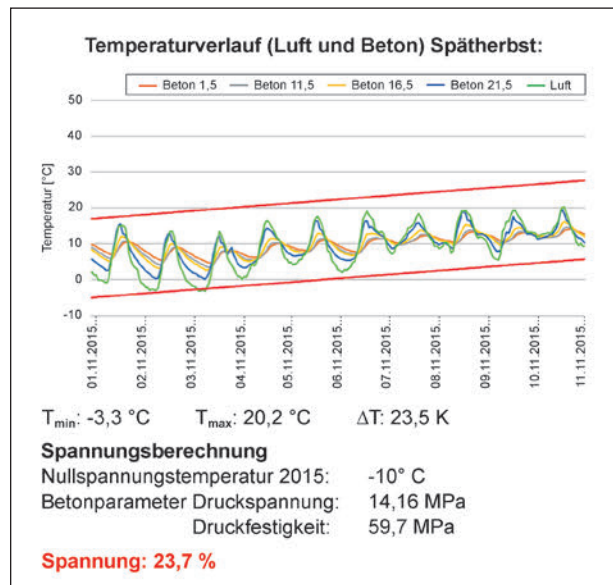


Bild 136: Spannungszustand Spätherbst 2015

sich für den 6.6. geringfügig höhere Druckspannungen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für den Spannungszustand nicht allein die maximale Temperatur an der Oberfläche der Betonplatte, sondern der Temperaturzustand im gesamten Querschnitt entscheidend ist. Die Temperaturdifferenz über dem gesamten Querschnitt war in der Spitze am 6.6. rund 1 K höher als am 5.7.

10.4.2 Gegenüberstellung der gemessenen und prognostizierten Spannungszustände

Die Zweckdienlichkeit des vereinfachten Prognoseverfahrens wird anhand der Simulation von 4 Hitzeperioden (siehe Anhang 5) verdeutlicht.

Hierbei zeigt sich, dass die auf Prognosedaten basierende Spannung im relevanten Bereich fast immer und im kritischen Bereich immer auf der sicheren Seite liegt. Der für die Prognose relevante Bereich der Spannungen liegt über $2,9 \text{ N/mm}^2$ und der kritische Bereich der Spannungen über $3,3 \text{ N/mm}^2$.

Eine für Hitzeschäden relevante Normalspannung in der Betondecke stellt sich erst im Laufe einer mehrere Tage andauernden Erwärmung ein. Die klimatischen Bedingungen an diesen Tagen ähneln sich und das Temperaturniveau ist gleichartig hoch. Dies wird ausgenutzt, um eine Worst-Case-Prognose für das einwirkende Klima auf Basis der letzten Tage zu erstellen. Hierbei ist zu beachten, dass der Beginn einer Hitzeperiode vom Prognosemodell nicht vorhergesagt werden kann und es daher an deren Beginn zu geringeren prognostizierten Spannungen führt. Dies tritt jedoch nur im nicht relevanten Spannungsbereich auf. Bild 4 in Anhang 5 zeigt einen solchen Wetterumschwung.

Regenereignisse und niedrige Globalstrahlung haben am 26. und 27. Juli 2017 die Fahrbahn der A92 führten zu einem relativ niedrigen Temperaturzustand mit niedrigen korrespondierenden Spannungen.

Das Klima am 28., 29. und 30. Juli wies keine Niederschläge bei hoher Globalstrahlung auf. Infolge dessen erhitzte sich die Fahrbahn und die Spannungen stiegen an. Es wird ersichtlich, dass am 28. und 29. Juli Spannungszustände erreicht wurden, die vom Prognosemodell nicht auf der sicheren Seite abgebildet werden konnten. Dies ist jedoch unerheblich, da diese Spannungszustände nicht im rele-

vanten Bereich liegen. Für 30. Juli liegt die Prognose bereits auf der sicheren Seite.

Das gleiche Modellverhalten kann für den Zeitraum vom 6. Juni bis zum 11. Juni 2017 (Anhang 5, Bild 2) beobachtet werden. Hier wurden insbesondere der 8. und 9. Juni auf der unsicheren Seite prognostiziert. Beide Tage erreichen fast den relevanten Spannungsbereich. Die teilweise kritischen Spannungswerte am 10. und 11. Juni wurden auf der sicheren Seite prognostiziert.

Die Prognose von relevanten Spannungszuständen während Hitzeperioden, die nach längeren Regenereignissen auftreten (Anhang 5, Bild 2 und 5), kann ggf. für relevante Spannungszustände auf der unsicheren Seite liegen. Für kritische Spannungszustände liegt sie jedoch auf der sicheren Seite.

Hitzeperioden ohne vorherige längere Regenereignisse (Anhang 5, Bild 1 und Bild 3) wurden durchgehend auf der sicheren Seite prognostiziert.

10.4.3 Ermittlung der Nullspannungstemperatur

Für eine Abschätzung der Spannungszustände ist die Kenntnis über die aktuell vorherrschende Nullspannungstemperatur der Fahrbahndecke, bei der die Normalspannung (Horizontalspannung) gerade noch Null beträgt, erforderlich. Temperaturen oberhalb der Nullspannungstemperatur führen zum Aufbau von Druckspannungen im Deckensystem.

Mithilfe der über das Gesamtjahr erfassten der Fugenbewegungen lässt sich die Nullspannungstemperatur grafisch ermitteln. Sie ist offensichtlich dann erreicht, wenn bei weiter steigender Betontemperatur keine Veränderung der Fugenweite mehr stattfindet.

Am Beispiel der Messwerte von der A92 aus den Jahren 2016 und 2017 soll veranschaulicht werden, bei welchen Betontemperaturen sich die Fugenweite nicht mehr ändert (Bild 137 und Bild 138).

Anhand der Lage der Punktwolke ist ersichtlich, dass bei Betontemperaturen von $7 - 8 \text{ }^\circ\text{C}$ keine signifikante Änderung der Fugenweite mehr erkennbar ist und dass sich oberhalb dieser Temperaturen Druckspannungen in der Betondecke aufbauen.

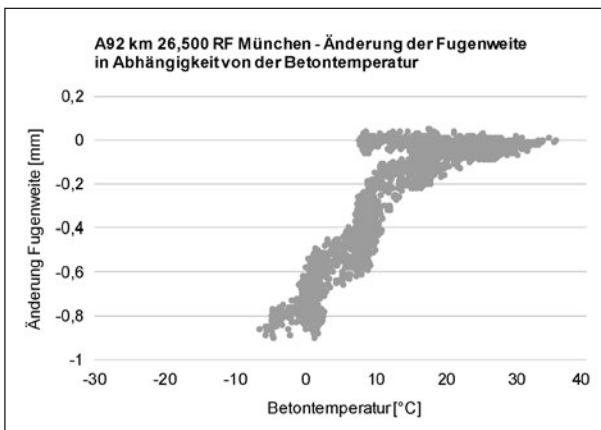


Bild 137: Änderung der Fugenweite im Verhältnis zur Betontemperatur im Jahr 2016

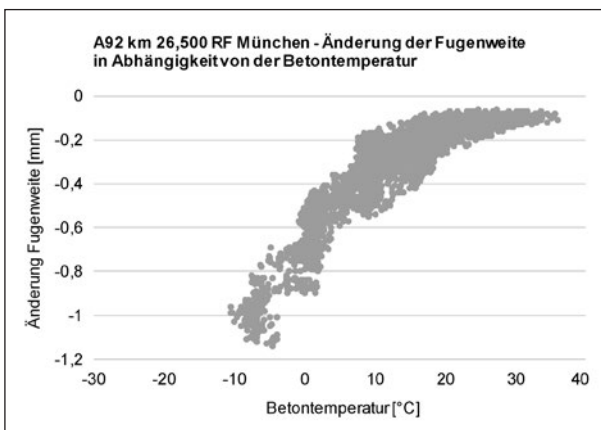


Bild 138: Änderung der Fugenweite im Verhältnis zur Betontemperatur im Jahr 2017

11 Zusammenfassung und Ausblick

Hitzeschäden an Betonfahrbahndecken sind auf die lokale Überschreitung der maximal aufnehmbaren Spannung im Deckensystem zurückzuführen sind. Ursächlich hierfür ist der Temperaturanstieg im Bauteil infolge intensiver Sonneneinstrahlung und anderer Einflüsse bei ausreichender Behinderung der Längsausdehnung im Deckensystem.

Der bei Hitzeschäden auftretende Versagensmechanismus ist eine Kombination ungünstiger Zustände und Randbedingungen. Neben dem Klima und der konstruktiven Ausbildung spielen herstellungs-, erhaltungs- und alterungsbedingte Imperfektionen bzw. lokale Schädigungen im Betonfahrbahndeckensystem eine Rolle. Diese sind nicht immer an der Fahrbahnoberfläche erkennbar. Im Oberflächenbild sind Hitzeschäden erkennbar als Riss, Abplatzung, vertikale Plattenauslenkung,

Übereinanderschoben von Platten bzw. Plattenteilen oder in seltenen Fällen als Ausknicken von Platten bzw. Plattenteilen nach oben, dem sog. Blow-up. Die Schadensbilder können dabei sowohl einzeln als auch in Kombination auftreten.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein Informationssystem aufgebaut, das Klimadaten, Fahrbahntemperaturen sowie Fugenbewegungen von Betonfahrbahnen in situ erfasst und anhand dieser Daten eine Risikobewertung der Temperaturinduzierten Spannungszustände in der Betonfahrbahn vornimmt.

Anhand der erfassten Daten können streckenspezifische Nullspannungstemperaturen, die maßgeblichen Einfluss auf die temperaturinduzierten Spannungszustände in Betonfahrbahnen haben, bestimmt werden. Das entwickelte Softwaretool ermöglicht in Verbindung mit der aufgestellten Datenbank eine weitere Bewertung und Analyse der Messdaten, um eine Risikobewertung der Spannungszustände in Betonfahrbahnen vorzunehmen. In der Anwendung kann anhand der Farbskala, mit der die überwachten Stationen gekennzeichnet werden, leicht erkannt werden, ob ein kritischer Spannungszustand in der Betonfahrbahn vorliegt bzw. zu erwarten ist.

Das Forschungsthema hat gezeigt, dass Messsysteme mit Liveüberwachung einen relevanten Beitrag zur Risikobewertung von Hitzeperioden leisten können und auf Basis der Auswertung konkrete Aussagen zum Spannungsaufbau in der Betondecke getroffen werden können.

Die Vorhersage der genauen Position und des genauen Zeitpunkts eines Hitzeschadens kann durch ein solches System jedoch nicht erreicht werden, da neben den Temperaturzuständen auch Imperfektionen in der Fahrbahn eine Grundvoraussetzung für das Auftreten von Hitzeschäden sind.

Die geschaffenen Mess- und Auswertesysteme dienen einerseits als Informationsquelle, ob die für einen Hitzeschaden notwendigen Temperaturen im Straßenaufbau überhaupt vorliegen bzw. in den nächsten 24 Stunden auftreten können.

Andererseits ergibt sich die Möglichkeit, anhand der ermittelten Daten auch generelle Informationen zum Streckenzustand und dessen Entwicklung gewonnen werden können, wie z. B. die Entwicklung der Nullspannungstemperatur während der Nutzungsdauer.

Der Aufbau und Betrieb mehrerer Messstationen und Sensoriksysteme, die geografisch über die Bundesrepublik verteilt sind und statistisch die relevanten Witterungslagen abbilden, ist für die Bewertung und die Beobachtung der Spannungszustände in Straßenkonstruktionen von großem Nutzen.

Die Absicherung des in diesem Forschungsvorhaben erarbeiteten Theorie- und Prognoseverfahrens erfolgt durch die Validierung des Zusammenhangs zwischen den in den Messstationen erfassten Wetterdaten und den Temperaturverläufen in der Fahrbahn. Das verwendete Prognoseverfahren hat sich hierbei, trotz des robusten Ansatzes, als ausreichend erwiesen.

Im Rahmen dieses Forschungsthemas wurden viele Erkenntnisse zum Ablauf von Hitzeschäden auf Betonfahrbahnen gewonnen und an interessierte Landesvertreter weitergegeben. Aus heutiger Sicht ist es nicht zielführend, jeden Bauabschnitt des deutschen Autobahnnetzes mit dieser Technik auszustatten.

Vielmehr sollte künftig dazu übergegangen werden, aus den Klimadaten des DWD auf Temperaturverläufe und Spannungszustände in der Fahrbahn zu schließen. Mit dieser Vorgehensweise zu betrachtende Autobahnabschnitte müssen vorrausichtlich hinsichtlich ihrer mechanischen und temperaturrelevanten Materialparameter bzw. Eigenschaften untersucht werden. Des Weiteren sollte ein solches System mit gezielt gewählten Referenzmessstationen kalibriert werden.

Die erheblichen Arbeitsaufwendungen bezüglich Aufbau, Unterhalt und Betrieb eines solchen Messstellennetzes sowie die Weiterentwicklung der zugehörigen Softwarelösung können für die Bewertung des jeweiligen Streckenabschnittes von erheblichem Nutzen sein. Der eigentliche Wert eines solchen Systems liegt in der breiten dauerhaften Datenerfassung direkt im Straßennetz, womit beispielsweise eine Bewertung der in den Lastannahmen für die Dimensionierung und Substanzbewertung angenommenen Temperaturzustände erfolgen könnte.

Literatur

- [Bayern Blow-Up Teil 2] VILLARET, RIWE: Hitzeschäden auf südbayerischen Betonautobahnen, Bericht – Teil 2, FE-Modell zur Berücksichtigung von Imperfektionen, Zwischenstand 07/2014
- [BK 2001] Betonkalender 2001, Verlag Ernst Sohn 2001
- [CONDUCT] Systembeschreibung CONDUCT+, Siemens Industry Sector Mobility Division
- [HINTZEN 1999] HINTZEN, W.; THIELEN, G.: Betontechnische Einflüsse auf die Rißbildung infolge Hydratationswärme, Zeitschrift Beton 49/99
- [Hitzeschäden ABD SB] Prof. Dr.-Ing. FREUDENSTEIN et al.: Untersuchung der Hitzeschäden auf bayerischen Autobahnen (2013-2014), Autobahndirektion Südbayern
- [KAYSER 2007] KAYSER, S.: Grundlagen zur Erfassung klimatischer Einflüsse für Dimensionierungsrechnungen von Asphaltbefestigungen. Dissertation, Technische Universität Dresden, Professur für Straßenbau, 2007
- [KERR 1984] KERR, A. D.; SHADE, P. J.: Analysis of Concrete Pavement Blowups, Acta Mechanica 52 (1984), Springer-Verlag 1984
- [LEICA] Leica-Geosystems, Datasheet Leica GeoMoS
- [VILLARET et al. 2010] VILLARET et al.: Grundlagen zur Erfassung der Belastung für die analytische Dimensionierung von Straßenbefestigungen – Teil Betonstraßen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1050, Bonn, 2010
- [VILLARET et al. 2013] VILLARET et al.: Dimensionierung und Konstruktion von Endbereichen beim Neubau und bei der Erneuerung des Oberbaus in Betonbauweise, Forschung BAST, 89.0269/2011, 2013
- [WICKE 1983] WICKE, M.: Betondecken-Meßstrecke Golling Teil II, Bundesministerium für Bauten und Technik, Straßenforschung, Heft 222, Wien, 1983

Verwendete Regelwerke

[DWD] Richtlinie automatische Klimastationen für nebenamtliche Stationen und Partnernetze, Deutscher Wetterdienst, Ausgabe Februar 2001, überarbeitete Kurzfassung Mai 2010

[RDO Beton 09] Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Betondecke, FGSV, Ausgabe 2009

Software

[CaculiX] DHOONDT, GUIDO et. al.: A Free Software Three-Dimensional Structural Finite Element Program

[ABAQUS] DASSAULT SYSTEMES: ABAQUS FEM

Bilder

- Bild 1: Zerlegung der Temperaturanteile im Plattenquerschnitt
- Bild 2: Temperaturzustand im Querschnitt mit Biege-, Wölb- und Dehnanteil
- Bild 3: Biegeanteil
- Bild 4: Wesentlicher Temperaturverlauf über die Platte – Aufwölbung (positiver Temperaturgradient)
- Bild 5: Wesentlicher Temperaturverlauf über die Platte – Aufschüsselung (negativer Temperaturgradient)
- Bild 6: Spannungsentwicklung im Zuge der Hydratation (aus [HINTZEN 1999])
- Bild 7: Entwicklung der Schwindverformung über 40 Jahre
- Bild 8: Erhöhung der Nullspannungstemperatur T_0 infolge Betonschwinden
- Bild 9: Verhalten des Plattensystems unter Berücksichtigung von Fugenverschmutzung ohne Dehnungsbehinderungen
- Bild 10: Verhalten des Plattensystems bei Dehnungsbehinderung durch Fugenverschmutzung

Bild 11: Verformung der Platten bei gleichmäßiger Erwärmung

Bild 12: Verformung der Platten bei gleichmäßiger Erwärmung (Schnitt)

Bild 13: Versatzmoment infolge des Fugenschnittes

Bild 14: Statisches System

Bild 15: Verformung des statischen Systems

Bild 16: Spannungen in Fahrbahnrichtung (x-Richtung) an der Fuge

Bild 17: Vertikalspannungen an der Fuge

Bild 18: Betonfestigkeit im 2-achsigen Spannungszustand (aus [BK 2001])

Bild 19: Zu erwartendes Rissbild

Bild 20: Typischer Hitzeschaden

Bild 21: Hitzeaufbruch mit einem Ausweichen der Platten nach oben

Bild 22: Umkehr des Versatzmomentes bei einem Betonausbruch an der Unterseite

Bild 23: Geschädigter Fugenbereich

Bild 24: Verformung des Berechnungsmodelles nach Simulation eines Betonausbruchs an der Unterseite

Bild 25: Prinzipielle Vorgehensweise zur Entwicklung eines geeigneten Messverfahrens

Bild 26: Skizze der Messstation

Bild 27: Skizze einer Einrichtung zur Temperaturmessung im Bestandsbeton

Bild 28: Verlegebeispiel Temperaturmessung, Einbauzustand

Bild 29: Verlegebeispiel Temperaturmessung, Lage der Sensoren

Bild 30: Sensor zur Messung der Fugenbewegung

Bild 31: Skizze des Systems zur Erfassung der Fugenbewegung und Temperatur in der Betondecke

Bild 32: Aufbau einer Übertragungsstation

Bild 33: Stromversorgung des Messsystems mit Hilfe von Solarzellen

- Bild 34: Auswertung Temperatur- und Fugenmessung
- Bild 35: Dehnmessstreifen in einem Bohrloch (Quelle: TU München)
- Bild 36: Druckmessdose (Quelle: TU München)
- Bild 37: DWD-Mustermessfeld (aus [DWD])
- Bild 38: Messung der Globalstrahlung an der BAB A92 bei Freising-Ost (Quelle: TU München)
- Bild 39: Schematische Darstellung der Multi-Ring-Elektrode (Quelle: Bestimmung der Feuchteverteilung in der Betonrandzone mit Multi-Ring-Elektroden, W. BREIT, M. RAUPACH)
- Bild 40: Beispiel für einen TDR-Wellenleiter
- Bild 41: Erste Versuchsreihe mit Tischoberflächen
- Bild 42: Screenshot der Auswertesoftware, Überlagerung eines Fotos des Scanbereiches mit einer 3D-Punktwolke
- Bild 43: Screenshot der Auswertesoftware, Definition der Grenzen
- Bild 44: Screenshot der Auswertesoftware, Das Überschreiten der vorab definierten Grenzen erfolgt über eine Alarmmeldung (rote Textzeilen)
- Bild 45: Screenshot einer nachgeordneten Software zur grafischen Darstellung der Messergebnisse
- Bild 46: Screenshot aus AutoCAD 2016, Integration der 3D-Punktwolke
- Bild 47: Am Widerlager montierte Multistation
- Bild 48: Schematische Darstellung der Scanbereiche zur Verifizierung des Anwendungsbereiches 1 und 2; die zu scannenden Bereiche sind grün dargestellt (eigene Darstellung)
- Bild 49: Schematische Darstellung der Scanbereiche zur Verifizierung des Anwendungsbereiches 2; die zu scannenden Bereiche sind grün dargestellt; die Monitoringprismen sind rot dargestellt (eigene Darstellung)
- Bild 50: Auf der Fahrbahn montierte Monitoringprismen
- Bild 51: Übersicht der Scanflächen in der Erprobungsphase für Anwendungsfall 1 & 2
- Bild 52: Startseite des Web-Portals
- Bild 53: Benutzeroberfläche des Web-Portals
- Bild 54: Beispielhafte Anzeige der automatisierten Deformationsanalyse mit Warnstufen
- Bild 55: Anzeige der definierten Scanflächen
- Bild 56: Anbindung einer Kamera in das Web-Portal
- Bild 57: Übersicht der Messstelle im Web-Portal
- Bild 58: Übersicht der Scanflächen im Web-Portal
- Bild 59: Relative Fugenbewegung horizontal, Mitte Juli bis Mitte August 2016
- Bild 60: Relative Fugenbewegung horizontal, 10.08.2016 bis 17.08.2016
- Bild 61: Relative Fugenbewegung vertikal, Mitte Juli bis Mitte August 2016
- Bild 62: Relative Fugenbewegung vertikal, 10.08.2016 bis 17.08.2016
- Bild 63: Scanflächen auf der Betonfahrbahn im Bereich 35 m bis 70 m
- Bild 64: Beispielhafte Darstellung von Punktwolken am Fugenkreuz
- Bild 65: Max. Deformation der Scanfläche, Messdistanz 30 m
- Bild 66: Max. Deformation der Scanfläche, Messdistanz 35 m
- Bild 67: Max. Deformation der Scanfläche, Messdistanz 40 m
- Bild 68: Max. Deformation der Scanfläche, Messdistanz 45 m
- Bild 69: Max. Deformation der Scanfläche, Messdistanz 65 m
- Bild 70: Streuung des Laserstrahls z. B. durch Wasser auf der Fahrbahnoberfläche
- Bild 71: Veränderung des Lasereinfallswinkels auf die Fahrbahnoberfläche

- Bild 72: Scannende Prüfverfahren (v. l. Ultraschall, Radar und Impact-Echo)
- Bild 73: Horizontalriss im Bereich der Querschein-fuge
- Bild 74: Lage der Bohrlochmessstellen
- Bild 75: Kleben der Dehnmessstreifen im Bohr-loch
- Bild 76: Mit Dehnmessstreifen instrumentiertes Bohrloch
- Bild 77: Demontierbarer und befahrbarer Bohr-lochverschluss
- Bild 78: Dehnmessstreifen im Bohrloch eines Mo-dells (Originalmaßstab), vorhergehendes Forschungsvorhaben
- Bild 79: Modell des Fugenbereiches im Prüfstand (Originalmaßstab), vorhergehendes For-schungsvorhaben
- Bild 80: Entnahme der Plattensegmente für die Kalibrierungsversuche
- Bild 81: Entnahme der Plattensegmente für die Kalibrierungsversuche
- Bild 82: Probekörper mit den Abmessungen 1,40 m x 1,00 m
- Bild 83: Anordnung des Prüfkörpers unterhalb des Prüfrahmens
- Bild 84: Anordnung der Dehnmessstreifen im Bohrloch, hier: Prüffeld „A92 Freising“
- Bild 85: Kraft-Dehnungs-Diagramm der horizontal angebrachten Dehnmessstreifen
- Bild 86: Kraft-Dehnungs-Diagramm der vertikal angebrachten Dehnmessstreifen
- Bild 87: Verlauf der Dehnungen der DMS im Bohr-loch in Bezug zur Betontemperatur im Jahr 2015
- Bild 88: Verlauf der Dehnungsänderungen eines horizontalen DMS in der Bohrlochmitte im Jahr 2015
- Bild 89: Verlauf der Dehnungen der DMS im Bohr-loch in Bezug zur Betontemperatur im Jahr 2016
- Bild 90: Verlauf der Dehnungsänderungen eines horizontalen DMS in der Bohrlochmitte im Jahr 2016
- Bild 91: Verlauf der aufgezeichneten Dehnungs-änderungen im Laborversuch
- Bild 92: Ablaufschema
- Bild 93: Einordnung in Übersicht
- Bild 94: Normalisierte Datenbankstruktur
- Bild 95: Konzept der zentralen Datenspeicherung
- Bild 96: Konzept der Absicherung der Daten
- Bild 97: Prozessablauf der Algorithmen
- Bild 98: Einordnung in Übersicht
- Bild 99: Zeitschrittverfahren
- Bild 100: Wärmeströme an der Betondecke (aus [KAYSER 2007])
- Bild 101: Einordnung der Temperaturverlaufs-berechnung in den Berechnungsalgorith-mus
- Bild 102: Oberfläche des Programms zur Tempe-raturverlaufs-berechnung
- Bild 103: Generieren von Testdaten zur Validie-rung der Temperaturverlaufs-berechnung
- Bild 104: Login-Fenster im Softwaretool
- Bild 105: Abrufen der Messdaten der jeweiligen Station
- Bild 106: Berechnung der Temperaturverläufe
- Bild 107: Ausgabe der Maßgebenden Spannun-gen
- Bild 108: Grafische Darstellung der FEM-Span-nungsbilder, farbliche Markierung der Station (oben links, Grün = unkritisch) entsprechend der aktuellen Spannungs-auslastung
- Bild 109: Normalisierte Datenbankstruktur mit Prognosedaten
- Bild 110: Klimadaten mit eingeblendeten Progno-sedaten
- Bild 111: Temperaturverläufe mit eingeblendeten prognostizierten Temperaturverläufen über den Straßenaufbau

Bild 112: Maßgebende Spannungen mit eingebendeten prognostizierten maßgebenden Spannungen

Bild 113: FEM-Spannungsbilder für die prognostizierten Temperaturverläufe

Bild 114: Einordnung in Übersicht

Bild 115: Basismodell mit 2 Platten und einem Volumenblock für die Auflagerung

Bild 116: 20-Knoten-Brickelement

Bild 117: 8-Knoten-Brickelement

Bild 118: Kontaktspannung in Abhängigkeit vom Abstand der Kontaktflächen

Bild 119: Reibung in Abhängigkeit von der Relativverschiebung zwischen Platten und Unterlage

Bild 120: Basismodell mit 2 Platten unter Ausnutzung der Symmetrie

Bild 121: Übergang mit Wedge-Elementen zur Netzverfeinerung im Bereich der Quertuge

Bild 122: Einordnung in Übersicht

Bild 123: Prinzipielle Vorgehensweise für Prognosesystem und Eingreifgrenzen

Bild 124: Aufbau einer Verkehrsbeeinflussungsanlage (eigene Darstellung nach Siemens AG)

Bild 125: Struktur eines Kommunikationsnetzwerks (eigene Darstellung nach Siemens AG)

Bild 126: Systemschnittstellen (aus [CONDUCT])

Bild 127: Kommunikation über die CSI-Schnittstelle (aus [CONDUCT])

Bild 128: Einordnung in Übersicht

Bild 129: Installation des Messsystems auf der A5

Bild 130: Messstation auf der A48

Bild 131: Vorhandener (vorn) und neuer (hinten) Demonstrator auf der A92

Bild 132: Temperaturverlauf gesamtes Jahr mit Betrachtungszeiträumen (rot hervorgehoben) in den folgenden vier Bildern

Bild 133: Spannungszustand Frühjahr 2015

Bild 134: Spannungszustand Frühsommer 2015

Bild 135: Spannungszustand Sommer 2015

Bild 136: Spannungszustand Spätherbst 2015

Bild 137: Änderung der Fugenweite im Verhältnis zur Betontemperatur im Jahr 2016

Bild 138: Änderung der Fugenweite im Verhältnis zur Betontemperatur im Jahr 2017

Tabellen

Tab. 1: Messgrößen und Messgenauigkeiten

Tab. 2: Standorte der Messstellen

Tab. 3: Längsdruckkraftzunahme in der Fahrbahnplatte bei einer Erwärmung von 15 K

Tab. 4: Zu erfassende Messgrößen

Anhang

Anhang 1: Maximale Deformation der Scanflächen im Messzeitraum

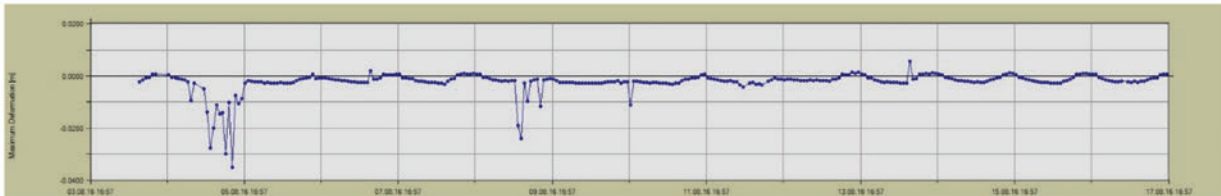


Bild 1: Max. Deformation der Scanfläche, Messdistanz 30 m

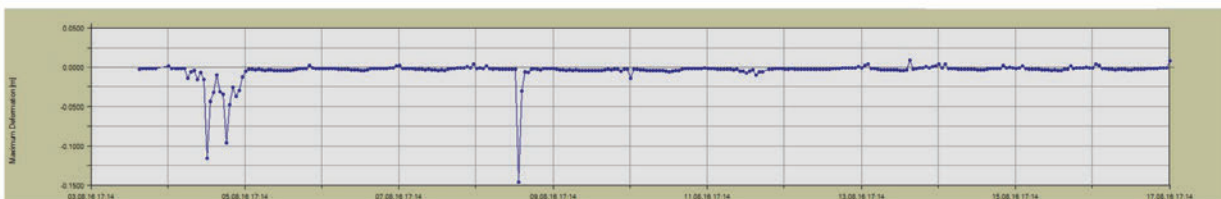


Bild 2: Max. Deformation der Scanfläche, Messdistanz 35 m

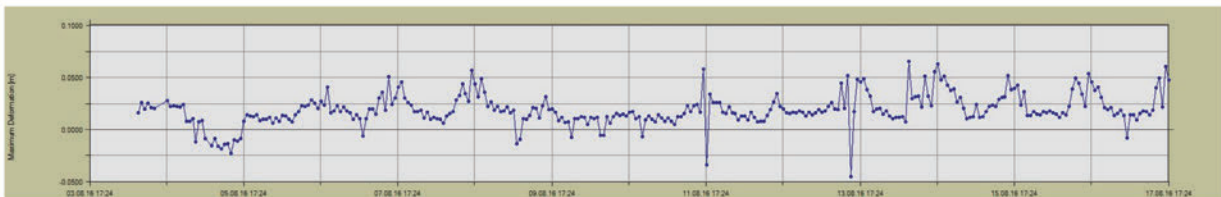


Bild 3: Max. Deformation der Scanfläche, Messdistanz 40 m



Bild 4: Max. Deformation der Scanfläche, Messdistanz 45 m



Bild 5: Max. Deformation der Scanfläche, Messdistanz 65 m

Anhang 2: Verlauf der gemessenen Dehnungen und Dehnungsänderungen der DMS im Jahr 2015

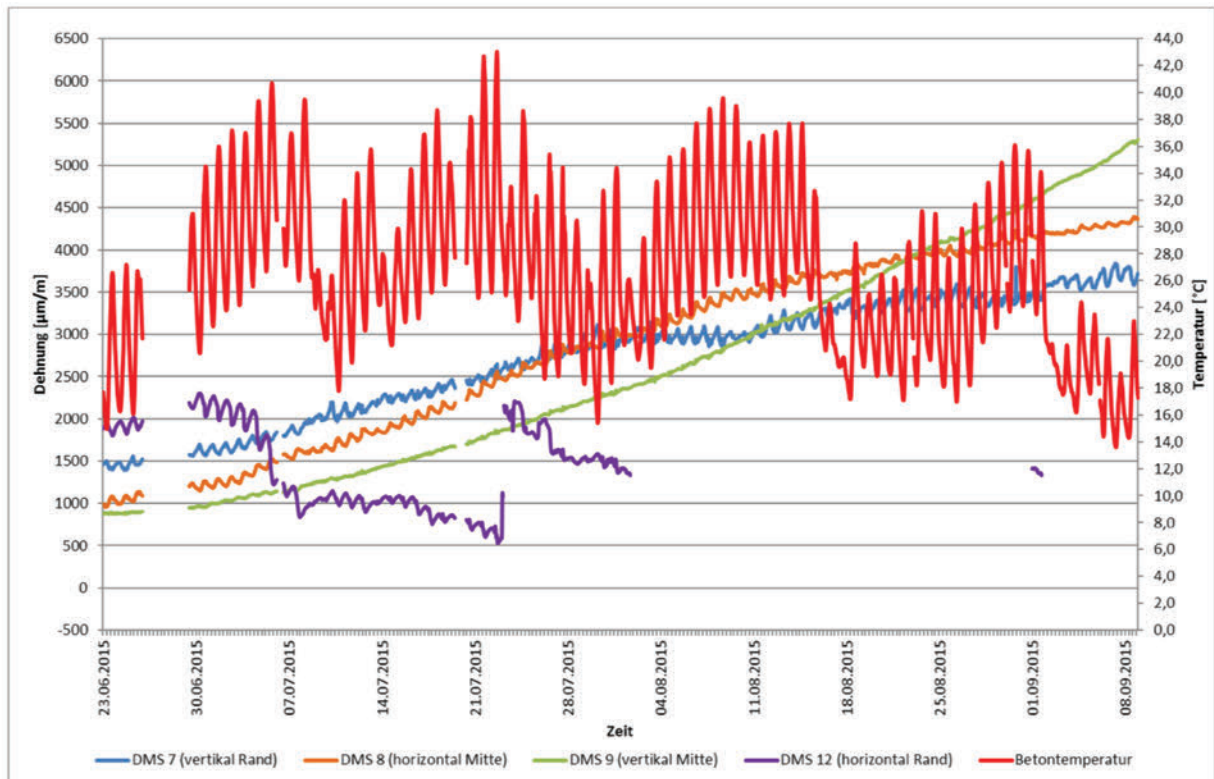


Bild 1: Verlauf der Dehnungen der DMS im Bohrloch in Bezug zur Betontemperatur im Jahr 2015

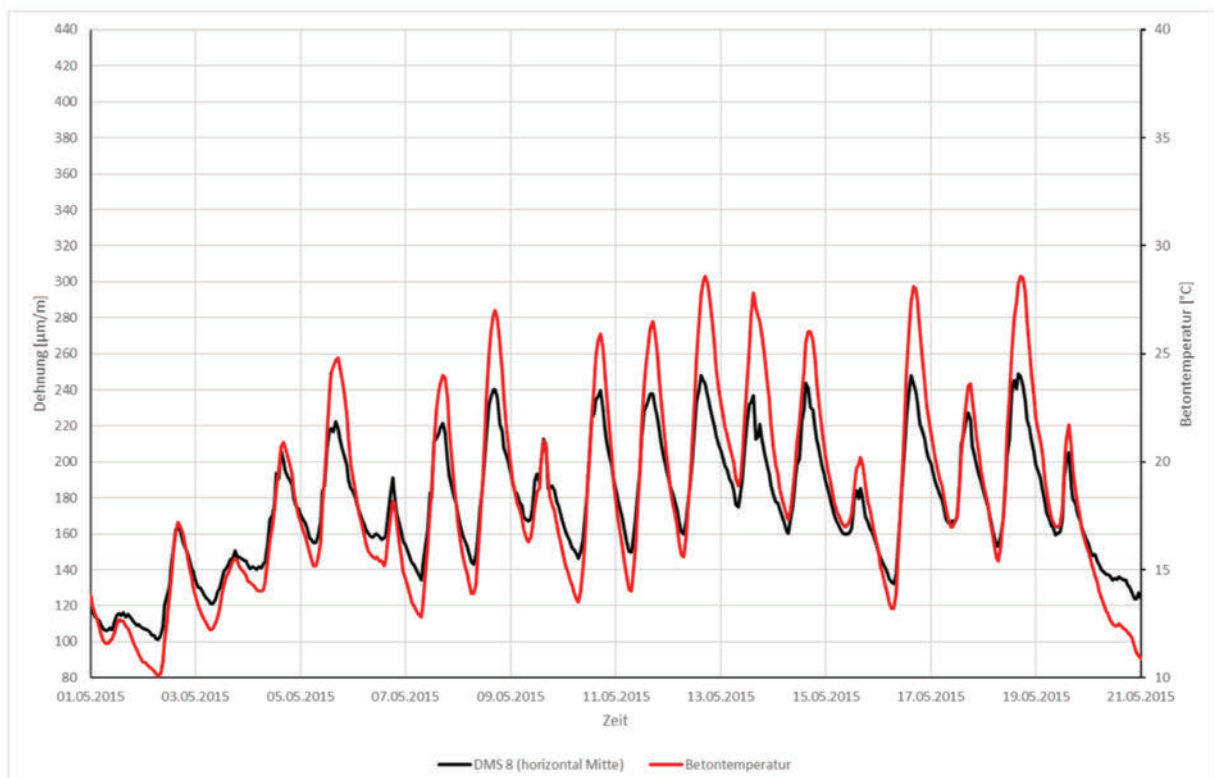


Bild 2: Verlauf der Dehnungsänderungen eines horizontalen DMS in der Bohrlochmitte im Jahr 2015

Anhang 3: Verlauf der gemessenen Dehnungen und Dehnungsänderungen der DMS im Jahr 2016

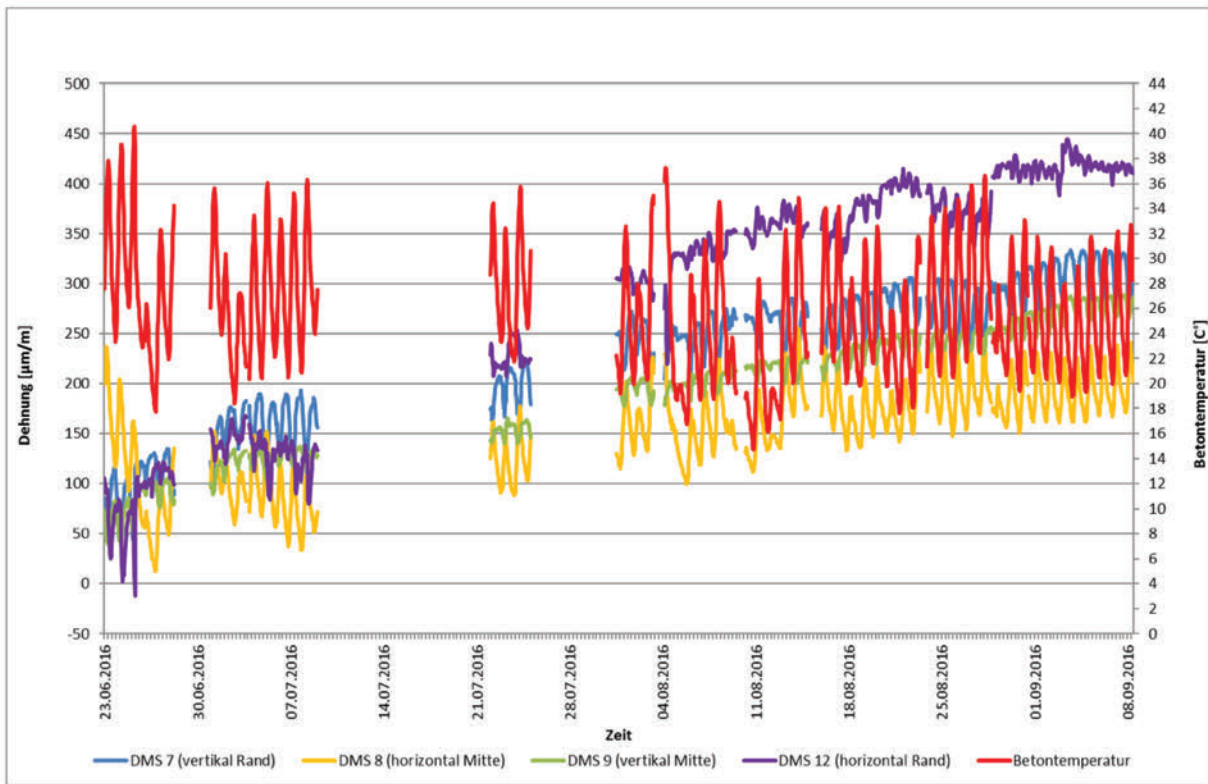


Bild 1: Verlauf der Dehnungen der DMS im Bohrloch in Bezug zur Betontemperatur im Jahr 2016

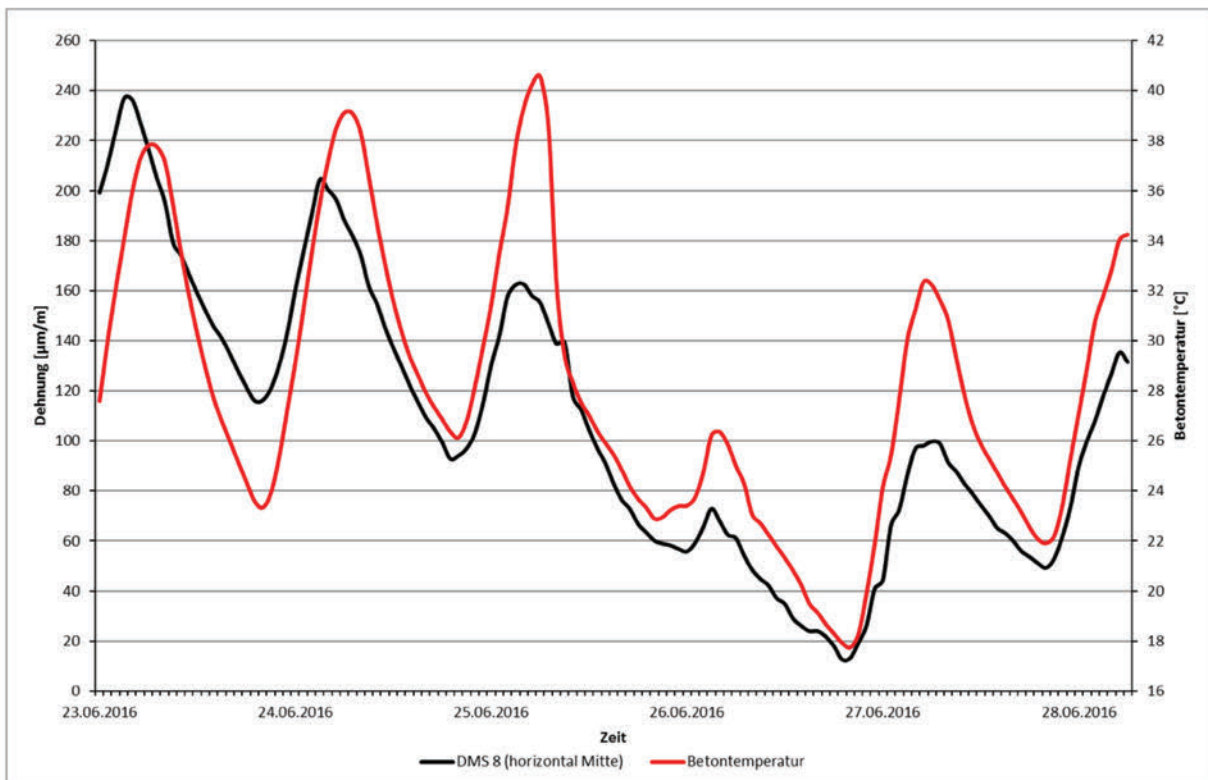


Bild 2: Verlauf der Dehnungsänderungen eines horizontalen DMS in der Bohrlochmitte im Jahr 2016

Anhang 4: Verlauf der aufgezeichneten Dehnungsänderungen im Laborversuch

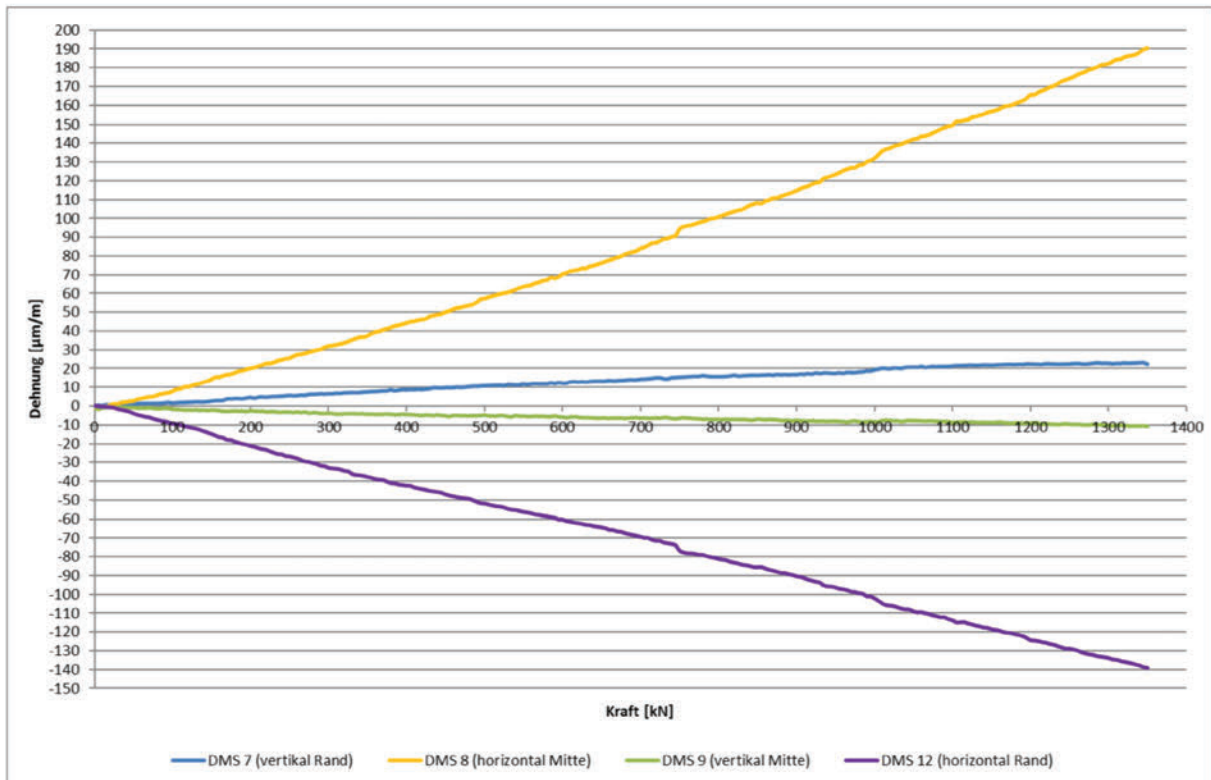


Bild 1: Verlauf der aufgezeichneten Dehnungsänderungen im Laborversuch

Anhang 5: Temperatur- und Klimadaten, Spannungsmessung und -prognose

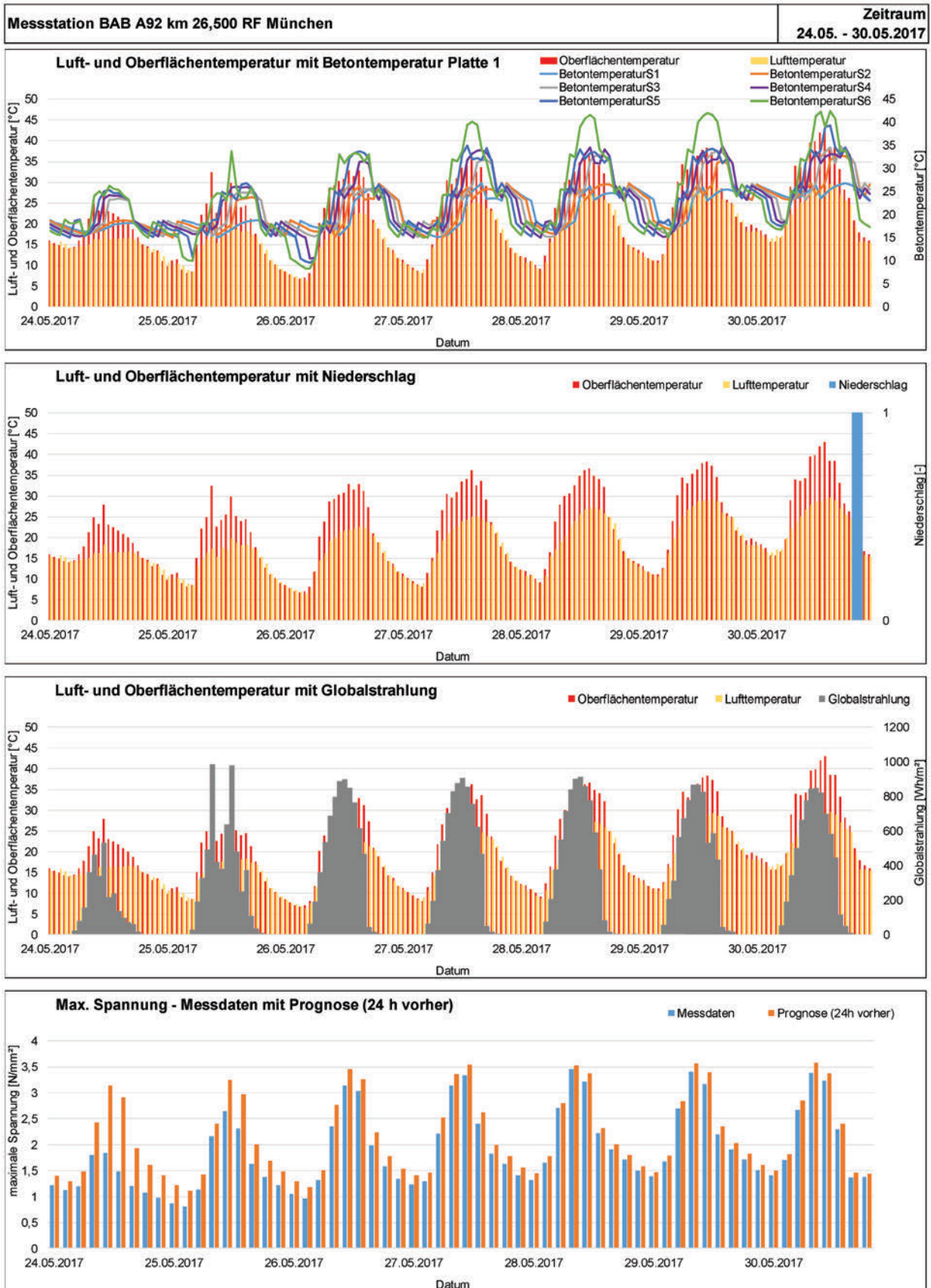


Bild 1: Vergleich Spannungsprognose A92, 24. Mai bis 30. Mai 2017

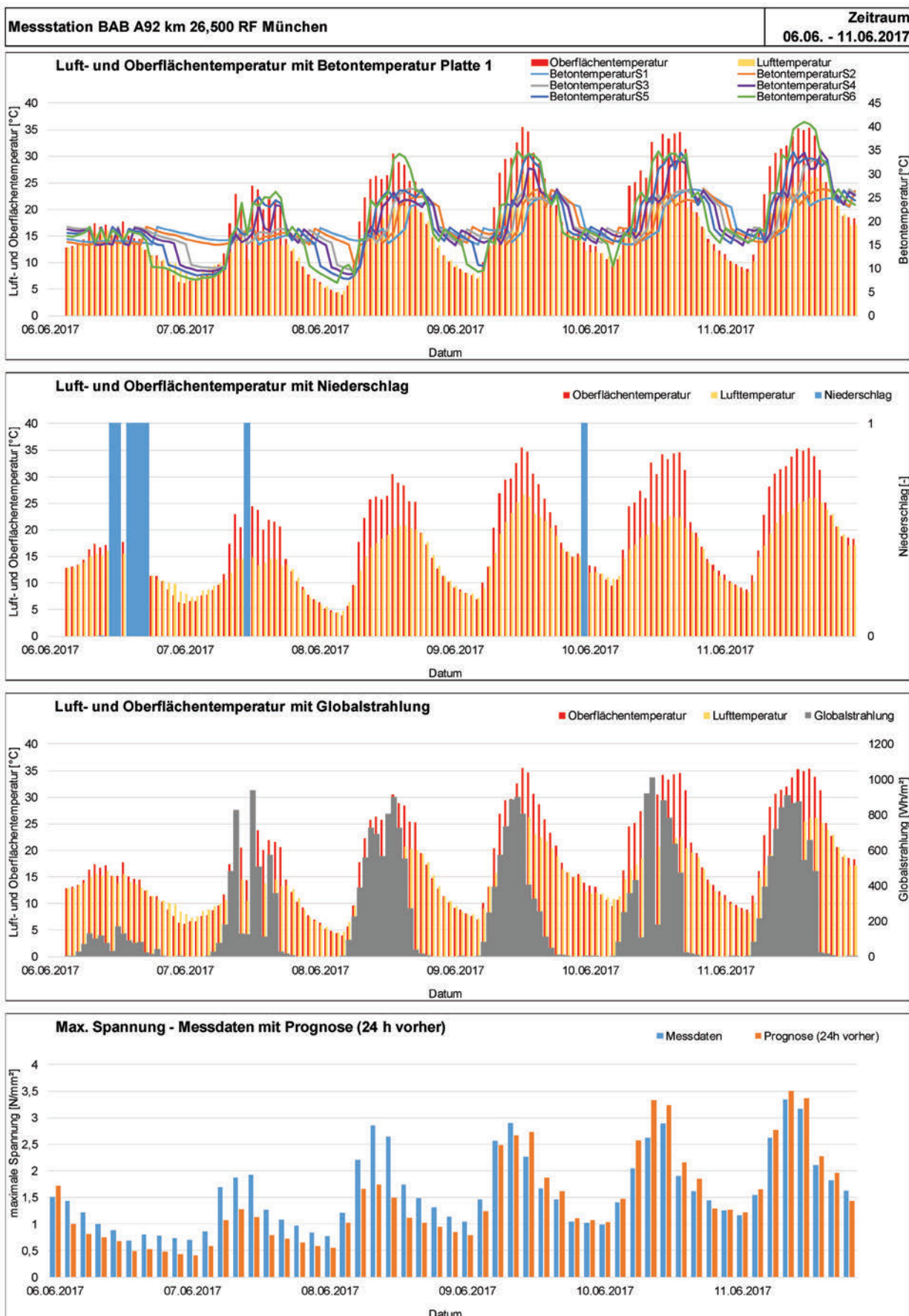


Bild 2: Vergleich Spannungsprognose A92, 06. Juni bis 11. Juni 2017

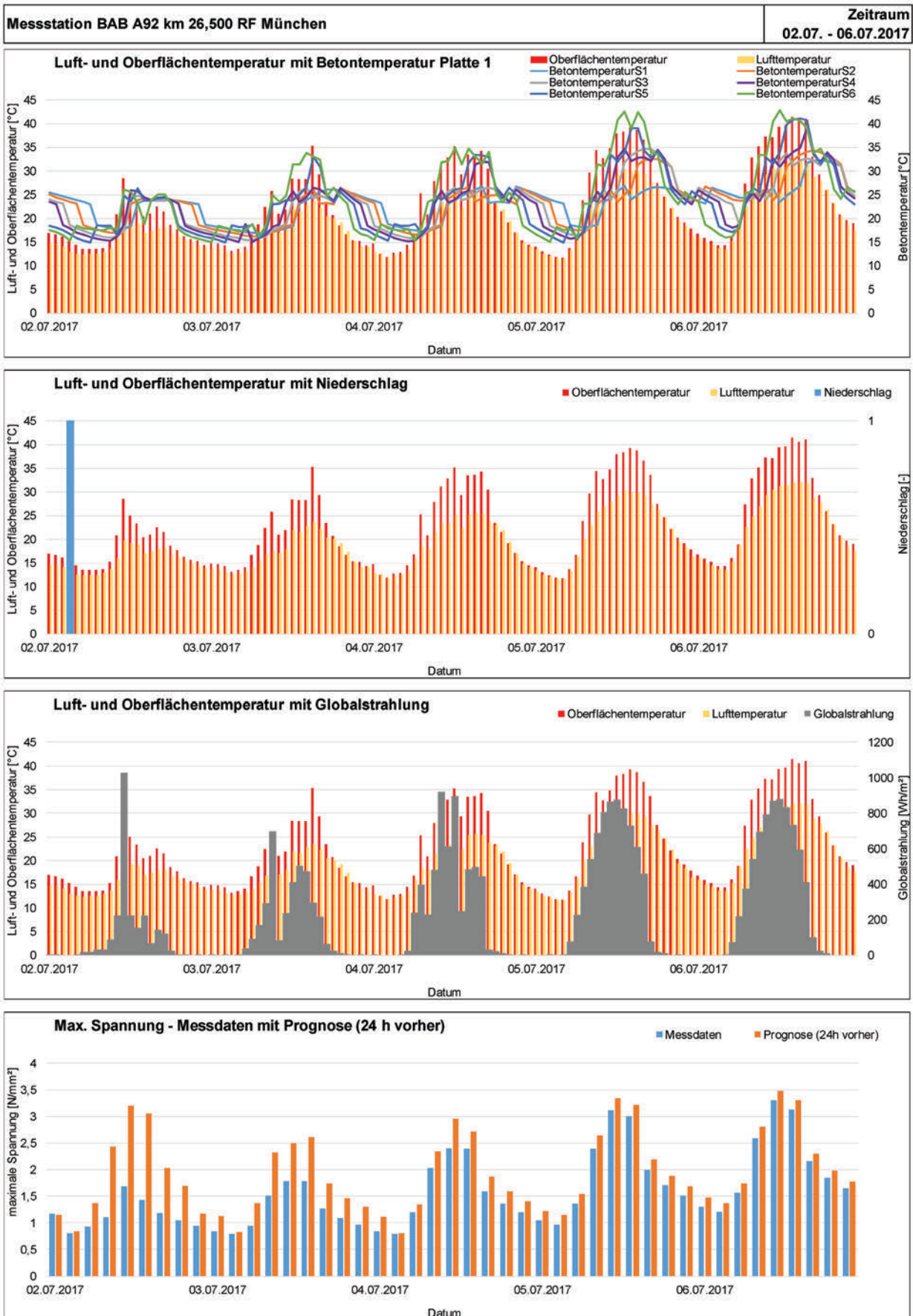


Bild 3: Vergleich Spannungsprognose A92, 02. Juli bis 06. Juli 2017

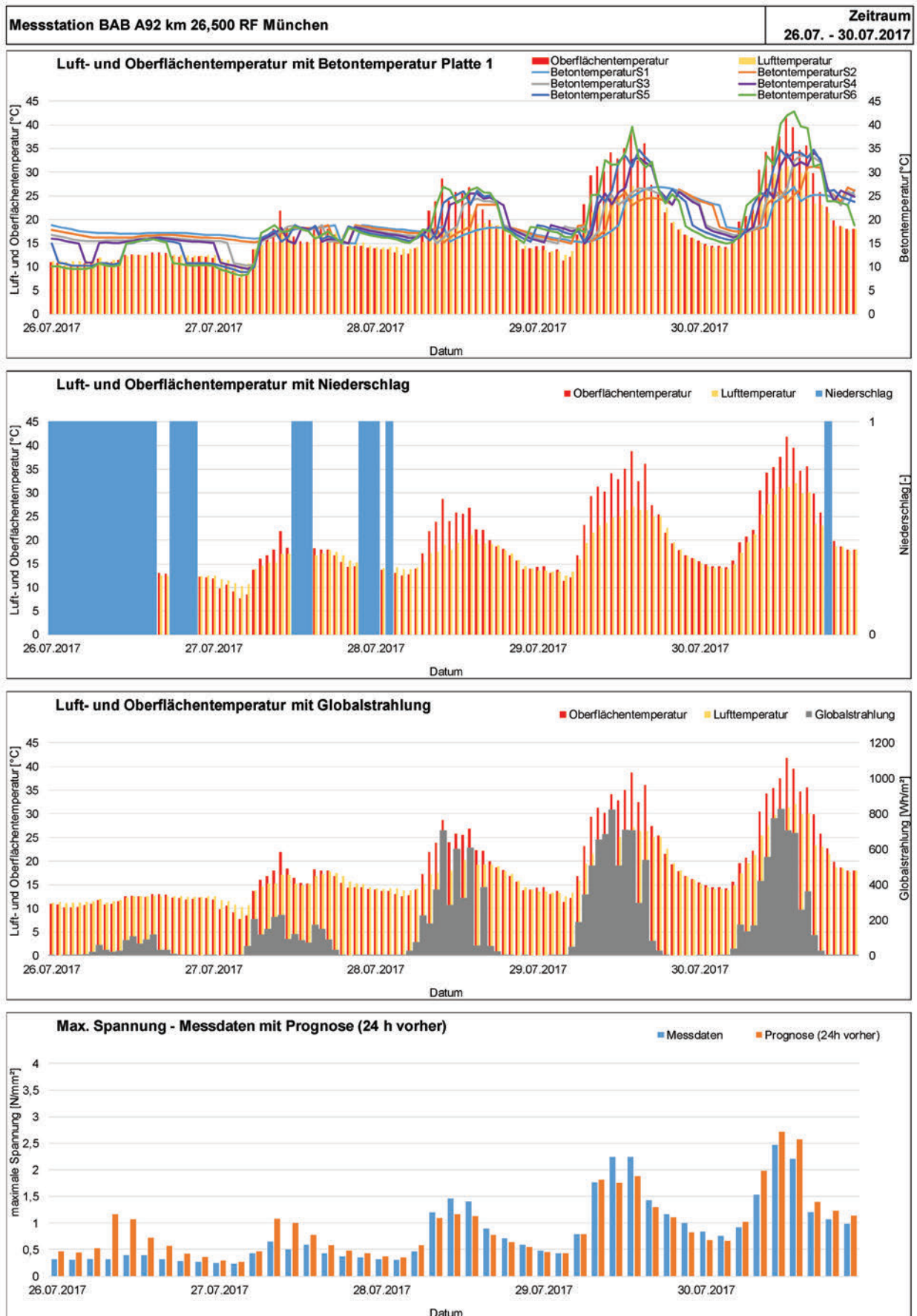


Bild 4: Vergleich Spannungsprognose A92, 26. Juli bis 30. Juli 2017

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2017

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

Lypp, Birle, Heyer, Vogt € 20,50

S 106: Zusammenhang zwischen Bitumenchemie und straßenbautechnischen Eigenschaften

Radenberg, Nytus, Gehrke

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

S 107: Baustoffe für standfeste Bankette

Koukoulidou, Birle, Heyer € 15,50

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

Durner

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

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

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

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

Lin, Linnemann, Vollpracht € 16,50

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

Alisov, Wistuba

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

S 112: Nachweis der flächendeckenden Verdichtungskontrolle von Asphalt

Zander, Buch, Birbaum

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

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

Schellenberg

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

S 114: Studie zum Anwendungspotenzial von werksgemischten Kaltbauweisen – Asphalt

Mollenhauer

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

2018

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

Wistuba, Isailović

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

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

Radenberg, Nytus, Boetcher, Diedel, Miehl

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

S 117: Bauzeitenverkürzung durch optimierten Asphaltbau

Böhm, Tielmann, Ulrich, Verges, Muschalla

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

S 118: Untersuchung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Asphaltbinderkonzepte

Renken, Wistuba

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

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

Durner

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

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

Wacker, Scherkenbach, Jansen

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

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

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

Schröter, Zumsande, Wörner, Kazakova, Patzak

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

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

Möller, Bundschuh, Birle, Heyer

€ 18,50

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

Stephan, Weigel

€ 19,00

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

Müller, Schulte-Schrepping, Benra, Ludwig, Breitenbücher

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

S 125: Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie

Radenberg, Manke, Steeb, Jänicke

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

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

Freudenstein, Neudert

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

S 127: **Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton**
Villaret, Kiehne, Riwe, Villaret

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

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

Breitenbücher, Penttilä, Schulte-Schrepping

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

2019

S 129: **Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt**

Hase, Beyersdorf, Hase, Rademacher

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

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

Radenberg, Holzwarth

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

S 131: **Einfluss viskositäts- verändernder Zusätze auf den Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe**

Radenberg, Gehrke

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

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

Oeser, Carreño, Renken, Kemper, Kneer, Höfler,

Al-Sibai, Hess, Gouya, zu Dohna, Steins € 15,50

S 133: **Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw – Stufe 2: Nacherhebung**

Wolf, Uhlig

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

S 134: **Temperatureinfluss auf die Sichtbarkeit von Substanzmerkmalen (Oberfläche)**

Skakuj, Balck, Beckedahl, Schrödter, Koppers, Ramadan

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

S 135: **Eignung von Boden-Bindemittel-Gemischen als Baustoff für den Hinterfüllbereich von Bauwerken**

Botor, Tost € 15,50

S 136: **KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Asphalt**

Augter, Kayser € 16,50

S 137: **Ressourcenschonung Bedingungen für die Verwendung organogener und weicher Böden sowie von Sekundärbaustoffen als Massenbaustoffe im Erdbau**

Cudmani, Heyer, Engel, Schoenherr € 22,50

S 138: **Entwicklung eines scannenden Prüfgeräts zur Detektion von Delaminationen in Betonfahrbahndecken**

Groschup, Große, Eger, Freudenstein

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

S 139: **Unterhaltung und Sanierung des Straßennetzes – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 17. und 18. September 2018 in Bonn**

Durner

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

S 140: **Erfahrungssammlung Bitumendaten – Frischbitumen**

Radenberg, Flottmann, Drewes

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

S 141: **Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummi-modifiziertem Bindemittel**

Radenberg, Manke

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

2020

S 142: **Untersuchungen zur Verbesserung der Methode zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen**

Beckedahl, Koppers, Schrödter € 15,50

S 143: **s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch**

Bräu, Vogt

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

S 144: **Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen**

Radenberg, Staschkiewicz € 17,50

S 145: **Schadenskategorie-spezifische Bewertung von AKR-Prüfverfahren**

Weise, Werner, Maier, Wilsch

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

S 146: **Untersuchungen zur Möglichkeit der Verarbeitung von Gussasphalt bei maximal 230 °Celsius ohne viskositätsverändernde Zusätze**

Radenberg, Gehrke

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

2021

S 147: **Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST**

Birle, Cudmani, Melsbach

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

S 148: **Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken**

Freudenstein, Eger, Pichotka, Riwe, K. Villaret, S. Villaret, Frohböse

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

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG

Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen

Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

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

www.schuenemann-verlag.de

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