

# Asphaltoberbau und extreme Temperaturen

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 156

**bast**

# Asphaltoberbau und extreme Temperaturen

von

Hartmut Johannes Beckedahl  
Tim Schrödter  
Stefan Koppers  
Dmytro Mansura

Bergische Universität Wuppertal  
Lehr- und Forschungsgebiet Straßenentwurf und Straßenbau  
Bergisches Straßenbaulabor

Oscar Reutter  
unter Mitarbeit von  
Charlotte Thelen

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 156**

**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 07.0276**  
Asphaltoberbau und extreme Temperaturen

**Fachbetreuung**  
Rolf Rabe

**Referat**  
Asphaltbauweisen

**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](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9323  
ISBN 978-3-95606-603-0

Bergisch Gladbach, August 2021

## Kurzfassung – Abstract

### Asphaltoberbau und extreme Temperaturen

Analysen von Klimasimulationen des Deutschen Wetterdienstes zur Ableitung zukünftiger Klimarandbedingungen haben gezeigt, dass es in Deutschland bereits in naher Zukunft zu einer Erwärmung kommen wird. Die Intensität der Zunahme ist dabei regional unterschiedlich und nimmt in ferner Zukunft noch einmal zu.

Um negativen Folgen der klimatischen Änderungen entgegenzuwirken, wurden Materialanpassungen hinsichtlich der thermophysikalischen und lichttechnischen Materialeigenschaften bei der Konzeption und Herstellung klimaoptimierter Asphalte umgesetzt. Eine Optimierung der lichttechnischen Eigenschaften wurde durch die Verwendung heller Gesteinskörnungen (Quarzit) und von synthetischem Bindemittel mit Pigmenten erzielt. Bezüglich der thermophysikalischen Eigenschaften wurden Asphaltmischgüter mit erhöhter (Quarzit, Kalkstein) und verringerter Wärmeleitfähigkeit (EO-Schlacke) für alle Asphaltsschichten konzipiert.

An Probekörpern der konzipierten Asphaltmischgüter wurden die Strahlungsreflexionsgrade sowie die thermophysikalischen Materialeigenschaften messtechnisch ermittelt. Anschließend fand eine praxisgerechte thermische Beanspruchung im Laboratorium an 24 cm dicken Asphaltaufbauten in einer Versuchsanlage zur Simulation der Globalstrahlung statt. Hierbei wurden Temperaturgradienten durch Messungen in verschiedenen Tiefen ermittelt. Zusätzlich wurde ein vereinfachtes eindimensionales Finite-Elemente-Modell erstellt, an dem Sensitivitätsanalysen zu thermophysikalischen Eigenschaften sowie Vergleiche zu den Laborergebnissen durchgeführt wurden.

Erwartungsgemäß erreichten die Varianten mit heller Deckschicht und Gesteinskörnung mit höherer Wärmeleitfähigkeit die geringsten Erwärmungen im Asphaltoberbau. Der Temperaturanstieg in der ATS ist dabei abhängig von den Wärmeleitfähigkeiten der ABS und ATS.

Abschließend wurden Asphalt- und Bindemittelprüfungen zur Bestimmung und Beurteilung der Performance der konzipierten Asphalte durchgeführt.

### Asphalt pavement structures and extreme temperatures

Analyses of climate simulations carried out by the German Weather Service to derive future climate boundary conditions have shown that there will be a climatic warming in Germany in the near future. The intensity of the increase will vary regionally and will increase once more in the distant future.

In order to counteract the negative consequences of these climatic changes, material adaptations with regard to the thermo-physical and photometric material properties were implemented in the design and production of climate-optimised asphalts. An optimisation of the photometric properties was achieved by using light-colored aggregates (quartzite) and synthetic binders with pigments. Regarding the thermo-physical properties, asphalt mixes with increased (quartzite, limestone) and reduced (electro-furnace slag) thermal conductivity were designed for all asphalt layers.

Radiation reflectance and thermo-physical material properties were measured on test specimens of the asphalt mixes designed. Subsequently, a practical thermal stressing in the laboratory on 24cm thick asphalt superstructures in a test facility for the simulation of global radiation took place. Temperature gradients were determined by measurements at different depths. In addition, a simplified one-dimensional finite element model was created on which sensitivity analyses of thermo-physical properties and comparisons with the laboratory results were carried out.

As expected, the variants with light-colored surface course and aggregates with higher thermal conductivity achieved the lowest heating in the asphalt pavement. The temperature rise in the asphalt base course depends on the thermal conductivity of the asphalt binder layer and the asphalt base course.

To conclude, asphalt and binder tests were successfully carried out to determine and assess the performance of the designed asphalts.

## Summary

### Asphalt pavement structures and extreme temperatures

## 1 Initial situation and objectives of the project

In research [1-4], which takes into account the projected climate change when dimensioning road pavements, it was shown that the durability of road pavements is significantly influenced by climatic changes (e.g. increase in the frequency and intensity of heat waves). Among other things, sensitivity analyses have shown that the service life of asphalt base layers is shortened due to the current standardised asphalt pavement designs, taking into account the projected climate change. In addition, the more frequent occurrence of high temperatures increases or accelerates the growth of permanent deformations, in some cases significantly.

This research project follows earlier research work. The aim is to make reliable statements regarding the possibilities of compensation through material optimisations on the effects of the projected climate change. To this end, existing asphalt types and grades are being redesigned with regard to their thermo-physical properties within the framework of this research project. Albedo is also taken into account as a measure of the reflection of thermal radiation.

The aim of the research project is to influence the performance parameters of asphalt by a targeted material adaptation in such a way that the effects of climate change on service life and maintenance intervals can be kept as low as possible.

## 2 Research methodology and results

In order to derive future climatic boundary conditions and their effects on the temperature development in an asphalt road surface, different climatic elements and climatological events have to be analysed first. For this purpose, climate simulations were carried

out by the German Weather Service and a catalogue of climate indices for individual and consecutive days was compiled, which is based on high-resolution data of an ensemble of regional climate models for Germany and the adjacent river basins. Especially for this research project, different climate elements were combined, which, according to first estimates, leads to a maximum warming of an asphalt package.

The analysis for the derivation of future climate boundary conditions shows that in the entire BRD area for the emission scenarios RCP4.5 and RCP8.5 warming will already occur in the near future (time slice 2031 to 2060). The intensity of the increase differs in some regions and will increase again in the distant future (time slice 2071 to 2100).

Extreme climatic events such as the combination 1 (heat period with tropical nights) occur more frequently, but their intensity varies greatly from region to region. Frequently, strong changes, especially with regard to daily maximum temperatures and the intensity of periods, can be observed in the east, on the Upper and Lower Rhine, in the Rhine-Main area and in Bavaria. In terms of changes in night-time temperature changes, the north and the coastal region are most affected.

The effects of climate change on the performance of asphalt and the resulting consequences for future road construction are mainly limited to extreme temperatures (in the sense of high asphalt temperatures). As the probability of very low temperatures due to global warming will be lower in the future, but their occurrence cannot be excluded, the possible widening of the temperature range between maximum and minimum asphalt temperatures must also be taken into account.

In order to counteract the negative consequences of climatic changes, material adaptations with regard to the thermo-physical and photometric material properties, which have been implemented in the design and manufacture of climate-optimised asphalts, can be purposeful. An optimisation of the light-engineering material properties was achieved by using light-colored aggregates (quartzite) and synthetic binder with pigments. Regarding the thermo-physical material properties, asphalt mixes with increased (quartzite and limestone) and reduced (EO slag) thermal conductivity were designed for all asphalt layers. Laboratory tests

Asphalt mix type	Variant	Aggregates	Binder	Miscellaneous
AC 8 D	ACD-1	Diabase	PmB	-
	ACD-2	Quartzite	PmB	-
	ACD-3	EO slag	PmB	-
	ACD-7	Quartzite	SynB	Pigments
	ACD-9	EO slag	SynB	Pigments
AC 16 B	ACB-1	Diabase	PmB	
	ACB-2	Limestone	PmB	
	ACB-3	EO slag	PmB	
AC 22 T	ACT-1	Diabase	StBB	
	ACT-2	Limestone	StBB	
	ACT-3	EO slag	StBB	

Tab. 1: Mix designs for asphalt wearing courses, asphalt binder courses and asphalt base courses

were carried out on both the individual layers and combinations of these layers. A selection of the asphalt mixes designed for asphalt wearing courses, asphalt binder courses and asphalt base courses is shown in table 1.

The photometric material properties of an asphalt wearing course (ADS) can be improved by using a light-colored aggregate within the asphalt or as a gritting material on its surface. The use of synthetic binders, which can be lightened with pigments, offers further optimisation potential. Within the scope of this research project, the radiation reflection coefficients of six asphalt surface layer variants were determined by measurement. The radiation reflectance indicates the proportion of radiation in the entire solar spectrum that is reflected by the asphalt.

The lowest (0.042) and the highest (0.484) radiation reflectance are the surface untreated asphalt wearing courses with PmB and SynB with pigments. These surfaces correspond to a freshly produced asphalt surface layer and have a continuous binder film, just like the surfaces of the asphalt specimens in the irradiation booth. The measurement results could therefore be used for the application of the laboratory results in the model. With a value of 0.125, the asphalt surface layer variant with quartzite as an aggregate and glass break blasted surface performs best in the concepts with PmB.

The thermo-physical properties of a material have a significant influence on heat conduction and storage. They are influenced, among other things, by the density, thermal conductivity and heat

capacity of a material. The metrological determination of thermo-physical material properties was carried out with a THB measuring instrument on flat-ground marble specimens with a diameter of 100mm.

As expected, the lowest thermal conductivity (1.23 to 1.29 W/(m\*K)) was determined for the variants with EO slag. The cover layers with quartzite as an aggregate are much higher (2.60 to 3.09 W/(m\*K)) and the reference variants with diabase are in between (1.59 to 1.89 W/(m\*K)). For the layers with more voids, measurements were only possible to a limited extent (asphalt binder course) or not at all (asphalt base course).

The practice-oriented thermal stressing of the asphalt specimens took place in the laboratory in a test facility (irradiation stand) built for this research project to simulate global radiation. In the irradiation stand, asphalt structures with a thickness of 24cm were irradiated with sunlight lamps and the temperature gradients were recorded by temperature measurements at various depths. The asphalt superstructures were composed of different combinations of the designed asphaltic pavements. In the case of the practice-oriented thermal stress, the influence of different thermo-physical asphalt properties was primarily investigated. The reflectivity was only dependent on the color of the binder film on the surface, as no surface treatment was applied.

The greatest temperature reduction in the bonded superstructure was achieved by the variant with a light and heat-conducting asphalt surface layer (quartzite and synthetic binder with pigments) on an asphalt binder and asphalt base layer with low thermal conductivity (EO slag). The other variants with a light-colored surface course and aggregates with higher thermal conductivity also lead to significantly less heating in the bonded superstructure. The temperature increase in the asphalt base layer (ATS) depends on the thermal conductivity of the asphalt binder course (ABS) and the ATS.

The asphalt variants with dark surface layer, which were optimised in terms of their thermo-physical material properties, did not lead to any reduction in the heat in the ADS after 27 hours. In the lower third of the ATS, only slightly lower temperature differences could be measured in three variants compared to the reference variant. It must be taken into account that no surface treatment was carried

out on the variants with a dark surface layer and their radiation reflectance therefore corresponds to that of a freshly applied asphalt surface layer.

In order to analyse the effect of the thermo-physical and photometric asphalt properties, a simplified one-dimensional finite element model for heat transfer was created. A sensitivity analysis on the single-layer model allowed qualitative statements to be made on the influence of the increase or reduction in thermal conductivity, specifically on heat capacity and density on temperature development.

The multi-layer model, which corresponds to a structure of the load class Bk10 according to the guidelines for the standardisation of pavement structures of traffic areas (RStO 12), was first calibrated in several steps and then used to verify the results of the practical thermal stress in the laboratory. For this purpose, the asphalt pavements used in the laboratory were simulated with the corresponding thermo-physical and photometric material properties. Based on the measured global radiation values during the tests in the irradiation booth, a constant radiation of  $600 \text{ W/m}^2$  was applied. The initial and ambient temperature was set at  $20^\circ\text{C}$  and a heat transfer coefficient for still air.

The comparison of the model calculations with the laboratory results at a depth of 20mm (middle of the asphalt surface layer) shows a higher agreement for the test series with darker asphalt surface layer ( $\Delta = 5.7 \text{ K}$ ) compared to those with light asphalt surface layer ( $\Delta = 15.8 \text{ K}$ ). At a depth of 220mm (lower third asphalt base layer) the differences are smaller. The test series with a dark asphalt surface layer exceed the laboratory results ( $\Delta = 5.2 \text{ K}$ ), those with a lighter one fall short of these ( $\Delta = 4.5 \text{ K}$ ). The reasons for this are probably the higher ambient temperature despite air conditioning in the laboratory, an excessive reduction in the amount of radiation due to the degree of reflection in the model and the assumptions made for the thermo-physical material properties for the asphalt binder and asphalt base layer due to the problems described.

Asphalt and binder tests were carried out to test and assess the performance of the designed asphalts. The stiffness and fatigue behavior were investigated by means of the indirect tensile test, the deformation behavior at high temperatures by means of the cyclic compression test and the track formation test, and the low temperature behavior by means of cooling and tensile tests. The binders were analysed

by conventional binder tests (PEN, EP RuK, BPFr,  $R_E$ ) and the BTS method.

The resistance to permanent deformation was determined using two different test methods, the cyclic compression test according to DIN EN 12697-25 [5] and the track formation test according to TP Asphalt StB Part 22 [6]. The resistance to permanent deformation was determined in both tests under otherwise identical conditions. An adjustment of the test temperatures to the temperatures to be expected due to the thermo-physical and light-technical material properties was not carried out in the test arrangements. The statements are therefore only relative. The effects of the temperatures on the development of the permanent deformations of the asphalts tested here can only be estimated by means of theoretically based prognosis models with which the thermo-physical and photometric material properties can also be represented.

The stiffness was determined as a function of frequency and temperature. As asphalt stiffness based on a frequency of 10Hz are usually used for stress and strain calculations and performance forecasts, the summarising evaluations are also based on this frequency.

The stiffnesses for the asphalt surface layer variants at high temperatures range from relatively high stiffnesses for ACD-3 and ACD-1, through moderately high stiffnesses for ACD-9 and ACD-2, to the lowest stiffnesses for ACD-7. At low temperatures, ACD-9, ACD-7 and ACD-3 are at a high stiffness level and ACD-1 and ACD-2 are at a relatively low stiffness level. The stiffnesses for the asphalt binder course variants do not differ significantly at high and low temperatures. For the asphalt base layer variants, hardly any differences can be detected at high temperatures. At low temperatures, the stiffnesses for ACT-3 are higher than for ACT-1 and ACT-2. In summary, only ACD variants show significant differences in the temperature dependent stiffnesses.

Based on the performance tests for resistance to permanent deformation of asphalt concrete wearing courses, tested with the cyclic compression test according to DIN EN 12697-25 [5], the ACD-9 variant behaves most favorably at  $50^\circ\text{C}$  test temperature, independent of the test method used. In the ranking list, the variants ACD-3 and ACD-1 or ACD-1 and ACD-3 follow, up to ACD-2 and ACD-7. Due to the stiffnesses determined, the very good

performance in the field of permanent deformation of variant ACD-9 can be described as unusual.

For the asphalt concrete binder course, the variants rank from ACB-1, ACB-3 to ACB-2 from favorable to less favorable, whereby ACB-2 would have to be classified as equivalent or even slightly more favorable than variant ACB-3 in the long term due to the lower creep rate at the end of the test. Here, too, one variant, ACB-1, shows a considerably more favorable behavior with respect to permanent deformations than the other two variants, although the stiffnesses at high temperatures hardly differ.

Based on the performance tests for fatigue resistance, the ACB-1, ACB-2 and ACB-3 variants perform almost equally well. In contrast, the tested variants ACT-2 and ACT-3 show a significant difference. The variant ACT-3 shows a significantly higher resistance to fatigue in the range of the initial elastic strain of  $\varepsilon_{el,Anf} < 0.1\%$  or allows significantly higher numbers of load cycles until cracking than the variant ACT-2. Since the fatigue strength is tested at a temperature of 20°C, the service life due to fatigue in an overall construction is very dependent on the stiffness gradients of the construction. As a result of relatively high temperatures in the structure under consideration, the layer stiffnesses are reduced and the tensile strains at the underside of the asphalt layer under consideration become greater for the same load. With increasing tensile strain at the underside, however, the service life decreases. Thus, the resistance to fatigue is a performance parameter but is not sufficient to determine the service life of asphalt structures.

Low temperature performance is an important performance property, particularly in asphalt wearing courses. According to the test methods uniaxial tensile test and cooling test according to TP Asphalt StB part 46 A [7], the asphalt surface layer variants ACD-7 and ACD-9 perform worst. The variants ACD-1, ACD-2 and ACD-3 are to be evaluated as relatively equal with regard to the low temperature behavior. It should be briefly mentioned here that the low temperature properties of asphalt deteriorate with decreasing binder film thickness. The binder content expressed in % by volume gives an indication of this, unless the aggregates are porous. Looking at the binder content of the asphalt wearing course variants, the synthetic binder variants have the lowest and the highest volumetric binder content (ACD-7). The ACD-1 variant has a slightly higher volumetric binder content than ACD-7, while the

volumetric binder content of the ACD-2 and ACD-3 variants is slightly lower than that of ACD-9. The information on both volumetric binder content and the stiffness at low temperatures does not provide any information on the low temperature behavior.

Apart from the material adaptations investigated here, the possibilities for mix optimisation that are already common today remain. In the publications [8-10] it could be shown that the choice of binder alone makes it possible to significantly influence the performance properties of resistance to permanent deformation, fatigue resistance and resistance to cooling with regard to longer service lives. These test results were obtained under otherwise identical boundary conditions such as layer thickness, traffic and climate compared to the standard solutions. If the above-mentioned approaches to asphalt design are combined with the usual mix optimisation, including, for example, binders not yet included as standard in the TL Asphalt-StB, such as high polymer modified bitumen (PmB H), the negative consequences of extreme temperatures on the performance behavior of asphalt can be successfully counteracted in any case.

As it was not part of the task catalogue of this research project to test such asphalt combinations by means of mix optimisation, nor to carry out performance prognoses, a follow-up research project should be set up. In this project, the above-mentioned approaches to asphalt design (heat storage, heat dissipation and brightened surface) in combination with high-performance binders will have to be investigated by incorporating forecasts of performance developments of an optimisation.

Based on the results of this research project, a further research project could also investigate the effects of the changed climatic boundary conditions on the service life of asphalt constructions. With the help of dimensioning calculations, the effects of the changed climatic conditions on the service life of conventional asphalt constructions on the one hand and climate-optimised asphalts on the other hand could be analysed. Thus, the questions regarding a possible shortening of the service life due to climate changes or an extension of the service life by asphalt mixes adapted to the climate changes could be clarified.

In addition to the pure adaptation of asphalt mixes to the extreme temperatures caused by climate change, the impact of climate change on asphalt performance can also be reduced by transport

policy decisions. In this context, the limitation of axle loads, by avoiding overloading with the help of vehicle technology (smart trucks), and the distribution of the vehicle mass over a larger area (reduction of the stress transmitted from the tire to the road surface), by increasing the number of axles per vehicle or by using tires that are less damaging to the road surface, are particularly worth mentioning. Political control would be possible through an architecture of tolls geared to this. Such measures could possibly reduce the effects of extreme temperatures on asphalt performance as an alternative or in combination with construction technology or optimisation of construction material components.

In conclusion, it should be noted that the search for solutions is not a distant future problem but must be implemented quickly. If one assumes that asphalt base layers are currently estimated to have an average service life of 50 years, new asphalt base layers built for example for major renovations are already today in the near future (time slice 2031 to 2060) and even beyond. It is therefore necessary to set future temperatures for current dimensioning of pavement structures.

## Inhalt

<b>Abkürzungen</b> .....	11	4.2	Vorbereitungen und Vorgehensweise bei der Analyse .....	26
<b>1 Einleitung</b> .....	13	4.3	Analyse der Klimadaten .....	27
<b>2 Treibhausgasemissionen in Deutschland und weltweit</b> .....	14	<b>5 Konzeption und Herstellung klimaoptimierter Asphalte</b> .....		34
2.1 Betrachtung von Vergangenheit und Gegenwart .....	14	5.1	Ansprache thermophysikalischer und lichttechnischer Asphalteeigenschaften .....	34
2.1.1 Fossile Kohlenstoffdioxidemissionen .....	14	5.2	Asphaltmischgutkonzeptionen .....	35
2.2 Typen von Zukunftsszenarien .....	15	<b>6 Modell zur Wirkungsweise der thermophysikalischen Asphalteeigenschaften</b> .....		36
2.2.1 Einführung zum fünften Sachstandsbericht (AR5) des IPCC (Entstehung, Zeitraum, Aufbau) .....	15	6.1	Numerische Modellbeschreibung .....	36
2.2.2 Einführung zum Emission Gap Report (EGR19) .....	16	6.2	Ergebnisse .....	40
2.3 Betrachtung der Zukunft .....	17	<b>7 Thermophysikalische und lichttechnische Asphalteeigenschaften</b> ...		44
2.3.1 Aussagen im fünften Sachstandsbericht des IPCC .....	17	7.1	Thermophysikalische Eigenschaften ...	44
2.3.2 Aussagen im Emission Gap Report 2019 .....	18	7.1.1	Prüfverfahren .....	44
2.4 Übersicht der gesamten Treibhausgas- und Kohlendioxidemissionen .....	19	7.1.2	Ergebnisse .....	45
<b>3 Klimamodellierung und Asphalteeigenschaften</b> .....	20	7.2	Lichttechnische Eigenschaften .....	47
3.1 Klimamodellierung .....	20	7.2.1	Prüfverfahren .....	48
3.1.1 Globalmodelle .....	20	7.2.2	Ergebnisse .....	48
3.1.2 Regionale Klimamodelle .....	21	7.3	Praxisgerechte thermische Beanspruchung im Laboratorium .....	49
3.2 Mögliche zukünftige Klimaänderungen in Deutschland .....	21	7.3.1	Bestrahlungsstand und Vorbereitungen .....	49
3.2.1 Auswirkungen auf den Asphalt-oberbau .....	22	7.3.2	Ergebnisse .....	50
3.3 Materialeigenschaften von Asphalt .....	22	7.4	Modellanwendung der Laborergebnisse .....	55
<b>4 Ableitung zukünftiger Klimarandbedingungen</b> .....	23	<b>8 Konventionelle und performanceorientierte Asphalt- und Bindemittelprüfungen</b> .....		58
4.1 Auswahl von Klimatelementen und Berechnung von Klimaindizes .....	23	8.1	Bindemittelprüfungen .....	58
		8.2	Asphaltprüfungen .....	58

8.2.1 Druckschwellversuch .....	58
8.2.2 Spurbildungsversuch .....	59
8.2.3 Spaltzug-Schwellversuch .....	59
8.2.4 Kälteeigenschaften .....	62
<b>9 Zusammenfassung .....</b>	<b>63</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>68</b>
<b>Bilder .....</b>	<b>72</b>
<b>Tabellen .....</b>	<b>75</b>

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

## Abkürzungen

ACB	Asphaltbeton Binderschicht	DIN EN	Deutsches Institut für Normung (DIN), Übernahme einer Europäischen Norm (EN)
ACD	Asphaltbeton Deckschicht		
ACT	Asphaltbeton Tragschicht	DWD	Deutscher Wetterdienst
AFOLU	Agriculture, Forestry and Other Land Use	EC-EARTH	European Centre – Earth System model
ALADIN	Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational	ECHAM	European Center Hamburg Model, Akronym aus ECMWF und Hamburg
ALARO	Kombiniertes Model aus ALADIN und AROME	ECMWF	European Centre for Medium Range Weather Forecasting
AROME	Application de la Recherche à l'Opérationnel à Meso-Echelle	EDGAR	Electronic Data Gathering, Analysis, and Retrieval
AR5	IPCC Assessment Report 5	EGR	Emission Gap Reports
BAU	Business as usual	EOS/EO-Schlacke	Elektroofenschlacke
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur	EP RuK	Erweichungspunkt Ring- und Kugel
BPFr	Brechpunkt nach Fraaß	ESM	Earth System Model
BRD	Bundesrepublik Deutschland	EU	Europäische Union
BTSV	Bitumen-Typisierung-Schnellverfahren	EURO-CORDEX	Coordinated Downscaling Experiment – European Domain
BTU	Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg	FOLU	Forstwirtschaft und andere Landnutzung
CanESM2	Canadian Earth System Model, Generation 2	GCM	Global Climate Model, oder auch General Circulation Model
CLINO	CLINO-Periode (CLINO = climate normal = Normalperiode)	HadGEM2-ES	Hadley Centre Global Environment Model 2 – Earth System
CMIP5	Climate Model Intercomparison Project, Phase 5	HIRHAM	Dynamisches Regionales Klimamodell des Dänischen Meteorologischen Instituts, Kombination der Modelle HIRLAM und ECHAM
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques		
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques – Climate Model, Version 5	HIRLAM	High Resolution Limited Area Model
COSMO-CLM	Consortium for Small Scale Modeling model in Climate Mode, auch CCLM genannt	HYRAS	Hydrologische Rasterdatensätze
DIN	Deutsches Institut für Normung		

IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	ReKliEs-De	Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland
IPSL-CM5A	Institute Pierre Simon Laplace – Climate Model, Version 5A	REMO	dynamisches Regional-Modell
KLIWAS	Forschungsprogramm Klima, Wasser, Schifffahrt	RStO	Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen
Kombi1	PeriH + NachtT	SMA	Splittmastixasphalt
Kombi2	PeriH + NachtW	SRES	Special Report on Emissions Scenarios
Kombi3	PeriW + NachtW		
LULUCF	Land Use, Land-Use Change and Forestry	StbB	Straßenbaubitumen
MA	Gussasphalt	SynB	synthetisches Bindemittel
MIROC5	Model for Interdisciplinary Research on Climate, Version 5	TagH	heiße Tage
MPI-ESM	Earth System Model des Max-Planck-Institutes	TagS	Sommertage
MPI-M	Hamburger Max-Planck-Institut für Meteorologie	TagW	warme Tage
NachtT	Topennächte	TAS	mittlere bodennahe Lufttemperatur
NachtW	warme Nächte	THB	Transient Hot Bridge
NDC	National Determined Contribution	THG-Emissionen	Treibhausgasemissionen
NorESM	Norwegian Earth System Model	Tmax	Tageshöchsttemperatur
PEN	Nadelpenetration	Tmin	Tagestiefsttemperatur
PeriH	Hitzeperiode	TP Asphalt-StB	Technische Prüfvorschriften für Asphalt
PeriW	Wärmeperiode	UBA	Umweltbundesamt
PmB	polymermodifiziertes Bindemittel	UN	United Nations
RACMO	Regional Atmospheric Climate Model	UNEP	United Nations Environment Programme
RCA	Rosby Centre regional atmospheric model	WRF	Weather Research and Forecast Model
RCM	Regional Climate Model		
RCP	Representative Concentration Pathway		
RDO Asphalt	Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht		

## 1 Einleitung

In Forschungsarbeiten [1–4], die den projizierten Klimawandel bei der Dimensionierung von Straßenbefestigungen berücksichtigen, konnte gezeigt werden, dass die Dauerhaftigkeit von Straßenbefestigungen durch klimatische Veränderungen (z. B. Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Hitzewellen) deutlich beeinflusst wird. Unter anderem konnte anhand von Sensitivitätsanalysen gezeigt werden, dass sich bei den derzeitigen standardisierten Asphaltoberbaukonstruktionen, unter Berücksichtigung des projizierten Klimawandels, die Nutzungsdauer der Asphalttragschichten verkürzt. Darüber hinaus wird durch das häufigere Auftreten hoher Temperaturen der Zuwachs an bleibenden Verformungen teilweise deutlich erhöht bzw. beschleunigt. Durch die Annahme veränderter Materialparameter wurde auf theoretische Weise gezeigt, dass durch Änderungen von Asphaltmischgutzusetzungen negative Auswirkungen des Klimawandels auf die Nutzungsdauern und Erhaltungszyklen kompensieren werden können.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen sind theoretischer Natur und wurden nicht durch Performance-Prüfungen an dafür konzipierten Asphalten verifiziert. Dieses Forschungsprojekt schließt sich inhaltlich früheren Forschungsarbeiten an. Es sollen belastbare Aussagen hinsichtlich der Kompensationsmöglichkeiten durch Materialoptimierungen auf die Auswirkungen des projizierten Klimawandels getroffen werden. Dazu werden im Rahmen dieses Forschungsprojektes bestehende Asphaltarten und -arten hinsichtlich ihrer thermophysikalischen Eigenschaften neu konzipiert. Ebenso findet die Albedo, als Maß der Reflexion thermischer Strahlung, Berücksichtigung. Durch eine gezielte Erhöhung der Albedo, die ein höheres Reflexionsvermögen gegenüber Wärmestrahlung bewirkt, soll die Resistenz gegen bleibende Verformungen bei steigender Häufigkeit sehr hoher Tageshöchsttemperaturen verbessert werden.

Ziel des Forschungsprojektes ist es, durch eine gezielte Materialadaption die Performanceparameter von Asphalt so zu beeinflussen, dass die Auswirkungen des Klimawandels auf Nutzungsdauer und Erhaltungsintervalle so gering wie möglich gehalten werden können.

Ohne eine Anpassung der verwendeten Materialien im Asphaltoberbau an den projizierten Klimawandel ist davon auszugehen, dass sich die Nutzungsdau-

er aller Asphaltsschichten verkürzt. An der Unterseite der Asphalttragschichten erhöhen sich infolge temperaturbedingter Steifigkeitsminderungen der Gesamtkonstruktion die Zugdehnungen und damit die Ermüdungsschädigung. Außerdem werden durch die Auswirkungen höherer Temperaturen die Schädigungen der Asphaltdecke in Form von bleibenden Verformungen zunehmen. Maßnahmen der Straßenerhaltung müssten somit häufiger durchgeführt werden. Neben den steigenden Erhaltungskosten würde dies auch zu höheren Beeinträchtigungen für Straßennutzer durch mangelnden Fahrkomfort und/oder Verkehrsstaus infolge von Baumaßnahmen sowie gegebenenfalls zu eingeschränkter Verkehrssicherheit durch Aquaplaning führen.

Eine Neukonzeption der Asphalte für Deck-, Binder- und Tragschichten hinsichtlich ihrer thermophysikalischen und Performance-Eigenschaften soll dazu führen, geplante Nutzungsdauern von Asphaltoberbauten trotz der zu erwartenden Auswirkungen des projizierten Klimawandels, wie etwa häufigeren und/oder längeren Perioden mit extremer Hitze, einhalten zu können.

Um auszuschließen, dass sich die Asphalteeigenschaften der im Forschungsvorhaben für extreme (hohe) Temperaturen thermophysikalisch optimierten Asphalte für Deck-, Binder- und Tragschicht hinsichtlich des Verhaltens bei niedrigen Temperaturen mehr als vertretbar verschlechtern, werden diese nicht nur im Hinblick auf ihr irreversibles Verformungsverhalten und ihrer Materialkennwerte gemäß den Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht (RDO Asphalt) [5] geprüft, sondern auch bezüglich ihres Verhaltens bei tiefen Temperaturen. Dies ist deshalb erforderlich, weil bei Standardasphalten ein Zuwachs des Widerstandes gegen bleibende Verformungen mit einer Verminderung des Widerstandes gegen tiefe Temperaturen einhergeht. Zudem werden die konzipierten Asphalte mit einer Referenzvariante verglichen. Somit können abschließend Aussagen zur Anwendung der gegen extreme Temperaturen widerstandsfähig konzipierten Asphalte getroffen werden.

## 2 Treibhausgasemissionen in Deutschland und weltweit

Um die vergangenen und zukünftigen weltweiten Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) anhand anerkannter wissenschaftlicher Quellen darzustellen, wird nachfolgend zunächst in einer Rückschau erläutert, wie sich die weltweiten THG-Emissionen seit dem Jahr 1970 mit Fokus auf den letzten zehn Jahren (2008 bis 2018) real entwickelt haben. Im Anschluss daran wird die voraussichtliche zukünftige Entwicklung der THG-Emissionen anhand von vorliegenden Referenz- bzw. Basisszenarien vorgestellt.

Als Datengrundlage dienen die Datenbank EDGAR [6] für die Rückschau sowie der fünfte Sachstandsbericht (AR5) des zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) [7] und der Emissions Gap Report (EGR) des United Nations Environment Programme (UNEP) [8] für die Betrachtung der zukünftigen Quellen.

### 2.1 Betrachtung von Vergangenheit und Gegenwart

#### 2.1.1 Fossile Kohlenstoffdioxidemissionen

Die fossilen (energiebedingten) CO<sub>2</sub>-Emissionen stiegen von 1971 bis 2000 weltweit um 62,28 % von 15.705 Mt CO<sub>2</sub>/Jahr auf 25.600 Mt CO<sub>2</sub>/Jahr an. Demgegenüber sanken in diesem Zeitraum die deutschen fossilen (energiebedingten) CO<sub>2</sub>-Emissionen von 1.076 Mt CO<sub>2</sub>/Jahr auf 871 Mt CO<sub>2</sub>/Jahr (Rückgang um 19,08 %) (vgl. Tabelle 2-1).

Die weltweiten fossilen (energiebedingten) Treibhausgasemissionen stiegen von 1971 bis 2000 um 46,59 % von 24.532 Mt CO<sub>2</sub> Äq/Jahr auf 35.962 Mt CO<sub>2</sub> Äq/Jahr an, während in diesem Zeitraum die deutschen fossilen (energiebedingten) CO<sub>2</sub> Äq-Emissionen von 1.323 Mt CO<sub>2</sub> Äq/Jahr auf 1.043 Mt CO<sub>2</sub> Äq/Jahr um 21,12 % sanken. Die Treibhausgasemissionen Deutschlands tragen im Jahr 2015

mit 928 Mt CO<sub>2</sub> Äq/Jahr zu 1,89 % zu den weltweiten Treibhausgasemissionen bei (vgl. Tabelle 2-2).

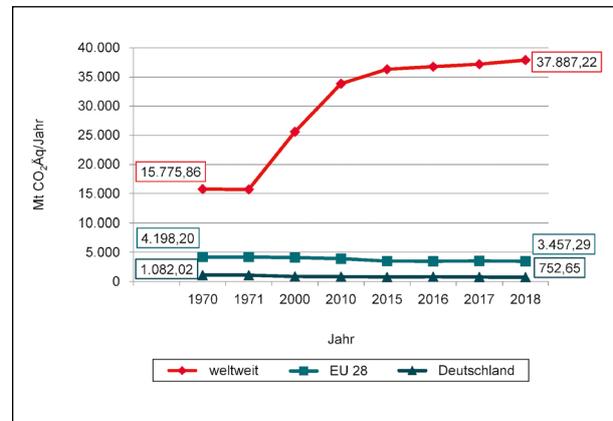


Bild 2-1: Fossile Kohlenstoffdioxidemissionen weltweit, in Deutschland und den EU 28; eigene Darstellung auf Grundlage der Daten aus Tabelle 2-1

	1970	1971	2000	2010	2015
weltweit	24.305	24.532	35.962	45.934	49.113
EU 28	5.507	5.537	5.297	4.956	4.499
Deutschland	1.325	1.323	1.043	974	928

Tab. 2-2: Treibhausgasemissionen [Mt CO<sub>2</sub> Äq/Jahr] weltweit, in Deutschland und den EU 28; eigene Darstellung nach [9]

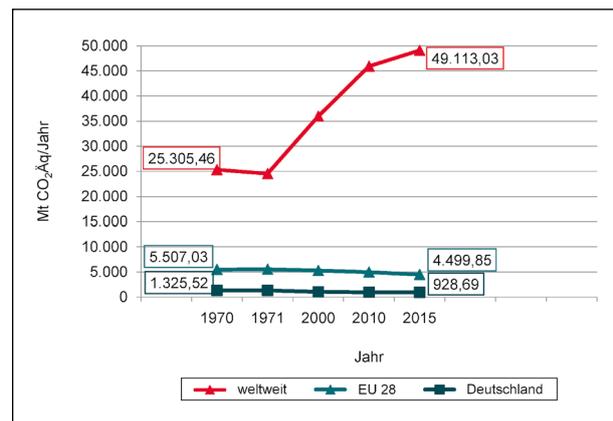


Bild 2-2: Treibhausgasemissionen weltweit und in Deutschland; eigene Darstellung auf Grundlage der Daten aus Tabelle 2-2

	1970	1971	2000	2010	2015	2016	2017	2018
weltweit	15.775	15.705	25.600	33.836	36.311	36.753	37.179	37.887
EU 28	4.198	4.196	4.121	3.922	3.492	3.480	3.524	3.457
Deutschland	1.082	1.076	871	816	786	790	787	752

Tab. 2-1: Fossile Kohlenstoffdioxidemissionen [Mt CO<sub>2</sub>/Jahr] weltweit, in Deutschland und den EU 28; Eigene Darstellung nach [9]

## 2.2 Typen von Zukunftsszenarien

Annahmen über den potenziellen Verlauf von Entwicklungen und den daraus resultierenden zukünftigen Situationen werden Szenarien genannt. Folgende Arten von Szenarien können unterschieden werden: Forecasting-Szenarien, Backcasting-Szenarien, Basis- bzw. Referenzszenarien und Policy-Szenarien.

Szenarien, die mittels Forecasting entwickelt werden, haben ihren Ausgangspunkt in der Gegenwart und entwickeln, ausgehend davon, Entwicklungspfade für die Zukunft. Forecasting-Szenarien beschreiben, was zukünftig geschieht, wenn in der Gegenwart bestimmte Entscheidungen getroffen werden. Damit wird mit Forecasting-Szenarien die Leitfrage „Was geschieht, wenn ...?“ untersucht.

Szenarien, die mittels Backcasting entwickelt werden, haben ihren Ausgangspunkt hingegen in einer zukünftigen Zielsituation und entwickeln davon ausgehend unterschiedliche Handlungsoptionen, um dieses Ziel zu erreichen. Backcasting-Szenarien beschreiben, was für Entscheidungen in der Gegenwart getroffen werden müssen, um zukünftige Zielsituationen zu erreichen. Untersucht wird mit Backcasting-Szenarien die Leitfrage „Was muss geschehen, damit ...?“.

In sogenannten Referenz- bzw. Basisszenarien wird beschrieben, was zukünftig geschieht, wenn die Entwicklung dem gegenwärtigen Stand entsprechend weiterverläuft. Diese Szenarien werden synonym „Business as usual“ (BAU)-Szenarien genannt. Hinter Referenz- bzw. Basisszenarien steht die Leitfrage „Was wird sein, wenn nichts geschieht ...?“. Solche Szenarien dienen dem Vergleich (baseline) zu Szenarien, die alternative Entwicklungspfade betrachten.

Policy-Szenarien untersuchen die zukünftigen Auswirkungen von Politikentscheidungen. Hinter Policy-Szenarien steht die Leitfrage „Wie wirken sich bestimmte Politiken aus ...?“.

### 2.2.1 Einführung zum fünften Sachstandsbericht (AR5) des IPCC (Entstehung, Zeitraum, Aufbau)

Der fünfte Sachstandsbericht (AR5) des IPCC besteht aus den Berichten der drei Arbeitsgruppen „Naturwissenschaftliche Grundlagen“ [10], „Folgen, Anpassung und Verwundbarkeit“ [11] und „Minderung des Klimawandels“ [12] sowie einem abschließenden Synthesebericht [13]. Der Synthesebericht „Klimaänderung 2014“ fasst die Hauptaussagen der drei Arbeitsgruppen zur Nutzung für Entscheidungsträger in Regierungen, dem Privatsektor sowie der Öffentlichkeit zusammen. Neben den Ergebnissen der drei Arbeitsgruppen zieht der Synthesebericht zusätzlich die Erkenntnisse aus den Sonderberichten „Erneuerbare Energiequellen und die Minderung des Klimawandels“ [14] und „Management des Risikos von Extremereignissen und Katastrophen zur Förderung der Anpassung an den Klimawandel“ [15] hinzu.

Der Synthesebericht teilt sich in vier Themenblöcke:

1. Beobachtete Änderungen und deren Ursachen
2. Zukünftige Klimaänderungen, Risiken und Folgen
3. Zukünftige Pfade für Anpassung, Minderung und Nachhaltige Entwicklung
4. Anpassung und Minderung

Die in diesem Synthesebericht betrachteten Szenarien werden Repräsentative Konzentrationspfade (RCP) genannt. Diese RCP beschreiben „vier unterschiedliche Pfade von Treibhausgasemissionen und atmosphärischen Konzentrationen, Luftschadstoffemissionen und Landnutzung im 21. Jahrhundert“ [16]. Sie setzen sich aus einem stringenten Minderungsszenario (RCP2.6), zwei mittleren Szenarien (RCP4.5 und 6.0) und einem Szenario mit sehr hohen Treibhausgasemissionen (RCP8.5) zusammen. Referenzszenarien, die keine zusätzlichen Bemühungen zur Beschränkung von Emissionen beinhalten, entwickeln Pfade, die zwischen RCP6.0 und RCP8.5 (vgl. Bild 2-3) [16].

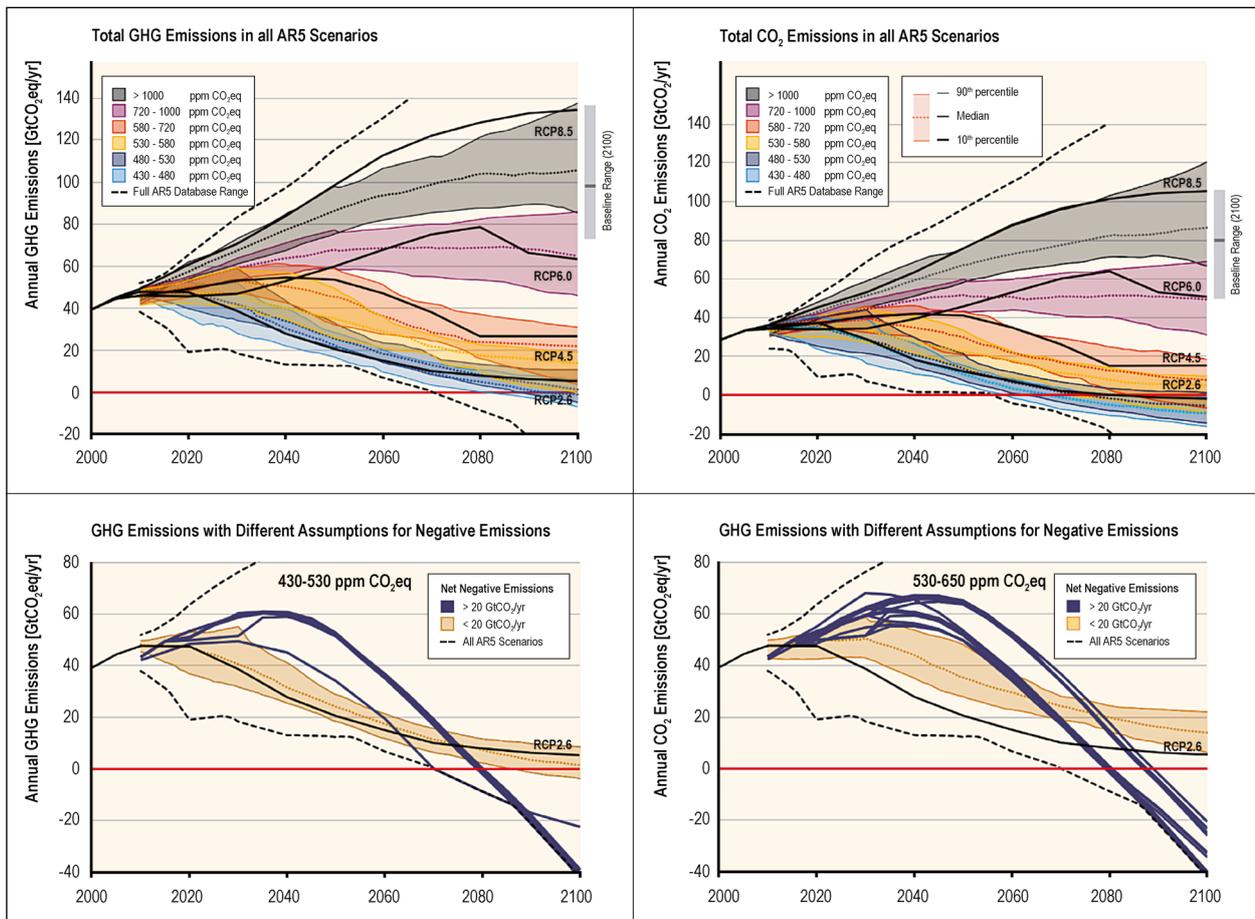


Bild 2-3: Emissionspfade des AR5 im Zeitraum von 2000 bis 2100 für unterschiedliche Szenarien [17]

## 2.2.2 Einführung zum Emission Gap Report (EGR19)

Im Jahr 2019 ist die zehnte Ausgabe des Emission Gap Reports (EGR) der UN erschienen. Der EGR dokumentiert die „Fortschritte bei der Erreichung der weltweit vereinbarten Klimaziele“ [8] und vergleicht hierfür die reale Entwicklung der Treibhausgasemissionen mit den Treibhausgasemissionen, die benötigt werden, um die Treibhausgasziele von 1,5 °C und 2 °C des Pariser Abkommens [18] einzuhalten. Der ermittelte Unterschied zwischen dem Status Quo der künftigen Treibhausgasemissionen zu den notwendigen Zielwerten, wird „Emission Gap“ [8] (zu deutsch: Emissionslücke) genannt. Laut dem EGR 2019 wird diese Emissionslücke im Jahr 2030 als die Differenz zwischen den projizierten Emissionen unter vollständiger Umsetzung der national festgelegten Beiträge (NDCs [18]) und den Emissionen, die im Pariser Abkommen (Least Cost Pathways) festgelegt sind, definiert. Die Least Cost Pathways stimmen mit den Zielen des Pariser Abkommens überein, die den

Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 °C und auf 1,5 °C begrenzen.

Zudem zeigt der Bericht Wege auf, um diese Emissionslücke zu schließen. Der EGR 2019, welcher von einem internationalen Team führender Wissenschaftler erstellt wurde, betrachtet dabei die neuesten wissenschaftlichen Studien, bspw. die IPCC-Studien. Die Bewertung der Emissionslücke im Jahr 2030 durch den EGR aus dem Jahr 2018 stützt sich auf die im Rahmen des Pariser Abkommens im Jahr 2015 vereinbarten National Determined Contribution (NDC).

Der EGR 2019 betrachtet zwei Referenzszenarien sowie NDC-Szenarien und Temperatur-Begrenzungsszenarien zur Bewertung der Emissionslücke. Die beiden Referenzszenarien, das PolitikszENARIO 2005 (2005-policies) und das aktuelle PolitikszENARIO (Current policy), sind Maßstäbe, mit denen die Fortschritte bei der Emissionsreduzierung verfolgt werden können. Das PolitikszENARIO 2005 betrachtet „globale Treibhausgasemissionen, sofern

ab etwa 2005 keine neue Klimapolitik eingeführt wird“ [8, 17].

Dieses Szenario ist das gleiche wie das No Policy-Szenario früherer Berichte. Das No Policy-Szenario betrachtet dabei die Entwicklung der globalen Treibhausgasemissionen nach dem Jahr 2005, ohne dass weitere Klimaschutzmaßnahmen ergriffen werden [19].

Das aktuelle PolitikszENARIO betrachtet „Treibhausgasemissionen, vorausgesetzt, dass alle derzeit verabschiedeten und umgesetzten Richtlinien (definiert als legislative Entscheidungen, Ausführungsbeschlüsse oder gleichwertige Maßnahmen) umgesetzt werden und keine zusätzlichen Maßnahmen ergriffen werden“ [8].

## 2.3 Betrachtung der Zukunft

### 2.3.1 Aussagen im fünften Sachstandsbericht des IPCC

#### Anthropogene CO<sub>2</sub>-Emissionen

Im Anhang zum Beitrag der Arbeitsgruppe I „Naturwissenschaftliche Grundlagen“ zum fünften Sachstandsbericht werden anthropogene Emissionen aufgelistet. Einen Teil dieser Auflistung stellen die anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen, wiederum unterteilt in anthropogene CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossilen Brennstoffen und anderen industriellen Quellen (FF), anthropogene CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Land- und Forstwirtschaft, Landnutzung (AFOLU) sowie anthropogene Gesamt-CO<sub>2</sub>-Emissionen, dar [10]. Die dort vorhandenen Werte sind in Petagramm (10<sup>15</sup> g) Kohlenstoff pro Jahr (PgC/Jahr) angegeben. Zur

besseren Vergleichbarkeit mit den Werten der Datenbank EDGAR wird eine Umrechnung in Gigatonnen Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) entsprechend den Umrechnungsvorgaben des AR5-Berichts [7] vorgenommen.

AR5-Szenarien, welche keine zusätzlichen Bemühungen zur Beschränkung von Emissionen (Referenzszenarien) beinhalten, führen zu Entwicklungspfaden zwischen dem Szenario mit mittleren THG-Emissionen (RCP6.0) und dem Szenario mit sehr hohen THG-Emissionen (RCP8.5). Laut dem Bericht der ersten Arbeitsgruppe zum fünften Sachstandsbericht aus dem Jahr 2013 [20] werden sich die zu erwartenden energiebedingten anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen ohne Landwirtschaft, Forstwirtschaft und sonstige Landnutzung (AFOLU) im Jahr 2030 zwischen 36,63 Gt CO<sub>2</sub> und 50,57 Gt CO<sub>2</sub>, im Jahr 2050 zwischen 47,67 Gt CO<sub>2</sub> und 73,45 Gt CO<sub>2</sub>, im Jahr 2060 zwischen 54,02 Gt CO<sub>2</sub> und 85,51 Gt CO<sub>2</sub>, im Jahr 2070 zwischen 59,88 Gt CO<sub>2</sub> und 94,43 Gt CO<sub>2</sub> und im Jahr 2100 zwischen 49,98 Gt CO<sub>2</sub> und 105,17 Gt CO<sub>2</sub> bewegen (vgl. Tabelle 2-3) [10].

Laut dem Bericht der ersten Arbeitsgruppe zum fünften Sachstandsbericht aus dem Jahr 2013 [20] werden sich die zu erwartenden energiebedingten anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen inklusive Landwirtschaft, Forstwirtschaft und sonstige Landnutzung (AFOLU) im Jahr 2030 zwischen 35,09 Gt CO<sub>2</sub> und 53,28 Gt CO<sub>2</sub>, im Jahr 2050 zwischen 45,91 Gt CO<sub>2</sub> und 75,58 Gt CO<sub>2</sub>, im Jahr 2060 zwischen 53,03 Gt CO<sub>2</sub> und 87,39 Gt CO<sub>2</sub>, im Jahr 2070 zwischen 59,74 Gt CO<sub>2</sub> und 95,97 Gt CO<sub>2</sub> und im Jahr 2100 zwischen 50,68 Gt CO<sub>2</sub> und 105,5 Gt CO<sub>2</sub> bewegen (vgl. Tabelle 2-4).

Szenario (ohne AFOLU)	2010	2030	2050	2060	2070	2100
RCP6.0 mittlere THG-Emissionen	30,77	36,63	47,67	54,02	59,88	49,98
RCP8.5 sehr hohe THG-Emissionen	32,64	50,57	73,45	85,51	94,43	105,17

Tab. 2-3: Weltweite anthropogene CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossilen Brennstoffen und anderen industriellen Quellen [Gt CO<sub>2</sub>] in den Jahren 2010, 2030, 2050, 2060, 2070 und 2100 (ohne AFOLU); eigene Darstellung und Berechnungen nach [10]

Szenario (inkl. AFOLU)	2010	2030	2050	2060	2070	2100
RCP6.0	34,18	35,09	45,91	53,03	59,74	50,68
RCP8.5	36,60	53,28	75,58	87,39	95,97	105,50

Tab. 2-4: Weltweite anthropogene CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossilen Brennstoffen und anderen industriellen Quellen [Gt CO<sub>2</sub>] in den Jahren 2010, 2030, 2050, 2060, 2070 und 2100 (inkl. AFOLU); Quelle: eigene Darstellung und Berechnung nach [10]

## Landwirtschaft, Forstwirtschaft und andere Landnutzung (Agriculture, forestry and other land use, AFOLU)

AFOLU ist für die Ernährungssicherheit und nachhaltige Entwicklung von großer Bedeutung. Im AFOLU-Sektor setzen sich die bestimmenden Minderoptionen aus einer Strategie oder mehreren Strategien zusammen:

- Vermeidung von Emissionen in die Atmosphäre, indem bestehende Kohlenstoffspeicher in Böden oder der Vegetation erhalten bzw. Emissionen von Methan und Lachgas verringert werden
- Entzug von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre, indem Kohlendioxid aus der Atmosphäre entzogen und in bestehenden Kohlenstoffspeichern eingelagert wird (Sequestrierung)
- Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Substitution fossiler Brennstoffe oder von Produkten mit hohem Energieaufwand mittels biologischer Produkte

Ebenfalls von Bedeutung können Maßnahmen auf der Nachfrageseite, wie z. B. eine Reduktion von Abfällen und Verlusten von Nahrungsmitteln oder eine Veränderung des Ernährungsverhaltens, sein [13].

Die Teilmenge an Treibhausgasemissionen und -entnahmen des AFOLU-Sektors, welche unmittelbar aus der vom Menschen erzeugten Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) ohne landwirtschaftliche Emissionen re-

sultieren, werden mit dem Begriff FOLU (Forstwirtschaft und andere Landnutzung) beschrieben [13].

## 2.3.2 Aussagen im Emission Gap Report 2019

### Treibhausgasemissionen [Gt CO<sub>2</sub> Äq]

Laut dem Emission Gap Report des Jahres 2019 werden die gesamten globalen Treibhausgasemissionen im Jahr 2030 64 Gt CO<sub>2</sub> Äq (in einem 10. bis 90. Perzentilbereich von 60 Gt CO<sub>2</sub> Äq bis 68 Gt CO<sub>2</sub> Äq) betragen, wenn mit einem 2005-policies (no policy)-Basisszenario, also ohne die Einrichtung weiterer Klimaschutzmaßnahmen, gerechnet wird.

In einem Current Policy-Szenario, in welchem die derzeitigen getroffenen Vereinbarungen weitergeführt werden, werden die Treibhausgasemissionen im Jahr 2030 voraussichtlich 60 Gt CO<sub>2</sub> Äq (in einem 10. bis 90. Perzentilbereich von 58 Gt CO<sub>2</sub> Äq bis 64 Gt CO<sub>2</sub> Äq) betragen (vgl. Tabelle 2-5 und Tabelle 2-6).

Szenario	2030
2005-policies (no-policy)	64 (60 – 68)
Current policy	60 (58 – 64)

Tab. 2-5: Gesamte globale Treibhausgasemissionen im Jahr 2030 im 2005-policies(no-policy)-Basisszenario und Current Policy-Szenario (Median und 10. bis 90. Perzentilbereich) in Gt CO<sub>2</sub> Äq [8]

Scenario (rounded to the nearest gigaton)	Number of scenarios in set	Global total emissions in 2030 [GtCO <sub>2</sub> e]	Estimated temperature outcomes			Closest corresponding IPCC SR1.5 scenario class	Emissions Gap in 2030 [GtCO <sub>2</sub> e]		
			50% probability	66% probability	90% probability		Below 2.0°C	Below 1.8°C	Below 1.5°C in 2100
2005-policies	6	64 (60–68)							
Current policy	8	60 (58–64)				18 (17–23)	24 (23–29)	35 (34–39)	
Unconditional NDCs	11	56 (54–60)				15 (12–18)	21 (18–24)	32 (29–35)	
Conditional NDCs	12	54 (51–56)				12 (9–14)	18 (15–21)	29 (26–31)	
Below 2.0°C (66% probability)	29	41 (39–46)	Peak: 1.7-1.8°C In 2100: 1.6-1.7°C	<b>Peak: 1.9-2.0°C</b> <b>In 2100: 1.8-1.9°C</b>	Peak: 2.4-2.6°C In 2100: 2.3-2.5°C	Higher-2.0°C pathways			

Tab. 2-6: Globale Treibhausgasemissionen im Jahr 2030 für verschiedene Szenarien (Median und 10. bis 90. Perzentilbereich), Temperatureffekte und der resultierenden Emissionslücke [8]

Scenario (rounded to the nearest gigaton)	Number of scenarios in set	Global total emissions in 2030 [GtCO <sub>2</sub> e]	Estimated temperature outcomes			Closest corresponding IPCC SR1.5 scenario class	Emissions Gap in 2030 [GtCO <sub>2</sub> e]		
			50% probability	66% probability	90% probability		Below 2.0°C	Below 1.8°C	Below 1.5°C in 2100
Below 1.8°C (66% probability)	43	35 (31–41)	Peak: 1.6-1.7°C In 2100: 1.3-1.6°C	<b>Peak: 1.7-1.8°C</b> <b>In 2100: 1.5-1.7°C</b>	Peak: 2.1-2.3°C In 2100: 1.9-2.2°C	Lower-2.0°C pathways			
Below 1.5°C in 2100 and peak below 1.7°C (both with 66% probability)	13	25 (22–31)	Peak: 1.5-1.6°C In 2100: 1.2-1.3°C	<b>Peak: 1.6-1.7°C</b> <b>In 2100: 1.4-1.5°C</b>	Peak: 2.0-2.1°C In 2100: 1.8-1.9°C	1.5°C with no or limited overshoot			

Tab. 2-6: Fortsetzung

## 2.4 Übersicht der gesamten Treibhausgas- und Kohlendioxidemissionen

Tabelle 2-7 gibt eine Übersicht zu den gesamten Treibhausgas- und Kohlendioxidemissionen in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft aus den zuvor genannten Quellen [7, 10, 19, 21]. Die EDGAR-

Datenbank betrachtet die Emissionen auf den drei räumlichen Ebenen weltweit, der EU 28 und Deutschland. Die anderen beiden Berichte betrachten die Emissionen anhand der in Kapitel 2.2 und 2.3 vorgestellten Szenarien. Die Daten der CO<sub>2</sub> Äq der Jahre 2030, 2050, 2060, 2070 und 2100 des 5. Sachstandsberichts sind optisch aus Bild 2-3 abgelesen.

Treibhausgasemissionen [Mt CO <sub>2</sub> ]		Fossil CO <sub>2</sub> and GHG emissions of all world countries – 2019 report			5. Sachstandsbericht des zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) 2013		Emissions Gap Report 2019		
		Weltweit	EU 28	Deutschland	RCP6.0	RCP8.5	2005-policies (no-policy)	Current policy	
Vergangenheit	1970	CO <sub>2</sub>	15.775,86	4.198,20	1.082,02	/	/	/	/
		CO <sub>2</sub> Äq	24.305,46	5.507,03	1.325,52	/	/	/	/
	1971	CO <sub>2</sub>	15.705,23	4.196,39	1.076,49	/	/	/	/
		CO <sub>2</sub> Äq	24.532,22	5.537,72	1.323,49	/	/	/	/
	2000	CO <sub>2</sub>	25.600,66	4.121,66	871,08	/	/	/	/
		CO <sub>2</sub> Äq	35.962,45	5.297,27	1.043,90	/	/	/	/
2010	CO <sub>2</sub>	33.836,35	3.922,47	816,40	/	/	34.176,44	36.896,66	
	CO <sub>2</sub> Äq	45.934,04	4.956,27	974,81	/	/	/	/	
Gegenwart	2015	CO <sub>2</sub>	36.311,98	3.492,04	786,44	/	/	/	/
		CO <sub>2</sub> Äq	49.113,03	4.499,85	928,69	/	/	/	/
	2016	CO <sub>2</sub>	36.753,96	3.480,15	790,21	/	/	/	/
		CO <sub>2</sub> Äq	/	/	/	/	/	/	/
	2017	CO <sub>2</sub>	37.179,65	3.524,98	787,95	/	/	/	/
		CO <sub>2</sub> Äq	/	/	/	/	/	/	/
	2018	CO <sub>2</sub>	37.887,22	3.457,29	752,65	/	/	/	/
		CO <sub>2</sub> Äq	/	/	/	/	/	/	/

Tab. 2-7: Treibhausgasemissionen [Mt CO<sub>2</sub> Äq] und Kohlendioxidemissionen [Mt CO<sub>2</sub>] in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft in Berichten und Szenarien (Stand: 11.12.2019) [7, 10, 19, 21]

Treibhausgas-emissionen [Mt CO <sub>2</sub> ]		Fossil CO <sub>2</sub> and GHG emissions of all world countries – 2019 report			5. Sachstandsbericht des zwischenstaatlichen Ausschusses für Klima- änderungen (IPCC) 2013		Emissions Gap Report 2019		
		Weltweit	EU 28	Deutsch- land	RCP6.0	RCP8.5	2005-policies (no-policy)	Current policy	
Zukunft	2030	CO <sub>2</sub>	/	/	/	35.093,19	53.281,51	/	/
		CO <sub>2</sub> Äq	/	/	/	~ 59.000,00	~ 63.000,00	64.000,00 (60.000,00 bis 68.000,00)	60.000,00 (58.000,00 bis 64.000,00)
	2050	CO <sub>2</sub>	/	/	/	45.910,84	75.576,87	/	/
		CO <sub>2</sub> Äq	/	/	/	~ 69.000,00	~ 89.000,00	/	/
	2060	CO <sub>2</sub>	/	/	/	53.024,82	87.384,61	/	/
		CO <sub>2</sub> Äq	/	/	/	~ 69.000,00	~ 92.000,00	/	/
Ferne Zukunft	2070	O <sub>2</sub>	/	/	/	59.735,43	95.965,39	/	/
		CO <sub>2</sub> Äq	/	/	/	~ 69.000,00	~ 99.000,00	/	/
	2100	CO <sub>2</sub>	/	/	/	50.677,94	105.499,59	/	/
		CO <sub>2</sub> Äq	/	/	/	~ 65.000,00	~ 105.000,00	/	/

Tab. 2-7: Fortsetzung

### 3 Klimamodellierung und Asphalteigenschaften

#### 3.1 Klimamodellierung

Zukünftige Klimaänderungen einer Region können durch Szenarien abgeschätzt werden. Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) entwickelt Klimaszenarien bzw. wählt repräsentative Szenarien aus und veröffentlicht diese. Die Szenarien des „Special Report on Emissions Scenarios“ (SRES-Szenarien) wurden im Jahr 2000 entwickelt und beschreiben den Einfluss von sozio-ökonomischen und technologischen Entwicklungen auf das Ausmaß des Klimawandels [22]. Den aktuellen Stand der Wissenschaft geben die für den fünften Sachstandsbericht (AR5) des IPCC veröffentlichten RCP-Szenarien wieder, welche neue Erkenntnisse für die Entwicklung der Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen in der Atmosphäre liefern [16].

##### 3.1.1 Globalmodelle

Globalmodelle GCM (engl. Global Climate Model, oder auch General Circulation Model) dienen der Abbildung des globalen Klimasystems. Mit diesen können Abschätzungen über das zukünftige Klima der Erde getroffen werden. Der Detaillierungsgrad von Globalmodellen ist abhängig vom Aufbau und

den getroffenen Grundannahmen, welche wiederum in Abhängigkeit vom Entwicklungszeitpunkt und der verfolgten Zielstellung sind. Die räumliche Auflösung von globalen Klimamodellen ist häufig sehr grob (> 100 x 100 km). Einfache und oft historische Globalmodelle beinhalten im Allgemeinen nur Prozesse in der Atmosphäre, physikalische Vorgänge der Ozeane und Landflächen gehen als feststehende Parameter in die Berechnungen mit ein [23].

Die neueste Generation der Globalmodelle ESM (engl. Earth System Model), wie etwa das am Hamburger Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) entwickelte MPI-ESM, sind sehr komplex und berücksichtigen die physikalischen und chemischen Vorgänge von Atmosphären, Ozeanen, Polkappen, Landoberflächen, Biosphären und menschlichen Einflüssen bei ihren Berechnungen. Sie liefern Ergebnisse in Form von gängigen Klimagrößen wie Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchte und Sonneneinstrahlung. Des Weiteren bilden ihre Ergebnisse die Randbedingungen für regionale Klimamodelle [23, 24].

Ein weiteres am MPI-M entwickeltes Globalmodell ist das ECHAM (Akronym aus ECMWF und Hamburg). Es basiert auf einem Modell des European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) und liegt aktuell in der fünften Version (ECHAM5) vor [25].

Die Berechnung des Erdklimas mit Globalmodellen erfolgt häufig mehrfach mit nahezu identischen Eingangsparametern, um die Unterschiede, welche durch die mathematische Vorgehensweise und die rechentechnische Verarbeitung hervorgerufen werden, zu berücksichtigen. Diese Berechnungen werden Läufe oder Realisationen (engl. runs) genannt. Als rechentechnische Realisationen oder Läufe werden aber auch Berechnungen mit unterschiedlichen Eingangsparametern, wie z. B. unterschiedliche Emissionsszenarien, bezeichnet [23].

### 3.1.2 Regionale Klimamodelle

Mithilfe der regionalen Klimamodelle werden die grobmaschigen Ergebnisse der globalen Klimamodelle in einen kleinräumigeren Maßstab überführt bzw. eingenestet. Hiermit können dann Aussagen für einzelne Regionen getroffen werden. In regionalen Klimamodellen können die Daten hochaufgelöst auf Rasterweiten von bis zu 7 x 7 km oder auf das Messnetz der Klimastationen heruntergerechnet werden. Dabei können in Abhängigkeit des angewendeten regionalen Klimamodells lokale Besonderheiten wie Geländehöhen, Stauwirkungen an Erhebungen, Zugbahnen von Wetterlagen oder deren regional differenzierte Auswirkungen berücksichtigt werden. Regionale Klimamodelle lassen sich anhand unterschiedlicher Herangehensweisen nach statistischen und dynamischen Klimamodellen unterscheiden [23].

Beispiele für regionale Klimamodelle sind u. a. das COSMO-CLM (Consortium for Small Scale Modeling model in Climate Mode) [26], auch CCLM genannt und das REMO (Regional Modell) [27], welches ursprünglich am MPI-M entwickelt wurde.

Aus der Kombination von Treibhausgas-Szenarien, Globalmodellen und regionalen Klimamodellen lassen sich mögliche klimatische Veränderungen abschätzen und quantifizieren. Über den Forschungsstand zum möglichen Klimawandel informiert die Helmholtz Gemeinschaft im Regionalen Klimaatlas Deutschland. Klimarechnungen verschiedener Forschergruppen, basierend auf Annahmen von Treibhausgas-Szenarien (RCP, SRES), Globalmodellen (u. a. ECHAM5, MPI-ESM) und Regionalmodellen (u. a. CCLM, REMO), werden hier gesammelt und abgebildet. Klimarechnungen können für verschiedene Klimaelemente (u. a. Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchte) sowie Regionen dargestellt und verglichen werden. Dies kann z. B. die Zunahme

von tropischen Nächten ( $T_{min} > 20 \text{ °C}$ ) sein. Das Regionalmodell REMO UBA vom MPI-M bildet Deutschland, Österreich und die Schweiz in einer Auflösung von 10 x 10 km ab.

## 3.2 Mögliche zukünftige Klimaänderungen in Deutschland

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) kommt im Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit“ zu dem Ergebnis, dass die Häufigkeiten von sehr hohen Tageshöchsttemperaturen, hohen täglichen Niederschlagsmengen und Spitzenwindgeschwindigkeiten ansteigen [28].

Ähnliche Informationen lassen sich auch im Regionalen Klimaatlas der Helmholtz Gesellschaft abrufen. Als Basis für die Berechnung der Durchschnittstemperaturen des Klimas in Deutschland dient die CLINO-Periode (Normalperiode). Die derzeit gültige Normalperiode umfasst den Zeitraum von 1961 bis 1990. Im Vergleich zur Normalperiode (1961 bis 1990) ergeben sich im Jahresmittel bis Mitte des 21. Jahrhunderts (2041 bis 2070) die in Tabelle 3-1 dargestellten möglichen mittleren Änderungen bzw. Häufigkeiten des Auftretens.

	Mögliche größte Zunahme	Mögliche kleinste Zunahme
Durchschnittliche Temperatur	+ 3,3 °C	+1,0 °C
Sommertage ( $T_{max} \geq 25 \text{ °C}$ )	+ 42 Tage	+ 2 Tage
Heiße Tage ( $T_{max} \geq 30 \text{ °C}$ )	+ 28 Tage	± 0 Tage
Tropische Nächte ( $T_{min} \geq 20 \text{ °C}$ )	+ 27 Tage	± 0 Tage
Frosttage ( $T_{min} < 0 \text{ °C}$ )	- 50 Tage	- 15 Tage
Eistage ( $T_{max} < 0 \text{ °C}$ )	- 31 Tage	- 5 Tage
Letzter Frost im Frühjahr	- 26 Tage	- 7 Tage

Tab. 3-1: Mögliche mittlere Änderungen bzw. Häufigkeiten des Auftretens im Jahresmittel bis Mitte des 21. Jh. (2041 bis 2070) im Vergleich zu heute (1961 bis 1990) [29]

### 3.2.1 Auswirkungen auf den Asphaltoberbau

Das deutsche Straßennetz besteht zu einem hohen Prozentsatz aus Straßen mit gebundenem Oberbau aus Asphalt. Die Auswirkungen des projizierten Klimawandels mit extremen Wetterereignissen (Hitzeperioden, Tropennächte) münden unter sonst gleichen Rahmenbedingungen in höheren Beanspruchungen der Asphaltsschichten infolge der temperaturbedingten Steifigkeitsabnahme.

Dies hat bei höheren durchschnittlichen Asphalttemperaturen verminderte Tragfähigkeiten der Gesamtkonstruktionen sowie erhöhte Beanspruchungen der Konstruktionen unterhalb der Asphaltsschichten zur Folge. Außerdem entstehen höhere Dehnungen an der Unterseite der Asphalttragschichten mit der Folge einer schnelleren Ermüdung bzw. kürzeren Nutzungsdauer.

Darüber hinaus ist mit einer Zunahme der bleibenden Verformungen (Spurrinnen) und resultierend daraus, mit einer kürzeren Folge bzw. höheren Anzahl von Erhaltungszyklen zu rechnen. Bei einer Vergrößerung der Temperaturspannweite im Asphalt während der Nutzung kann auch die Gefahr von Kälterisbildungen ansteigen.

## 3.3 Materialeigenschaften von Asphalt

Maßgebend für die Temperatur im gebundenen Oberbau aus Asphalt sind das Rückstrahlvermögen (Albedo) der Asphaltoberfläche sowie die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität der einzelnen Schichten.

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [W/(m\*K)] ist eine temperaturabhängige Materialkonstante, welche den Abfluss von Wärmeenergie in Richtung eines Temperaturgefälles beschreibt. Eine hohe Wärmeleitfähigkeit führt zu einem großen Abfluss von Wärmeenergie. Bei mit bitumenhaltigen Bindemitteln gebundenen Baustoffen liegt diese zwischen 1,09 W/(m\*K) (Gussasphalt) und 2,43 W/(m\*K) (Asphalttragschicht aus Kies) [30]. Der Wärmestrom im Asphaltoberbau, also der Wärmeverlust bzw. -gewinn durch Wärmeleitung an der Fahrbahnoberfläche, lässt sich durch die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Asphaltsschichten beeinflussen.

Die Wärmekapazität  $c$  [MJ/(kg\*K)] gibt Auskunft über die zuzuführende Wärmeenergie, um die Temperatur eines Stoffes zu verändern. Je höher die

Wärmekapazität ist, desto besser eignet sich ein Stoff als Wärmespeicher. Die spezifische Wärmekapazität von Gussasphalt liegt bei 0,88 MJ/(kg\*K) und von einer Asphalttragschicht aus Kies bei 1,35 MJ/(kg\*K) [30].

Das Rückstrahlvermögen kann durch eine Aufhellung der Fahrbahnoberfläche positiv beeinflusst werden. Dies kann durch die Verwendung heller Gesteinskörnungen, von Abstreusplitten mit sehr heller Grundfarbe, heller Brechsande und/oder künstlicher Farbpigmente geschehen. Versuche von MÜLLER, PIRSKAWETZ und WEISE haben gezeigt, dass sich aufgehellte Fahrbahndecken im Sommer um bis zu 15 K weniger aufheizen [31].

Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt auch CHAKAR [32] bei der Untersuchung des thermischen Verhaltens von Splittmastixasphalten. Durch Aufhellung und Verwendung von Elektroofenschlacke (EOS) heizten sich die Oberflächen im Vergleich zu herkömmlichen Splittmastixasphalten weniger auf. Es zeigt sich jedoch auch, dass dies im Winter zu negativen Auswirkungen durch eine langsamere Erwärmung der Straßenoberfläche und zu der damit verbundenen Gefahr von Glättebildung führen kann.

Die Albedo wird durch die Farbe bzw. Helligkeit des Asphaltess beeinflusst. Insbesondere Gussasphalt verfügt hier, durch die Verwendung unterschiedlicher Abstreusplitte, über ein großes Optimierungspotenzial. Aufgehellte Fahrbahnoberflächen müssen jedoch sauber gehalten werden, da durch Verfärbung, Verwitterung und Schmutzablagerungen die Albedo abnehmen kann [33]. Vorteile sind nachts zu erwarten, da die helle Fahrbahnoberfläche die Erkennbarkeit verbessert und innerstädtisch für Straßenbeleuchtungen Leuchtmittel mit geringerer Leuchtdichte benötigt werden, die einen geringeren Energiebedarf haben.

Zur Verbesserung der reflektierenden Eigenschaften von Asphalt sind bei einem Pilotprojekt in einem Wohnviertel in Los Angeles Straßen mit einem reflektierenden weißen Belag überzogen worden. Eine Abkühlung der Belagstemperatur um 5,5 K war dadurch möglich. Geeignet ist der Überzug für Radwege, Parkplätze und Gebiete mit Tempolimit (bis maximal 48 km/h). Die Haltbarkeit des Materials im Winter wird noch untersucht [34].

In Deutschland werden vielerorts helle Fahrbahnbeläge auf kommunalen Straßen eingebaut. Die Aufhellung wird durch helles Gestein in der Asphalt-

deckschicht, vornehmlich Henauer Quarzit, realisiert. Die Asphalttemperatur kann dadurch um bis zu 8 K abgesenkt werden. Die helle Deckschicht tritt einige Monate nach der Herstellung zum Vorschein, wenn der schwarze Bindemittelfilm an der Oberfläche durch Witterung und Abfahren abgetragen wurde [35].

In einem Tunnel in Luxemburg wurde eine helle 3 cm dicke Splittmastixasphaltdeckschicht eingebaut. Für die Aufhellung sorgten Henauer Quarzit, Titanoxid als Pigment und ein farbloses Bindemittel auf Harzbasis. Die Aufhellung sorgt für eine verbesserte Verkehrssicherheit und spart Energie bei der Beleuchtung ein. Das farblose Bindemittel wurde eingesetzt, damit die aufhellende Wirkung direkt nach dem Einbau zur Geltung kommt [36].

Bei zwei Bauprojekten auf den Autobahnen 48 und 61 wurde Henauer Quarzit als Abstreumaterial für eine Asphaltdeckschicht aus Gussasphalt MA 5 S verwendet. Hierdurch kann eine um bis zu 10 K geringere Oberflächentemperatur im Vergleich zu dunklen Asphaltdeckschichten erzielt werden. Die Ummantelung des Abstreumaterials mit schwarzem Bitumen sorgte auch hier für eine verzögerte Wirkung der Aufhellung, welche aber zur besseren Haftung auf dem Gussasphalt notwendig ist [37].

Für Asphaltkonstruktionen mit konventionellen Gesteinskörnungen und mit EOS zeigen sich Unterschiede in den Temperaturgradienten der Deckschicht. Der Aufbau mit EOS zeigt im Vergleich zum konventionellen Aufbau ein zeitlich verzögertes Erwärmen und Abkühlen der einzelnen Schichten auf. So erwärmt sich der konventionelle Aufbau im Verlauf des Tages deutlich stärker, kühlt während der Abend- und Nachtstunden schneller ab und weist nachts eine niedrigere Temperatur als der Aufbau mit EOS auf [38].

Die Temperaturleitfähigkeit gibt die Geschwindigkeit an, mit der sich eine Temperaturveränderung durch einen Stoff ausbreitet. Labortechnische Ermittlungen von Wärmekennwerten der Universität Duisburg Essen zeigen, dass die Temperaturleitfähigkeit von Probekörpern aus Asphalt mit Stahlwerksschlacke zwischen 19 % und 57 % geringer sind als die der Asphaltprobekörper mit natürlichen Gesteinskörnungen (Basalt, Diabas, Grauwacke) [39].

## 4 Ableitung zukünftiger Klimarandbedingungen

Zur Ableitung zukünftiger Klimarandbedingungen und deren Auswirkungen auf die Temperaturentwicklung in einem Straßenoberbau in Asphaltbauweise sind verschiedene Klimaelemente und klimatologische Ereignisse zu analysieren. Hierzu wurden die verschiedenen Klimaelemente hinsichtlich ihres Potenzials eines extremen Erwärmens des Asphaltaufbaus beurteilt und ausgewertet. Neben den einfachen Klimaelementen, die ausschließlich die Häufigkeit des Auftretens in Tagen bzw. Nächten in einem bestimmten Zeitraum darstellen, wurden in der Analyse auch periodische Klimaelemente berücksichtigt, die eine konsekutive Anzahl von Tagen bzw. Nächten angeben. Speziell für dieses Forschungsvorhaben wurden unterschiedliche Klimaelemente kombiniert, die nach ersten Einschätzungen zu einer maximalen Erwärmung eines Asphaltpaketes führen.

Die einfachen Klimaelemente und die periodischen Klimaelemente sowie die daraus gebildeten Klimaelementkombinationen wurden im Rahmen einer Datenanfrage zusammengefasst und an den DWD übermittelt. Auf Grundlage der Datenanfrage wurde vom DWD ein Katalog von Klimaindizes erstellt, für verschiedene RCP-Szenarien Klimasimulation durchgeführt und die Ergebnisse in Karten dargestellt [40].

### 4.1 Auswahl von Klimaelementen und Berechnung von Klimaindizes

Zur Analyse der Klimaelemente stellte sich zunächst die Frage, welche Klimaelemente zu maximalen Asphalttemperaturen führen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es grundsätzlich eine Aufheizphase während der Tagesstunden und eine Auskühlphase während der Nachtstunden gibt.

Bei der Betrachtung einzelner einfacher Klimaelemente hat ein heißer Tag das größte Potenzial zur Erwärmung eines Asphaltpaketes. An heißen Tagen wird eine Tageshöchsttemperatur ( $T_{max}$ ) von über 30 °C erreicht. Weitere Klimaelemente die sich auf die Tageshöchsttemperatur beziehen sind der Sommertag ( $T_{max} \geq 25$  °C) und die warmen Tage an dem die Tageshöchsttemperatur größer als das 90. Perzentil der Tageshöchsttemperaturen ist. Hierbei ist grundsätzlich davon auszugehen, dass die Glo-

balstrahlung ein Maximum erreicht (z. B. keine bis geringe Bewölkung) und keine abkühlenden Klimaelemente (z. B. starker Wind oder Niederschlag) gleichzeitig auftreten und dadurch eine kontinuierliche Erwärmung des Asphaltpaketes stattfindet.

Die Nachtstunden bieten grundsätzlich die Möglichkeit zur Abkühlung des Asphaltpaketes, da die Globalstrahlung hier ihr Minimum erreicht. Allerdings ist die Intensität der Auskühlung abhängig von den Lufttemperaturen in den Nachtstunden, hier wird im Allgemeinen die Tagestiefsttemperatur ( $T_{min}$ ) gemessen. Nächte in denen die Temperatur nicht unter  $20\text{ °C}$  fällt werden als tropische Nächte bezeichnet. In warmen Nächten fällt die Temperatur ( $T_{min}$ ) nicht unter das 90. Perzentil der Tagestiefsttemperatur.

Grundsätzlich kann angenommen werden, dass das konsekutive Auftreten von Klimaelementen, die die Tageshöchsttemperatur betreffen, zu einer verstärkten Erwärmung des Asphaltpaketes führen. Daher wurden bei der Analyse das konsekutive Auftreten von heißen und warmen Tagen mit den Klimaelementen Hitzeperiode (Anzahl der Tage mit  $T_{max} \geq 30\text{ °C}$ ) und Wärmeperiode (Anzahl der Tage mit  $T_{max} > 90.$  Perzentil) berücksichtigt. Hierbei erhält man allerdings keine Aussage über Intensität der Auskühlung während der Nachtstunden.

Das ungünstigste Klimaereignis und der damit ungünstigste anzunehmende Fall für die Dimensionie-

rung von Straßen in Asphaltbauweise ist die direkte Aufeinanderfolge von hohen Lufttemperaturen im Tagesverlauf und hohen Lufttemperaturen während der Nacht. Das konsekutive Auftreten von mehreren heißen Tagen und tropischen Nächten dazwischen führt zu hohen Asphalttemperaturen während der Aufheizphase und einem langsamen und damit verringerten Temperaturrückgang während der Abkühlphase. Dieser ungünstigste Fall wurde in der Analyse mit der Kombination 1 (Hitzeperiode mit tropischen Nächten) berücksichtigt. Wie auch bei den anderen periodischen Klimaelementen wurde hierbei die Anzahl konsekutiver Tage als Ergebnis berechnet.

Zusätzlich zu dem ungünstigsten Fall (Kombination 1) wurden zwei weitere Kombinationen berechnet, die in ihrer Intensität der Erwärmung der Kombination 1 untergeordnet sind. Die Kombination 2 berücksichtigt eine Hitzeperiode mit warmen Nächten und die Kombination 3 eine Wärmeperiode mit warmen Nächten.

Unter Berücksichtigung der erläuterten Klimaelemente wurden vom Deutschen Wetterdienst Klimasimulationen durchgeführt und ein Katalog von Klimaindizes erstellt (vgl. Tabelle 4-1), der auf hochauflösenden Daten eines Ensembles regionaler Klimamodelle für Deutschland und den angrenzenden Flusseinzugsgebieten beruht. Dieses Ensemble wurde bereits im Themenfeld 1 „Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereig-

Kurzbez.	Klimaindex	Temperatur	Einheit
TagH	heiße Tage	$T_{max} \geq 30\text{ °C}$	Tage
TagS	Sommertage	$T_{max} \geq 25\text{ °C}$	Tage
TagW	warme Tage	$T_{max} > 90.$ Perzentil	Tage
TagF	Frosttage	$T_{min} < 0\text{ °C}$	Tage
TagE	Eistage	$T_{max} < 0\text{ °C}$	Tage
TagK	Kalte Tage	$TAS < 10.$ Perzentil	Tage
TagFW	Frostwechselftage	$T_{max} \geq 0\text{ °C}$ & $T_{min} < 0\text{ °C}$	Tage
NachtT	Tropennächte	$T_{min} \geq 20\text{ °C}$	Tage
NachtW	warme Nächte	$T_{min} > 90.$ Perzentil	Tage
NachtK	kalte Nächte	$T_{min} > 90.$ Perzentil	Tage
PeriH	Hitzeperiode	$T_{max} \geq 30\text{ °C}$	konsekutive Tage
PeriW	Wärmeperiode	$T_{max} > 90\%$ Perzentil	konsekutive Tage
Kombi1	PeriH + NachtT	$T_{max} \geq 30\text{ °C}$ + $T_{min} \geq 20\text{ °C}$	konsekutive Tage
Kombi2	PeriH + NachtW	$T_{max} \geq 30\text{ °C}$ + $T_{min} > 90\%$ Perzentil	konsekutive Tage
Kombi3	PeriW + NachtW	$T_{max} > 90\%$ Perzentil + $T_{min} > 90\%$ Perzentil	konsekutive Tage

Tab. 4-1: Zur Analyse der zukünftigen Klimarandbedingungen verwendeter Katalog der Klimaindizes nach [40]

nisse anpassen“ des BMVI-Expertennetzwerkes Wissen-Können-Handeln verwendet.

Die Ergebnisse der Klimasimulationen basieren auf globalen und regionalen Erdsystemmodellen, die bereits im fünften Sachstandsbericht des Weltklimarates [10] bzw. im Rahmen der europäischen Initiative EURO-CORDEX (Coordinated Downscaling Experiment for Europe) [41] und im Projekt Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland (ReKliEs-De) [42] verwendet wurden. Grundlage der hier verwendeten Klimaszenarien sind einheitliche regionale Klimamodellstandards. Dieses Ensemble beruht auf verschiedenen antreibenden globalen Modellen (GCM) mit drei unterschiedlichen Emissionsszenarien (RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5; vgl. Kapitel 2.2.1) und mehreren Regionalmodellen (RCM). Die Zusammenstellung der Kombinationen aus GCM und RCM sind in Tabelle 4-2 dargestellt.

Da zum Zeitpunkt der Berechnung noch keine BIAS-korrigierten Daten zur Verfügung standen, wurde vom DWD ein vereinfachtes BIAS-Korrekturverfahren angewandt. Hierfür wurden zunächst die Klimaindizes für die Klimasimulationen Historisch

(1971 bis 2000) sowie RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 (2031 bis 2060 und 2071 bis 2000) berechnet. Anschließend wurden die Klimaindizes für die Beobachtungsdaten (1971 bis 2000) berechnet. Der korrigierte Klimaindex ergibt sich dann aus der Differenz der Indexwerte RCP und Historisch zu der der Klimaindex der Beobachtungsdaten addiert wird [40].

Die Klimaindizes sind monatsweise für drei verschiedene Zeitscheiben berechnet worden. Dabei wurden die Beobachtungen der Vergangenheit zwischen 1971 und 2000 in der ersten Zeitscheibe berücksichtigt. Die zweite und dritte Zeitscheibe zeigen die nahe Zukunft (2031 – 2060) und die ferne Zukunft (2071 – 2100). Die Zeitscheiben wurden entsprechend der Vorgaben im Themenfeld 1 (SP-101 Szenarienbildung) in Absprache mit dem Auftraggeber ausgewählt.

Für jede Kombination aus Klimaindex, Emissionsszenario und Zeitscheibe wurden die Daten des 15., 50. und 85. Perzentils berechnet.

		RCM								
RCP	GCM	CCLM [26]	REMO [27]	WRF [43]	RCA [44]	RACMO [45]	HIRHAM [46]	ALADIN [47]	BTU-CCLM [48]	ALARO [49]
2.6	MPI-ESM_LRL [24]	X	X	X	X				X	
	EC-EARTH [50]	X			X	X	X			
	CNRM-CM5 [51]							X		X
	HadGEM2-ES [52]				X	X				
4.5	MPI-ESM_LRL [24]	X	X		X					
	EC-EARTH [50]	X			X	X	X			
	CNRM-CM5 [51]	X			X			X		
	HadGEM2-ES [52]	X			X	X				
	IPSL-CM5A [53]			X	X					
	NorESM [54]							X		
8.5	MPI-ESM_LRL [24]	X	X	X	X					
	EC-EARTH [50]	X	X	X	X	X		X		
	HadGEM2-ES [52]	X	X		X			X		
	CNRM-CM5 [51]	X	X	X	X	X	X			
	IPSL-CM5A [53]			X	X					
	MIROC5 [55]	X	X							
	CanESM2 [56]	X	X							
	NorESM [54]							X		

Tab. 4-2: Übersicht über die Global- und Regionalmodellpaare pro verwendetem RCP-Szenario nach [40]

## 4.2 Vorbereitungen und Vorgehensweise bei der Analyse

Die vom Deutschen Wetterdienst berechneten Daten der Klimaindizes wurden im \*tiff-Dateiformat als Karten zur Analyse übergeben. Die Kartendarstellungen umfassten das sogenannte HYRAS-Gebiet (ohne Tschechien), welches bereits im KLIWAS-Projekt [57] Verwendung fand (vgl. Bild 4-1). Da für dieses Forschungsprojekt ausschließlich Daten verwendet werden sollten, die das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland (BRD-Gebiet) betreffen, mussten die gesamten DWD-Daten bearbeitet und auf das BRD-Gebiet zugeschnitten werden (vgl. Bild 4-2).

Nach dem Zuschritt der Karten auf das BRD-Gebiet wurden die Kartendaten analysiert und bewertet. Die Karten stellen grundsätzlich eine gute qualitative Darstellung der klimatischen Entwicklung über die unterschiedlichen Zeitscheiben und innerhalb der Emissionsszenarien (RCP) dar. Zudem lassen sich aus den Kartendarstellungen regionale Temperaturveränderungen ablesen.

Zur quantitativen Auswertung wurden die Kartendaten als prozentualer Anteil am BRD-Gebiet dargestellt. Daraus lassen sich Details der klimatischen Veränderungen quantitativ als Säulen in einem Diagramm darstellen. Beispielhaft sind die klimatischen Veränderungen des Index warme Tage über

alle drei Zeitscheiben für das Emissionsszenario RCP4.5 dargestellt (vgl. Bild 4-2 bis Bild 4-4). Das Bild 4-5 zeigt die flächenhafte Darstellung der Kartenwerte.

Anhand der Kartendarstellung (Bild 4-2) ist sehr gut erkennbar, dass es im gesamten BRD-Gebiet in der Vergangenheit (Beobachtungen 1971 bis 2000) keine weiten Streuungen für den Index warme Tage gibt und die Anzahl der warmen Tagen zwischen 10 und 13 Tagen liegt. Bild 4-3 zeigt die nahe Zukunft (2031 – 2060), es ist erkennbar, dass die Streuung und die Anzahl der Tage leicht zugenommen haben. Es ist ebenfalls erkennbar, dass die Küstenregionen und Süddeutschland etwas stärker von den Veränderungen betroffen sind als der norddeutsche Raum im Landesinneren. Die ferne Zukunft (2071 – 2100) zeigt eine ähnlich enge Verteilung wie die Vergangenheit. Es ist allerdings erkennbar, dass die Küstenregionen am stärksten von den klimatischen Veränderungen betroffen sind.

Ohne dass die räumliche Verteilung der klimatischen Veränderungen hierbei ersichtlich wird, zeigen sich diese Verhältnisse auch in der Verteilung der Säulen des Diagramms (Bild 4-5). Durch die Verschiebung auf der Abszissenachse wird die Zunahme der warmen Tage deutlich. Gleichzeitig lassen sich die Streuung der Werte und der quantitative Anteil der Werte am BRD-Gebiet ablesen.

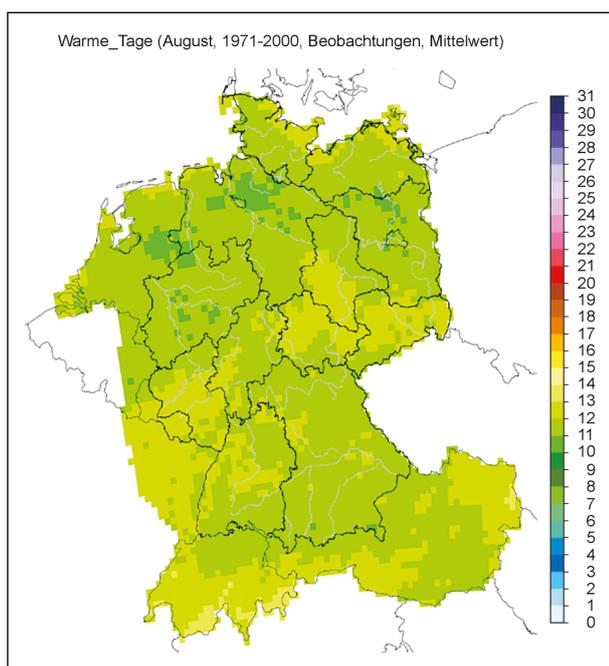


Bild 4-1: Original DWD-Daten (HYRAS-Gebiet) TagW – August – Beobachtung (1971 – 2000)

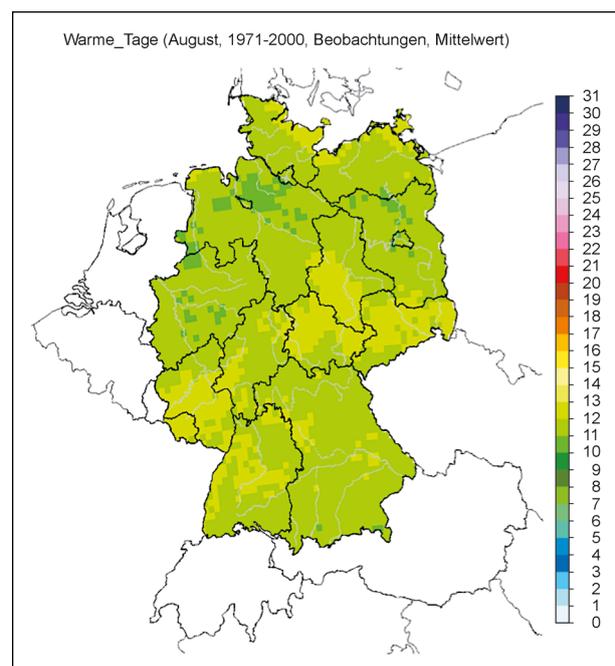


Bild 4-2: Zuschritt DWD-Daten (BRD-Gebiet) TagW – August – Beobachtung (1971 – 2000)

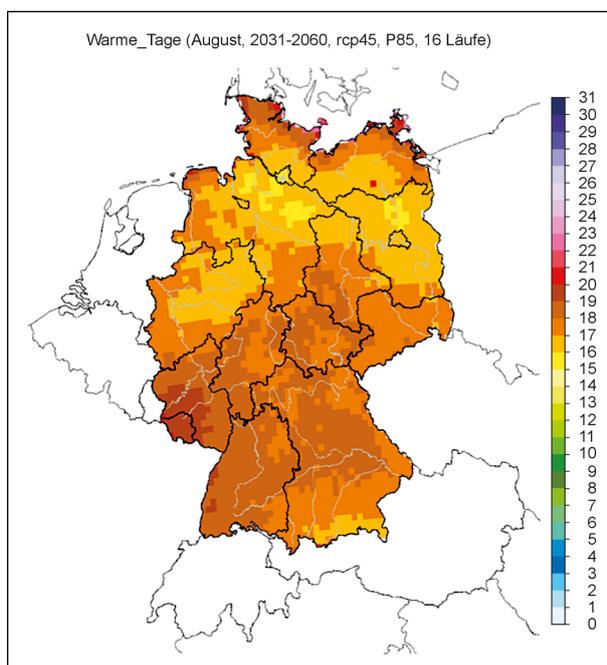


Bild 4-3: TagW- August – nahe Zukunft (2031 – 2060) – RCP4.5 – 85. Perzentil

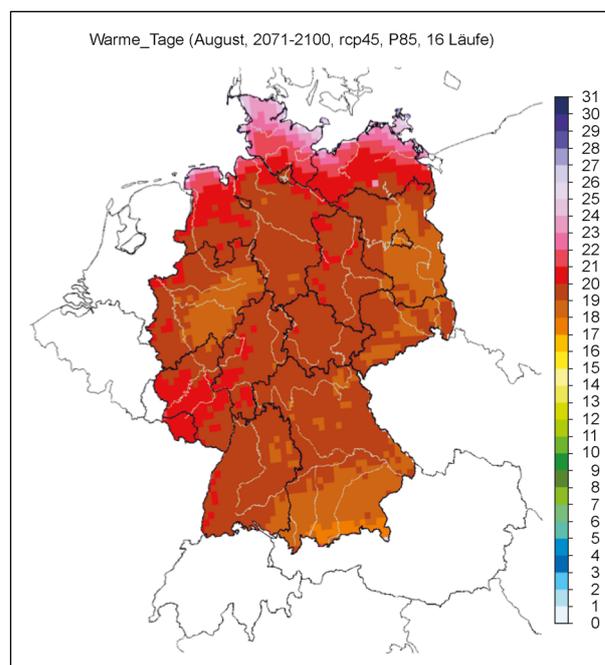


Bild 4-4: TagW- August – ferne Zukunft (2071 – 2100) – RCP4.5 – 85. Perzentil

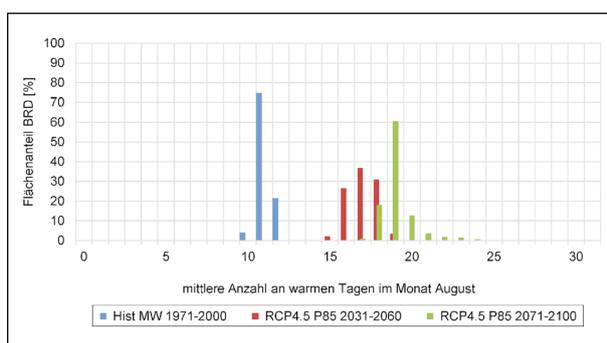


Bild 4-5: Klimatische Entwicklung der warmen Tage im Monat August über alle Zeitscheiben im RCP4.5

### 4.3 Analyse der Klimadaten

Wie bereits erläutert, wurde vom DWD eine umfangreiche Datenbasis über zwei zukünftige Zeitscheiben (nahe Zukunft und ferne Zukunft) und drei unterschiedliche Emissionsszenarien (RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5) zur Verfügung gestellt. Des Weiteren wurden die Ergebnisse jeweils mit dem 15. Perzentilwert, 50. Perzentilwert und dem 85. Perzentilwert angegeben.

Im Rahmen der Analyse wurde in einer ersten Datenbewertung festgestellt, welche Monate für die unterschiedlichen Klimaindizes auszuwerten oder auszuschließen sind. Dabei wurden Monate ausgeschlossen bei denen keine Veränderungen über beide zukünftige Zeitscheiben und alle drei Emissions-

szenarien festgestellt wurden (z. B. Januar beim Klimaindex Heiße Tage).

Zur Reduktion der Datenmenge mussten weitere zweckmäßige Annahmen getroffen werden. Diese Annahmen betreffen die auszuwertenden Monate, Zeitscheiben, Emissionsszenarien und Perzentilwerte. Die getroffenen Annahmen werden im Folgenden erläutert:

Annahme 1: Bei einer ersten Datenbewertung stellt sich heraus, dass der Monat August die größten klimatischen Veränderungen in der Sommerzeit erfährt. Daher bezieht sich die weitere Analyse grundsätzlich auf den Monat August.

Annahme 2: Da die Anpassung der Asphaltdecks an die langfristig zu erwartenden klimatischen Veränderungen zu erfolgen hat, wird für die weitere Analyse vorrangig die Zeitscheibe der fernen Zukunft (2071 – 2100) verwendet. Die nahe Zukunft (2031 – 2060) kann zur Beurteilung der zeitlichen Umsetzung der Anpassungen dienen.

Annahme 3: Da das Eintreten eines Emissionsszenarios stark von den internationalen und nationalen politischen Entwicklungen und Bemühungen abhängig ist, ist eine konkrete Analyse in Richtung eines Szenarios zurzeit nicht möglich. Da sowohl in der internationalen wie auch nationalen Politik derzeit keine wirksamen Bemühungen oder kurzfristigen Maßnahmen zur Vermeidung von Treibhaus-

gas-Emissionen erkennbar sind, und damit das Eintreten eines Szenarios mit nur geringen Veränderungen des Weltklimas sehr unwahrscheinlich ist, wird das Emissionsszenario RCP2.6 für die weitere Analyse nicht berücksichtigt.

Wie bereits erläutert, ist davon auszugehen, dass die Kombination 1, eine Periode heißer Tage ( $T_{\max} \geq 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ) mit tropischen Nächten ( $T_{\min} \geq 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) das ungünstigste klimatische Ereignis für eine Straße in Asphaltbauweise ist. Daher wird der Klimaindex Kombination 1 als ungünstigster Fall in der Analyse betrachtet.

Bei einigen Klimaindizes wird als Ergebnis die maximale Anzahl konsekutiver Tage je Kalendermonat angegeben. Der Wert sagt also nur etwas über die Anzahl aufeinanderfolgender Tage aus und gibt nur bedingt Informationen über die Gesamtzahl an Tagen je Monat wieder. Im ungünstigsten Fall kann ein Tag, welcher die Bedingung der Klimaindizes nicht erfüllt, dafür sorgen, dass der Maximalwert 15 wiedergegeben wird obwohl vor und nach dem unterbrechenden Tag 15 Tage den Klimaindex erfüllen könnten und somit insgesamt 30 Tage im Monat betroffen wären.

Die ausführliche Analyse der Klimadaten beschränkt sich in diesem Kapitel auf die Entwicklung der Klimaindizes hoher Temperaturen. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens tiefer Temperaturen nimmt für die drei Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5

in naher und ferner Zukunft tendenziell ab. Das Auftreten von z. B. anhaltenden Frostperioden oder einzelnen Frosttagen kann nicht ausgeschlossen werden. Dies kann den Ergebniskarten für die Klimaindizes Frosttage, Eistage, Frostwechseltage und maximale Frostperiode, welche im Anhang A dargestellt sind, entnommen werden.

Das Bild 4-6 zeigt die Verteilung der mittleren Anzahl an Tagen an denen die Kombination 1 in der Vergangenheit (1971 bis 2000) im Monat August vorgekommen ist. Erkennbar ist, dass die Kombination aus heißen Tagen und tropischen Nächten vereinzelt im Westen und Nordwesten sowie im Osten aufgetreten ist. Zudem ist die Rhein-Main-Region von dem klimatischen Ereignis mit wenigen Tagen betroffen.

Im Bild 4-7 ist die Kombination 1 für das RCP4.5 und das 85. Perzentil dargestellt. Die Karte stellt somit die ungünstigste Situation im RCP4.5 dar, bei denen die gezeigten Werte von 15 % aller Läufe in den Jahren von 2071 bis 2100 mindestens einmal überschritten werden. Die Karte zeigt eine erhebliche Zunahme der konsekutiven Tage in der Rhein-Main-Region, im Osten und im Westen, während der Nordwesten eine geringere Zunahme aufweist. Eine besondere klimatische Veränderung ist in Bayern und dem Norden von Baden Württemberg zu erkennen, da die Kombination 1 hier in der Vergangenheit nicht beobachtet wurde.

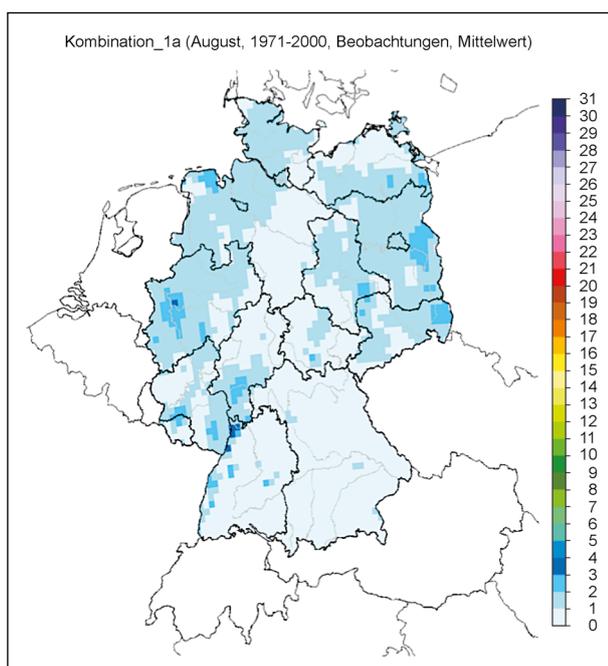


Bild 4-6: Kombi 1 – August – Beobachtung (1971 – 2000)

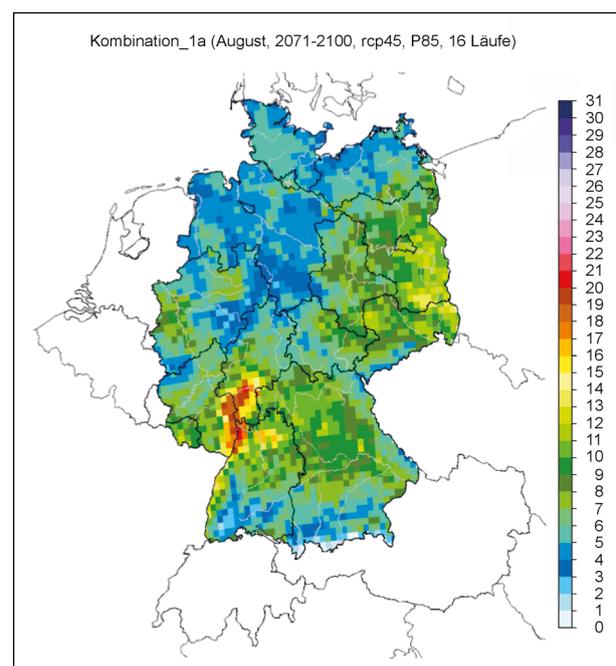


Bild 4-7: Kombi 1 – August – RCP4.5 – ferne Zukunft (2071 – 2100) – 85. Perzentil

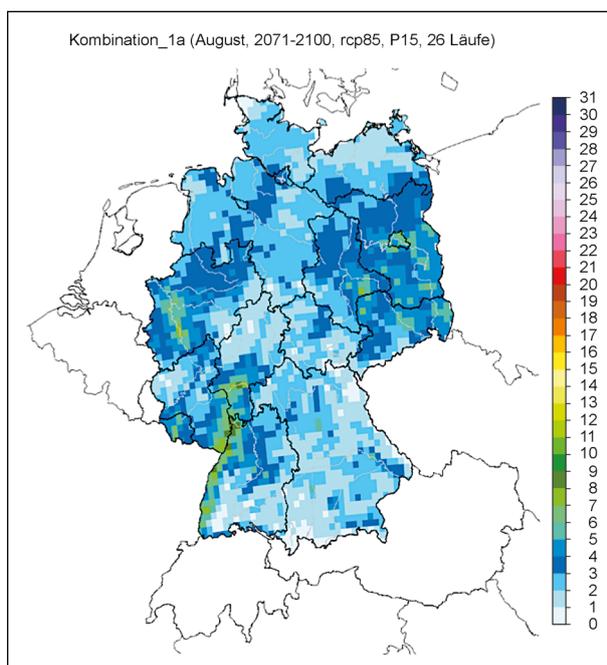


Bild 4-8: Kombi 1 – August – ferne Zukunft (2071 – 2100) – RCP8.5 – 15. Perzentil

Bild 4-8 stellt die Situation für das 15. Perzentil im RCP8.5 dar. Die hierbei dargestellten Werte werden von 85 % aller Läufe in den 30 Jahren der Zeitscheibe 2071 bis 2100 mindestens einmal überschritten. Die räumliche Ausdehnung des betroffenen BRD-Gebietes ist den Beobachtungen der Vergangenheit sehr ähnlich. Eine erhebliche Zunahme des klimatischen Ereignisses ist im Rhein-Main-Gebiet, dem Niederrhein und dem Oberrhein zu erkennen. Des Weiteren ist eine leichte Zunahme im Westen und Osten sowie vereinzelt Regionen in Süd- und Südostbayern zu erkennen.

Die Darstellung in Bild 4-9 zeigt die Werte des 85. Perzentils der Kombination 1 im Emissionsszenario RCP8.5. Wie auch schon in den anderen Darstellungen erkennbar war, sind die Rhein-Main-Region und der Oberrhein von einer erheblichen Zunahme der mittleren Anzahl an Tagen betroffen. Ebenfalls eine erhebliche Zunahme ist in den östlichen Bundesländern zu verzeichnen, während im Westen von einer geringen Zunahme auszugehen ist. Eine wesentliche klimatische Veränderung findet zudem im Süden des BRD-Gebietes statt, insbesondere in Bayern und im nördlichen Baden Württemberg.

Die klimatischen Veränderungen lassen sich quantitativ aus Bild 4-10 ablesen. Die Grafik zeigt, dass auf gut 55 % des BRD-Gebietes die Kombination 1 in der Vergangenheit nicht beobachtet wurde, mit etwa 1 bis 2 Tagen waren ca. 40 % des BRD-Gebie-

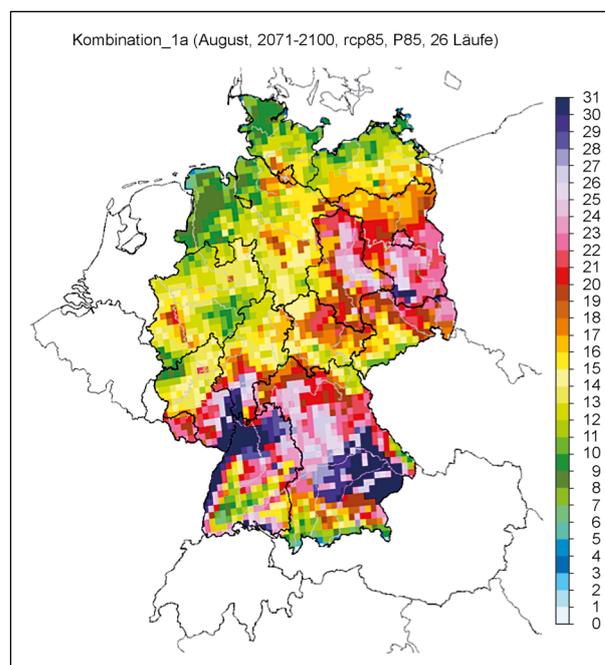


Bild 4-9: Kombi 1 – August – ferne Zukunft (2071 – 2100) – RCP8.5 – 85. Perzentil

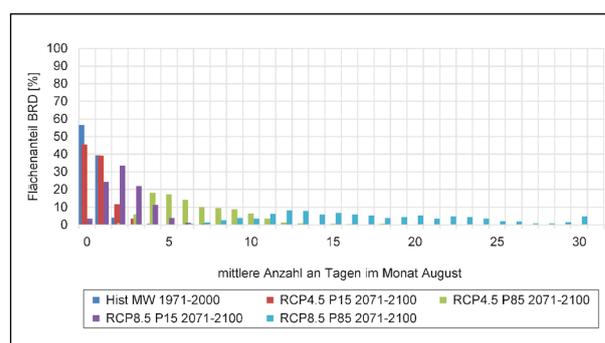


Bild 4-10: Kombination 1 – August – Verteilung des Klimaindex über das BRD-Gebiet

tes betroffen. Es konnten kleinräumig maximal 2 bis 3 konsekutive Tage im BRD-Gebiet festgestellt werden.

Für das RCP4.5/15. Perzentil ist nur eine geringe Änderung zu erkennen. Das 85. Perzentil des RCP4.5 zeigt eine Verteilung bei der bereits ca. 74 % des Bundesgebietes eine Periode der Kombination 1 mit einer Dauer von 4 bis 9 Tagen aufweisen. Das 85. Perzentil des RCP8.5 zeigt eine Verteilung, bei der ca. 76 % des Bundesgebietes eine Periode der Kombination 1 mit einer Dauer von 10 bis 25 Tagen aufweisen. Sogar 5 % des BRD-Gebietes zeigen eine Dauer von 29 bis 30 Tagen für die Kombination 1 auf.

Für die weitere Analyse wird der Klimaindex heiße Tage betrachtet. Hierbei ist deutlich zu erkennen,

dass bereits in der Vergangenheit (1971 bis 2000), dargestellt in Bild 4-11, einige Regionen mit wenigen Tagen (1 bis 4) betroffen waren. Am stärksten betroffen sind die Rhein-Main-Region und der Oberrhein mit 3 bis 4 Tagen. Des Weiteren wurden 2 bis 3 heiße Tage in Nordrhein-Westfalen (Niederrhein und Teile des Münsterlandes sowie des Teutoburger Waldes), im Süden von Niedersachsen und

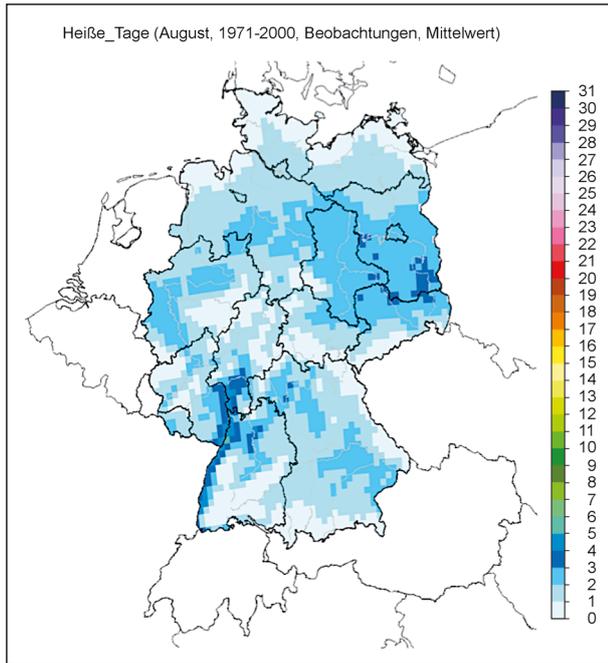


Bild 4-11: TagH – August – Beobachtung (1971 – 2000)

in den östlichen Bundesländern sowie in Bayern (Niederbayern) beobachtet.

Im RCP4.5 (85. Perzentil) ist in der fernen Zukunft eine deutliche Zunahme an heißen Tagen gegenüber den Beobachtungen (1971 bis 2000) zu erkennen. Insbesondere im Rhein-Main-Gebiet und am Oberrhein verdoppelt sich die Anzahl an heißen Tagen. Auch im Osten, am Niederrhein und in Bayern ist eine Zunahme zu beobachten (vgl. Bild 4-12).

Für das 15. Perzentil im RCP8.5 (Bild 4-13) sind geringfügigere Zunahmen der heißen Tage gegenüber den Beobachtungen (1971 bis 2000) zu beobachten. Auch hierbei sind insbesondere die o. g. Gebiete betroffen, auf ca. 40 % des BRD-Gebietes ist mit 3 bis 4 heißen Tagen zu rechnen.

Im Bild 4-14 ist das 85. Perzentil für das RCP8.5 dargestellt. Wie bereits bei der Kombination 1 ist auch hier deutlich zu erkennen, dass insbesondere in Bayern eine erhebliche Zunahme an heißen Tagen gegenüber den Beobachtungen (1971 bis 2000) zu erwarten ist. Die meisten heißen Tage sind allerdings auch hierbei in der Rhein-Main-Region und am Oberrhein festzustellen.

Bild 4-15 zeigt hierzu die prozentuale Verteilung der Anzahl der heißen Tage über das BRD-Gebiet. Es ist zu erkennen, dass das RCP4.5/P15 nur eine geringe Veränderung zu den Beobachtungen der Vergangenheit aufweist. Die Verteilungen der Daten

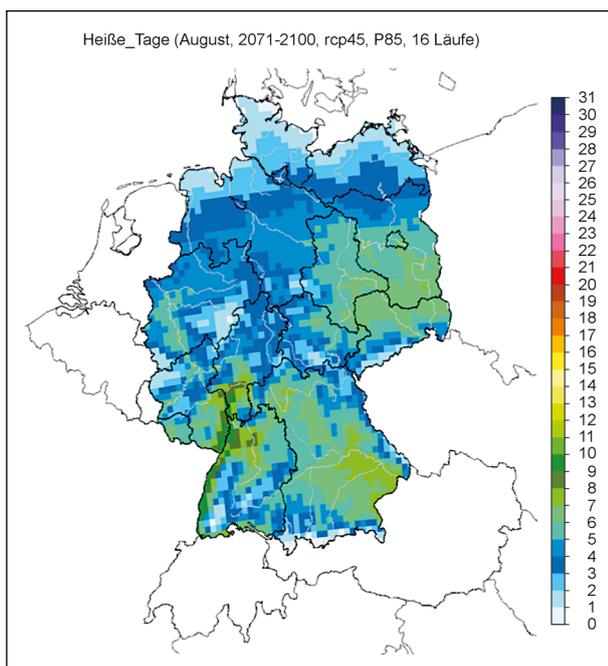


Bild 4-12: TagH – August – RCP4.5 – ferne Zukunft (2071 – 2100) – 85. Perzentil

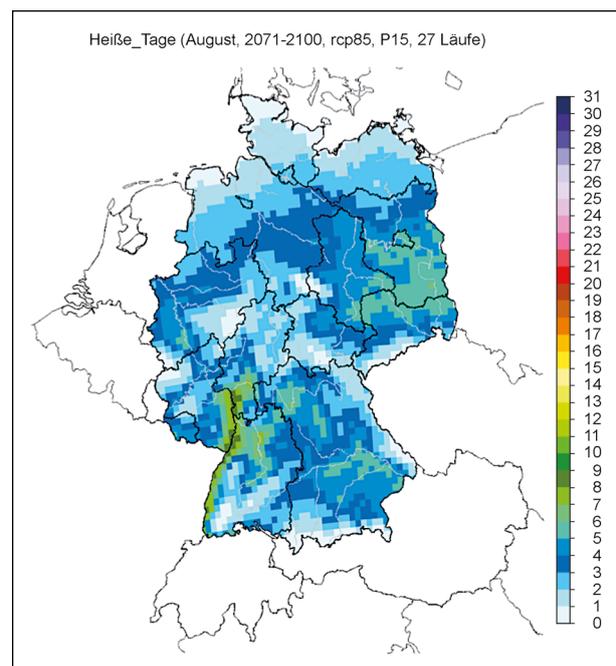


Bild 4-13: TagH – August – ferne Zukunft (2071 – 2100) – RCP8.5 – 15. Perzentil

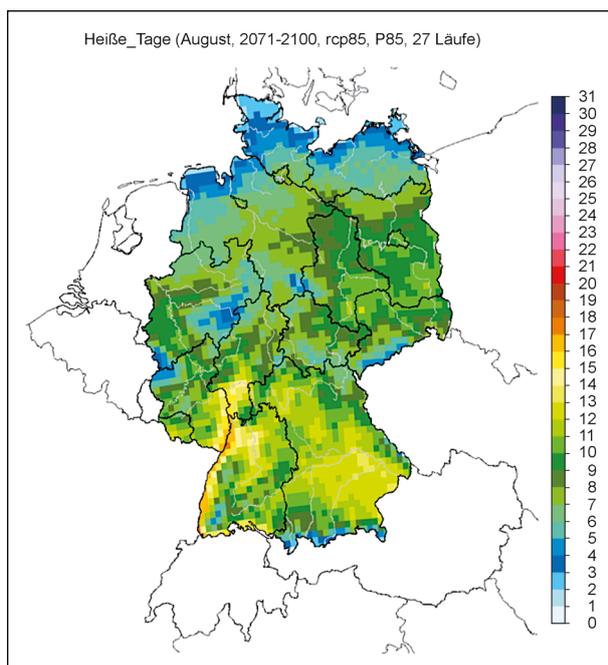


Bild 4-14: TagH – August – ferne Zukunft (2071 – 2100) – RCP8.5 – 85. Perzentil

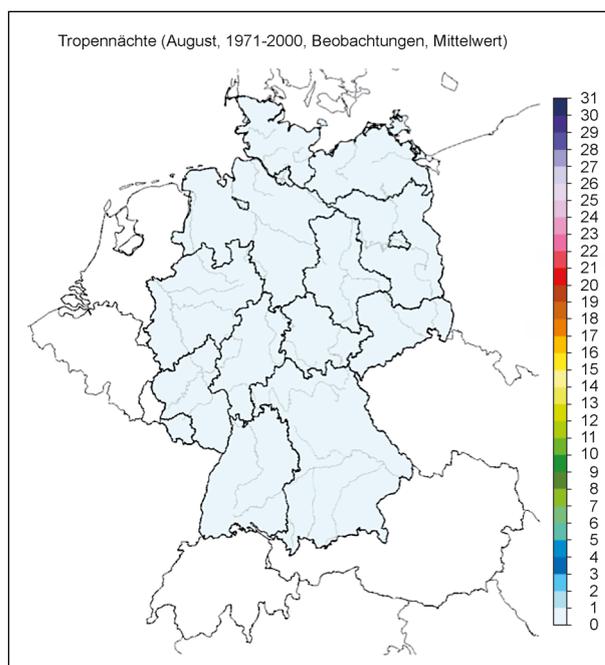


Bild 4-16: NachtT – August – Beobachtung (1971 – 2000)

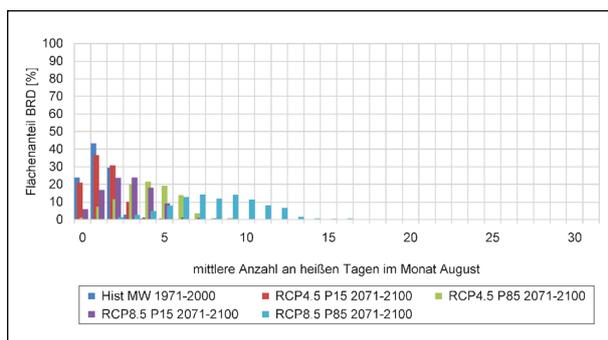


Bild 4-15: TagH – August – Verteilung des Klimaindex über das BRD-Gebiet

zum RCP4.5/P85 und RCP8.5/P15 sind sehr ähnlich, wobei das RCP4.5/P85 allerdings mehr heiße Tage aufzeigt. Für das 85. Perzentil des RCP8.5 sind auf ca. 70 % des BRD-Gebietes mit 5 bis 10 heißen Tagen zu rechnen.

Das Bild 4-16 zeigt, dass in der Vergangenheit keine tropischen Nächte mit Temperaturen über 20 °C beobachtet wurden. Im Bild 4-17 (RCP4.5/P85) zeigt sich eine Zunahme gegenüber den Beobachtungen (1971 bis 2000) in den bereits bei den heißen Tagen festgestellten Regionen. Insbesondere betroffen sind hier wieder die Rhein-Main-Region und der Oberrhein. Darüber hinaus sind auf ca. 50 % des BRD-Gebiets 1 bis 2 tropische Nächte verzeichnet.

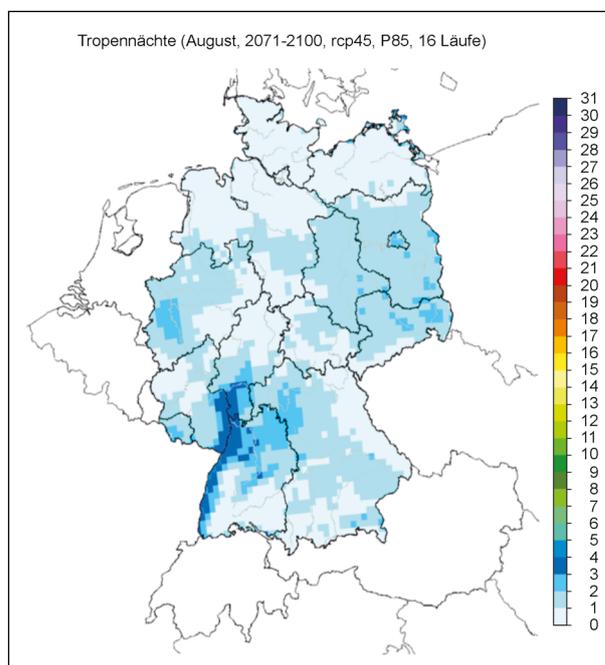


Bild 4-17: NachtT – August – RCP4.5 – ferne Zukunft (2071 – 2100) – 85. Perzentil

Bild 4-18 zeigt die tropischen Nächte für das RCP8.5/P15, erkennbar sind einzelne tropische Nächte am Ober- und Niederrhein, der Rhein-Main-Region und in den östlichen Bundesländern. Die Ergebnisse des 85. Perzentils für das RCP8.5 sind in Bild 4-19 dargestellt. Hierfür zeigen sich erhebliche Veränderungen, betroffen sind insbesondere wie-

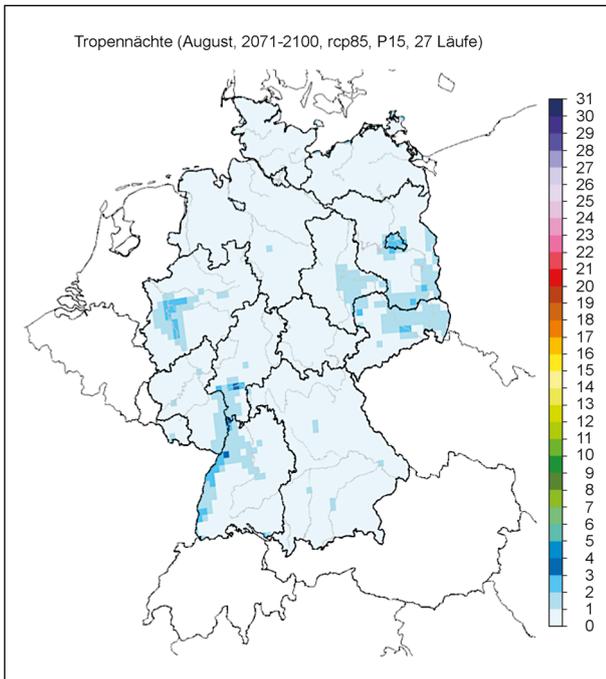


Bild 4-18: NachtT – August – ferne Zukunft (2071 – 2100) – RCP8.5 – 15. Perzentil

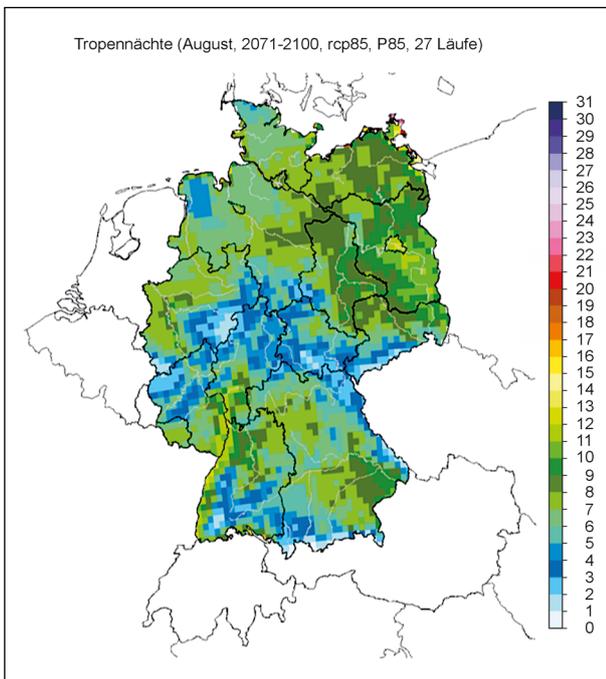


Bild 4-19: NachtT – August – ferne Zukunft (2071 – 2100) – RCP8.5 – 85. Perzentil

der die Rhein-Main-Region, der Norden Baden Württembergs, Niederbayern sowie der Niederrhein und das Münsterland. Eine erhebliche Zunahme ist auch in den östlichen Bundesländern festzustellen. Im Gegensatz zum Klimaindex heiße Tage sind hierbei auch der Nordosten und die Küstenregionen der Ostsee betroffen.

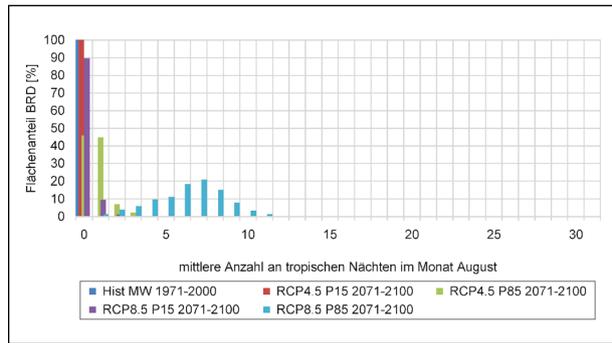


Bild 4-20: NachtT – August – Verteilung des Klimaindex über das BRD-Gebiet

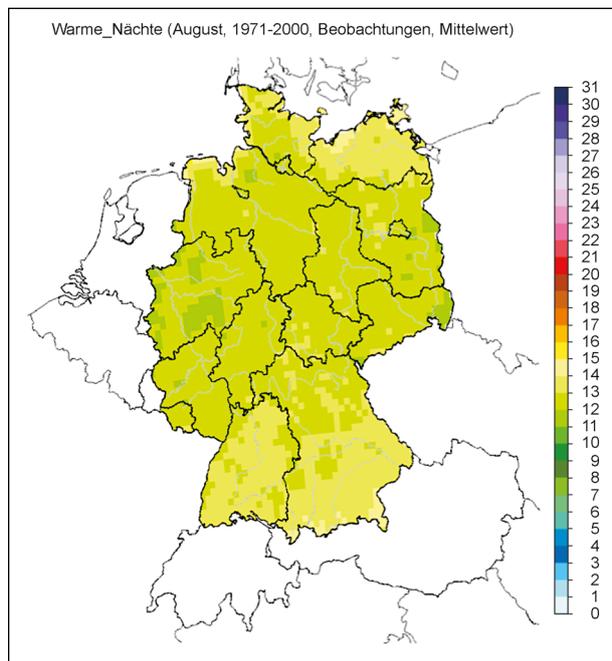


Bild 4-21: NachtW – August – Beobachtung (1971 – 2000)

Die Grafik in Bild 4-20 zeigt eine entsprechende Verschiebung und Verteilung der Werte auf der Abszissenachse für das RCP8.5/P85. Die Emissionsszenarien RCP4.5 (P15) und das RCP8.5 (P15) zeigen nur einige regionale Veränderungen im Vergleich zu den Beobachtungen der Vergangenheit, daher sind die Datenreihen in der Diagrammdarstellung ungefähr deckungsgleich wahrzunehmen.

Bild 4-21 bis Bild 4-24 zeigen die Ergebnisse der Klimasimulationen für den Klimaindex der warmen Nächte. Hierbei ist auffällig, dass die Anzahl der warmen Nächte etwa gleichmäßig über das gesamte BRD-Gebiet zunehmen, wodurch sich im Bild 4-25 eine Verschiebung auf der Abszissenachse statt einer Streuung ergibt. Die Karten zeigen ebenfalls, dass der Norden stärker betroffen ist als der Süden.

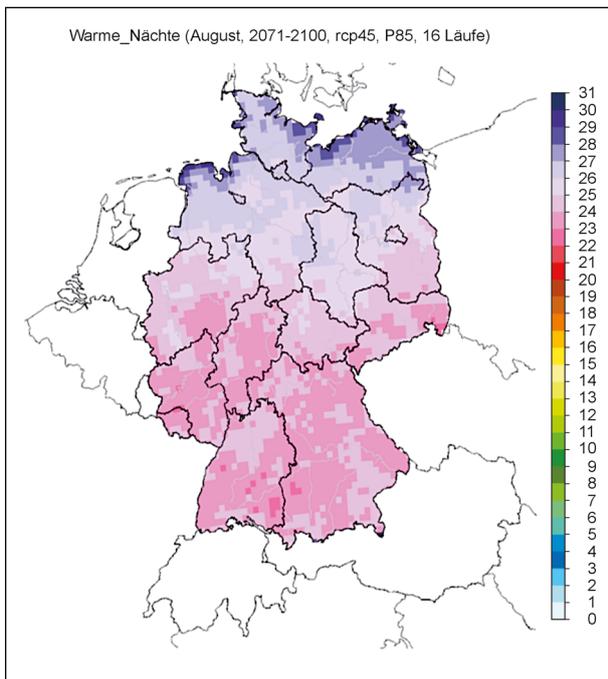


Bild 4-22: NachtW – August – RCP4.5 – ferne Zukunft (2071 – 2100) – 85. Perzentil

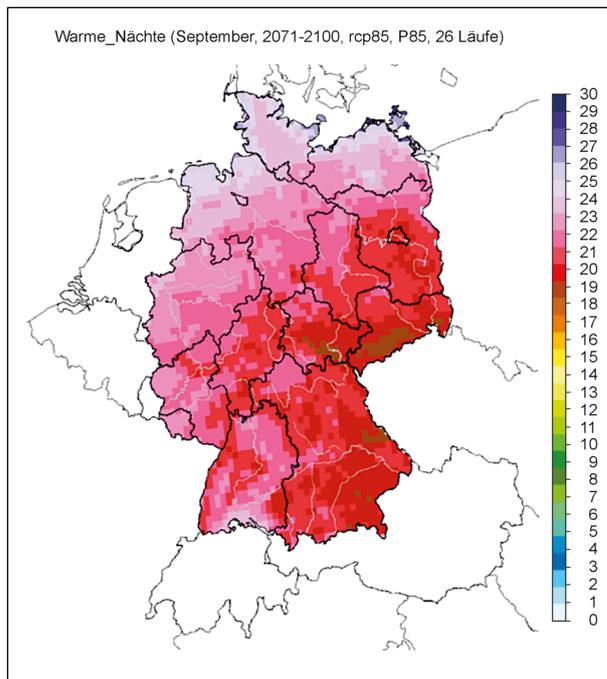


Bild 4-24: NachtW – August – ferne Zukunft (2071 – 2100) – RCP8.5 – 85. Perzentil

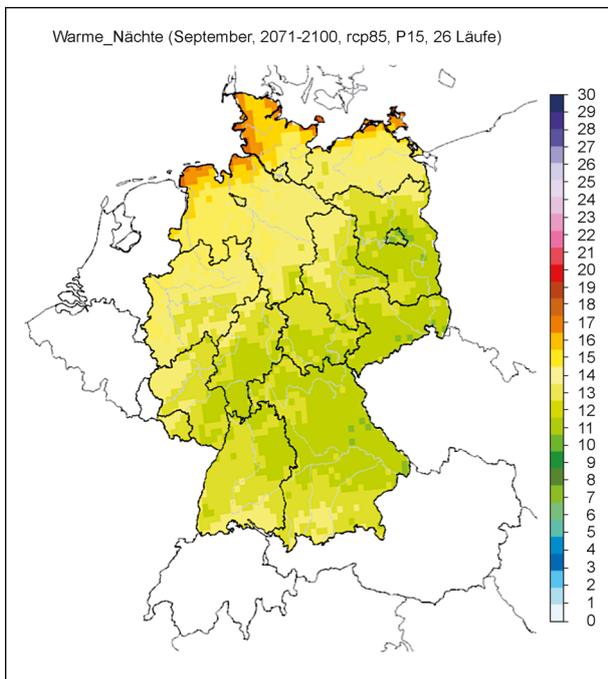


Bild 4-23: NachtW – August – ferne Zukunft (2071 – 2100) – RCP8.5 – 15. Perzentil

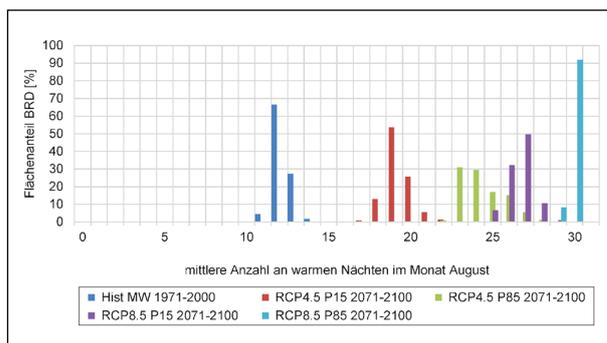


Bild 4-25: NachtW – August – Verteilung des Klimaindex über das BRD-Gebiet

Die Analyse zur Ableitung zukünftiger Klimarandbedingung zeigt, dass es im gesamten BRD-Gebiet für die Emissionsszenarien RCP4.5 und RCP8.5 zu einer Erwärmung kommen wird. Die Intensität der Zunahme ist dabei teilweise regional unterschiedlich. So ist z. B. bei einigen Klimaindizes in Bayern eine stärkere Veränderung zu erwarten als in ande-

ren Regionen. Bei den Veränderungen hinsichtlich der nächtlichen Temperaturveränderungen sind der Norden und die Küstenregion am stärksten betroffen.

Extreme klimatische Ereignisse wie die Kombination 1 treten häufiger auf, sind allerdings in ihrer Intensität regional sehr unterschiedlich. Häufig sind starke Veränderungen, insbesondere hinsichtlich der Tageshöchsttemperaturen und der Intensität von Perioden, im Osten, am Ober- und Niederrhein, im Rhein-Main-Gebiet und in Bayern erkennbar.

## 5 Konzeption und Herstellung klimaoptimierter Asphalte

Bevor klimaoptimierte Asphalte konzipiert und hergestellt werden konnten, wurde zunächst eine theoretische Grundlage zu den thermophysikalischen und lichttechnischen Asphalteigenschaften erarbeitet (vgl. Kapitel 5.1). Darauf aufbauend wurde das Modell zur Darstellung der Wirkungsweise von thermophysikalischen und lichttechnischen Asphalteigenschaften erstellt (vgl. Kapitel 6). Die in diesem Kapitel konzipierten und hergestellten klimaoptimierten Asphalte sowie die Referenzvarianten wurden anschließend mit geeigneten und vorausgewählten Prüfverfahren bezüglich der thermophysikalischen und lichttechnischen Asphalteigenschaften untersucht (vgl. Kapitel 7).

### 5.1 Ansprache thermophysikalischer und lichttechnischer Asphalteigenschaften

Um eine theoretische Grundlage zu den thermophysikalischen Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Temperaturleitfähigkeit) von Asphalt zu schaffen, wurden die Bestandteile Gesteinskörnung und Bitumen zunächst getrennt betrachtet. Die Wärmeleitfähigkeit von Bitumen ist mit einem Wert von 0,16 W/(m\*K) sehr gering [30]. Somit wirkt Bitumen im erkalteten Zustand wärmeisolierend. Es ist zu erwarten, dass ein Asphaltmischgut mit hohem Bindemittelgehalt eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufweist. Da Gussasphalt kein in sich abgestütztes Korngerüst aufweist, ist außerdem damit zu rechnen, dass dieser über eine geringere Wärmeleitfähigkeit als ein Asphaltbeton verfügt.

Die Wärmeleitfähigkeit sowie die volumenbezogene spezifische Wärmekapazität von ausgewählten natürlichen Gesteinstypen ist in Tabelle 5-1 dargestellt.

Bezüglich der lichttechnischen Asphalteigenschaften ist der Albedo-Wert, welcher das Reflexionsver-

mögen einer Oberfläche beschreibt, entscheidend. Nach [59] beträgt der Albedo-Wert einer frischen Asphaltdeckschicht 0,05. Das bedeutet, dass 5 % der auf die Oberfläche einfallenden kurzwelligeren Sonneneinstrahlung reflektiert und 95 % aufgenommen werden, die dann zur Erwärmung der Schicht führen. In Tabelle 5-2 sind übliche Albedo-Werte für Asphaltdeckschichten gegenübergestellt.

Bei der Konzeption und der Herstellung klimaoptimierter Asphalte wurden vier Ansätze hinsichtlich Wärmeleitfähigkeit im Asphaltoberbau und Helligkeit der Asphaltdeckschicht verfolgt. Folgende Konzepte wurden umgesetzt:

- Wärmeleitfähigkeit durch den Einsatz von Quarzit und Kalkstein im Asphaltoberbau erhöhen, mit dem Ziel, die Wärme schnell in tiefere/kühlere Schichten (Tragschicht ohne Bindemittel) abzuleiten.
- Wärmeleitfähigkeit durch den Einsatz von Elektroofenschlacke im Asphaltoberbau verringern, mit dem Ziel, das Eindringen von Wärme in den Asphaltoberbau zu vermeiden.
- Kombination aus hoher und niedriger Wärmeleitfähigkeit in den verschiedenen Schichten des Asphaltoberbaus.
- Helligkeit der Asphaltdeckschicht durch den Einsatz von synthetischem Bindemittel und Pigmenten bzw. heller Gesteinskörnung (Quarzit) erhöhen, mit dem Ziel, das Rückstrahlvermögen zu verbessern.

Gesteinstyp	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ in W/(m*K)	Volumenbezogene spez. Wärmekapazität $\rho \cdot c_p$ in MJ/(m <sup>3</sup> *K)
Quarzit	5,5	2,1
Granit	3,2	2,1 bis 3,0
Kalkstein	2,7	2,1 bis 2,4
Basalt	1,7	2,3 bis 2,6

Tab. 5-1: Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität ausgewählter Gesteinstypen [58]

	Minimal Wert (frisch aufgebrauchte Asphaltdeckschicht)	Mittlerer Wert (gezielte Aufhellung der Asphaltdeckschicht)	Maximaler Wert (bei Asphaltbauweise schwer zu realisieren, entspricht heller Betondeckschicht)
Albedo der Asphaltdeckschicht	0,05	0,25	0,45

Tab. 5-2: Übliche Albedo-Werte einer Asphaltdeckschicht [59]

Nachfolgend sind die Neukonzeptionen von Asphaltmischgütern für verschiedene Asphaltsschichten beschrieben.

## 5.2 Asphaltmischgutkonzeptionen

Für die Asphaltdeckschicht wurden Asphaltbetone und Splittmastixasphalte mit einer oberen Siebgröße von 8 mm hergestellt. Die Varianten ACD-1, SMA-1 und MA-1 dienen als Referenzvarianten und enthalten Diabas und polymermodifiziertes Bindemittel (PmB). Die Varianten ACD-2, SMA-2 und MA-2 wurden mit Quarzit als Gesteinskörnung hergestellt, um eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit herbeizuführen. Dem entgegen soll die in den Varianten ACD-3 und SMA-3 verwendete Elektroofenschlacke zu einer Verringerung der Wärmeleitfähigkeit gegenüber den Referenzvarianten führen.

Die Varianten ACD-4, ACD-5 und ACD-6 sowie MA-3 und MA-4 wurden nach Fertigstellung mit einer hellen Gesteinskörnung abgestreut, um den Strahlungsreflexionsgrad zu erhöhen. Das Aufbringen des hellen Abstreusplittes erfolgte unmittelbar nach dem Verdichten bzw. dem Eingießen des Asphalttes im Formkasten des WSV. Danach wurde der aufgebrauchte Abstreusplitt mit einem speziellen Verdichtungsprogramm (wenig Übergänge mit geringer Kraft) angedrückt. Nach mehreren Versuchen, mit Variationen des Verdichtungsprogramms zum Andrücken, musste festgestellt werden, dass die Herstellung von abgestreuten Asphaltprobeplatten im Laboratorium zu keinen realitätsnahen Ergebnissen führte.

Bei der Herstellung der Varianten ACD-7 und ACD-9 sowie SMA-4 und SMA-5 wurde ein synthetisches Bindemittel (SynB) verwendet und zusätzlich Pigmente hinzugegeben. Hierdurch entsteht eine hellere Oberfläche im Gegensatz zu den Varianten mit PmB wodurch der Strahlungsreflexionsgrad erhöht wird. Die Erhöhung bzw. Verringerung der Wärmeleitfähigkeit verhält sich durch die verwendeten Gesteinskörnungen wie oben beschrieben.

Asphaltbetone für die Asphaltbinderschicht wurden mit einem Größtkorn von 16 mm hergestellt. Auch hier wurde die Referenzvariante ACB-1 mit Diabas umgesetzt. Eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit soll durch die Verwendung von Kalkstein (ACB-2) und eine Verringerung der Wärmeleitfähigkeit durch den Einsatz von Elektroofenschlacke (ACB-3) erzielt werden.

Die Asphalttragschichtmischgüter wurden mit einer oberen Siebgröße von 22 mm aus drei verschiedenen Gesteinsarten hergestellt. Die Referenzvariante ACT-1 enthält Diabasgestein. Wie beim Asphaltbinder sollen auch hier Kalkstein für eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit und Elektroofenschlacke für eine Verringerung der Wärmeleitfähigkeit sorgen.

Eine Übersicht der Asphaltmischgutarten für Asphaltdeckschichten, Asphaltbinderschichten und Asphalttragschichten ist in Tabelle 5-3 dargestellt. Eine Fotodokumentation von Probekörpern der konzipierten und hergestellten Asphaltmischgüter befindet sich im Anhang C.

Asphaltmischgutart	Variante	Gesteinsart	Bindemittel	Sonstiges
AC 8 D	ACD-1	Diabas	PmB	-
	ACD-2	Quarzit	PmB	-
	ACD-3	EOS	PmB	-
	ACD-4	Diabas	PmB	Abstreumaterial: Quarzit
	ACD-5	Quarzit	PmB	Abstreumaterial: Quarzit
	ACD-6	EOS	PmB	Abstreumaterial: Quarzit
	ACD-7	Quarzit	SynB	Pigmente
	ACD-9	EOS	SynB	Pigmente
	SMA 8 S	SMA-1	Diabas	PmB
SMA-2		Quarzit	PmB	-
SMA-3		EOS	PmB	-
SMA-4		Quarzit	SynB	Pigmente
SMA-5		EOS	SynB	Pigmente

Tab. 5-3: Mischgutkonzeptionen für Asphaltdeckschichten, Asphaltbinderschichten und Asphalttragschichten

Asphaltmischgutart	Variante	Gesteinsart	Bindemittel	Sonstiges
MA 8	MA-1	Diabas	PmB	-
	MA-2	EOS	PmB	-
	MA-3	Diabas	PmB	Abstreumaterial: Quarzit
	MA-4	EOS	PmB	Abstreumaterial: Quarzit
AC 16 B	ACB-1	Diabas	PmB	
	ACB-2	Kalkstein	PmB	
	ACB-3	EOS	PmB	
AC 22 T	ACT-1	Diabas	StBB	
	ACT-2	Kalkstein	StBB	
	ACT-3	EOS	StBB	

Tab. 5-3: Fortsetzung

## 6 Modell zur Wirkungsweise der thermophysikalischen Asphalteigenschaften

Um die Wirkungsweise der thermophysikalischen und lichttechnischen Asphalteigenschaften zu analysieren, wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ein vereinfachtes eindimensionales Finite-Elemente-Modell zum Wärmetransfer erstellt. Erkenntnisse aus den Bestrahlungsversuchen, Messungen zu den thermophysikalischen Materialeigenschaften und lichttechnischen Eigenschaften können auf dieses Modell angewendet werden. Mit dem Modell sollen folgende Ziele erreicht werden:

1. Entwicklung eines vereinfachten, eindimensionalen numerischen Wärmeübertragungsmodells, um die Temperaturverteilung im Asphalt-oberbau vorherzusagen
2. Darstellung des Zusammenhangs zwischen den Temperaturen im Straßenoberbau und den thermophysikalischen Eigenschaften (insbesondere Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Rohdichte)
3. Analyse des Einflusses von Albedo und Windgeschwindigkeit auf die Temperaturverteilung im Straßenoberbau

### 6.1 Numerische Modellbeschreibung

Die Berechnung der relativen Einflüsse von thermophysikalischen Materialeigenschaften auf Oberflächen- und Tiefentemperaturen von Straßenaufbauten wurde mit dem Programmpaket Abaqus/CAE

2018 [60], einem Finite-Elemente-Programm von Simulia (Dassault Systèmes), durchgeführt. Um die Temperaturentwicklung über die Zeit innerhalb des Straßenaufbaus zu erfassen, wurde ein vereinfachtes eindimensionales Wärmeübergangstransportmodell erarbeitet. Darin wird die Wärme nur in einer vertikalen Richtung übertragen, während die anderen Seiten, longitudinal und lateral, als isoliert angenommen werden und dort weder einströmende noch abgehende Wärmeströme stattfinden.

Im Wesentlichen wurden zwei Modellkonfigurationen konstruiert. Das erste Modell besteht aus einem standardisierten mehrschichtigen Straßenoberbau, der verwendet wurde, um den Temperaturverlauf im gesamten Oberbau zu simulieren und Unterschiede innerhalb der einzelnen Schichten aufzuzeigen. Das zweite Modell besteht aus einem einschichtigen Asphaltaufbau und wurde verwendet, um Effekte der thermophysikalischen Materialeigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Rohdichte) auf den Temperaturverlauf im gebundenen Straßenoberbau getrennt voneinander zu analysieren. Dazu wurden weitere Einflussfaktoren konstant gehalten und lediglich die Materialparameter variiert.

Die Fahrbahnoberflächentemperatur wird durch kurz- und langwellige Strahlungen sowie Wärmetransportmodi wie etwa die Wärmekonvektion beeinflusst. Die Nettorate des Wärmestroms zum Straßenaufbau hin und vom Straßenaufbau weg ist schematisch in Bild 6-1 dargestellt und kann mit dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik, der die Energieerhaltung in einem System beschreibt, definiert werden:

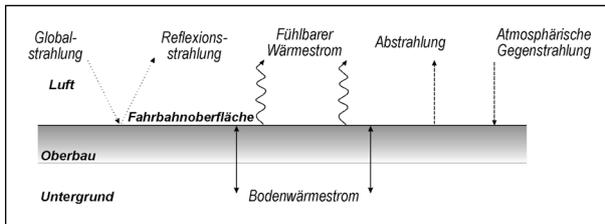


Bild 6-1: Schema des Wärmestroms an der Fahrbahnoberfläche

$$q_{net} = q_s + q_a \pm q_c \pm q_k - q_r$$

$q_{net}$  Netto Energiemenge [W/m<sup>2</sup>]

$q_s$  Absorbierte Energie der Globalstrahlung [W/m<sup>2</sup>]

$q_a$  Absorbierte Energie der atmosphärischen Gegenstrahlung [W/m<sup>2</sup>]

$q_c$  Übertragene Energie durch Konvektion [W/m<sup>2</sup>]

$q_k$  Transportierte Energie durch Wärmeleitung [W/m<sup>2</sup>]

$q_r$  Abstrahlende Energie von der Fahrbahnoberfläche [W/m<sup>2</sup>]

Die von der Fahrbahnoberfläche absorbierte Energie  $q_s$  beträgt:

$$q_s = (1 - \alpha) * q_{global}$$

Hierbei ist  $\alpha$  die Albedo der Fahrbahnoberfläche und  $q_{global}$  der Gesamtwert der einfallenden Globalstrahlung. Die Albedo von trockenen Fahrbahnoberflächen in Asphaltbeton liegt zwischen 0,11 und 0,25 [33].

Die von der Fahrbahnoberfläche absorbierte Energie  $q_a$  beträgt:

$$q_a = \varepsilon * \sigma * (T_{Luft} + 273,15)^4$$

Hierbei ist  $\varepsilon$  der Emissionskoeffizient der Atmosphäre für langwellige Strahlung,  $\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante und  $T_{Luft}$  die Lufttemperatur, welche durch Addition der Nulltemperatur von 273,15 °C zu einer Kelvintemperatur konvertiert wird.

Der durch Konvektion hervorgerufene Wärmestrom  $q_c$  kann mit dem Newtonschen Wärmeübergangsgesetz beschrieben werden:

$$q_c = h_c * (T_{OF} - T_{Luft})$$

Hierbei steht  $h_c$  für den Wärmeübergangskoeffizienten,  $T_{OF}$  für die Oberflächentemperatur und  $T_{Luft}$  für die Lufttemperatur.

Die infolge von Wärmeleitung im Asphaltoberbau transportierte Energie kann wie folgt beschrieben werden:

$$q_k = \lambda * (T_{OF} - T_x) / x$$

Hierbei ist  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit,  $T_{OF}$  die Oberflächentemperatur und  $T_x$  die Temperatur in der Tiefe  $x$ . Die Wärmeleitfähigkeit des Materials bestimmt die Geschwindigkeit der Wärmeleitung, welche von der wärmeren Region in die kältere Region getrieben wird. Drei materialbezogene Eigenschaften beeinflussen das Leitungsniveau: die Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ), die spezifische Wärmekapazität ( $c$ ) und die Dichte ( $\rho$ ). Sowohl die spezifische Wärmekapazität als auch die Dichte tragen zu der Menge an Energie bei, die benötigt wird, um die Materialtemperatur um eine bestimmte Menge zu erhöhen, die anschließend in dem Material gespeichert wird. Um die interne spezifische Wärme ( $U$ ), die im Material pro Einheitsvolumen mit der Temperatur ( $T$ ) gehalten wird, zu bestimmen, kann die nachfolgende Gleichung verwendet werden [33]:

$$U = \rho * c * T$$

Eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit des Materials verbessert die Übertragung der Wärme in die tieferen Schichten des Straßenoberbaus. Eine Erhöhung der spezifischen Wärmekapazität führt dazu, dass der Asphalt mehr thermische Energie speichern kann [33].

Die langwellige Wärmestrahlung der Fahrbahnoberfläche kann durch die folgende Formel dargestellt werden:

$$q_r = \varepsilon * \sigma * (T_{OF} + 273,15)^4$$

Hierbei ist  $\varepsilon$  der Emissionskoeffizient der Fahrbahnoberfläche,  $\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante und  $T_{OF}$  die Fahrbahnoberflächentemperatur, welche durch Addition der absoluten Nulltemperatur von 273,15 °C zu einer Kelvintemperatur konvertiert wird.

Der Wärmestrom infolge von Kondensation bzw. Verdunstung von Wasserdampf bzw. Wasser wird in dem Modell nicht berücksichtigt.

Die Entwicklung des Finite-Elemente-Modells umfasst eine Reihe von Komponenten, die entspre-

chend definiert wurden und nachfolgend genauer beschrieben werden:

- Geometrie
- Thermophysikalische Materialeigenschaften
- Klimatologische Randbedingungen
- Konvektion, Abstrahlungsenergie und Lufttemperatur
- Diskretisierung des Modells

**Geometrie**

Für die Vorhersagen der Temperaturverteilung im gesamten Straßenoberbau, wurde ein standardisierter Oberbau nach RStO 12 gewählt [61]. Das vereinfachte eindimensionale Modell besteht aus einer Asphaltdeckschicht, Asphaltbinderschicht, Asphalttragschicht, Schottertragschicht, Frostschuttschicht und dem Untergrund. Der Aufbau entspricht damit der Belastungsklasse Bk10 für Bauweisen mit Asphaltdecke auf Asphalttragschicht und Schottertragschicht auf Frostschuttschicht mit einer Dicke des frostsicheren Oberbaus von 60 cm. Eine Skizze des Aufbaus ist in Bild 6-2 dargestellt.

Um die Auswirkungen der einzelnen thermophysikalischen Materialeigenschaften getrennt voneinander zu analysieren, wurde ein einlagiger Aufbau erstellt. Die Dicke des betrachteten Aufbaus wurde zu 350 cm gewählt und ist schematisch in Bild 6-3

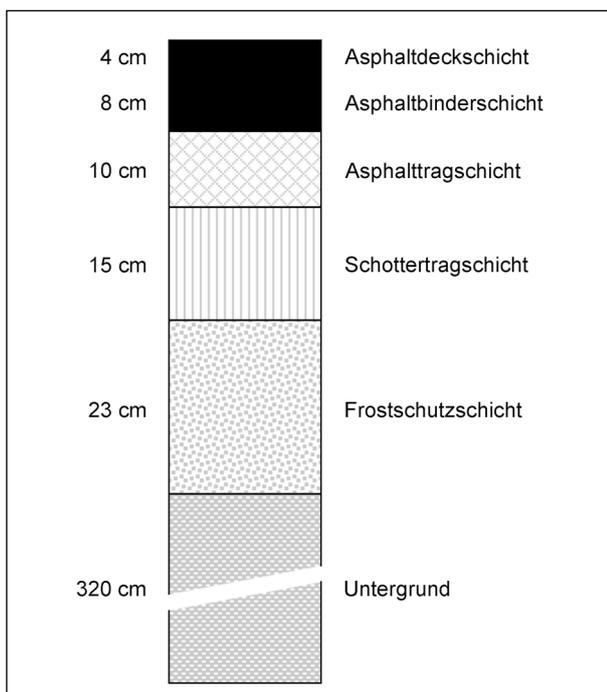


Bild 6-2: Darstellung des standardisierten Oberbaus

zu sehen. Die Dicke des Aufbaus wurde so gewählt, dass die konstante Temperatur am unteren Ende als Randbedingung nahezu keinen Einfluss auf die Temperaturentwicklung im oberen Bereich darstellt.

**Thermophysikalische Materialeigenschaften**

Die gewählten thermophysikalischen Materialparameter sowie die jeweiligen Rohdichten sind in Tabelle 6-1 dargestellt. Die Kennwerte für die Asphaltbaustoffe wurden gemäß eigener Erfahrungswerte sowie Angaben in der Literatur gewählt [62]. Für erste Sensitivitätsanalysen wurde die Spannweite der Wärmeleitfähigkeit mit 0,5 bis 5,0 W/(m\*K) sehr groß gewählt. Die spezifische Wärmekapazität sowie die Rohdichten wurden konstant gehalten. Bei den ungebundenen Schichtbaustoffen wurden die Werte aus der Literatur entnommen und für Trag-

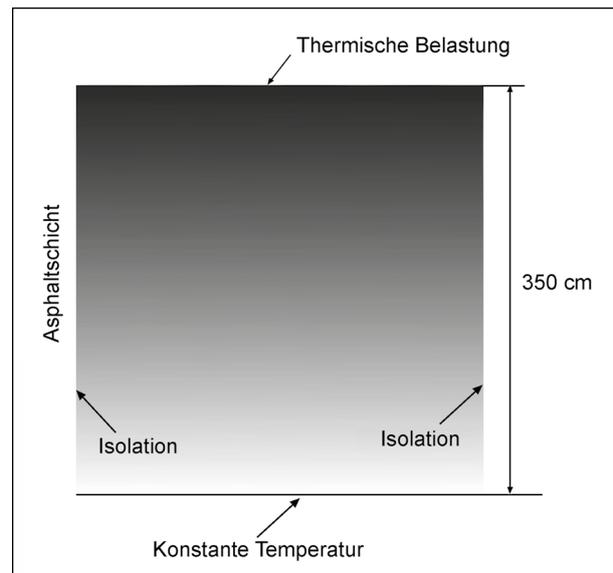


Bild 6-3: Eine schematische Konfiguration für ein Einzelschichtmodell

Schicht	Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]	Spez. Wärmekapazität [J/(kg*K)]	Rohdichte [kg/m³]
Asphaltdeckschicht	0,5 bis 5,0	600	2.350
Asphaltbinderschicht	0,5 bis 5,0	600	2.350
Asphalttragschicht	0,5 bis 5,0	600	2.350
Tragschichten ohne Bindemittel	0,4	725	2000
Untergrund	0,4	725	2000

Tab. 6-1: Thermische Eigenschaften für die Schichten einer Straßenbefestigung mit Asphaltdecke

schichten ohne Bindemittel und den Untergrund als gleich angenommen [58]. Die Materialkennwerte können anschließend im Finite-Elemente-Modell jeder Schicht einzeln zugeordnet werden.

### Klimatologische Randbedingungen

Zur Simulation von Klimarandbedingungen wurden zunächst zwei Datensätze zur Globalstrahlung verwendet, die experimentell in Cambridge [63] und in Mannheim [64] gemessen wurden. Diese wurden zeitabhängig im Finite-Elemente-Modell hinterlegt, sodass die Globalstrahlungswerte im Tagesverlauf unterschiedlich auftreten. Bei dem vereinfachten einschichtigen Modell wurde eine konstante Globalstrahlung von  $500 \text{ W/m}^2$  angenommen.

Die langwellige atmosphärische Gegenstrahlung wurde über Tag und Nacht konstant mit einer Leistung von  $300 \text{ W/m}^2$  angenommen. Dieser ständig auftretende Strahlungsenergiestrom wurde zur gesamten Globalstrahlung addiert und im Finite-Elemente-Modell implementiert. Zur Vereinfachung wurde die Annahme getroffen, dass die Fahrbahnoberfläche einer gleichmäßig verteilten Strahlungsenergie ausgesetzt ist.

Ebenfalls wurde hier die Albedo der Fahrbahnoberfläche berücksichtigt. Aus der Literatur wurde eine Albedo von 11 % angenommen und im Finite-Elemente-Modell von der auftretenden Globalstrahlung abgezogen [33].

### Konvektion, Abstrahlungsenergie und Lufttemperatur

Für eine adäquate Beschreibung der Wechselwirkung zwischen dem Straßenoberbau und der Umgebungsluft muss ein Wärmeübergangskoeffizient im Finite-Elemente-Modell eingebaut werden.

Zur Schätzung des Wärmeübergangskoeffizienten wurden zahlreiche empirische Gleichungen entwickelt [33, 65, 66]. Für die hier durchgeführten Modellberechnungen wurde zunächst eine Gleichung nach LI [33] verwendet, um den Wärmeübergangskoeffizienten zu bestimmen. Die Gleichung zeigt einen linearen Anstieg des Wärmeübergangskoeffizienten ( $h_c$ ) in Bezug auf die Windgeschwindigkeit ( $V_w$ ) und ist wie folgt beschrieben:

$$h_c = 6,1 + 3,7 * V_w$$

Der Energiegewinn bzw. -verlust durch Konvektion ist zudem abhängig von der Lufttemperatur. Hierzu

wurden im Finite-Elemente-Modell Tagesganglinien der Lufttemperatur für die Betrachtungszeiträume implementiert. Es wurden verschiedene Tagesganglinien analysiert, um z. B. den Einfluss von tropischen Nächten auf das Abkühlverhalten des Straßenoberbaus zu beobachten.

Um die Abstrahlungsenergie der Fahrbahnoberfläche im Finite-Elemente-Modell zu berücksichtigen, wurde ein Emissionskoeffizient der Fahrbahnoberfläche mit 0,93 angenommen [67], die absolute Nulltemperatur auf  $-273,15 \text{ °C}$  festgelegt und die Stefan-Boltzmann-Konstante mit  $5,67 * 10^{-11} \text{ mW/(mm}^2\text{K}^4)$  hinterlegt. Die Umgebungslufttemperatur kann vom Modell zu jedem Zeitpunkt aus den zuvor beschriebenen Tagesganglinien abgerufen werden.

Zunächst wurden als Randbedingungen die Temperaturen an der Fahrbahnoberfläche auf  $20 \text{ °C}$  und an der Unterseite des modellierten Aufbaus auf  $8 \text{ °C}$  festgelegt. Diese Randbedingungen wurden sowohl für das mehrschichtige als auch für das einschichtige Modell angenommen. Die Seiten des Modells wurden, wie bereits beschrieben, als isoliert angenommen, was bedeutet, dass weder Energie aufgenommen noch abgegeben werden kann.

### Diskretisierung

Bild 6-4 zeigt einen Ausschnitt der Netz-Konfiguration für das numerische Mehrschichten-Modell. Da die Temperaturverteilung im Straßenoberbau für die

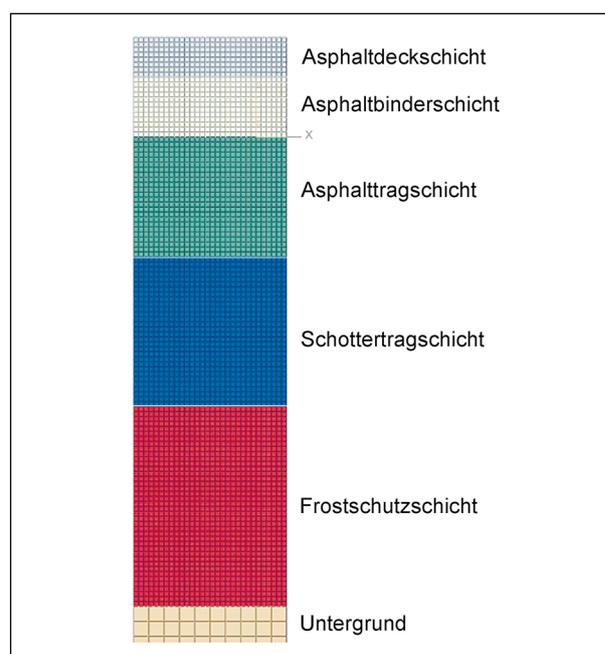


Bild 6-4: Ausschnitt der Netz-Konfiguration für das mehrschichtige Finite-Elemente-Modell

Analysen entscheidend ist, wurde die Netzweite für die Schichten des Oberbaus feiner gewählt als für den Untergrund (von dem in Bild 6-4 nur ein Teil zu sehen ist). Jedes verwendete Element ist ein lineares Viereck mit vier Knoten und einer Größe von 5 x 5 mm für den Straßenoberbau und 15 x 15 mm für den Untergrund. Für das einschichtige Finite-Elemente-Modell wurde eine Netzweite von 10 x 10 mm verwendet.

## 6.2 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse für die ersten Modellberechnungen am Ein- und Mehrschichtenmodell beschrieben. Die Ergebnisse liefern vor allem qualitative Erkenntnisse zum Temperaturverlauf innerhalb des Fahrbahnoberbaus und über mehrere Tage. Quantitativ liegen die im Modell ermittelten Temperaturen teilweise höher bzw. niedriger als der Erwartungswert.

Zunächst wurden Modellläufe am mehrschichtigen Aufbau nach Bild 6-2 durchgeführt. Bild 6-5 zeigt die Simulation für sieben Tage unter Einwirkung einer Globalstrahlungstagesganglinie mit  $1.000 \text{ W/m}^2$  in der Spitze. Durch eine angenommene Albedo der Fahrbahnoberfläche wird dieser Wert um 11 % auf  $890 \text{ W/m}^2$  abgeschwächt. Die Lufttemperatur wurde idealisiert modelliert und sinkt nachts nicht unter  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  und übersteigt im Tagesverlauf die  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ -Marke nicht. Des Weiteren wurde die atmosphärische Gegenstrahlung nicht berücksichtigt und der Wärmeübergangskoeffizient mit  $3,4 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  sehr gering festgelegt.

Da diese Berechnung lediglich zur ersten Kalibrierung des Modells diente, sind die unrealistischen Fahrbahnoberflächentemperaturen von über  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  zu vernachlässigen. Da am siebten Tag weiterhin ein Anstieg der Maximaltemperatur erkennbar ist,

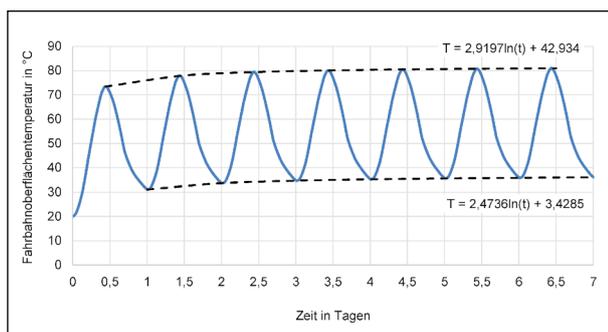


Bild 6-5: Fahrbahnoberflächentemperaturen für eine Woche bei einer maximalen Globalstrahlung von  $890 \text{ W/m}^2$

wurde ein weiterer Modelllauf für 31 Tage bei gleichbleibenden Randbedingungen durchgeführt. Der Fahrbahnoberflächenverlauf über einen Monat ist in Bild 6-6 dargestellt.

Anhand der Tageshöchst- und -tiefsttemperaturen ist erkennbar, dass für diese Modellberechnung nach ca. neun Tagen kein weiterer Anstieg zu verzeichnen ist. Diese Erkenntnis war für die Modellentwicklung wichtig, da sie verdeutlicht, dass auch die Wärmeverlustströme berücksichtigt werden und sich somit bei gleichbleibenden Randbedingungen der Temperaturverlauf auf ein Niveau einregelt.

Als nächstes wurde der Temperaturverlauf im Straßenoberbau sowie im Untergrund betrachtet. In Bild 6-7 ist der Temperaturverlauf für eine Woche bei den oben beschriebenen Randbedingungen an der Fahrbahnoberfläche sowie in einer Tiefe von 16 cm (innerhalb der ATS), 37 cm (unteres Ende der STS) und in 378 cm (Untergrund) dargestellt.

Die Temperatur von  $8 \text{ }^\circ\text{C}$  in 378 cm wurde als Randbedingung festgelegt, bleibt innerhalb der Modellberechnung unverändert und ist somit erfüllt. Die Temperaturverläufe in 16 cm und 37 cm zeigen einen qualitativ ähnlichen Verlauf wie an der Fahr-

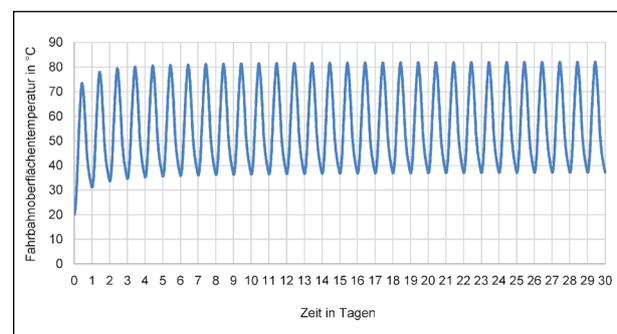


Bild 6-6: Fahrbahnoberflächentemperaturverlauf für einen Monat bei einer maximalen Globalstrahlung von  $890 \text{ W/m}^2$

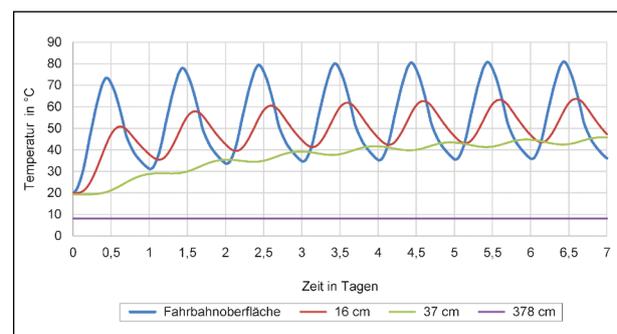


Bild 6-7: Temperaturverlauf in verschiedenen Tiefen für eine Woche bei einer maximalen Globalstrahlung von  $890 \text{ W/m}^2$

bahnoberfläche, die allerdings zeitversetzt auftreten. Quantitativ auffällig aber plausibel ist, dass die Tagestiefsttemperatur nach sieben Tagen in der Asphaltdeckschicht niedriger ist als in den tieferliegenden Schichten, da diese einen Teil der Temperatur speichern und langsamer abgeben als die Asphaltdeckschicht.

Da das Temperaturverhalten, also Aufheizen und Abkühlen, an der Fahrbahnoberfläche neben der Globalstrahlung von der Lufttemperatur abhängig ist, wurden nachfolgend verschiedene Tagesganglinien der Lufttemperaturen untersucht. Hierzu wurden verschiedene Kombinationen mit Tagestiefsttemperaturen von 20 °C und 25 °C und Tageshöchsttemperaturen von 30 °C und 40 °C sinusförmig über den Tag modelliert. Die Ergebnisse sind in Bild 6-8 dargestellt.

Erwartungsgemäß werden die höchsten Fahrbahnoberflächentemperaturen bei den Kombinationen mit  $T_{\max} = 40$  °C und die niedrigsten bei den Kombinationen mit  $T_{\min} = 20$  °C ermittelt. Die Kombination  $T_{\min} = 20$  °C und  $T_{\max} = 40$  °C, mit der größten Temperaturdifferenz, zeigt bei der maximalen und minimalen Fahrbahnoberflächentemperatur nur geringe Abweichungen zu den Kombinationen mit einer geringeren Temperaturdifferenz.

Die in Bild 6-9 dargestellten Modellberechnungen der Fahrbahnoberflächentemperaturen unterscheiden sich in ihren Wärmeübergangskoeffizienten, welcher für Windgeschwindigkeiten von 2,5 m/s und 5,0 m/s errechnet wurde. Diese Windgeschwindigkeiten entsprechen gemäß der Beaufortskala einer leichten Brise bzw. einer schwachen Brise. Bereits bei diesen geringen Windgeschwindigkeiten werden große Unterschiede bei der Entwicklung der Fahrbahnoberflächentemperaturen deutlich. Am vierten Tag beträgt die Temperaturdifferenz zwischen den unterschiedlichen Wärmeübergangs-

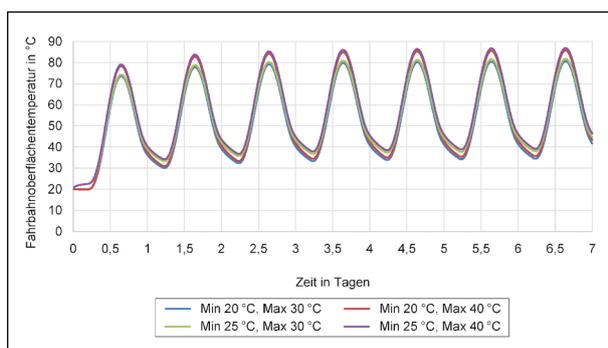


Bild 6-8: Fahrbahnoberflächentemperatur für eine Woche bei verschiedenen Tagesganglinien der Lufttemperatur

koeffizienten von 15,35 W/(m<sup>2</sup>\*K) und 24,60 W/(m<sup>2</sup>\*K) ca. 5 K.

Um den Einfluss verschiedener Wärmeleitfähigkeiten auf die Fahrbahnoberflächentemperatur zu untersuchen, wurde eine Berechnung durchgeführt, bei der vier verschiedene Konstellationen im Modell berücksichtigt wurden. Es wurden Wärmeleitfähigkeiten von 0,5, 1,5, 2,5 und 5,0 W/(m\*K) analysiert und in allen drei Schichten des Asphalt oberbaus eingesetzt. Die Ergebnisse sind in Bild 6-10 dargestellt.

An der Fahrbahnoberfläche werden die höchsten Temperaturen bei einer Wärmeleitfähigkeit von 0,5 W/(m\*K) und die niedrigsten bei einer Wärmeleitfähigkeit von 5,0 W/(m\*K) erzielt. Dies hat vermutlich damit zu tun, dass die Wärme aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit nur sehr langsam in die tieferen Schichten abgegeben werden kann und sich somit an der Oberfläche staut. Durch diesen Wärmestau lassen sich auch die mit Abstand niedrigsten Temperaturen in der Nacht erklären, da sich der Asphalt oberbau an der Oberfläche schnell abkühlt und nur wenig Wärme aus den tieferliegenden Asphalt schichten nachkommt. Die Oberfläche des

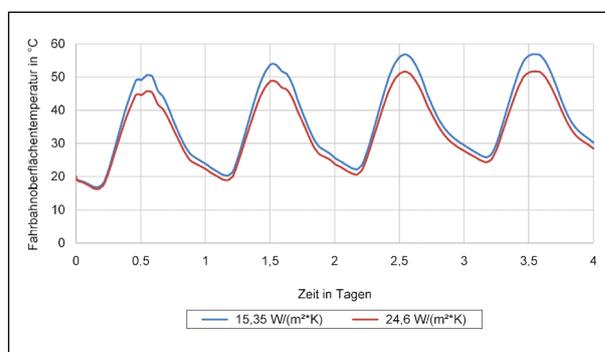


Bild 6-9: Fahrbahnoberflächentemperaturen bei unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten

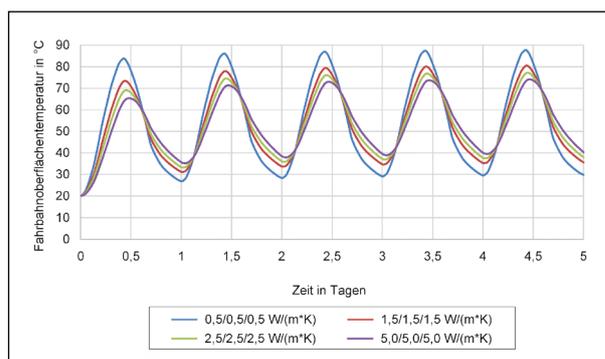


Bild 6-10: Fahrbahnoberflächentemperaturen bei unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten im Asphalt oberbau

Asphaltaufbau mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $5,0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  kühlt sich langsamer und nicht so stark ab, da gespeicherte Wärme aus den tieferliegenden Schichten nachströmt und zeitversetzt über die Fahrbahnoberfläche abgegeben wird.

Um dieses Phänomen genauer untersuchen zu können, wurden die Temperaturgradienten um 15:00 Uhr für die vier verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten dargestellt. Das Ergebnis ist in Bild 6-11 dargestellt. An den Temperaturgradienten lassen sich die zuvor aufgestellten Vermutungen bestätigen. Die Wärme im Asphaltüberbau mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $0,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  staut sich insbesondere in den oberen Schichten und wird nur sehr langsam nach unten abgegeben. Die Asphaltüberbauten mit einer höheren Wärmeleitfähigkeit hingegen geben die Wärme gleichmäßiger nach unten hin ab.

Da das vorherige Diagramm nur einen Zeitpunkt betrachtet, werden nachfolgend Temperaturgradienten zu verschiedenen Tageszeitpunkten, exemplarisch für den Asphaltüberbau mit einer einheitlichen Wärmeleitfähigkeit von  $1,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , dargestellt. Diese betrachten Tageszeiten zwischen 06:00 Uhr und 24:00 Uhr und sind in Bild 6-12 dargestellt.

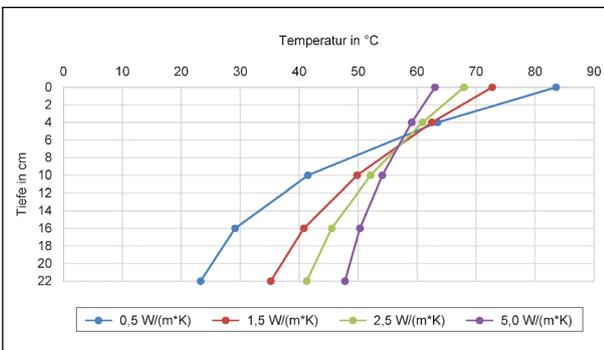


Bild 6-11: Temperaturgradienten um 15:00 Uhr für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten im Asphaltüberbau

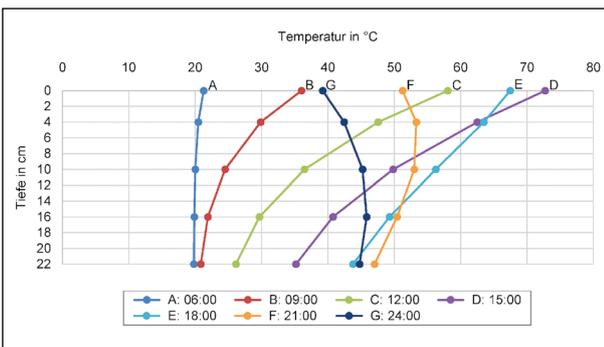


Bild 6-12: Temperaturgradienten in unterschiedlichen Tiefen zwischen 06:00 und 24:00 Uhr

An der Fahrbahnoberfläche ist zu erkennen, dass die Temperatur bis 15:00 Uhr ansteigt, und dann mit abnehmender Globalstrahlung und sinkenden Lufttemperaturen abnimmt. In 22 cm Tiefe, dem unteren Ende der Asphalttragschicht, steigt die Temperatur sogar bis 21:00 Uhr an. Um 24:00 Uhr ist die Temperatur an der Fahrbahnoberfläche geringer als an der Unterseite der Asphalttragschicht. Daran lässt sich deutlich erkennen, dass der Asphaltüberbau die an der Fahrbahnoberfläche aufgenommene Energie je nach Potenzial der Wärmeleitfähigkeit an die darunterliegenden Schichten weiterleitet und diese dann zeitversetzt wieder abgegeben wird.

Abschließend wurden auf das mehrschichtige Modell reale Messdaten zu Lufttemperatur, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit für einen Monat angewendet. Bei den Wetterdaten handelt es sich um Aufzeichnungen des Deutschen Wetterdienstes für Mannheim im August 2003. Die Tagesganglinien für die Lufttemperatur und Globalstrahlung konnten im Finite-Elemente-Modell hinterlegt werden. Bei der für die Berechnungen verwendeten Windgeschwindigkeit handelt es sich um einen Mittelwert über den Betrachtungszeitraum. Die im August 2003 in Mannheim ermittelten Tagesverläufe der Lufttemperatur und der Globalstrahlung sind in Bild 6-13 dargestellt.

Der Monat August 2003 war einer der heißesten Monate seit Beginn der Wetteraufzeichnungen. In Mannheim wurden Tageshöchsttemperaturen von  $38,6 \text{ }^\circ\text{C}$  und Globalstrahlungen von bis zu  $833 \text{ W/m}^2$  gemessen. Die Albedo der Fahrbahnoberfläche wurde für die Modellberechnungen erneut mit 11 % und die atmosphärische Gegenstrahlung konstant mit  $300 \text{ W/m}^2$  angenommen. Die im Modell ermittelten Fahrbahnoberflächentemperaturen für diesen Monat sind in Bild 6-14 zu sehen.

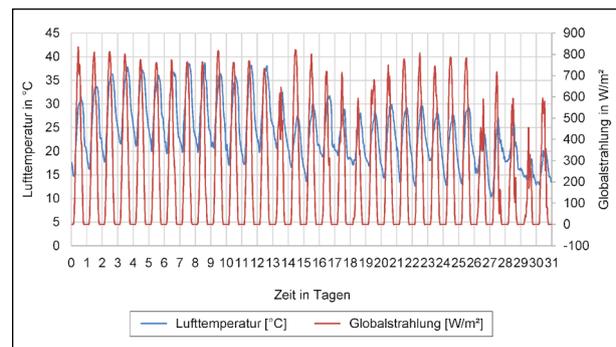


Bild 6-13: Lufttemperatur und Globalstrahlung in Mannheim für den Monat August 2003

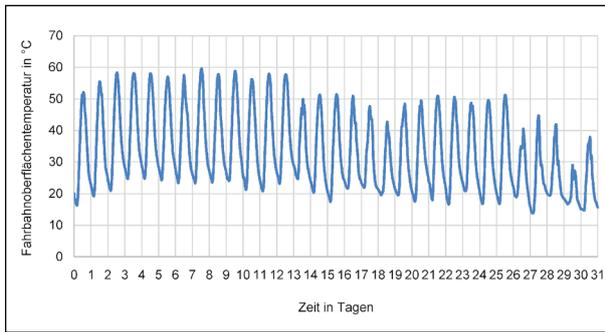


Bild 6-14: Fahrbahnoberflächentemperatur für einen Monat unter Verwendung der Klimadaten von Mannheim im August 2003

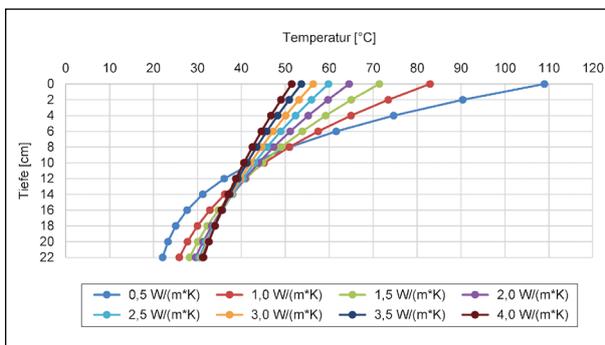


Bild 6-15: Temperaturgradienten an einer idealisierten Asphalt-schicht mit verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten

Die hier berechnete maximale Fahrbahnoberflächentemperatur liegt bei  $59,6\text{ °C}$  und befindet sich somit quantitativ in einem realistischen Bereich. Außerdem ist eine gute Korrelation zu den in Bild 6-13 dargestellten Lufttemperaturen und Globalstrahlungswerten erkennbar. Insbesondere wird deutlich, dass die Abkühlung der Fahrbahnoberfläche durch nächtliche Lufttemperaturen von  $> 20\text{ °C}$  (tropische Nächte) beeinträchtigt wird.

Das Einschichten-Modell besteht aus einer idealisierten  $3,50\text{ m}$  dicken Asphalt-schicht, die für die nachfolgenden Untersuchungen mit einer konstanten Strahlung von  $500\text{ W/m}^2$  für 10 Stunden belastet wurde. Die Lufttemperatur sowie die Ausgangstemperatur an der Fahrbahnoberfläche wurden auf  $20\text{ °C}$  festgelegt. Die Ergebnisse sollen dazu dienen, die Effekte der Materialkennwerte Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Rohdichte auf die Temperaturverteilung im Straßenoberbau aufzuzeigen. Die Ergebnisse sind aufgrund der idealisierten Randbedingungen nur qualitativ zu betrachten und dienen dazu, Tendenzen abzuleiten.

Als erstes wurde die Wärmeleitfähigkeit der Asphalt-schicht zwischen  $0,5$  und  $4,0\text{ W/(m}^*\text{K)}$  variiert und der Temperaturgradient nach einer zehnstündi-

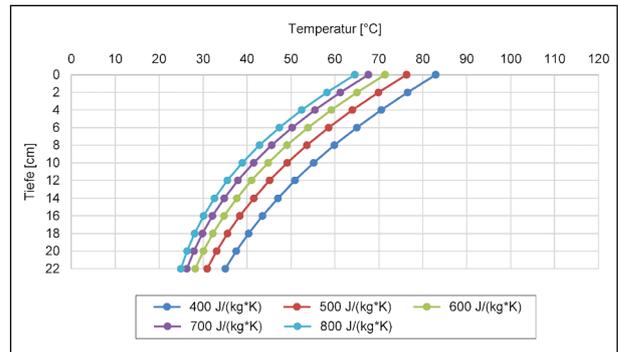


Bild 6-16: Temperaturgradienten an einer idealisierten Asphalt-schicht mit verschiedenen spezifischen Wärmekapazitäten

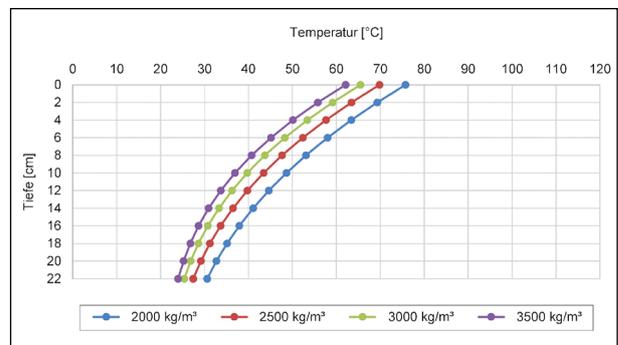


Bild 6-17: Temperaturgradienten an einer idealisierten Asphalt-schicht mit verschiedenen Rohdichten

gen Bestrahlung analysiert (siehe Bild 6-15). Es ist zu erkennen, dass an der Fahrbahnoberfläche die geringste Wärmeleitfähigkeit zu der höchsten Erwärmung führt. Diese Tendenz bleibt bis in eine Tiefe von ca.  $8\text{ cm}$  bestehen und wendet sich von dort an um. Ab einer Tiefe von ca.  $18\text{ cm}$  weist dann die Asphalt-schicht mit der höchsten Wärmeleitfähigkeit die höchste Temperatur auf. Die Differenz zwischen der Temperatur an der Fahrbahnoberfläche und in  $22\text{ cm}$  Tiefe wird mit zunehmender Wärmeleitfähigkeit der Asphalt-schicht geringer.

Die Entwicklung der Temperaturgradienten bei unterschiedlichen spezifischen Wärmekapazitäten ist in Bild 6-16 dargestellt. Am Verlauf wird ersichtlich, dass die Temperatur mit Zunahme der spezifischen Wärmekapazität abnimmt. Diese Tendenz setzt sich auch bei dem hier betrachteten Zeitpunkt nach 10 Stunden bis in eine Tiefe von  $22\text{ cm}$  fort, ist allerdings weniger stark ausgeprägt.

Ähnliche Beobachtungen können bei der Betrachtung der Temperaturgradienten bei unterschiedlichen Asphaltroh-dichten erzielt werden (siehe Bild 6-17). Die Zunahme der Asphaltroh-dichte führt hierbei zu einer Abnahme der Temperatur. Dieses Er-

gebnis ist während des Betrachtungszeitpunktes an der Fahrbahnoberfläche stärker ausgeprägt als in der Tiefe.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Modellberechnungen realistische und plausible Ergebnisse gezeigt haben. Im weiteren Verlauf werden die ermittelten thermophysikalischen und lichttechnischen Asphalteeigenschaften im Modell implementiert und Berechnungen analog zur praxisgerechten thermischen Beanspruchung im Bestrahlungsstand durchgeführt.

## 7 Thermophysikalische und lichttechnische Asphalteeigenschaften

Die thermophysikalischen und lichttechnischen Eigenschaften sind die wesentlichen Kenngrößen, die zur Beurteilung der Wärmeleitung und -speicherung im gebundenen Oberbau erforderlich sind. Die Vorgehensweise und die Ergebnisse der Untersuchung der thermophysikalischen Eigenschaften von ausgewählten Asphalten, die im Rahmen dieses Projektes hergestellt wurden, sind in Kapitel 7.1 beschrieben. Die Prüfungen und Ergebnisse zu den lichttechnischen Eigenschaften sind in Kapitel 7.2 dargestellt.

### 7.1 Thermophysikalische Eigenschaften

Die thermophysikalischen Eigenschaften eines Stoffes beeinflussen die Wärmeleitung und -speicherung maßgeblich. Einige Stoffgruppen weisen dabei typische Eigenschaften auf, die im Wesentlichen vom strukturellen und konstruktiven Aufbau des Bau- bzw. Werkstoffes bestimmt werden. Zu den die Wärmeleitung und -speicherung beeinflussenden Kenngrößen eines Stoffes zählen seine Dichte, die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität.

#### 7.1.1 Prüfverfahren

Zur Bestimmung der thermischen Transporteigenschaften wird das Heizbrückenverfahren Transient Hot Bridge (THB) verwendet (siehe Bild 7-1). Bei dieser instationären, also zeitabhängigen Messmethode, können mittels eines streifenförmigen elektrischen

Leiters, der sowohl als Joulsche Wärmequelle, als auch als Widerstandsthermometer dient, die Wärmeleitfähigkeit, die Temperaturleitfähigkeit und die Wärmekapazität bestimmt werden.

Das Grundprinzip sowie die Anordnung des Sensors zwischen zwei Probenhälften ist in Bild 7-2 dargestellt. Durch einen konstanten Heizstrom während der Messung wird sowohl die Probe als auch der Sensor erwärmt. Die thermischen Transporteigenschaften können anhand des zeitlichen Temperaturanstiegs des Sensors ermittelt werden.

Die Messungen erfolgen mit den Sensoren vom Typ THB6N (82 x 42 mm) und vom Typ THB6K/MFR (42 x 22 mm) (siehe Bild 7-3). Zur Bestimmung der ther-

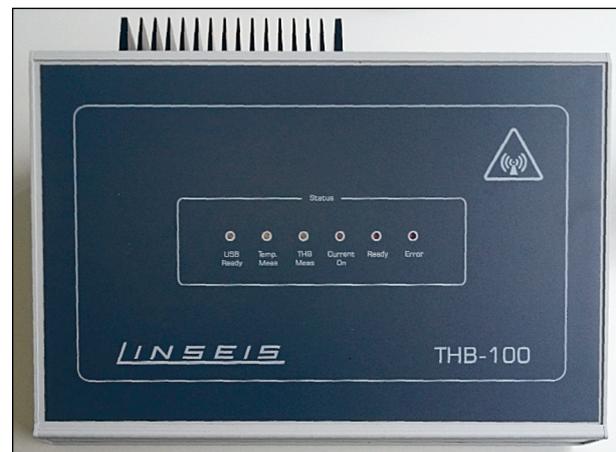


Bild 7-1: Messgerät: Heizbrückenverfahren Transient Hot Bridge (THB)

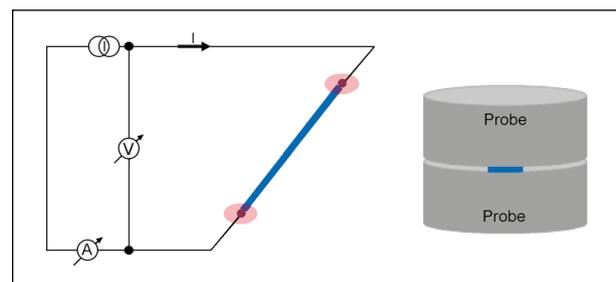


Bild 7-2: Grundprinzip und Probenanordnung des THB (eigene Darstellung nach [68])



Bild 7-3: Sensoren THB 6N (82 x 42 mm) links und THB6K/MFR (42 x 22 mm) mit Metallrahmen rechts

mischen Transporteigenschaften muss bei Einsatz des Sensors THB6N die Probendicke mindestens 5 mm betragen. Der Sensor THB6K/MFR hat einen Metallrahmen und ist nur für Flüssigkeiten, Pulver und Pasten geeignet. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes werden die thermischen Transporteigenschaften von natürlicher und künstlicher Gesteinskörnung (Schüttgüter mit einer Korngröße von 0,063 bis 2 mm), Bindemitteln in fester Form und Asphaltprobekörpern ermittelt.

### 7.1.2 Ergebnisse

An den Asphaltmischgutarten wurden die folgenden thermophysikalischen Eigenschaften ermittelt:

- Wärmeleitfähigkeit [ $W/(m \cdot K)$ ],
- spezifische Wärmekapazität [ $kJ/(kg \cdot K)$ ] und
- Temperaturleitfähigkeit [ $mm^2/s$ ].

Die messtechnische Erfassung erfolgte mittels des in Kapitel 7.1.1 beschriebenen THB-Messgeräts. Aus den in Kapitel 5 beschriebenen Asphaltmischgutvarianten wurden jeweils zwei Marshallprobekörper mit einem Durchmesser von 100 mm herge-

stellt und deren Schnittkreisflächen plangeschliffen (siehe Bild 7-4, oben links). Die Messungen wurden in einem auf 20 °C klimatisiertem Labor durchgeführt, in welchem die Probekörper mindestens 24 Stunden vor der Messung gelagert wurden.

An jedem Marshallprobekörperpaar wurden drei Messungen an jeweils vier Positionen durchgeführt. Hierzu wurde der Messsensor zwischen zwei plangeschliffenen Marshallprobekörpern platziert (Bild 7-4, oben rechts und unten links). Anschließend wurden die Probekörper mit einem 1.500 g schweren Stempel belastet und die Messung gestartet (siehe Bild 7-4, unten rechts).

Für die Auswertung der Messergebnisse wurde aus den 12 Einzelwerten der Mittelwert je Stoffeigenschaft ermittelt. Die gesamten Ergebnisse sind in Tabelle 7-1 dargestellt.

Eine grafische Darstellung der Wärmeleitfähigkeit für die Deckschichtvarianten aus Asphaltbeton (ACD) und Splittmastixasphalt (SMA) ist in Bild 7-5 dargestellt. Erwartungsgemäß wurde bei den Varianten mit EOS (blau) die geringste Wärmeleitfähigkeit ermittelt. Die Deckschichten mit Quarzit (gelb) als Gesteinskörnung liegen mit 2,60  $W/(m \cdot K)$  bis



Bild 7-4: MPK SMA-2 mit plangeschliffenen Schnittkreisflächen (o. l.), Platzierung des Messensors auf der Oberfläche (o. r.), Platzierung des Messensors zwischen zwei Marschallprobekörpern (u. l.), Belastung der Probekörper durch Stempel (u. r.)

Variante	Gestein	Binde- mittel	Rohdichte MPK [g/cm <sup>3</sup> ]	Wärme- leitfähigkeit $\lambda$ [W/(m*K)]	spezifische Wärmekapazität c [J/(kg*K)]	Temperatur- leitfähigkeit [m <sup>2</sup> /s]
ACD-1	Diabas	PmB	2,517	1,89	0,58	1,28
ACD-2	Quarzit	PmB	2,427	2,60	0,36	3,01
ACD-3	EOS	PmB	3,157	1,23	0,38	1,03
ACD-7	Quarzit	SynB	2,473	3,09	0,55	2,28
ACD-9	EOS	SynB	3,221	1,27	0,41	0,96
ACB-1	Diabas	PmB	2,617	1,57	0,32	1,87
ACB-2	Kalkstein	PmB	2,534	1,69	0,51	1,32
ACB-3	EOS	PmB	3,217	1,11	0,32	1,09
ACT-1	Diabas	StBB	2,561	-	-	-
ACT-2	Kalkstein	StBB	2,558	-	-	-
ACT-3	EOS	StBB	3,266	-	-	-
SMA-1	Diabas	PmB	2,493	1,56	0,52	1,20
SMA-2	Quarzit	PmB	2,407	2,78	0,60	1,94
SMA-3	EOS	PmB	3,115	1,29	0,59	0,70

Tab. 7-1: Auswertung der THB-Messungen

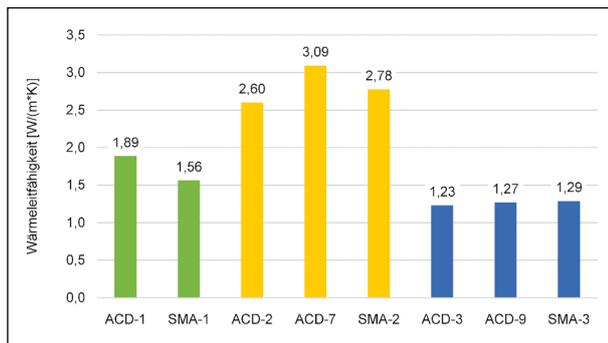


Bild 7-5: Wärmeleitfähigkeit für Deckschichtvarianten aus Asphaltbeton (ACD) und Splittmastixasphalt (SMA) mit unterschiedlichen Gesteinsarten (Diabas: grün; Quarzit: gelb; EOS: blau)

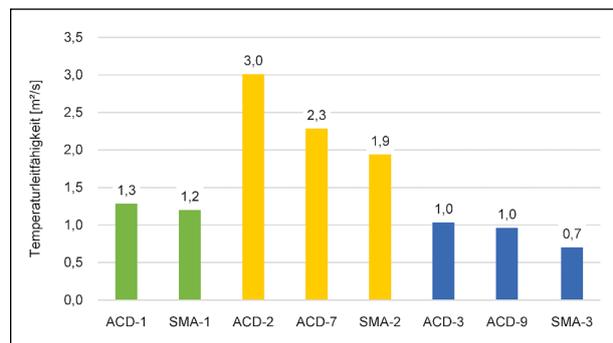


Bild 7-7: Temperaturleitfähigkeit für Deckschichtvarianten aus Asphaltbeton (ACD) und Splittmastixasphalt (SMA) mit unterschiedlichen Gesteinsarten (Diabas: grün; Quarzit: gelb; EOS: blau)

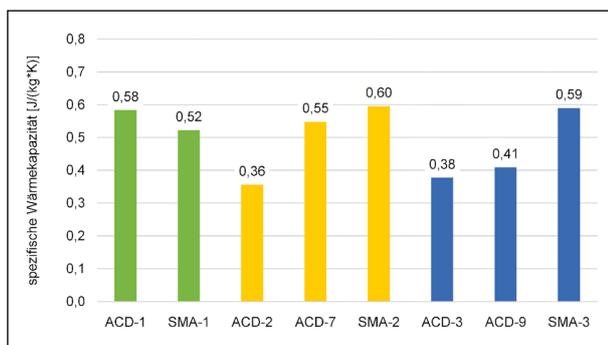


Bild 7-6: Spezifische Wärmekapazität für Deckschichtvarianten aus Asphaltbeton (ACD) und Splittmastixasphalt (SMA) mit unterschiedlichen Gesteinsarten (Diabas: grün; Quarzit: gelb; EOS: blau)

3,09 W/(m\*K) weitaus höher. Die Referenzvarianten mit Diabas (grün) liegen dazwischen.

Die spezifische Wärmekapazität sowie die Temperaturleitfähigkeit der Deckschichtvarianten aus ACD und SMA sind in Bild 7-6 und Bild 7-7 dargestellt.

Bereits bei den Prüfungen der Asphaltbinder-schicht-Varianten zeigten sich Schwierigkeiten mit dem Messverfahren auf. Da der Sensor keinen direkten Kontakt zu größeren Hohlräumen am Probekörper haben darf, waren Messungen bei den Probekörpern zur Asphaltbinderschicht nicht an allen Positionen möglich. Die Probekörper der Asphalt-

tragschicht-Varianten weisen, selbst an den geschliffenen Marshallprobekörpern größere Hohlräume auf, sodass hier keine Bestimmung der thermophysikalischen Eigenschaften stattfinden konnte.

## 7.2 Lichttechnische Eigenschaften

Zu den lichttechnischen Eigenschaften eines Stoffes zählt das Rückstrahlvermögen, auch Albedo genannt. Dieses gibt an, wie groß der Anteil der Strahlung im gesamten Sonnenspektrum ist, der vom Asphalt reflektiert wird. Die in Kapitel 5.2 hergestellten Asphaltdeckschichten weisen durch die Verwendung verschiedener Gesteinskörnungen, Bindemittel und Zuschlagstoffe unterschiedliche Rückstrahlvermögen auf.

Insgesamt wurden sechs Proben untersucht. Die 31 mm dicken Asphaltprobekörperplatten wurden im Walzsegmentverdichter hergestellt. Für den Probenhalter des in Kapitel 7.2.1 beschriebenen Prüfverfahrens wurden sie anschließend auf eine Grö-

ße von 198 mm mal 298 mm zurechtgeschnitten. Ausgewählt wurden die Varianten ACD-1, ACD-2, ACD-3, ACD-7 und ACD-9. Die Oberflächen von vier Proben wurden nach der Herstellung mit Glasbruch gestrahlt, um ein Abfahren des Bindemittelfilms an der Oberfläche zu simulieren und so den Einfluss der Helligkeit der verwendeten Gesteinskörnung untersuchen zu können. Tabelle 7-2 stellt die untersuchten Varianten mit Angabe der verwendeten Gesteinskörnung, Bindemittel und Behandlung der Oberfläche dar.

Die Varianten ACD-1 und ACD-7.1 stellen die Referenzvarianten mit unbehandelter Oberfläche dar. Die Varianten ACD-2, ACD-3, ACD-7.2 und ACD-9 wurden glasbruchgestrahlt, wodurch der Bindemittelfilm auf der Oberfläche der Gesteinskörnung entfernt wurde. Bei den Varianten ACD-2 und ACD-7.2 wurde eine helle Gesteinskörnung Quarzit und bei den Varianten ACD-3 und ACD-9 Elektroofenschlacke verwendet. Oberflächenaufnahmen der untersuchten Asphaltprobekörper sind in Bild 7-8 dargestellt.

Variante	Gesteinskörnung	Bindemittel	Behandlung Oberfläche
ACD-1	Diabas	Polymermodifiziertes Bindemittel	Keine
ACD-2	Quarzit	Polymermodifiziertes Bindemittel	Glasbruchgestrahlt
ACD-3	Elektroofenschlacke	Polymermodifiziertes Bindemittel	Glasbruchgestrahlt
ACD-7.1	Quarzit	Synthetisches Bindemittel und Pigmente	Keine
ACD-7.2	Quarzit	Synthetisches Bindemittel und Pigmente	Glasbruchgestrahlt
ACD-9	Elektroofenschlacke	Synthetisches Bindemittel und Pigmente	Glasbruchgestrahlt

Tab. 7-2: Varianten und Beschreibung der untersuchten Proben

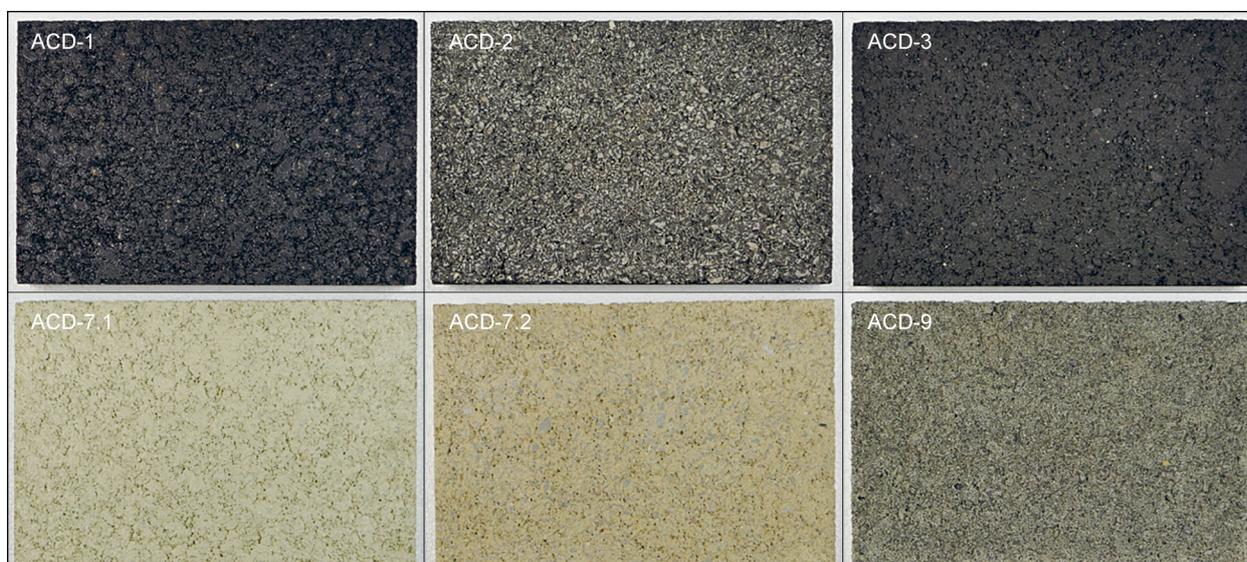


Bild 7-8: Oberflächenbilder der untersuchten Asphaltprobekörper

### 7.2.1 Prüfverfahren

Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE wurde beauftragt, die solaren Strahlungsreflexionsgrade nach ASTM E903-12 [69] zu bestimmen. Mit einer sogenannten RHOWIN-Ulbrichtkugel wurde die Hauptmessung der nah-normal-hemisphärischen Reflexionsspektren bei einem Einfallswinkel von 8° durchgeführt (vgl. Bild 7-9).

Der solare Strahlungsreflexionsgrad berechnet sich durch die Gewichtung der gemessenen nah-normal-hemisphärischen Reflexionsspektren im solaren Spektralbereich mit der hemisphärischen (globalen), solaren Spektralkurve nach ASTM G 173-03(2012) [71] und Integration gemäß ASTM E 903-12 [72]. Der solare Absorptionsgrad  $A$  lässt sich wie folgt aus dem solaren Reflexionsgrad  $R$  berechnen:  $A = 1 - R$ .

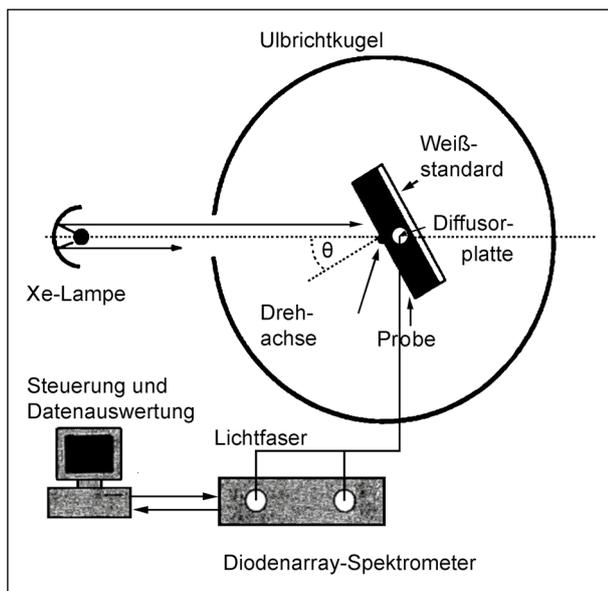


Bild 7-9: Horizontaler Schnitt durch die RHOWIN-Ulbrichtkugel [70]

### 7.2.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse zur Bestimmung des solaren Strahlungsreflexionsgrades nach ASTM E 903-12 [69] sind in Tabelle 7-3 in  $R_{nh}$  (nah-normal-hemisphärischer Reflexionsgrad) dargestellt und gelten für nahezu senkrechten Lichteinfall. Es ist zu beachten, dass nur zwei Nachkommastellen des Ergebnisses signifikant sind und die dritte Stelle lediglich zur Darstellung kleiner Unterschiede dient [70].

Erwartungsgemäß weist der Asphaltprobekörper von Variante ACD-1 ohne Glasbruchbestrahlung und mit dunklem Bindemittelfilm auf der Oberfläche den niedrigsten solaren Strahlungsreflexionsgrad mit einem Wert von 0,042 auf. Die zweite Referenzprobe, Variante ACD-7.1, weist mit 0,484 den höchsten Wert auf. Auch hier fand keine Glasbruchbestrahlung statt, wodurch das synthetische Bindemittel mit Pigmenten einen hellen Film auf der Oberfläche bildet.

Der solare Strahlungsreflexionsgrad der Variante ACD-3 ist mit einem Wert von 0,046 trotz Glasbruchstrahlen nur minimal über dem Referenzwert der Variante ACD-1. Dies verdeutlicht, wie dunkel die Elektroofenschlacke ist. Auch die Verwendung des synthetischen Bindemittels mit Pigmenten (Variante ACD-9) hebt den Wert auf 0,116 nur geringfügig an.

Anders verhält sich Variante ACD-2, welche durch das Glasbruchstrahlen eine deutlich hellere Oberfläche aufweist und mit einem Wert von 0,125 sogar über dem solaren Strahlungsreflexionsgrad der Variante ACD-9 liegt. Durch die Verwendung des synthetischen Bindemittels mit weißen Pigmenten kann sogar ein Wert von 0,370 erzielt werden.

Variante	Gesteinskörnung	Bindemittel	Behandlung Oberfläche	Solarer Strahlungsreflexionsgrad $R_{nh}$ [-]
ACD-1	Diabas	Polymermodifiziertes Bindemittel	Keine	0,042
ACD-2	Quarzit	Polymermodifiziertes Bindemittel	Glasbruchgestrahlt	0,125
ACD-3	Elektroofenschlacke	Polymermodifiziertes Bindemittel	Glasbruchgestrahlt	0,046
ACD-7.1	Quarzit	Synthetisches Bindemittel und Pigmente	Keine	0,484
ACD-7.2	Quarzit	Synthetisches Bindemittel und Pigmente	Glasbruchgestrahlt	0,370
ACD-9	Elektroofenschlacke	Synthetisches Bindemittel und Pigmente	Glasbruchgestrahlt	0,116

Tab. 7-3: Solare Strahlungsreflexionsgrade nach ASTM E 903-12 [70]

### 7.3 Praxisgerechte thermische Beanspruchung im Laboratorium

Neben der theoretischen Bestimmung von Temperaturgradienten mit Modellrechnungen sind in diesem Projekt Untersuchungen zur Bestimmung von Temperaturgradienten mit praxisgerechter thermischer Beanspruchung im Laboratorium durchgeführt worden. Hierzu sind Asphaltaufbauten, die aus den im Projekt konzipierten Asphalten hergestellt wurden, mit künstlichem Sonnenlicht (Sonnenlichtlampen) bestrahlt bzw. erwärmt worden.

#### 7.3.1 Bestrahlungsstand und Vorbereitungen

Für die praxisgerechte thermische Beanspruchung im Laboratorium wurde eigens für dieses Forschungsprojekt eine Versuchsanlage (Bestrahlungsstand) zur Simulation von Globalstrahlung auf Asphaltprobekörper konzipiert und gebaut. Der Bestrahlungsstand besteht aus einer Holzkiste mit einer Grundfläche von 125 cm x 56 cm und einer Höhe von 50 cm sowie einer höhenverstellbaren Traverse mit vier Keramikfassungen zur Aufnahme von Sonnenlichtlampen.

Zur Erzielung vergleichbarer Ergebnisse wurden die Probekörper für den Bestrahlungsstand im Walzsek-torverdichter (WSV) hergestellt. Der Standardasphaltaufbau, der für die Untersuchungen verwendet wurde, ist aufgrund der limitierten Herstellungshöhe von 12 cm im WSV in zwei Teilen hergestellt worden. Die Asphaltdecke besteht aus einer 4 cm dicken Asphaltdeckschicht AC 8 D S und einer 8 cm dicken Asphaltbinderschicht AC 16 B S, die heiß auf heiß verdichtet wurden. Die Tragschicht

AC 22 T S wurde ebenfalls zweischichtig mit jeweils 6 cm Schichtdicke hergestellt bzw. heiß auf heiß verdichtet. Durch die limitierte Herstellungshöhe konnte kein Aufbau hergestellt werden, der einer Belastungsklasse nach den RStO 12 entspricht. Die verwendeten Asphaltdecken mit einer Dicke von 12 cm, entsprechen den Anforderungen an die Asphaltdecken ab Bk10 der RStO 12. Die Asphalttragschicht hingegen erfüllt mit ihren 12 cm lediglich die Anforderungen der Bk3,2. Eine Auswahl der Varianten ist in Bild 7-10 dargestellt.

Aus den Daten von Vorversuchen wurde ersichtlich, dass sich an der groben und hohlraumreichen Schichtgrenze zwischen ABS und ATS, die sich aufgrund der zweigeteilten Herstellung zwangsläufig ergibt, kein realistischer Wärmeübergang einstellt. Die Temperaturverläufe zeigten an dieser Position eine starke Unstetigkeit im Temperaturgradienten auf. Aus diesem Grund wurde zur Herstellung eines realistischen Wärmeübergangs, der einer Verdichtung heiß auf heiß entspricht, eine Wärmeleitpaste in der Schichtgrenze zwischen ABS und ATS eingesetzt, aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit der Paste kann hiermit von einer realitätsnahen Wärmeübertragung zwischen den Schichten ausgegangen werden.

Zum Einsetzen der Temperatursensoren wurden in regelmäßigen Abständen Bohrungen bis zur Plattenmitte (ca. 12 cm tief) in den Asphaltdecken und den Asphalttragschichten angelegt. Damit beinhaltet jeder Asphaltaufbau (d = 24 cm) sechs Temperatursensoren. Die Anordnung der Sensoren erfolgte im Abstand von 4 cm, beginnend bei 2 cm unter OK Asphaltdeckschicht. Daraus ergeben sich die Sen-

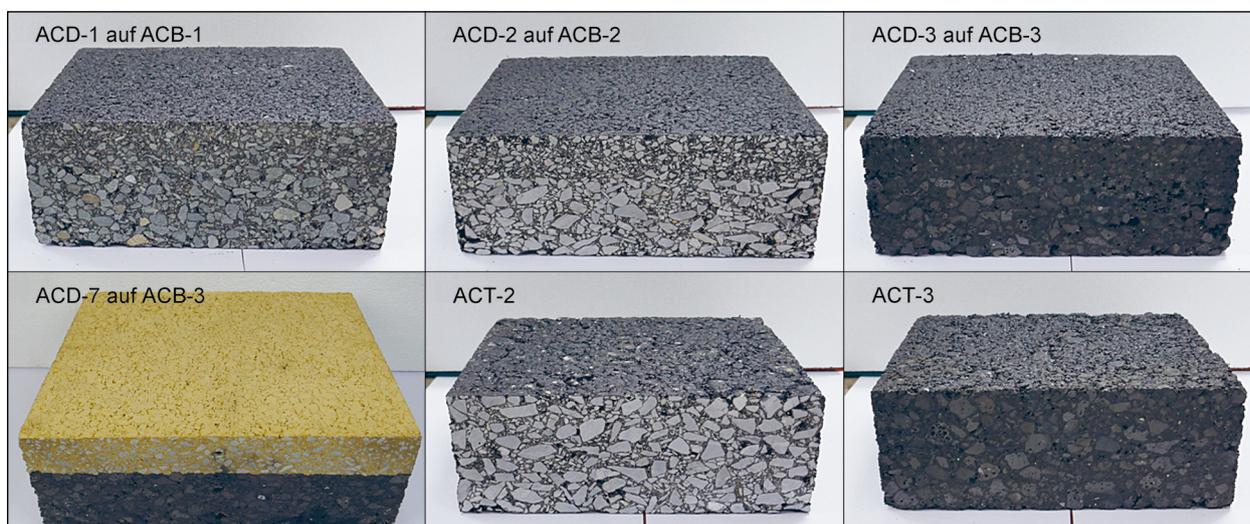


Bild 7-10: Beispielfotos der Probekörper für die Bestrahlungsanlage

sorpositionen bei 20; 60; 100; 140; 180; und 220 mm unter OK ADS. Zusätzlich zu den sechs Sensoren im Asphaltaufbau wurde ein Temperatursensor in einer Tiefe von 260 cm unter OK ADS eingebaut, d. h. in der ungebundenen Sandschicht. Dieser Temperatursensor dient ausschließlich zur Kontrolle des Wärmedurchgangs durch den gebundenen Asphaltaufbau.

In der Holzkiste des Bestrahlungsstandes wurden jeweils zwei Asphaltprobekörper auf eine 25 cm dicke Sandschicht platziert und anschließend die Temperatursensoren in die Bohrungen eingesetzt. Danach erfolgte das Auffüllen der Holzkiste mit Sand bis zur OK Asphaltdeckschicht.

Die Bestrahlung erfolgte mit sogenannten Sonnenlichtlampen. In Vorversuchen wurden verschiedene Anordnungen (horizontale Ausrichtung) und Höhen (vertikale Ausrichtung) der Lampen untersucht. Die hier in den Untersuchungen verwendete Anordnung von 4 Lampen mit einer Höhe von 53 cm über OK ADS bietet die gleichmäßigste Bestrahlung auf den Asphaltprobekörpern. Zusätzlich, zur Reduzierung von Strahlungsverlusten und Abkühlungseffekte durch Luftzug, wurde der Bestrahlungsstand seitlich mit weißen EPS-Platten begrenzt. Die fertige Prüfeinrichtung ist in Bild 7-11 dargestellt.

Durch die gewählte Anordnung der Sonnenlichtlampen konnte eine gleichmäßige Bestrahlung der zwei Probekörper und des mittig positionierten Pyranometers erreicht werden. Die Bestrahlungsstärke entspricht dabei im Mittel  $600 \text{ W/m}^2$ . Die Untersuchungen fanden in einem klimatisierten Laboratorium bei  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  Lufttemperatur statt.

In Vorversuchen wurde eine zyklische Aufheizung und Abkühlung (jeweils 12 Stunden) der Probekörper durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass ab dem vierten Aufheizzyklus in der Deckschicht ein Temperaturmaximum erreicht wird. Mit weiteren



Bild 7-11: Bestrahlungsstand mit zwei unterschiedlichen Asphaltaufbauvarianten und Pyranometer in der Mitte

Vorversuchen konnte gezeigt werden, dass eine durchgängige Bestrahlung (ohne Abkühlphasen) zu einem bestimmten Zeitpunkt zu den gleichen Ergebnissen führt. Zwecks Zeitraffung wurde für die Durchführung der Untersuchungen zur praxisgerechten thermischen Beanspruchung eine Bestrahlungsdauer von 27 Stunden festgelegt, die einer Bestrahlungsintensität von vier Aufheizzyklen entspricht.

Bei der praxisgerechten thermischen Beanspruchung ist vorrangig der Einfluss unterschiedlicher thermo-physikalischer Asphalteeigenschaften untersucht worden. Daher wurde keine Glasbruchbestrahlung (vgl. Kapitel 6.2) zur Herstellung einer realitätsnahen Oberfläche durchgeführt. Vielmehr sind hier die Extrema dunkle Oberfläche (PmB) und eine sehr helle Oberfläche (SynB) gegenübergestellt worden, damit der Einfluss einer aufgehellten Deckschicht bei Verwendung gleicher Gesteinskörnung deutlich wird.

### 7.3.2 Ergebnisse

Insgesamt wurden zehn unterschiedliche Asphaltaufbauten in sieben Versuchsreihen im Bestrahlungsstand untersucht. Vier Messungen wurden dabei zur Kontrolle und zur Feststellung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wiederholt. Tabelle 7-4 zeigt eine Übersicht der unterschiedlichen Aufbau-

Versuchsreihe	Asphaltdeckschicht	Asphaltbinderschicht	Asphalttragschicht
1-1	ACD-1 (D;PmB)	ACB-1 (D)	ACT-1 (D)
1-2	ACD-3 (E;PmB)	ACB-3 (E)	ACT-3 (E)
2-1	ACD-7 (Q;SynB)	ACB-2 (K)	ACT-2 (K)
2-2	ACD-2 (Q;PmB)	ACB-2 (K)	ACT-2 (K)
3-1*	ACD-7 (Q;SynB)	ACB-2 (K)	ACT-2 (K)
3-2	ACD-9 (E;SynB)	ACB-3 (E)	ACT-3 (E)
4-1	ACD-7 (Q;SynB)	ACB-3 (E)	ACT-2 (K)
4-2	ACD-2 (Q;PmB)	ACB-3 (E)	ACT-3 (E)
5-1	ACD-2 (Q;PmB)	ACB-3 (E)	ACT-2 (K)
5-2	ACD-7 (Q;SynB)	ACB-3 (E)	ACT-3 (E)
6-1	ACD-9 (E;SynB)	ACB-3 (E)	ACT-2 (K)
6-2*	ACD-7 (Q;SynB)	ACB-3 (E)	ACT-3 (E)
7-1*	ACD-7 (Q;SynB)	ACB-3 (E)	ACT-2 (K)
7-2*	ACD-9 (E;SynB)	ACB-3 (E)	ACT-3 (E)

D Diabas      \* Wiederholungsversuch  
E EOS            wärmeleitend  
K Kalkstein  
Q Quarzit        wärmedämmend

Tab. 7-4: Übersicht der im Bestrahlungsstand untersuchten Aufbauten

ten. Die thermophysikalischen Eigenschaften der jeweiligen Asphalt-schichten sind farblich markiert.

Je Versuchsreihe konnten zwei unterschiedliche Aufbauten im Bestrahlungsstand untersucht werden, daraus ergibt sich die Bezeichnung der Versuchsreihen mit fortlaufender Nummerierung bei der ersten Ziffer und der zweiten Ziffer als Angabe für die Position im Bestrahlungsstand (1 = links; 2 = rechts).

In der ersten Versuchsreihe wurden die Aufbauvarianten 1-1 und 1-2 einer thermischen Beanspruchung über 27 Stunden ausgesetzt. Die Variante 1-1 ist die Referenzvariante aus Diabas mit einer mittleren Wärmeleitfähigkeit in allen Asphalt-schichten. Daneben wurde die Variante 1-2 mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit in allen Schichten untersucht; zur Herstellung dieser Variante wurde die EO-Schlacke verwendet.

Mit dieser Versuchsreihe soll gezeigt werden, wie sich die Verwendung einer Gesteinskörnung mit geringer Wärmeleitfähigkeit auf den Temperaturgradienten des gebundenen Oberbaus auswirkt. Die Aufbauten sind in Tabelle 7-5 und die Temperaturgradienten in Bild 7-12 dargestellt.

Die Versuchsergebnisse zeigen deutlich, dass geringe Wärmeleitfähigkeiten in allen Schichten des gebundenen Oberbaus zu höheren Temperaturen im Bereich der Deckschicht führen. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Temperatursteigerung im

Bereich der Asphaltbinderschicht abnimmt und damit im Bereich der Tragschicht ein geringerer Temperaturanstieg als bei der Referenzvariante gemessen wurde.

Für die zweite Versuchsreihe wurden zwei Aufbauten mit jeweils gleicher Gesteinskörnung in den Asphalt-schichten verwendet. Es handelt sich hierbei um Varianten mit hoher Wärmeleitfähigkeit, die sich ausschließlich durch das verwendete Bindemittel in der ADS unterscheiden. Für die Variante 2-1 wurde ein künstliches Bindemittel mit weißen Pigmenten verwendet, die Variante 2-2 enthält ein polymermodifiziertes Bitumen in der Deckschicht.

Die Versuchsreihe soll zeigen, ob durch eine höhere Wärmeleitfähigkeit eine schnellere Ableitung der Wärme in kühlere (ungebundene) Schichten möglich und zweckmäßig ist. Gleichzeitig wird der Unterschied zwischen einer dunklen und einer hellen ADS aufgezeigt. Mit der sehr hellen ADS soll eine Reduzierung des Wärmeeintrages in Deckschicht erreicht werden. Tabelle 7-6 enthält die Beschreibung der Aufbauten und die Temperaturgradienten sind in Bild 7-13 abgebildet.

Es ist erkennbar, dass eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit zu insgesamt höheren Temperaturen im gesamten gebundenen Oberbau führt, der Verlauf der Gradienten der Varianten 1-1 und 2-2 ist dabei nahezu parallel. Des Weiteren ist erkennbar, dass durch die sehr helle Oberfläche der ADS, eine

Versuchsreihe	AC 8 D S (40 mm)	AC 16 B S (80 mm)	AC 22 T S (120 mm)
1-1	Diabas/PmB	Diabas/PmB	Diabas/StbB
1-2	EOS/PmB	EOS/PmB	EOS/StbB

Tab. 7-5: Aufbauten der Versuchsreihen 1-1 und 1-2

Versuchsreihe	AC 8 D S (40 mm)	AC 16 B S (80 mm)	AC 22 T S (120 mm)
1-1	Diabas/PmB	Diabas/PmB	Diabas/StbB
2-1	Quarzit/SynB	Kalkstein/PmB	Kalkstein/StbB
2-2	Quarzit/PmB	Kalkstein/PmB	Kalkstein/StbB

Tab. 7-6: Aufbauten der Versuchsreihen 1-1, 2-1 und 2-2

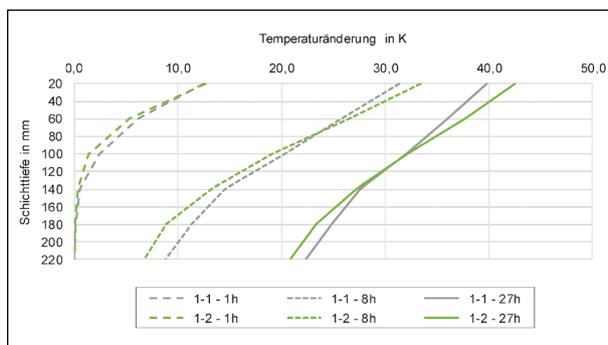


Bild 7-12: Temperaturgradienten der Versuchsreihen 1-1 und 1-2 nach 1, 8 und 27 Stunden bei einer Bestrahlung von ca. 600 W/m<sup>2</sup>

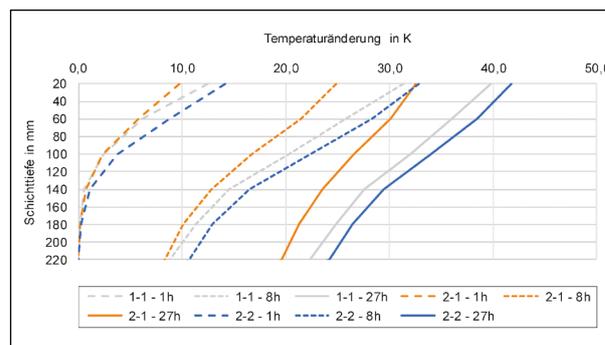


Bild 7-13: Temperaturgradienten der Versuchsreihen 1-1, 2-1 und 2-2 nach 1, 8 und 27 Stunden bei einer Bestrahlung von ca. 600 W/m<sup>2</sup>

erhebliche Temperaturreduzierung erreicht werden kann.

Mit der dritten Versuchsreihe wurde die erste Wiederholungsmessung zum Zweck der Kontrolle der Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse durchgeführt. Daher ist die Variante 3-1 identisch zu Variante 2-1. Zusätzlich wurde die Variante 3-2 untersucht, die in allen Schichten aus EO-Schlacke besteht und eine helle ADS aufweist. Hierbei sollte die Kombination einer sehr hellen Deckschicht und eines wärmedämmenden Aufbaus untersucht werden. Die Aufbauten sind in Tabelle 7-7 und die Temperaturgradienten in Bild 7-14 dargestellt.

Hierbei ist zu sehen, dass der Temperaturgradient der Variante 3-2 qualitativ ähnlich zur Referenzvariante 1-1 und der Variante 2-2 (hier nur nach 27 Stunden) verläuft und in der Tragschicht eine weitere Reduzierung der Temperatur gemessen wurde. Im Vergleich zur wärmeleitenden Variante 3-1 ist bei Variante 3-2 im Bereich der Tragschicht eine wesentliche Temperaturreduzierung festzustellen.

Die bisherigen Ergebnisse haben erwartungsgemäß gezeigt, dass eine helle ADS die Temperaturen im Oberbau deutlich reduzieren kann. In Kombination mit einer wärmeleitenden Gesteinskörnung in der ADS wurden in der Deckschicht die geringsten

Temperaturerhöhungen gemessen, dagegen wurden mit einer wärmedämmenden Gesteinskörnung in der ADS höhere Temperaturen aufgezeichnet. Daher werden in den nachfolgenden Versuchsreihen verschiedene Kombination von wärmeleitenden und wärmedämmenden Schichten bzw. Schichtfolgen zum Zweck der weiteren Temperaturreduzierung im gebundenen Oberbau untersucht.

Die Aufbauten der vierten Versuchsreihe bestehen aus Kombinationen von wärmeleitenden und wärmedämmenden Asphalttschichten sowie einer Variation der Deckschichtelligkeit. Die Variante 4-1 hat eine hohe Wärmeleitfähigkeit (Quarzit) und enthält das helle Bindemittel (SynB) in der Deckschicht, die Binderschicht ist wärmedämmend (EOS) und die Tragschicht wärmeleitend (Kalkstein). Die Variante 4-2 hat ebenfalls eine hohe Wärmeleitfähigkeit in der Deckschicht enthält hier aber das dunkle polymermodifizierte Bindemittel, die Binder- und Tragschicht sind beide aus EO-Schlacke hergestellt, also wärmedämmend. Die Aufbauten können Tabelle 7-8 entnommen werden und die Temperaturgradienten sind in Bild 7-15 dargestellt.

Auch bei dieser Versuchsreihe ist der Unterschied zwischen einer dunklen und eine hellen Deckschicht deutlich sichtbar. Durch die wärmedämmende As-

Versuchsreihe	AC 8 D S (40 mm)	AC 16 B S (80 mm)	AC 22 T S (120 mm)
1-1	Diabas/PmB	Diabas/PmB	Diabas/StbB
2-2	Quarzit/PmB	Kalkstein/PmB	Kalkstein/StbB
3-1*(2-1)	Quarzit/SynB	Kalkstein/PmB	Kalkstein/StbB
3-2	EOS/SynB	EOS/PmB	EOS/StbB

Tab. 7-7: Aufbauten der Versuchsreihen 1-1, 2-2, 3-1 und 3-2

Versuchsreihe	AC 8 D S (40 mm)	AC 16 B S (80 mm)	AC 22 T S (120 mm)
1-1	Diabas/PmB	Diabas/PmB	Diabas/StbB
3-1*(2-1)	Quarzit/SynB	Kalkstein/PmB	Kalkstein/StbB
3-2	EOS/SynB	EOS/PmB	EOS/StbB
4-1	Quarzit/SynB	EOS/PmB	Kalkstein/StbB
4-2	Quarzit/PmB	EOS/PmB	EOS/StbB

Tab. 7-8: Aufbauten der Versuchsreihen 1-1, 3-1, 3-2, 4-1 und 4-2

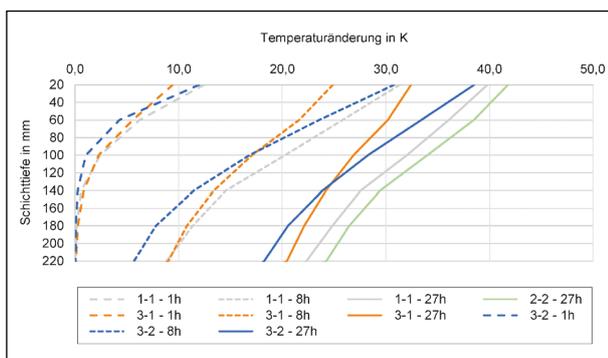


Bild 7-14: Temperaturgradienten der Versuchsreihen 1-1, 2-2, 3-1 und 3-2 nach 1, 8 und 27 Stunden bei einer Bestrahlung von ca. 600 W/m<sup>2</sup>

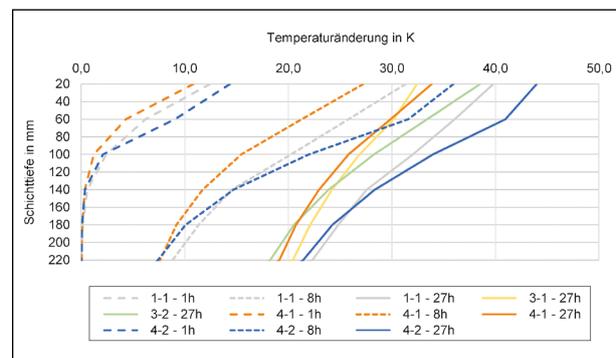


Bild 7-15: Temperaturgradienten der Versuchsreihen 1-1, 3-1, 3-2, 4-1 und 4-2 nach 1, 8 und 27 Stunden bei einer Bestrahlung von ca. 600 W/m<sup>2</sup>

phaltbinderschicht wird die Wärmeableitung aus der ADS derart vermindert, dass es zu einem Wärmestau in der Deckschicht kommt. Daher weist die Variante 4-2 bereits nach einer Bestrahlungsdauer von 8 Stunden höhere Temperaturen in der Deckschicht auf als die Variante 4-1 nach 27 Stunden. Bei der Variante 4-1 ist der Temperaturanstieg durch die helle Oberfläche deutlich geringer, dennoch ist auch hier ein Wärmestau in der Deckschicht zu erkennen. Im Vergleich zur Variante 3-1 weist die Variante 4-1 etwas höhere Temperaturen in der Deckschicht auf, im Bereich der ABS und ATS wurden geringere Temperaturen gemessen.

Bei der fünften Versuchsreihe wurden die lediglich die Asphaltdecken aus der Versuchsreihe 4 getauscht. D. h. für die Variante 5-1 liegt die dunkle ADS auf der wärmedämmenden ABS mit wärmeleitender ATS und für die Variante 5-2 liegt die helle ADS auf der wärmedämmenden ABS und ATS. Eine Übersicht der Aufbauten ist in Tabelle 7-9 dargestellt und die Temperaturgradienten sind in Bild 7-16 abgebildet.

Durch die Variation der Asphaltdecken in den Versuchsreihen 4 und 5 zeigt sich, dass die Variante 5-2 im direkten Vergleich zur Variante 4-1 eine ge-

Versuchsreihe	AC 8 D S (40 mm)	AC 16 B S (80 mm)	AC 22 T S (120 mm)
1-1	Diabas/PmB	Diabas/PmB	Diabas/StbB
3-2	EOS/SynB	EOS/PmB	EOS/StbB
4-1	Quarzit/SynB	EOS/PmB	Kalkstein/StbB
4-2	Quarzit/PmB	EOS/PmB	EOS/StbB
5-1	Quarzit/PmB	EOS/PmB	Kalkstein/StbB
5-2	Quarzit/SynB	EOS/PmB	EOS/StbB

Tab. 7-9: Aufbauten der Versuchsreihen 1-1, 3-2, 4-1, 4-2, 5-1 und 5-2

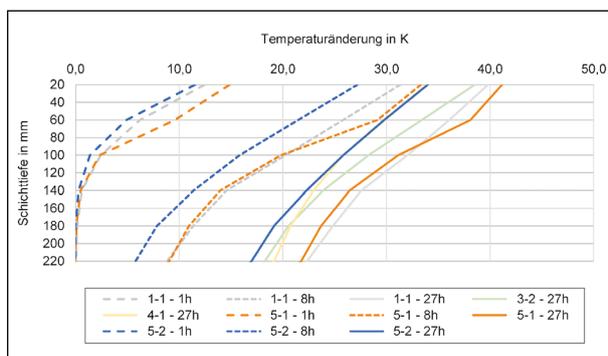


Bild 7-16: Temperaturgradienten der Versuchsreihen 1-1, 3-2, 4-1, 5-1 und 5-2 nach 1, 8 und 27 Stunden bei einer Bestrahlung von ca. 600 W/m<sup>2</sup>

ringere Temperatur in der Asphalttragschicht bei gleichen Temperaturen in der Asphaltdecke aufweist. Insgesamt konnte mit der Variante 5-2 eine Temperaturreduzierung von 6,3 K in der ADS und 5,3 K in der ATS im Vergleich zur Referenzvariante erzielt werden.

In der Versuchsreihe 6 wurde eine Variation der Wärmeleitfähigkeit in der ADS untersucht, die Variante 6-1 wurde mit hellem Bindemittel und wärmedämmender Gesteinskörnung (EOS) hergestellt. Damit unterscheidet sich die Variante 6-1 ausschließlich durch die Wärmeleitfähigkeit in der ADS von der Variante 4-1. Variante 6-2 ist eine Wiederholungsmessung, der Aufbau ist identisch mit der Variante 5-2. Tabelle 7-10 enthält die Beschreibung der Asphaltaufbauten und die Temperaturgradienten sind in Bild 7-17 dargestellt.

Im Vergleich der Variante 6-1 und 4-1 zeigt sich, dass durch die Verwendung einer Gesteinskörnung mit geringerer Wärmeleitfähigkeit in der ADS eine höhere Temperatur in der Deckschicht zu beobachten ist, daraus resultiert dann ebenfalls eine höhere Temperatur in der ATS. Bei der Wiederholungsmessung Variante 6-2 sind Abweichungen von 1,2 K (ATS) und 1,4 K (ADS) im Vergleich zur Variante 5-2 zu beobachten.

Versuchsreihe	AC 8 D S (40 mm)	AC 16 B S (80 mm)	AC 22 T S (120 mm)
1-1	Diabas/PmB	Diabas/PmB	Diabas/StbB
3-2	EOS/SynB	EOS/PmB	EOS/StbB
4-1	Quarzit/SynB	EOS/PmB	Kalkstein/StbB
6-1	EOS/SynB	EOS/PmB	Kalkstein/StbB
6-2*(5-2)	Quarzit/SynB	EOS/PmB	EOS/StbB

Tab. 7-10: Aufbauten der Versuchsreihen 1-1, 3-2, 4-1, 6-1 und 6-2

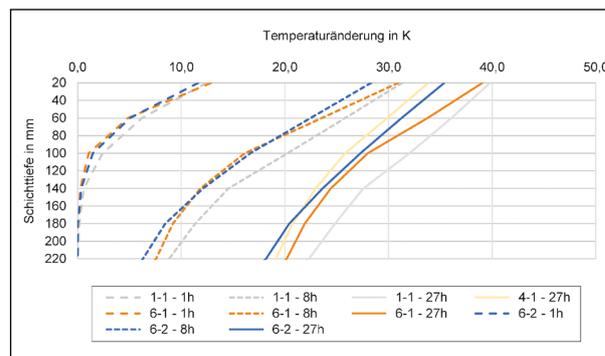


Bild 7-17: Temperaturgradienten der Versuchsreihen 1-1, 4-1, 6-1 und 6-2 nach 1, 8 und 27 Stunden bei einer Bestrahlung von ca. 600 W/m<sup>2</sup>

Die Versuchsreihe 7 wurde zwecks Prüfung der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse durchgeführt. Hierbei ist Variante 7-1 gleich mit der Variante 4-1 und die Variante 7-2 entspricht der Variante 3-2. Die Aufbauten sind in Tabelle 7-11 und die Temperaturgradienten in Bild 7-18 dargestellt.

Obwohl aufgrund der geringen Anzahl von Wiederholungen und Wiederholungsmessungen keine belastbare Statistik zur Reproduzierbarkeit von Messergebnissen aufgestellt werden kann, zeigen die Ergebnisse der Wiederholungsmessungen nur ge-

ringe Abweichungen auf. Zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit wurden die absoluten Abweichungen für jeden der sieben Messpunkte (20 bis 260 mm) zu den ausgewerteten Zeitpunkten (1h, 8h, 27h) bestimmt. Für diese Abweichungen wurden der Mittelwert, das Maximum und das Minimum berechnet. Hiermit konnte festgestellt werden, dass bei den Wiederholungsmessungen zu den Versuchsreihen 5-2/6-2 die maximale absolute Abweichung von 1,47 K aufgetreten ist, der Mittelwert zwischen diesen beiden Versuchen liegt im Mittel bei 1,32 K. Die mittlere Abweichung aller Wiederholungsmessungen insgesamt beträgt 0,47 K.

Versuchsreihe	AC 8 D S (40 mm)	AC 16 B S (80 mm)	AC 22 T S (120 mm)
7-1*(4-1)	Quarzit/SynB	EOS/PmB	Kalkstein/StbB
7-2*(3-2)	EOS/SynB	EOS/PmB	EOS/StbB

Tab. 7-11: Aufbauten der Versuchsreihen 7-1 und 7-2

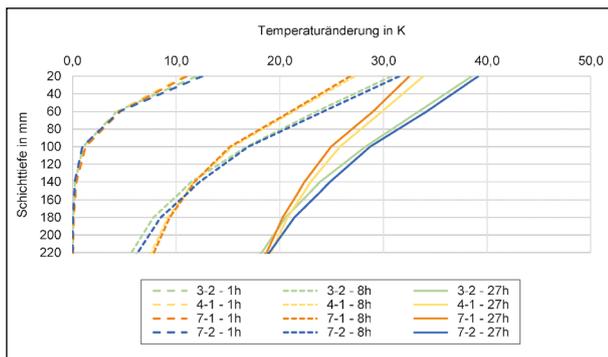


Bild 7-18: Temperaturgradienten der Versuchsreihen 7-1 und 7-2 nach 1, 8 und 27 Stunden bei einer Bestrahlung von ca. 600 W/m<sup>2</sup>

Zum Abschluss der Analyse ist in Bild 7-19 ein Vergleich aller Varianten dargestellt. Die Darstellung zeigt zu jeder Variante die Temperaturänderung in einer Tiefe von 20 mm und 220 mm sowie die Summe der Temperaturänderungen jeweils nach einer Bestrahlungsdauer von 27 Stunden. Die Summe der beiden Temperaturänderungen soll als Indikator für den gesamten vermeidbaren Wärmeeintrag in Bezug auf die Referenzvariante dienen. In der Darstellung sind die Varianten (mit Ausnahme der Referenz) von links nach rechts aufsteigend nach ihrem vermeidbaren Wärmeeintrag geordnet. Hierbei ist unmittelbar der Einfluss der Helligkeit der ADS erkennbar, alle Varianten mit heller ADS erreichen in beiden Schichten eine geringere Erwärmung als die Referenzvariante. Mit den Varianten mit dunkler Deckschicht konnte nach 27 Stunden keine Reduzierung der Wärme in der ADS (t = 20 mm) erreicht werden, in der ATS konnten bei drei Varianten durch die Materialadaption geringfügig geringere Tempe-

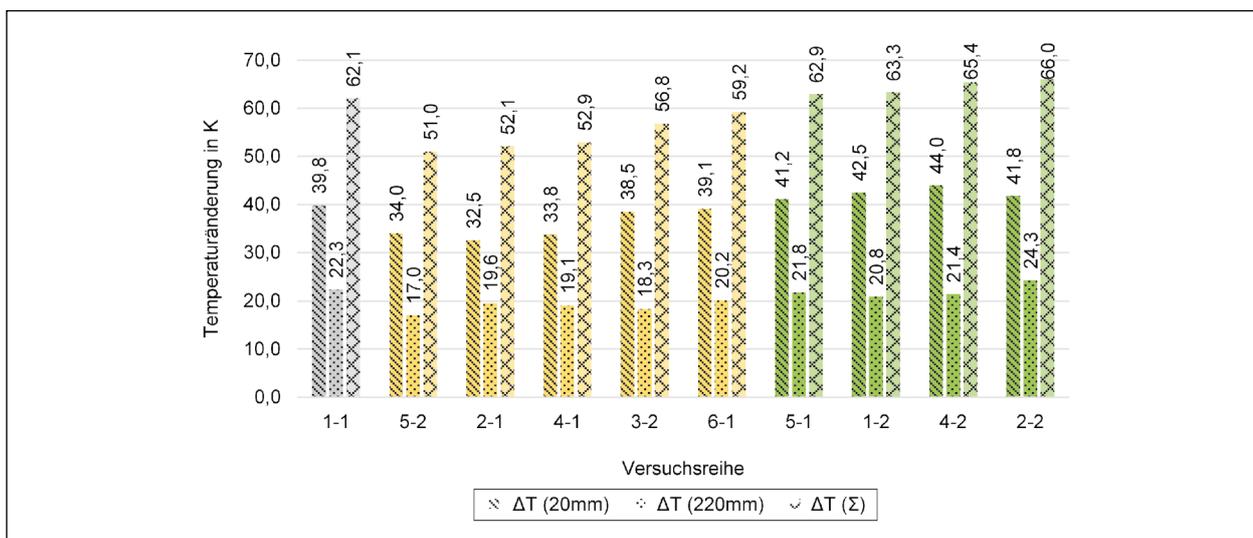


Bild 7-19: Temperaturänderungen nach 27 Stunden aller Versuchsreihen ohne Wiederholungsmessungen in der ADS [ΔT (20mm)] und ATS [ΔT (220mm)] sowie die Summe der Temperaturdifferenzen [ΔT (Σ)] als Indikator für die gesamte Temperaturerhöhung im gesamten Aufbau (gelb = helle ADS; grün = dunkle ADS)

raturdifferenzen (1,5 K) im Vergleich zur Referenzvariante gemessen werden, die vierte Variante überschreitet den Wert der Referenzvariante um 2 K.

Die besten Ergebnisse hinsichtlich einer Temperaturreduzierung im gebundenen Oberbau erzielte die Variante 5-2. Der gesamte vermeidbare Wärmeeintrag beträgt hierbei 11,1 K, in der ADS ist die Temperaturdifferenz im Vergleich zur Referenzvariante 5,8 K und in der ATS 5,3 K. Ähnlich gute Ergebnisse hinsichtlich der Temperaturen in der ADS zeigen sich bei den Varianten 2-1 und 4-1, hier ist die Temperatur in der ATS allerdings mehr als 2 K höher als bei Variante 5-2.

Es zeigt sich, dass die Varianten mit heller Deckenschicht die geringsten Erwärmungen im Oberbau erreichen. Quarzit als wärmeleitende Gesteinskörnung in der aufgehellten ADS (Varianten 2-1, 4-1 und 5-2) schneidet hierbei besser ab als die wärmedämmende EO-Schlacke (Variante 3-2 und 6-1). Der weitere Temperaturverlauf in der ABS und der ATS ist stark abhängig von der Temperatur in der ADS. Jedoch führt die Verwendung von wärmedämmender EO-Schlacke in der ABS und der ATS (Varianten 3-2 und 5-2 für aufgehellte ADS bzw. Varianten 1-2 und 4-2 für dunkle ADS) zu den niedrigsten Temperaturen an der Unterseite der ATS.

## 7.4 Modellanwendung der Laborergebnisse

Abschließend wurden die zuvor beschriebenen Ergebnisse der Untersuchungen im Bestrahlungsstand mit den Modellberechnungen verglichen. Hierzu wurden die Aufbauten in der Bestrahlungsanlage möglichst genau im Modell nachgebaut.

Zunächst wurde der dreischichtige Asphaltüberbau mit den Schichtdicken aus Kapitel 7.3.1 angelegt. In einer Materialdatenbank wurden für jede Variante Angaben zur Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit und spezifischer Wärmekapazität nach Kapitel 7.1.2 hinterlegt. Die unterschiedlichen Helligkeiten der Oberflächen wurden durch die in Kapitel 7.2.2 angegebenen Strahlungsreflexionsgrade berücksichtigt und angewendet.

In Anlehnung an die gemessenen Globalstrahlungswerte während der Versuche im Bestrahlungsstand wurde eine konstante Strahlung von 600 W/m<sup>2</sup> angesetzt. Die Ausgangs- und Umgebungstemperatur wurde auf 20 °C festgelegt. Die Werte für Konvektion (windstill) und Abstrahlungsenergie wurden gemäß der Angaben in Kapitel 6.1 übernommen.

Da die Wärmeleitfähigkeit und weitere thermophysikalische Eigenschaften mit dem in Kapitel 7.1.1 beschriebenen Messverfahren nicht für die Asphalttragschicht-Varianten bestimmt werden konnten, wurde für die Berechnungen auf die Werte der Asphaltbinderschichten der entsprechenden Materialien zurückgegriffen. In Tabelle 7-12 sind die variablen Eingangswerte für die Modellberechnungen je Versuchsreihe zusammengestellt.

Eine Modellrechnung am dreischichtigen Asphaltüberbau ist in Bild 7-20 beispielhaft für die Versuchsreihe 5-2 dargestellt. Zu sehen ist der Temperaturverlauf innerhalb der gebundenen Asphaltsschichten und der ungebundenen Tragschicht in Netzdarstellung. Die Ergebnisse sind nach einer Stunde (links), acht Stunden (Mitte) und 27 Stunden (rechts) ausgegeben.

Ein Vergleich der Modellberechnungen mit den Laborergebnissen in einer Tiefe von 20 mm (Mitte As-

Versuchsreihe	Strahlungsreflexionsgrad	AC 8 D S (40 mm)	AC 16 B S (80 mm)	AC 22 T S (120 mm)
1-1	0,042	$\lambda = 1,89 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,58 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 2,517 \text{ g/cm}^3$	$\lambda = 1,57 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,32 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 2,617 \text{ g/cm}^3$	$\lambda = 1,57 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,32 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 2,516 \text{ g/cm}^3$
1-2	0,042	$\lambda = 1,23 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,38 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 3,157 \text{ g/cm}^3$	$\lambda = 1,11 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,32 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 3,217 \text{ g/cm}^3$	$\lambda = 1,89 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,58 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 3,266 \text{ g/cm}^3$
2-1	0,484	$\lambda = 3,09 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,55 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 2,473 \text{ g/cm}^3$	$\lambda = 1,69 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,51 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 2,534 \text{ g/cm}^3$	$\lambda = 1,89 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,58 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 2,558 \text{ g/cm}^3$

Tab. 7-12: Variable Eingangswerte für die Modellrechnung je Versuchsreihe

Versuchsreihe	Strahlungsreflexionsgrad	AC 8 D S (40 mm)	AC 16 B S (80 mm)	AC 22 T S (120 mm)
2-2	0,042	$\lambda = 2,60 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,36 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 2,427 \text{ g/cm}^3$	$\lambda = 1,69 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,51 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 2,534 \text{ g/cm}^3$	$\lambda = 1,89 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,58 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 2,558 \text{ g/cm}^3$
3-2	0,484	$\lambda = 1,27 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,41 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 3,221 \text{ g/cm}^3$	$\lambda = 1,11 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,32 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 3,217 \text{ g/cm}^3$	$\lambda = 1,89 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,58 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 3,266 \text{ g/cm}^3$
4-1	0,484	$\lambda = 3,09 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,55 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 2,473 \text{ g/cm}^3$	$\lambda = 1,11 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,32 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 3,217 \text{ g/cm}^3$	$\lambda = 1,89 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,58 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 2,558 \text{ g/cm}^3$
4-2	0,042	$\lambda = 2,60 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,36 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 2,427 \text{ g/cm}^3$	$\lambda = 1,11 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,32 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 3,217 \text{ g/cm}^3$	$\lambda = 1,89 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,58 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 3,266 \text{ g/cm}^3$
5-1	0,042	$\lambda = 2,60 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,36 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 2,427 \text{ g/cm}^3$	$\lambda = 1,11 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,32 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 3,217 \text{ g/cm}^3$	$\lambda = 1,89 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,58 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 2,558 \text{ g/cm}^3$
5-2	0,484	$\lambda = 3,09 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,55 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 2,473 \text{ g/cm}^3$	$\lambda = 1,11 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,32 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 3,217 \text{ g/cm}^3$	$\lambda = 1,89 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,58 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 3,266 \text{ g/cm}^3$
6-1	0,484	$\lambda = 1,27 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,41 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 3,221 \text{ g/cm}^3$	$\lambda = 1,11 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,32 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 3,217 \text{ g/cm}^3$	$\lambda = 1,89 \text{ W/(mK)}$ $c = 0,58 \text{ J/(kgK)}$ $\rho_P = 2,558 \text{ g/cm}^3$

Tab. 7-12: Fortsetzung

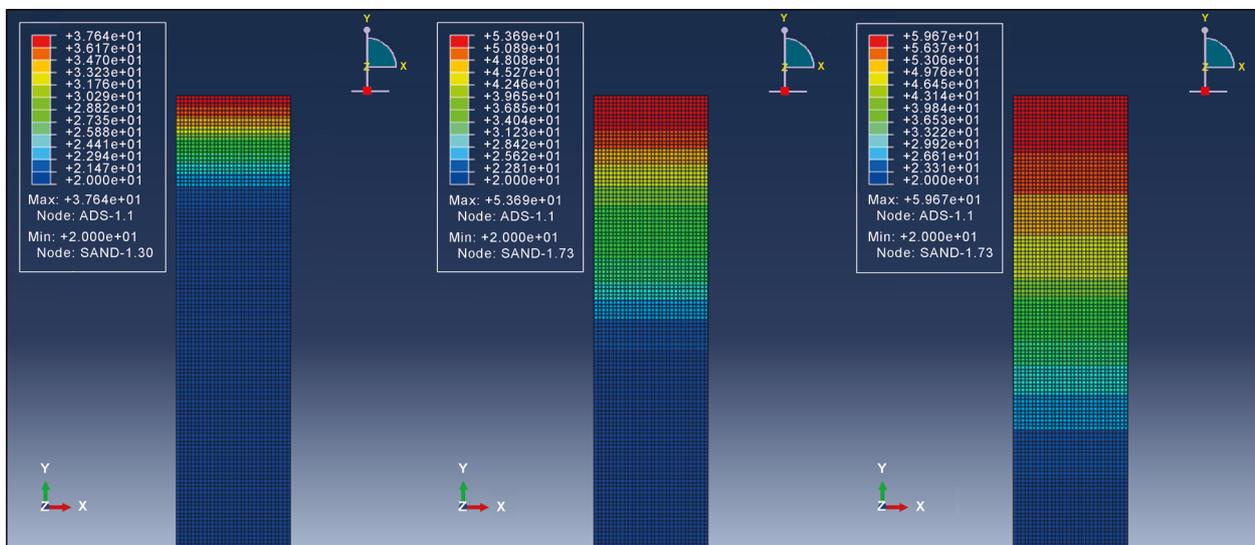


Bild 7-20: Modellrechnung am dreischichtigen Asphaltdeckschicht in Netzdarstellung für Versuchsreihe 5-2 nach einer Stunde (links), acht Stunden (Mitte) und 27 Stunden (rechts)

phaltdeckschicht) ist in Bild 7-21 zu sehen. Während die Temperaturdifferenz zwischen Laborergebnissen und Modellberechnungen der Varianten mit dunkler Asphaltdeckschicht (grüne Säulen) im Mittel bei 5,7 K liegt, unterscheiden sich die Varianten mit heller Asphaltdeckschicht (gelbe Säulen) um 15,8 K. Die Temperaturdifferenz zwischen den La-

borergebnissen und der Modellberechnung der Referenzvariante beträgt 2,5 K.

Als eine Ursache der Unterschiede ist die Umgebungstemperatur zu nennen. Während diese im Modell konstant bei 20 °C liegt, kann davon ausgegangen werden, dass im Bestrahlungsstand eine

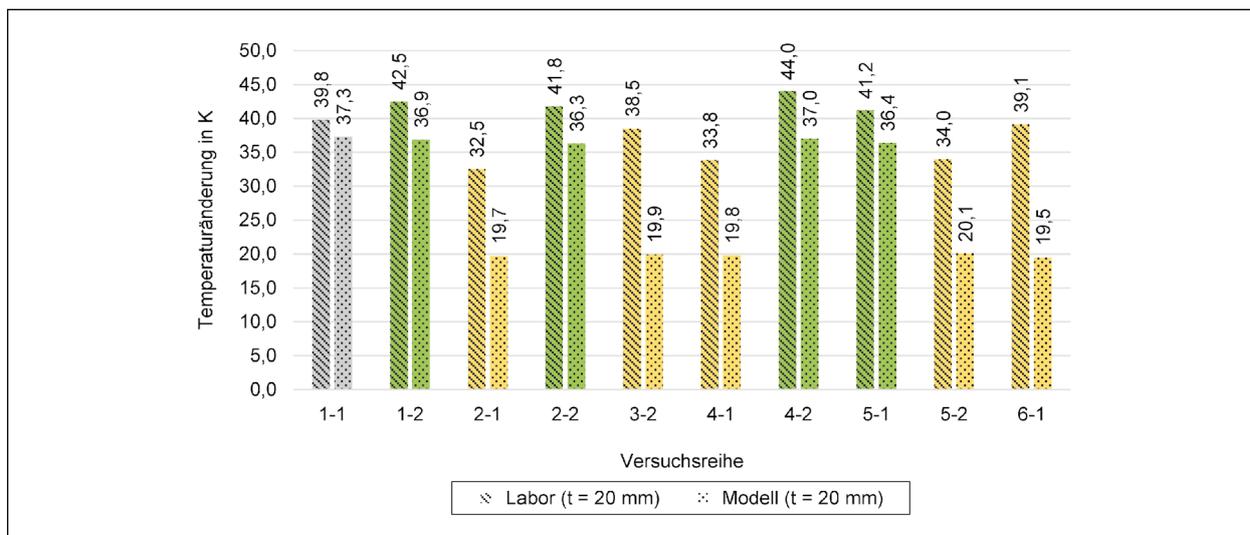


Bild 7-21: Vergleich der Modellberechnungen mit den Laborergebnissen in 20 mm Tiefe (gelb = helle ADS; grün = dunkle ADS)

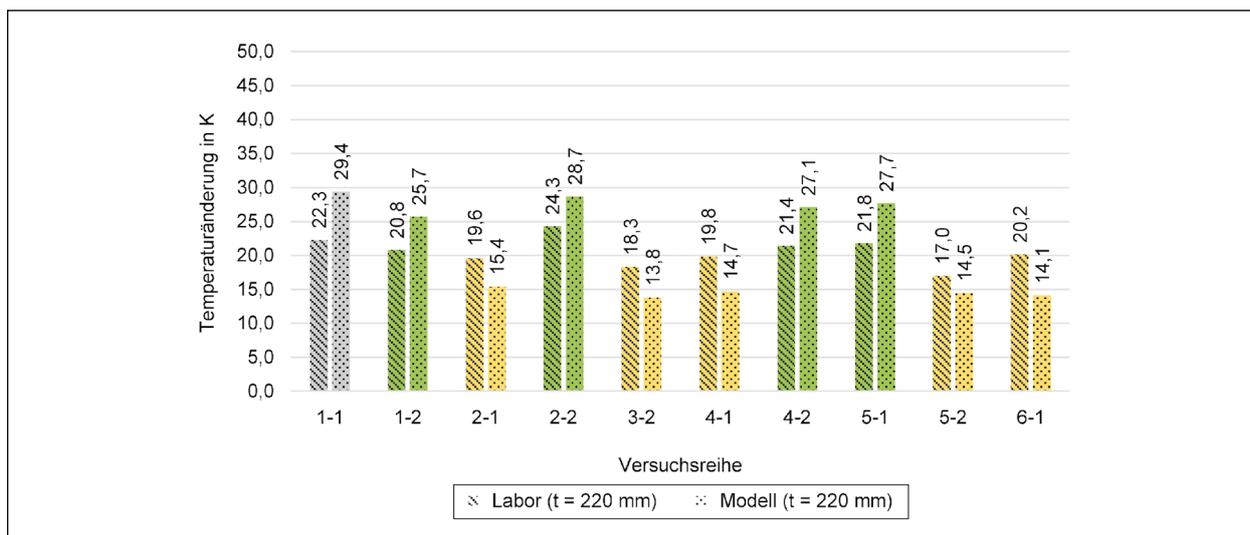


Bild 7-22: Vergleich der Modellberechnungen mit den Laborergebnissen in 220 mm Tiefe (gelb = helle ADS; grün = dunkle ADS)

Erwärmung der unmittelbaren Umgebung der bestrahlten Flächen trotz der Raumklimatisierung stattfindet. Dadurch ist der Wärmeaustausch im Bestrahlungsstand eingeschränkt und es kommt zu höheren Temperaturen. Ein weiterer Grund ist womöglich eine zu hohe Minderung der Strahlungsmenge durch den Strahlungsreflexionsgrad im Modell.

Bild 7-22 stellt den Vergleich der Modellberechnungen mit den Laborergebnissen in einer Tiefe von 220 mm (unteres Drittel Asphalttragschicht) dar. Gegenüber den Laborergebnissen werden die Temperaturen von den Varianten mit dunkler Asphaltdeckschicht (grüne Säulen) um 5,2 K im Mittel überschritten und von den Varianten mit heller Asphaltdeckschicht (gelbe Säulen) um 4,5 K im Mittel un-

terschritten. Bei der Referenzvariante liegt die Temperaturänderung der Modellberechnungen um 7,1 K über den Laborergebnissen.

Ein Vergleich der Ergebnisse über beide Schichttiefen zeigt, dass die Spannweite zwischen Asphalttragschicht und Asphaltdeckschicht bei den Laborergebnissen die der Modellberechnungen übersteigt. Während im Modell die mittlere Spannweite bei 7,2 K liegt, beträgt diese im Labor 18,2 K.

Ursächlich hierfür könnte die Verwendung der thermophysikalischen Materialeigenschaften der Asphaltbinderschicht für die Asphalttragschicht im Modell sein. Da diese aus den o. g. Gründen messtechnisch nicht ermittelt werden konnte, sind die Unterschiede im Temperaturverlauf in der Asphalt-

tragschicht und z. T. auch in der Asphaltdeckschicht womöglich auf falsche Annahmen bezüglich dieser Materialeigenschaften zurückzuführen.

Die Ergebnisse der Modellberechnungen sind für alle Versuchsreihen als Zeit-Temperatur-Diagramme über sämtliche Schichttiefen in Anhang E zu finden.

## 8 Konventionelle und performance-orientierte Asphalt- und Bindemittelprüfungen

Zur Prüfung und Beurteilung der Performance der konzipierten Asphalte wurden Asphalt- und Bindemittelprüfungen durchgeführt. Dabei wurden Untersuchungen zum Steifigkeits- und Ermüdungsverhalten mit dem Spaltzugschwellversuch, das Verformungsverhalten bei hohen Temperaturen mit dem Druckschwellversuch und dem Spurbildungsversuch sowie Untersuchungen zum Kälteverhalten mittels Abkühl- und Zugversuch durchgeführt. Die Bindemittel wurden mittels konventioneller Bindemittelprüfungen (PEN, EP RuK, BPFr,  $R_E$ ) und dem BTS-Verfahren analysiert. Eine Übersicht der Mischguteigenschaften der hier untersuchten Asphalte befindet sich in Anhang B.

### 8.1 Bindemittelprüfungen

Für die Asphaltherstellung wurden ein polymermodifiziertes Bindemittel (PmB) 25/55-55A, ein Straßenbaubitumen (StbB) 50/70 und ein synthetisches Bindemittel (SynB) eingesetzt. Als Zusatzstoffe wurden Haftverbesserer für die Deckschichtvarianten mit Quarzit und Titandioxid als Pigment für die Aufhellung eingesetzt. Tabelle 8-1 stellt das verwendete Bindemittel und Zusatzstoffe je Variante dar.

Bindemittel	Zusatzstoffe	Variante
PmB 25/55-55A	Keine	ACD-1, ACD-3, ACB-1, ACB-2, ACB-3, SMA-1, SMA-3
	Haftverbesserer	ACD-2, SMA-2
StbB 50/70	Keine	ACT-1, ACT-2, ACT-3
SynB	Titandioxid	ACD-7, ACD-9

Tab. 8-1: Übersicht der Variante je Bindemittel und Zusatzstoff

Die Ergebnisse zur Bestimmung des Erweichungspunktes Ring- und Kugel-Verfahren (EP RuK) nach DIN EN 1427 [73], der Nadelpenetration (PEN) nach DIN EN 1426 [74], des Brechpunktes nach Fraaß (BPFr) nach DIN EN 12593 [75], der elastischen Rückstellung von modifiziertem Bitumen ( $R_E$ ) nach DIN EN 13398 [76] und der Dichte von bitumenhaltigen Bindemitteln mithilfe des Pyknometerverfahrens mit Kapillarstopfen nach DIN EN 15326 [77] sowie die Ergebnisse des Bitumen-Typisierungs-Schnellverfahrens (BTSV) im Dynamischen Scherrheometer nach DIN 52050 [78] und sind in Tabelle 8-2 dargestellt.

### 8.2 Asphaltprüfungen

#### 8.2.1 Druckschwellversuch

Die Beständigkeit von Asphalt gegen bleibende Verformung wird mit dem Prüfverfahren Druckschwellversuch nach DIN EN 12697-25 [79] bestimmt. Die Prüfungen wurden bei zwei unterschiedlichen Prüftemperaturen von 50 °C und 60 °C durchgeführt. Eine Adaption der Prüftemperatur an die Asphalttemperaturen, welche durch eine Änderung der thermophysikalischen und lichttechnischen Materialeigenschaften klimatisch optimiert wurden, fand nicht statt. Als Ergebnis werden nachfolgend die Kriechkurve sowie die Gesamtaxialdehnung nach 10.000 Belastungszyklen und die Kriechrate dargestellt. Die Kriechrate bezieht sich dabei immer auf den (quasi-)linearen Teil der Kriechkurve.

Die gemittelten Kriechkurven der Varianten ACD-1, ACD-2, ACD-3, ACD-7 und ACD-9 sind in Bild 8-1 dargestellt. Die entsprechenden Kriechraten und Gesamtaxialdehnungen können Tabelle 8-3 ent-

		PmB 25/55-55A	StbB 50/70	SynB
Mittelwert EP RuK	[°C]	56	49	77
Mittelwert PEN	[1/10 mm]	43	60	50
Mittelwert BPFr	[%]	-14	-13	-10
Mittelwert RE	[%]	75		40
Mittelwert Dichte $\rho_{25}$	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,020	1,021	1,007
Temperatur TBTSV	[°C]	56,0	50,4	50,4
Phasenwinkel $\delta_{BTSV}$	[°]	71,8	81,8	72,4

Tab. 8-2: Übersicht der Bindemittelprüfungen am PmB 25/55-55A, StbB 50/70 und SynB

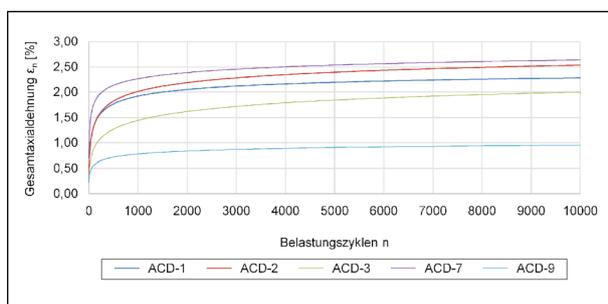


Bild 8-1: Mittlere Kriechkurve der Varianten ACD-1, ACD-2, ACD-3, ACD-7 und ACD-9 bei einer Prüftemperatur von 50 °C

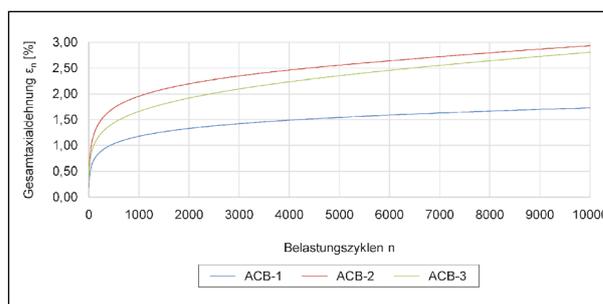


Bild 8-2: Mittlere Kriechkurve der Varianten ACB-1, ACB-2, ACB-3 bei einer Prüftemperatur von 50 °C

	ACD-1	ACD-2	ACD-3	ACD-7	ACD-9
Kriechrate [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	-0,0118	-0,0199	-0,0232	-0,0137	-0,0058
Gesamtaxialdehnung [%]	-2,28	-2,54	-2,00	-2,64	-0,95

Tab. 8-3: Mittlere Kriechrate und mittlere Gesamtaxialdehnung der Varianten ACD-1, ACD-2, ACD-3, ACD-7 und ACD-9 bei einer Prüftemperatur von 50 °C

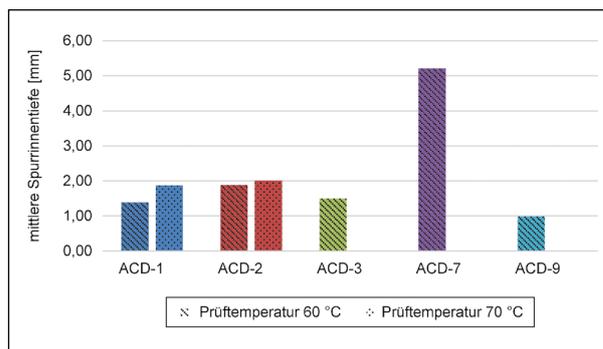


Bild 8-3: Mittlere Spurrinnentiefe der Varianten ACD-1, ACD-2, ACD-3, ACD-7 und ACD-9 bei einer Prüftemperatur von 60 °C und der Varianten ACD-1 und ACD-2 bei einer Prüftemperatur von 70 °C

	ACB-1	ACB-2	ACB-3	ACD-7	ACD-9
Kriechrate [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	-0,0293	-0,0486	-0,0793	-0,0137	-0,0058
Gesamtaxialdehnung [%]	-1,73	-2,94	-2,81	-2,64	-0,95

Tab. 8-4: Mittlere Kriechrate und mittlere Gesamtaxialdehnung der Varianten ACB-1, ACB-2 und ACB-3 bei einer Prüftemperatur von 50 °C

nommen werden. Beim Druckschwellversuch zum Widerstand gegen bleibende Verformungen an Asphaltbetondeckschichten bei einer Prüftemperatur von 50 °C schneidet die Variante ACD-9 am besten ab. In der Rangliste folgen ACD-3, ACD-1, ACD-2 und ACD-7.

Die gemittelten Kriechkurven der Varianten ACB-1, ACB-2 und ACB-3 sind in Bild 8-2 dargestellt. Die entsprechenden Kriechraten und Gesamtaxialdehnungen können Tabelle 8-4 entnommen werden. Am besten schneidet hier die Referenzvariante ACB-1 ab. Es folgen die Varianten ACB-3 und ACB-2. Aufgrund der geringeren Kriechrate von Variante ACB-2 ist diese langfristig als günstiger gegenüber Variante ACB-3 einzustufen.

Die gemittelten Kriechkurven sowie die entsprechenden Kriechraten und Gesamtaxialdehnungen der Varianten ACB-1 und ACD-1 bei einer Prüftemperatur von 60 °C befinden sich in Anhang F.

## 8.2.2 Spurbildungsversuch

Der Widerstand gegen bleibende Verformungen durch wiederholte Belastungen wird mit dem Prüfverfahren Spurbildungsversuch nach TP Asphalt-StB Teil 22 [80] bestimmt. Die Prüfungen wurden bei zwei unterschiedlichen Prüftemperaturen von 60 °C und 70 °C durchgeführt. Als Ergebnis wird der Mittelwert der Spurrinnentiefe von zwei Probekörpern nachfolgend dargestellt.

Die mittleren Spurrinnentiefen der Varianten ACD-1, ACD-2, ACD-3, ACD-7 und ACD-9 bei einer Prüftemperatur von 60 °C und der Varianten ACD-1 und ACD-2 bei einer Prüftemperatur von 70 °C sind in Bild 8-3 dargestellt.

## 8.2.3 Spaltzug-Schwellversuch

Mit dem Prüfverfahren Spaltzug-Schwellversuch werden der Steifigkeitsmodul in Abhängigkeit von der Temperatur und Frequenz nach TP Asphalt-StB Teil 26 [81] sowie der Ermüdungswiderstand nach TP Asphalt-StB Teil 24 [82] bestimmt. Als Ergebnis werden für die Bestimmung der Steifigkeit die Hauptkurven sowie Steifigkeits-Temperaturfunktio-

nen und für die Beständigkeit gegen Ermüdung die Ermüdungsfunktionen dargestellt. Die Steifigkeits-Temperaturfunktionen wurden für eine Frequenz von 10 Hz berechnet, da diese üblicherweise als Basis für Dimensionierungsberechnungen und Performance-Prognosen verwendet werden.

**Bestimmung der Steifigkeit**

Die Hauptkurven bei einer Referenztemperatur von 20 °C und die Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen für eine Frequenz von 10 Hz der untersuchten Deckschichtvarianten aus Asphaltbeton sind für ACD-1, ACD-2, ACD-3, ACD-7 und ACD-9 in Bild 8-4 dargestellt.

Anhand der Steifigkeits-Temperaturfunktionen bei einer Frequenz von 10 Hz lässt sich bei niedrigen Temperaturen für die Varianten ACD-9, ACD-7 und ACD-3 ein hohes und für die Varianten ACD-1 und ACD-2 ein niedriges Steifigkeitsniveau feststellen. Bei hohen Temperaturen weisen die Varianten ACD-3 und ACD-1 ein relativ hohes, ACD-9 und ACD-2 ein mäßiges und ACD-7 ein niedriges Steifigkeitsniveau auf. Eine Gegenüberstellung der Minimaltemperaturen nach einer, acht und 27 Stunden je Asphaltdeckschichtvariante mit dem entsprechenden Steifigkeitsmodul bei einer Frequenz von 10 Hz ist

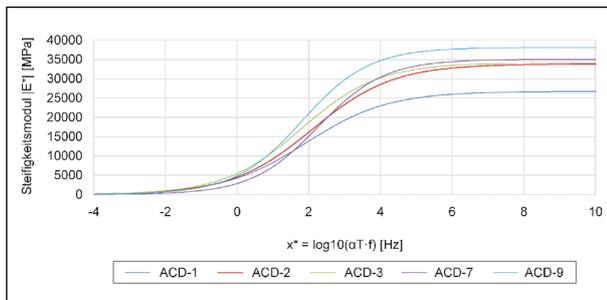


Bild 8-4: Hauptkurven der Varianten ACD-1, ACD-2, ACD-3, ACD-7 und ACD-9 bei der Referenztemperatur T<sub>0</sub> = 20 °C

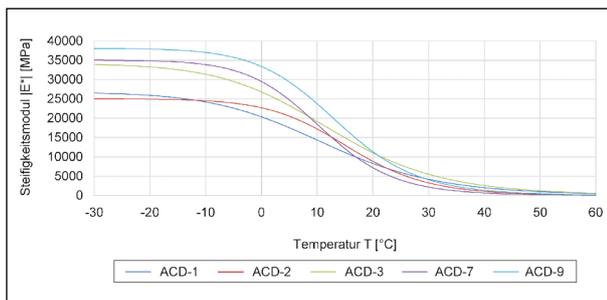


Bild 8-5: Steifigkeits-Temperaturfunktionen der Varianten ACD-1, ACD-2, ACD-3, ACD-7 und ACD-9 für die Frequenz f = 10 Hz

in Tabelle 8-5 dargestellt. Angegeben sind die Asphalttemperaturen in 2 cm Tiefe in der Mitte der Asphaltdeckschicht. Es ist zu erkennen, dass die aufgehellten Varianten ACD-7 und ACD-9 trotz niedrigerer Temperaturen geringere Steifigkeitsmodule aufweisen als die Referenzvariante ACD-1.

Für die untersuchten Deckschichtvarianten aus Splittmastixasphalt SMA-1 und SMA-3 sind die Hauptkurven bei einer Referenztemperatur von 20 °C und die Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen für eine Frequenz von 10 Hz im Anhang F abgebildet.

Die Hauptkurven bei einer Referenztemperatur von 20 °C und die Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen für eine Frequenz von 10 Hz der untersuchten Binderschichtvarianten aus Asphaltbeton sind für ACB-1, ACB-2 und ACB-3 in Bild 8-6 dargestellt.

Die Steifigkeiten bei einer Frequenz von 10 Hz der Varianten ACB-1, ACB-2 und ACB-3 unterscheiden sich bei hohen Temperaturen nur sehr gering. Bei niedrigen Temperaturen liegen die Varianten ACB-1 und ACB-2 nahezu gleichauf während die Variante ACB-3 eine höhere Steifigkeit aufweist. Ein Vergleich der Steifigkeitsmodule der Asphaltbinderschichtvarianten bei Minimaltemperaturen nach einer, acht und 27 Stunden ist in Tabelle 8-6 dargestellt. Angegeben ist die linear interpolierte Asphalttemperatur in 8 cm Tiefe des Gesamtaufbaus in der Mitte der Asphaltbinderschicht. Aufgrund der niedrigeren Temperaturen kann sich nach 27 Stunden Bestrahlung die Variante ACB-2 mit einer höhe-

	ACD-1	ACD-2	ACD-3	ACD-7	ACD-9
Temperatur nach 1 Stunde [°C]	32,4	34,2	32,6	29,8	32,0
Entsprechender Steifigkeitsmodul [MPa]	3.525	2.046	4.526	1.812	3.251
Temperatur nach 8 Stunden [°C]	51,3	52,9	53,4	44,9	50,8
Entsprechender Steifigkeitsmodul [MPa]	882	257	931	355	414
Temperatur nach 27 Stunden [°C]	59,8	61,2	62,5	52,5	58,5
Entsprechender Steifigkeitsmodul [MPa]	483	< 121	< 573	146	185

Tab. 8-5: Minimaltemperaturen nach 1, 8 und 27 Stunden und entsprechende Steifigkeitsmodule für Asphaltdeckschichtvarianten

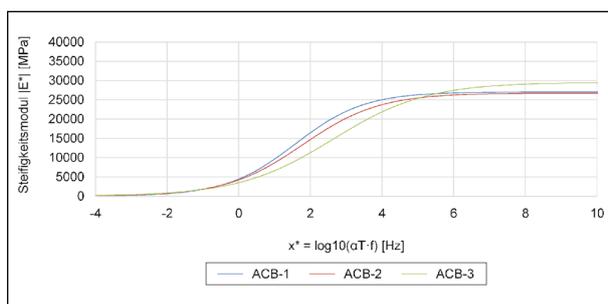


Bild 8-6: Hauptkurven der Varianten ACB-1, ACB-2 und ACB-3 bei der Referenztemperatur  $T_0 = 20\text{ °C}$

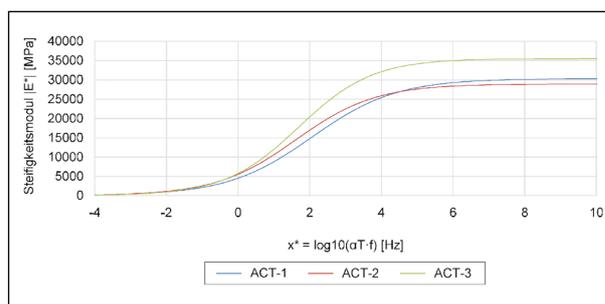


Bild 8-8: Hauptkurven der Varianten ACT-1, ACT-2 und ACT-3 bei der Referenztemperatur  $T_0 = 20\text{ °C}$

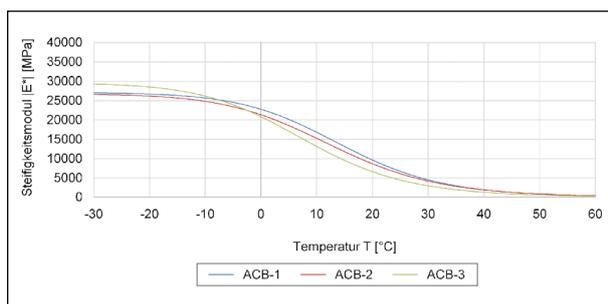


Bild 8-7: Steifigkeits-Temperaturfunktionen der Varianten ACB-1, ACB-2 und ACB-3 für die Frequenz  $f = 10\text{ Hz}$

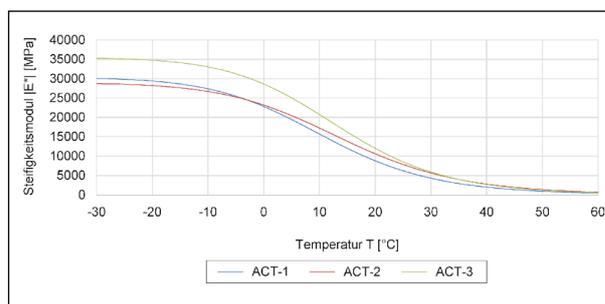


Bild 8-9: Steifigkeits-Temperaturfunktionen der Varianten ACT-1, ACT-2 und ACT-3 für die Frequenz  $f = 10\text{ Hz}$

	ACB-1	ACB-2	ACB-3
Temperatur nach 1 Stunde [°C]	24,3	23,4	22,7
Entsprechender Steifigkeitsmodul [MPa]	7.081	6.866	5.380
Temperatur nach 8 Stunden [°C]	43,0	39,1	38,7
Entsprechender Steifigkeitsmodul [MPa]	1505	2040	1442
Temperatur nach 27 Stunden [°C]	54,0	48,3	47,8
Entsprechender Steifigkeitsmodul [MPa]	594	980	685

Tab. 8-6: Minimaltemperaturen nach 1, 8 und 27 Stunden und entsprechende Steifigkeitsmodule für Asphaltbinderschichtvarianten

	ACT-1	ACT-2	ACT-3
Temperatur nach 1 Stunde [°C]	20,2	20,1	20,0
Entsprechender Steifigkeitsmodul [MPa]	8.670	10.549	12.009
Temperatur nach 8 Stunden [°C]	31,3	29,2	27,8
Entsprechender Steifigkeitsmodul [MPa]	3906	5806	6803
Temperatur nach 27 Stunden [°C]	44,8	41,3	39,2
Entsprechender Steifigkeitsmodul [MPa]	1396	2386	2499

Tab. 8-7: Minimaltemperaturen nach 1, 8 und 27 Stunden und entsprechende Steifigkeitsmodule für Asphalttragschichtvarianten

ren Steifigkeit gegenüber den Varianten ACB-1 und ACB-3 absetzen.

Die Hauptkurven bei einer Referenztemperatur von  $20\text{ °C}$  und die Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen für eine Frequenz von  $10\text{ Hz}$  der untersuchten Tragschichtvarianten aus Asphaltbeton sind für ACT-1, ACT-2 und ACT-3 in Bild 8-8 dargestellt.

Während sich die Steifigkeiten der Asphalttragschichtvarianten bei einer Frequenz von  $10\text{ Hz}$  und

hohen Temperaturen kaum unterscheiden, gibt es im niedrigen Temperaturbereich kleinere Unterschiede. Die Varianten ACT-1 und ACT-2 liegen ungefähr auf gleichem Niveau und weisen eine verminderte Steifigkeit gegenüber der Variante ACT-3 auf. Die Gegenüberstellung der Steifigkeitsmodule der Asphalttragschichtvarianten bei Minimaltemperaturen nach einer, acht und 27 Stunden ist in Tabelle 8-7 dargestellt. Angegeben ist die Asphalttemperatur in  $18\text{ cm}$  Tiefe des Gesamtaufbaus in der Mitte

	ACB-1	ACB-2	ACB-3
Ermüdungsfunktion	$1,3969 \cdot x^{-3,626}$	$2,9462 \cdot x^{-3,296}$	$4,2805 \cdot x^{-3,239}$
Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup>	0,9925	0,9832	0,9835

Tab. 8-8: Ermüdungsfunktion und Bestimmtheitsmaß der Asphaltbinderschichtvarianten

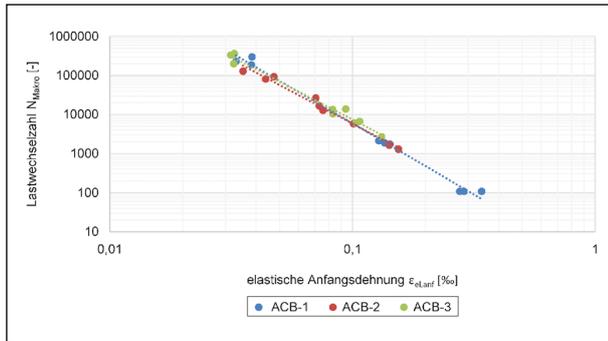


Bild 8-10: Ermüdungsfunktionen der Varianten ACB-1, ACB-2 und ACB-3

der Asphalttragschicht. Aufgrund der niedrigeren Temperaturen können sich nach 27 Stunden Bestrahlung die Varianten ACT-2 und ACT-3 mit einer höheren Steifigkeit gegenüber der Referenzvariante ACT-1 absetzen.

**Beständigkeit gegen Ermüdung**

Die Ermüdungsfunktionen der untersuchten Bindschichtvarianten aus Asphaltbeton sind für ACB-1, ACB-2 und ACB-3 in Bild 8-10 und gemeinsam mit dem Bestimmtheitsmaß in Tabelle 8-8 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Varianten ACB-1, ACB-2 und ACB-3 praktisch gleichwertig abschneiden.

Die Ermüdungsfunktionen der untersuchten Tragschichtvarianten aus Asphaltbeton sind für ACT-2 und ACT-3 in Bild 8-11 und gemeinsam mit dem Bestimmtheitsmaß in Tabelle 8-9 dargestellt. Die geprüften Varianten ACT-2 und ACT-3 zeigen einen durchaus signifikanten Unterschied. Die Variante ACT-3 weist in dem Bereich der elastischen Anfangsdehnung von  $\epsilon_{el,anf} < 0,1$  ‰ einen deutlich höheren Widerstand gegen Ermüdung auf bzw. lässt deutlich höhere Lastwechselzahlen bis zum Bruch zu als die Variante ACT-2.

**8.2.4 Kälteeigenschaften**

Der Widerstand gegen kälteinduzierte Rissbildung wird mit den Prüfverfahren Einaxialer Zugversuch und Abkühlversuch nach TP Asphalt-StB Teil 46 A [83] bestimmt. Nachfolgend werden die Bruchspan-

	ACT-2	ACT-3
Ermüdungsfunktion	$5,3277 \cdot x^{-2,701}$	$1,5392 \cdot x^{-3,178}$
Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup>	0,9894	0,9922

Tab. 8-9: Ermüdungsfunktion und Bestimmtheitsmaß für Asphalttragschichtvarianten

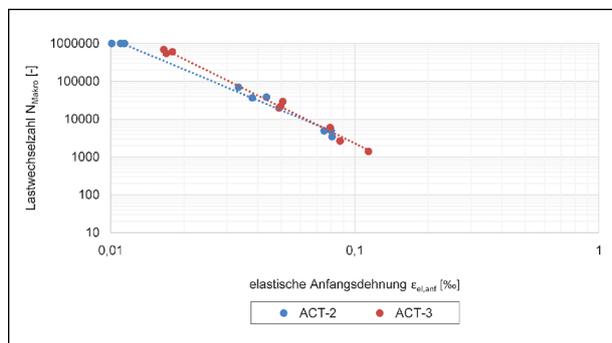


Bild 8-11: Ermüdungsfunktionen der Varianten ACT-2 und ACT-3

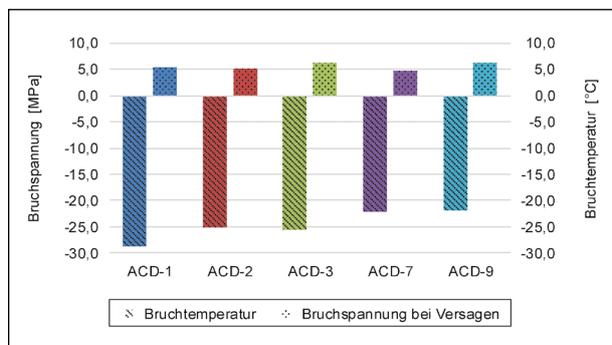


Bild 8-12: Bruchtemperatur und Bruchspannung bei Versagen der Varianten ACD-1, ACD-2, ACD-3, ACD-7 und ACD-9

nung bei Versagen und die Bruchtemperatur des Abkühlversuchs sowie die Zugfestigkeitsreserve dargestellt.

**Abkühlversuch**

Die Bruchtemperaturen sowie die entsprechenden Bruchspannungen bei Versagen der untersuchten Deckschichtvarianten aus Asphaltbeton sind für ACD-1, ACD-2, ACD-3, ACD-7 und ACD-9 in Bild 8-12 dargestellt. Die niedrigste Bruchtemperatur erzielt die Referenzvariante ACD-1. Die Varianten

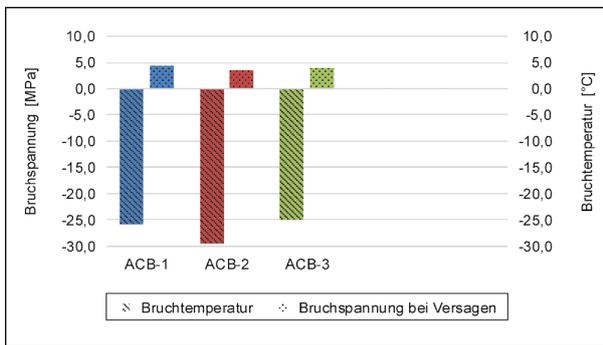


Bild 8-13: Bruchtemperatur und Bruchspannung bei Versagen der Varianten ACB-1, ACB-2 und ACB-3

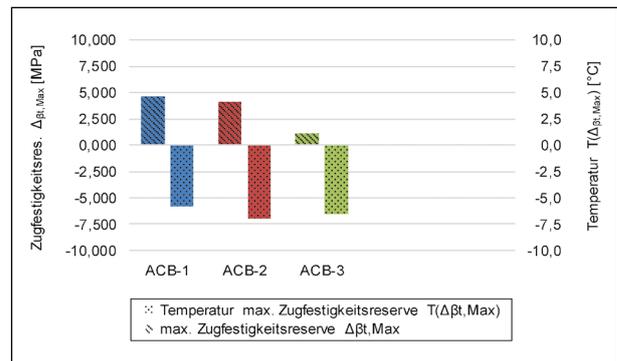


Bild 8-15: Maximalwert der Zugfestigkeitsreserve der Varianten ACB-1, ACB-2 und ACB-3

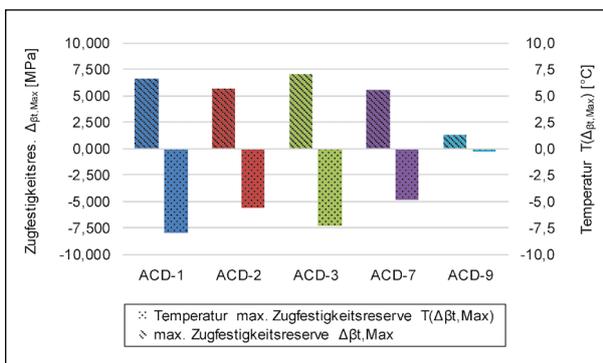


Bild 8-14: Maximalwert der Zugfestigkeitsreserve der Varianten ACD-1, ACD-2, ACD-3, ACD-7 und ACD-9

ACD-2 und ACD-3 liegen im Mittelfeld. Die Varianten, bei denen synthetisches Bindemittel zum Einsatz kam, schneiden bezüglich der Bruchtemperatur am schlechtesten ab.

Die Bruchtemperaturen sowie die entsprechenden Bruchspannungen bei Versagen der untersuchten Binderschichtvarianten aus Asphaltbeton sind für ACB-1, ACB-2 und ACB-3 Bild 8-13 dargestellt.

### Zugfestigkeitsreserve

Die Maximalwerte der Zugfestigkeitsreserve sowie die zugehörigen Temperaturen der untersuchten Deckschichtvarianten aus Asphaltbeton sind für ACD-1, ACD-2, ACD-3, ACD-7 und ACD-9 in Bild 8-14 dargestellt.

Die Maximalwerte der Zugfestigkeitsreserve sowie die zugehörigen Temperaturen der untersuchten Binderschichtvarianten aus Asphaltbeton sind für ACB-1, ACB-2 und ACB-3 in Bild 8-15 dargestellt.

## 9 Zusammenfassung

Zur Ableitung zukünftiger Klimarandbedingungen und deren Auswirkungen auf die Temperaturentwicklung in einem Straßenoberbau in Asphaltbauweise sind verschiedene Klimatelemente und klimatologische Ereignisse zu analysieren. Hierzu wurden vom Deutschen Wetterdienst Klimasimulationen durchgeführt und ein Katalog von Klimaindizes für einzelne und konsekutive Tage erstellt, der auf hochauflösenden regionalisierten Daten eines Ensembles regionaler Klimamodelle für Deutschland und den angrenzenden Flusseinzugsgebieten beruht. Speziell für dieses Forschungsvorhaben wurden unterschiedliche Klimatelemente kombiniert, die nach ersten Einschätzungen zu einer maximalen Erwärmung eines Asphaltpaketes führen.

Die Analyse zur Ableitung zukünftiger Klimarandbedingung zeigt, dass es im gesamten BRD-Gebiet für die Emissionsszenarien RCP4.5 und RCP8.5 bereits in naher Zukunft (Zeitscheibe 2031 bis 2060) zu einer deutlichen Erwärmung kommen wird. Die Intensität der Zunahme ist dabei teilweise regional unterschiedlich und nimmt in ferner Zukunft (Zeitscheibe 2071 bis 2100) noch einmal zu.

Extreme klimatische Ereignisse wie die Kombination 1 (Hitzeperiode mit tropischen Nächten) treten häufiger auf, sind allerdings in ihrer Intensität regional sehr unterschiedlich. Häufig sind starke Veränderungen, insbesondere hinsichtlich der Tageshöchsttemperaturen und der Intensität von Perioden, in den östlichen Bundesländern, am Ober- und Niederrhein, im Rhein-Main-Gebiet und in Bayern erkennbar. Bei den Veränderungen hinsichtlich der nächtlichen Temperaturveränderungen sind der Norden und die Küstenregion am stärksten betroffen.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Performance von Asphalt und die daraus ableitbaren Konsequenzen für den Straßenbau der Zukunft konzentrieren sich hauptsächlich auf extreme Temperaturen (im Sinne von hohen Asphalttemperaturen). Da in Zukunft die Wahrscheinlichkeit des Auftretens sehr tiefer Temperaturen infolge der globalen Erwärmung zwar geringer ausfällt, aber das Auftreten nicht ausgeschlossen werden kann, muss auch die mögliche Vergrößerung der Temperaturspanne zwischen maximal und minimal auftretender Asphalttemperatur in die Betrachtungen mit einbezogen werden.

Um den negativen Folgen der klimatischen Änderungen entgegenzuwirken, können Materialanpassungen hinsichtlich der thermophysikalischen und lichttechnischen Materialeigenschaften zielführend sein, welche bei der Konzeption und Herstellung klimaoptimierter Asphalte umgesetzt wurden. Eine Optimierung der lichttechnischen Materialeigenschaften wurde durch die Verwendung heller Gesteinskörnungen (Quarzit) und von synthetischem Bindemittel mit Pigmenten erzielt. Bezüglich der thermophysikalischen Materialeigenschaften wurden Asphaltmischgüter mit erhöhter (Quarzit und Kalkstein) und verringerter Wärmeleitfähigkeit (EO-Schlacke) für alle Asphaltsschichten konzipiert. Laborprüfungen fanden sowohl an den einzelnen als auch an den Kombinationen dieser Schichten statt.

Die lichttechnischen Materialeigenschaften einer Asphaltdeckschicht können u. a. durch die Verwendung einer hellen Gesteinskörnung innerhalb des Asphaltes bzw. als Abstreumaterial an dessen Oberfläche verbessert werden. Weiteres Optimierungspotenzial bietet der Einsatz von synthetischem Bindemittel, welches mit Pigmenten aufgehellt werden kann. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden die Strahlungsreflexionsgrade von sechs Asphaltdeckschichtvarianten messtechnisch ermittelt. Der Strahlungsreflexionsgrad gibt an, wie groß der Anteil der Strahlung im gesamten Sonnenspektrum ist, der vom Asphalt reflektiert wird.

Den niedrigsten (0,042) und den höchsten (0,484) Strahlungsreflexionsgrad weisen die oberflächlich unbehandelten Asphaltdeckschichtvarianten mit PmB und SynB mit Pigmenten auf. Diese Oberflächen entsprechen einer frisch hergestellten Asphaltdeckschicht und weisen einen durchgängigen Bindemittelfilm auf, so wie die Oberflächen der Asphaltprobekörper im Bestrahlungsstand. Die Mess-

ergebnisse konnten somit für die Anwendung der Laborergebnisse im Modell verwendet werden. Mit einem Wert von 0,125 schneidet die Asphaltdeckschichtvariante mit Quarzit als Gesteinskörnung und glasbruchgestrahlter Oberfläche bei den Konzeptionen mit PmB am besten ab.

Die thermophysikalischen Eigenschaften eines Stoffes beeinflussen maßgeblich die Wärmeleitung und -speicherung. Sie werden u. a. durch die Dichte, die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität eines Stoffes beeinflusst. Die messtechnische Bestimmung thermophysikalischer Materialeigenschaften erfolgte mit einem THB-Messgerät an plangeschliffenen Marschallprobekörpern mit einem Durchmesser von 100 mm.

Erwartungsgemäß wurde bei den Varianten mit EO-Schlacke die geringste Wärmeleitfähigkeit (1,23 bis 1,29 W/(m\*K)) ermittelt. Die Deckschichten mit Quarzit als Gesteinskörnung liegen weitaus höher (2,60 bis 3,09 W/(m\*K)) und die Referenzvarianten mit Diabasgestein liegen dazwischen (1,59 bis 1,89 W/(m\*K)). Bei den hohlraumreicheren Schichten waren Messungen nur eingeschränkt (Asphaltbinderschicht) bzw. gar nicht möglich (Asphalttragschicht).

Die praxisgerechte thermische Beanspruchung der Asphaltprobekörper fand im Laboratorium in einer für dieses Forschungsprojekt gebauten Versuchsanlage (Bestrahlungsstand) zur Simulation der Globalstrahlung statt. Im Bestrahlungsstand wurden Asphaltbauten mit einer Dicke von 24 cm mit Sonnenlichtlampen bestrahlt und durch Temperaturmessungen in verschiedenen Tiefen die Temperaturgradienten aufgezeichnet. Die Asphaltbauten wurden aus unterschiedlichen Kombinationen der konzipierten Asphalte zusammengesetzt. Bei der praxisgerechten thermischen Beanspruchung wurde vorrangig der Einfluss unterschiedlicher thermophysikalischer Asphalteigenschaften untersucht. Das Reflexionsvermögen war nur abhängig von der Farbe des Bindemittelfilms an der Oberfläche, da keine glasbruchgestrahlten Oberflächen eingesetzt wurden.

Die größte Temperaturreduzierung im gebundenen Oberbau erzielte die Variante mit einer hellen und wärmeleitenden Asphaltdeckschicht (Quarzit und synthetisches Bindemittel mit Pigmenten) auf einer Asphaltbinder- und Asphalttragschicht mit niedriger Wärmeleitfähigkeit (EO-Schlacke). Auch die weiteren Varianten mit heller Deckschicht und Gesteins-

körnung mit höherer Wärmeleitfähigkeit in der Deckschicht führen zu einer deutlich geringeren Erwärmung im gebundenen Oberbau. Die Verwendung von wärmedämmender EO-Schlacke in der Asphaltbinder- und der Asphalttragschicht führt zu den niedrigsten Erwärmungen an der Unterseite der Asphalttragschicht.

Die hinsichtlich ihrer thermophysikalischen Materialeigenschaften optimierten Asphaltvarianten mit dunkler Deckschicht führten nach 27 Stunden zu keiner Reduzierung der Wärme in der ADS. Im unteren Drittel der ATS konnten bei drei Varianten nur geringfügig niedrigere Temperaturdifferenzen im Vergleich zur Referenzvariante gemessen werden. Es muss berücksichtigt werden, dass an den Varianten mit dunkler Deckschicht keine Glasbruchbestrahlung durchgeführt wurde und ihr Strahlungsreflexionsgrad somit dem einer frisch aufgetragenen Asphaltdeckschicht entspricht.

Um die Wirkungsweise der thermophysikalischen und lichttechnischen Asphalteigenschaften zu analysieren, wurde ein vereinfachtes eindimensionales Finite-Elemente-Modell zum Wärmetransfer erstellt. Durch eine Sensitivitätsanalyse am einschichtigen Modell konnten qualitative Aussagen zum Einfluss der Erhöhung bzw. Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit, spezifischen Wärmekapazität und Dichte auf die Temperaturentwicklung aufgezeigt werden.

Das mehrschichtige Modell, welches einem Aufbau der Bk10 gemäß RStO 12 entspricht, wurde zunächst in mehreren Schritten kalibriert und anschließend verwendet, um die Ergebnisse der praxisgerechten thermischen Beanspruchung im Labor zu überprüfen. Hierzu wurden die im Labor verwendeten Asphaltüberbauten mit den entsprechenden thermophysikalischen und lichttechnischen Materialeigenschaften nachgebildet. In Anlehnung an die gemessenen Globalstrahlungswerte während der Versuche im Bestrahlungsstand wurde eine konstante Strahlung von  $600 \text{ W/m}^2$  angesetzt. Die Ausgangs- und Umgebungstemperatur wurde auf  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  und ein Wärmeübergangskoeffizient für Windstille festgelegt.

Der Vergleich der Modellberechnungen mit den Laborergebnissen in einer Tiefe von 20 mm (Mitte Asphaltdeckschicht) zeigt eine höhere Übereinstimmung für die Versuchsreihen mit dunkler ( $\Delta = 5,7 \text{ K}$ ) gegenüber denen mit heller Asphaltdeckschicht ( $\Delta = 15,8 \text{ K}$ ). In einer Tiefe von 220 mm (unteres Drittel Asphalttragschicht) sind die Unterschiede

geringer. Die Laborergebnisse werden von den Versuchsreihen mit dunkler Asphaltdeckschicht überschritten ( $\Delta = 5,2 \text{ K}$ ) und von den Versuchsreihen mit heller Asphaltdeckschicht unterschritten ( $\Delta = 4,5 \text{ K}$ ). Ursächlich hierfür sind vermutlich die höhere Umgebungstemperatur trotz Klimatisierung im Labor, eine zu hohe Minderung der Strahlungsmenge durch den Reflexionsgrad im Modell und die getroffenen Annahmen für die thermophysikalischen Materialeigenschaften für die Asphaltbinder- und Asphalttragschicht aufgrund der beschriebenen Probleme.

Zur Prüfung und Beurteilung der Performance der konzipierten Asphalte wurden Asphalt- und Bindemittelprüfungen durchgeführt. Dabei wurden Untersuchungen zum Steifigkeits- und Ermüdungsverhalten mit dem Spaltzugschwellversuch, das Verformungsverhalten bei hohen Temperaturen mit dem Druckschwellversuch und dem Spurbildungsversuch sowie Untersuchungen zum Kälteverhalten mittels Abkühl- und Zugversuch durchgeführt. Die Bindemittel wurden mittels konventioneller Bindemittelprüfungen (PEN, EP RuK, BPFr, R<sub>E</sub>) und dem BTS-Verfahren analysiert.

Der Widerstand gegen bleibende Verformungen wurde mit zwei unterschiedlichen Versuchsmethoden ermittelt, dem Druckschwellversuch nach DIN EN 12697-25 [79] und dem Spurbildungsversuch nach TP Asphalt-StB Teil 22 [82]. Der Widerstand gegen bleibende Verformungen wurde in beiden Versuchen unter sonst gleichen Bedingungen durchgeführt. Eine Anpassung der Versuchstemperaturen auf die Temperaturen, die aufgrund der thermophysikalischen und lichttechnischen Materialeigenschaften zu erwarten sind, wurde in den Versuchsanordnungen nicht vorgenommen. Die Aussagen sind daher auch nur relativ. Die Auswirkungen der Temperaturen auf die Entwicklung der bleibenden Verformungen der hier geprüften Asphalte lassen sich nur über theoretisch basierte Prognosemodelle abschätzen, mit denen auch die thermophysikalischen und lichttechnischen Materialeigenschaften abgebildet werden können.

Die Steifigkeit wurde in Abhängigkeit von Frequenz und Temperatur ermittelt. Da üblicherweise bei Dimensionierungsrechnungen und Performance-Prognosen Asphaltsteifigkeiten auf Basis einer Frequenz von 10 Hz verwendet werden, werden auch die zusammenfassenden Bewertungen nachfolgend auf dieser Grundlage durchgeführt.

Die Steifigkeiten reihen sich für die Asphaltdeckschichtvarianten bei hohen Temperaturen von relativ hohen Steifigkeiten für ACD-3 und ACD-1 über mäßig hohe Steifigkeiten für ACD-9 und ACD-2 bis zu den geringsten Steifigkeiten für ACD-7. Bei niedrigen Temperaturen sind ACD-9, ACD-7 und ACD-3 auf hohem Steifigkeitsniveau; ACD-1 und ACD-2 sind auf einem relativ niedrigen Steifigkeitsniveau. Die Steifigkeiten für die Asphaltbinderschichtvarianten unterscheiden sich weder bei hohen noch bei niedrigen Temperaturen nennenswert. Bei den Asphalttragschichtvarianten sind bei hohen Temperaturen kaum Unterschiede feststellbar. Bei niedrigen Temperaturen liegen die Steifigkeiten für ACT-3 höher als für ACT-1 und ACT-2. Zusammenfassend ist festzustellen, dass nur bei ACD-Varianten signifikante Unterschiede in den temperaturabhängigen Steifigkeiten festzustellen sind.

Aufgrund der Performanceprüfungen zum Widerstand gegen bleibende Verformungen an Asphaltbetondeckschichten, geprüft mit dem Druckschwellversuch und dem Spurbildungsversuch, verhält sich die Variante ACD-9 bei 50 °C Prüftemperatur am günstigsten, unabhängig von der angewendeten Prüfmethode. In der Rangliste folgen die Varianten ACD-3 und ACD-1 bzw. ACD-1 und ACD-3, bis zu ACD-2 und ACD-7. Aufgrund der ermittelten Steifigkeiten ist das sehr gute Abschneiden auf dem Gebiet der bleibenden Verformungen der Variante ACD-9 nicht zu erwarten gewesen.

Bei der Asphaltbetonbinderschicht reihen sich die Varianten nach günstig zu weniger günstig von ACB-1, ACB-3 bis ACB-2, wobei ACB-2 wegen der geringeren Kriechrate am Versuchsende langfristig gegenüber der Variante ACB-3 als gleichwertig oder sogar als etwas günstiger einzustufen wäre. Auch hier zeigt eine Variante, die ACB-1, ein erheblich günstigeres Verhalten hinsichtlich bleibender Verformungen als die beiden anderen Varianten, obwohl sich die Steifigkeiten bei hohen Temperaturen kaum unterscheiden.

Aufgrund der Performanceprüfungen zum Widerstand gegen Ermüdung schneiden die Varianten ACB-1, ACB-2 und ACB-3 praktisch gleichwertig ab. Die geprüften Varianten ACT-2 und ACT-3 zeigen dagegen einen durchaus signifikanten Unterschied. Die Variante ACT-3 weist in dem Bereich der elastischen Anfangsdehnung von  $\epsilon_{el,Anf} < 0,1 \text{ ‰}$  einen deutlich höheren Widerstand gegen Ermüdung auf bzw. lässt deutlich höhere Lastwechselzahlen bis zum Bruch zu als die Variante ACT-2. Da

die Ermüdungsfestigkeit bei einer Temperatur von 20 °C getestet wird, ist in einer Gesamtkonstruktion die Nutzungsdauer aufgrund von Ermüdung sehr abhängig von den Steifigkeitsgradienten der Konstruktion. Infolge von relativ hohen Temperaturen in der betrachteten Konstruktion verringern sich die Schichtsteifigkeiten; die Zugdehnungen an der Unterseite der betrachteten Asphaltenschicht werden bei gleicher Belastung größer. Mit größer werdender Zugdehnung an der Unterseite nimmt jedoch die Nutzungsdauer ab. Somit ist der Widerstand gegen Ermüdung zwar eine Performance-Kenngröße, ist aber nicht hinreichend, um die Nutzungsdauer von Asphaltkonstruktionen zu bestimmen.

Das Verhalten bei tiefen Temperaturen ist eine wichtige Performance-Eigenschaft, insbesondere die Asphaltdeckschichten betreffend. Nach den Prüfverfahren einaxialer Zugversuch und Abkühlversuch nach TP Asphalt-StB Teil 46 A [83] schneiden die Asphaltdeckschichtvarianten ACD-7 und ACD-9 am schlechtesten ab. Die Varianten ACD-1, ACD-2 und ACD-3 sind in Bezug auf das Kälteverhalten insgesamt betrachtet als relativ gleich zu bewerten. Es ist hier kurz zu erwähnen, dass sich die Kälteeigenschaften von Asphalt mit abnehmender Bindemittelfilmstärke verschlechtern. Der Bindemittelgehalt, ausgedrückt in Vol.-%, gibt hierzu einen Anhalt, außer es handelt sich um poröses Gestein. Betrachtet man die Bindemittelgehalte der Asphaltdeckschichtvarianten, so weisen die Varianten mit dem synthetischen Bindemittel einmal (ACD-7) den geringsten und einmal den höchsten volumetrischen Bindemittelgehalt auf. Die Variante ACD-1 weist einen geringfügig höheren volumetrischen Bindemittelgehalt auf als ACD 7. Die Varianten ACD-2 und ACD-3 liegen hinsichtlich ihres volumetrischen Bindemittelgehaltes etwas niedriger als ACD-9. Sowohl aus den Informationen zu den volumetrischen Bindemittelgehalten als auch zu den Steifigkeiten bei niedrigen Temperaturen lassen sich keine Gesetzmäßigkeiten für das Kälteverhalten ableiten.

Außer den hier untersuchten Materialanpassungen bleiben die bereits heute üblichen Möglichkeiten der Mischgutoptimierung. In den Veröffentlichungen [84–86] konnte gezeigt werden, dass es die Wahl des Bindemittels allein bereits ermöglicht, die Performance-Eigenschaften Widerstand gegen bleibende Verformungen, Ermüdungswiderstand und Widerstand gegen Abkühlung signifikant bezüglich längerer Nutzungsdauern zu beeinflussen. Diese Untersuchungsergebnisse wurden unter sonst

gleich gehaltenen Randbedingungen wie Schichtdicken, Verkehr und Klima im Vergleich zu den Standardlösungen erzielt. Werden nun die oben genannten Ansätze zur Asphaltkonzeption mit der üblichen Mischgutoptimierung unter Einbeziehung z. B. derzeit noch nicht in den TL Asphalt-StB standardmäßig vorgesehenen Bindemitteln, wie z. B. hochpolymermodifiziertes Bitumen (PmB H), kombiniert, kann auf jeden Fall den negativen Folgen extremer Temperaturen auf das Performance-Verhalten von Asphalt erfolgreich entgegengewirkt werden.

Da es weder zum Aufgabenkatalog dieses Forschungsvorhabens gehörte derartige Asphaltkombinationen durch Mischgutoptimierungen zu testen, noch Performance-Prognosen durchzuführen, sollte ein Folgeforschungsvorhaben aufgelegt werden. Darin sollten die oben vorgestellten Ansätze zur Asphaltkonzeption (Wärmespeicherung, Wärmeableitung und aufgehellte Oberfläche) in Kombination mit Hochleistungsbindemitteln durch die Einbeziehung von Prognosen zu Performance-Entwicklungen einer Optimierung untersucht werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen dieses Forschungsprojektes könnten in einem weiteren Forschungsprojekt zudem die Auswirkungen der veränderten klimatischen Randbedingungen auf die Nutzungsdauer von Asphaltkonstruktionen untersucht werden. Mithilfe von Dimensionierungsrechnungen wären hier einerseits die Auswirkungen der veränderten Klimarandbedingungen auf die Nutzungsdauer konventioneller Asphaltkonstruktionen und andererseits klimaoptimierter Asphalte zu analysieren. Somit könnten die Fragestellungen hinsichtlich einer möglichen Verkürzung der Nutzungsdauer durch Klimaveränderungen bzw. eine Verlängerung der Nutzungsdauer durch an die Klimaänderungen angepasste Asphaltmischgüter geklärt werden.

Neben den reinen Anpassungen der Asphaltmischgüter an die aus dem Klimawandel verursachten extremen Temperaturen können auch durch verkehrspolitische Entscheidungen die Auswirkungen des Klimawandels auf die Asphaltperformance verringert werden. In diesem Zusammenhang sind insbesondere die Begrenzung der Achslasten durch die Vermeidung von Überladungen mithilfe der Fahrzeugtechnik (Smart-Lkw) und die Verteilung der Fahrzeugmasse auf eine größere Fläche (Reduktion der vom Reifen auf die Straßenoberfläche übertragenden Spannung) durch eine Erhö-

hung der Achszahl pro Fahrzeug oder die Verwendung straßenschonender Reifen zu nennen. Eine politische Steuerung wäre durch eine darauf ausgerichtete Architektur der Mautgebühren möglich. Derartige Maßnahmen können möglicherweise alternativ oder in Kombination mit der Bautechnik bzw. Optimierung der Baustoffkomponenten die Auswirkungen von extremen Temperaturen auf die Asphaltperformance reduzieren.

Abschließend ist festzuhalten, dass es sich bei den Lösungssuchen nicht um ein fernes Zukunftsproblem handelt, sondern diese zeitnah umzusetzen sind. Geht man davon aus, dass derzeit Asphalttragschichten mit einer mittleren Nutzungsdauer von 50 Jahren veranschlagt werden, liegen zum Beispiel bei Grunderneuerungen neu gebaute Asphalttragschichten bereits heute in der nahen Zukunft (Zeitscheibe 2031 bis 2060) und sogar darüber hinaus. Es ist also notwendig, zukünftige Temperaturen für heutige Dimensionierungen anzusetzen.

## Literatur

- [1] WELLNER, F.; KAYSER, S.; CLAUß, M.: Projizierter Klimawandel und Dimensionierung von Straßenbefestigungen. 2014
- [2] KAYSER, S.: Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Dauerhaftigkeit von Verkehrsflächen mit Asphaltdecke. 2009
- [3] KAYSER, S.: Climate Change – Ramifications for Structural Road Design. 2010
- [4] BEST, C. (Hrsg.): Klimaänderung 2007: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger: Vierter Sachstandsbericht des IPCC (AR4); I. Wissenschaftliche Grundlagen, II. Auswirkungen, Anpassung, Verwundbarkeiten, III. Verminderung des Klimawandels. Bern: ProClim, 2007
- [5] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht (RDO Asphalt). Ausgabe 2009. Köln, 2009
- [6] EDGAR – Emissions Database for Global Atmospheric Research: Global Emissions EDGAR v4.2 FT2012. 2014. URL <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=42FT2012>
- [7] Deutsche IPCC Koordinierungsstelle; Umweltbundesamt; ProClim: Klimaänderung 2013/2014: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. Beiträge der drei Arbeitsgruppen zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). 2016
- [8] Programme, United Nations Environment: The Emissions Gap Report 2018//EMISSIONS GAP REPORT 2018. [S.I.]: UNEP, 2019. URL [http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26895/EGR2018\\_FullReport\\_EN.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26895/EGR2018_FullReport_EN.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [9] CRIPPA, M.; OREGGIONI, G.; GUIZZARDI, D.; MUNTEAN, M.; SCHAAF, E.; LO VULLO, E.; SOLAZZO, E.; MONFORTI-FERRARIO, F.; OLIVIER, J. G. J.; VIGNATI, E.: Fossil CO<sub>2</sub> and GHG emissions of all world countries: 2019 report. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2019
- [10] STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G.-K.: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013. URL [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5\\_SummaryVolume\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf)
- [11] BARROS, V.; FIELD, C. B.: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
- [12] FIELD, C. B.; BARROS, V.: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
- [13] PACHAURI, R. K.; MEYER, L.: Klimaänderung 2014: Synthesebericht: Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). Genf, Schweiz: IPCC. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle Bonn 2016, 2016
- [14] EDENHOFER, O.; PICHS-MADRUGA, R.; SOKONA, Y.: Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. 2011
- [15] FIELD, C. B.; BARROS, V.; STOCKER, T. F.: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2012
- [16] PACHAURI, R. K.: Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Bonn: IPCC-Koordinierungsstelle, 2016. URL [https://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/deutch/IPCC-AR5\\_SYR\\_barrierefrei.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/deutch/IPCC-AR5_SYR_barrierefrei.pdf)
- [17] CLARKE, L.; JIANG, K.: Assessing Transformation Pathways. 2014
- [18] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Die Klimakonferenz

- in Paris. 2017. URL <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/pariser-abkommen/>
- [19] The emissions gap report 2019. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Program, 2019. URL <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30797/EGR2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [20] PACHAURI, R. K.; MAYER, L.: Climate change 2014: Synthesis report. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015. URL [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_wcover.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf)
- [21] EDGAR – Emissions Database for Global Atmospheric Research: Methodology. 2017. URL <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=42FT2012>
- [22] NAKIĆENOVIĆ, N.: Special report on emissions scenarios: A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2000
- [23] Bayerisches Landesamt für Umwelt: Globale Klimamodelle. 2017. URL [https://www.lfu.bayern.de/wasser/klima\\_wandel/klimamodellierung/global/index.htm](https://www.lfu.bayern.de/wasser/klima_wandel/klimamodellierung/global/index.htm)
- [24] Max-Planck-Institut für Meteorologie: MPI-ESM – New Earth system model of Max Planck Institute for Meteorology. URL <http://www.mpimet.mpg.de/en/science/models/mpiesm/> – Überprüfungsdatum 2016-11-06
- [25] ROECKNER, E.; BÄUML, G.; BONAVENTURA, L.: the atmospheric general circulation model ECHAM5 Part I: Model description. 2003
- [26] Climate Limited-area Modelling Community: The COSMO-CLM Model System and its extensions. URL <https://wiki.coast.hzg.de/clm-com/overview-98599066.html> – Überprüfungsdatum 2020-02-11
- [27] JACOB, D.: The REMO model. URL <https://www.rem0-rcm.de/059966/index.php.en#tab-1> – Überprüfungsdatum 2020-02-11
- [28] DEUTSCHLÄNDER, T.; DALELANE, C.: Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit. Forschungsvorhaben der ressortübergreifenden Behördenallianz. Offenbach am Main: 2012
- [29] Helmholtz-Zentrum: Regionaler Klimaatlas Deutschland. URL <http://www.regionaler-klimaatlas.de/> – Überprüfungsdatum 2016-11-06
- [30] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Entstehung und Verhütung von Frostschäden an Straßen. Bonn: Kirschbaum, 1994 (Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen 105)
- [31] MÜLLER, R.; PIRSKAWETZ, S.; WEISE, F.: Einfluss der Wärmeabstrahlung, -leitfähigkeit und -kapazität von Mineralstoffen auf die Energiebilanz von Fahrbahnbefestigungen. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (2007), Nr. 968
- [32] CHAKAR, L.: Optimierung des Verformungswiderstandes von Splittmastixasphalt durch Modifikation mit Elektroofenschlacke. Zugl.: Karlsruhe, Univ. (TH), Diss., 2008. Print on demand. Karlsruhe, Hannover: KIT Scientific Publ; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek, 2010 (Veröffentlichungen des Institutes für Straßen- und Eisenbahnwesen 58)
- [33] LI, H.: Evaluation of Cool Pavement Strategies for Heat Island Mitigation. Davis, USA, 2012
- [34] PRZYBILLA, S.: Mit weißer Farbe gegen die Hitze der Stadt. In: Süddeutsche Zeitung 2018 (2018-04-10)
- [35] WILHELM, O.: Gegen den Wärmeinseleffekt: Die wichtigste Komponente für helle Fahrbahnen ist ein helles Gestein in der Deckschicht. 05/2018
- [36] WILHELM, O.: Helle Tunnel und mehr: Zur Verbesserung der Sicherheit und zur Energieeinsparung bei der Beleuchtung setzt man in Luxemburg seit einigen Jahren in den Tunnelanlagen auf die Vorteile heller Deckschichten. Hannover, 03/2016
- [37] Asphalt und Bitumen: Kühl, hell und leise: Muss leiser Gussasphalt immer dunkel sein?

- Nein, muss er nicht. Das zeigen zwei interessante Projekte aus Rheinland-Pfalz. Hannover, 06/2017
- [38] MERKEL, T.; DISCHER, H.-P.; FREUND, H.-J.; NAKIĆENOVIĆ, N.: Praktische Erfahrungen mit Elektroofenschlacken im Straßenbau. 2000
- [39] MIELKE, T.; LUPASCU, D. C.; DEMOND, D.; MERKEL, T.: Emissionsminderung und Ressourcenschonung durch innovatives Asphaltmischgut mit industriellen Nebenprodukten (Posterausstellung – Deutscher Straßen- und Verkehrskongress 2016). Bremen, 28. – 30. September 2016
- [40] KRÄHENMANN, S.; WALTER, A.: Klimaindizes auf Basis der aktuellen CORDEX-Läufe: Datenanfrage für das Projekt „Asphalt und extreme Temperaturen“. 29.03.2018
- [41] Coordinated Downscaling Experiment – European Domain: About EURO-CORDEX. URL <https://www.euro-cordex.net/060374/index.php.en> – Überprüfungsdatum 2020-02-11
- [42] HÜBENER, H.; BÜLOW, K.; FOOKEN, C.; FRÜH, B.; HOFFMANN, P.; HÖPP, S.; KEULER, K.; MENZ, C.; MOHR, V.; RADTKE, K.; RAMTHUN, H.; SPEKAT, A.; STEGER, C.; TOUSSAINT, F.; WARRACH-SAGI, K.; WOLDT, M.: ReKliEs-De Ergebnisbericht. 2017
- [43] University Corporation for Atmospheric Research: The Weather Research and Forecasting (WRF) Model. URL <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model> – Überprüfungsdatum 2020-02-21
- [44] Swedish Meteorological and Hydrological Institut: Rossby Centre regional atmospheric model (RCA). URL <https://www.smhi.se/en/research/research-departments/climate-research-rossby-centre2-552/rossby-centre-regional-atmospheric-model-rca4-1.16562> – Überprüfungsdatum 2020-02-21
- [45] Van MEIJGAAR, E.; Van ULFT, L. H.; Van de BERG, W. J.; BOSVELD, F. C.; Van den HURK, B. J. J. M.; LENDERIK, G.; SIEBESMA, A. P.: The KNMI regional atmospheric climate model RACMO version 2.1
- [46] CHRISTENSEN, O. B.; DREWS, M.; CHRISTENSEN, J. H.; DETHLOFF, K. KETELSEN, K. HEBESTADT, I.; RINKE, A.: The HIRHAM Regional Climate Model Version 5 (β). 2007
- [47] FARDA, A.; DÉUÉ, M.; SOMOT, S.; HORÁNYI, A.; SPIRIDONOV, V.; TÓTH, H.: Model ALADIN as regional climate model for Central and Eastern Europe. In: *Studia Geophysica et Geodaetica* 54 (2010), Nr. 2, S. 313–332
- [48] Climate Limited-area Modelling Community: CORDEX Europe: Evaluation run performed by BTU Cottbus. URL <https://wiki.coast.hzg.de/clmcom/r04-europe-98599535.html>
- [49] GERARD, L.; GELEYN, J. F.: Evolution of a subgrid deep convection parametrization in a limited-area model with increasing resolution. In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 610 (2005), S. 2293–2312
- [50] EC-Earth: EC-Earth: A European community Earth-System Model. URL <http://www.ec-earth.org/> – Überprüfungsdatum 2020-02-21
- [51] Centre National de Recherches Météorologiques: CNRM-CM5. URL <http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article126&lang=fr>
- [52] COLLINS, W. J.; BELLOUIN, N.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; GEDNEY, N.; HALLOLAN, P.; HINTON, T.; HUGHES, J.; JONES, C. D.; JOSHI, M.; LIDDICOAT, S.; MARTIN, G.; O&APOS; CONNOR, F.; RAE, J.; SENIOR, C.; SITCH, S.; TOTTERDELL, I.; WILTSHIRE, A.; WOODWARD, S.: Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2. In: *Geoscientific Model Development* 4 (2011), Nr. 4, S. 1051–1075
- [53] Institut Pierre Simon Laplace: IPSL-CM5. URL <https://cmc.ipsl.fr/ipsl-climate-models/ipsl-cm5/> – Überprüfungsdatum 2020-02-21
- [54] IVERSEN, T.; BENTSEN, M.; BETHKE, I.; DEBERNARD, J. B.; KIRKEVÅG, A.; SELAND, Ø.; DRANGE, H.; KRISTJANSSON, J. E.; MEDHAUG, I.; SAND, M.; SEIERSTAD, I. A.: The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M – Part 2: Climate response and scenario projections. In: *Geoscientific Model Development* 6 (2013), Nr. 2, S. 389–415

- [55] WATANABE, S.; HAJIMA, T.; SUDO, K.; NAGASHIMA, T.; TAKEMURA, T.; OKAJIMA, H.; NOZAWA, T.; KAWASE, H.; ABE, M.; YOKOHATA, T.; ISE, T.; SATO, H.; KATO, E.; TAKATA, K.; EMORI, S.; KAWAMIYA, M.: MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. In: Geoscientific Model Development 4 (2011), Nr. 4, S. 845–872
- [56] Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis: Second generation Canadian Earth System Model. URL <https://www.ec.gc.ca/ccmac-cccma/default.aspx?lang=En&n=1A3B7DF1-1&wbdisable=true> – Überprüfungsdatum 2020-02-21
- [57] Arbeitskreis KLIWA: Regional Klimaszenarien für Süddeutschland: Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. 2006
- [58] VDI-Richtlinie 4640. 2010-06. Thermische Nutzung des Untergrunds
- [59] MÜLLER, Renate; PIRSKAWETZ, Stephan; WEISE, Frank: Einfluss der Wärmeabstrahlung, -leitfähigkeit und -kapazität von Mineralstoffen auf die Energiebilanz von Fahrbahnbefestigungen: [Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FE 04.191/2003/AGB des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn]. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wiss, 2007 (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 968)
- [60] Dassault Systèmes: Abaqus/CAE 2018
- [61] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO). Ausgabe 2012. Köln, 2012
- [62] MINHOTO, M. J.; PAIS, J. C.; PEREIRA, P.A.A.: Asphalt Pavement Temperature Prediction. Volume X. 2005 (Road Materials and Pavement Design No. X/2005)
- [63] Cambridge-Solar (Hrsg.): Solar panels in Cambridge: Solar PV in Cambridge
- [64] Deutscher Wetterdienst: Die Globalstrahlung. URL [https://www.dwd.de/DE/leistungen/solar\\_energie/globalstrahlung.html](https://www.dwd.de/DE/leistungen/solar_energie/globalstrahlung.html)
- [65] VANDERMEULEN, J.: Light Coloured Cool Asphalt Pavements. Hamilton, Canada, 2014
- [66] BURGER, M.: Prediction of the Temperature Distribution in the Asphalt Pavement Samples. South Africa, 2005
- [67] SOLAIMANIAN, M.; KENNEDY, T.: Predicting Maximum Pavement Surface Temperature Using Maximum Air Temperature and Hourly Solar Radiation. 1993 (Transportation Research Record 1417)
- [68] Linseis Messgeräte GMBH: Handbuch Transient Hot Bridge THB 100. Selb, 2017
- [69] ASTM E903-12: Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres. West Conshohocken, PA
- [70] WILSON, H. R.; HANEK, J.; BRUCKNER, F.: Bestimmung des „Solar Reflectance Index“ von Asphaltproben: Auftrag der Bergischen Universität Wuppertal. Bericht EEB3-HRW-1910-E12. Freiburg, 2019
- [71] Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37 Tilted Surface
- [72] Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres
- [73] DIN EN 1427:2015-09, Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel\_ - Bestimmung des Erweichungspunktes\_ - Ring- und Kugel-Verfahren; Deutsche Fassung EN\_1427:2015
- [74] DIN EN 1426:2015-09, Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel\_ - Bestimmung der Nadelpenetration; Deutsche Fassung EN\_1426:2015
- [75] DIN EN 12593:2015-09, Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel\_ - Bestimmung des Brechpunktes nach Fraaß; Deutsche Fassung EN\_12593:2015
- [76] DIN EN 13398:2018-02, Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel\_ - Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifiziertem Bitumen; Deutsche Fassung EN\_13398:2017
- [77] DIN EN 15326:2009-08, Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel\_ - Messung der Dich-

te und der relativen Dichte\_ - Pyknometerverfahren mit Kapillarstopfen; Deutsche Fassung EN\_15326:2007+A1:2009

- [78] DIN 52050:2018-12, Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel\_ - BTSV-Prüfung
- [79] DIN EN 12697-25:2016-12, Asphalt\_ - Prüfverfahren\_ - Teil\_25: Druck-Schwellversuch; Deutsche Fassung EN\_12697-25:2016
- [80] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Technische Prüfvorschriften für Asphalt TP Asphalt-StB Teil 22: Spurbildungsversuch. Ausgabe 2007. Köln, 2007
- [81] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Technische Prüfvorschriften für Asphalt TP Asphalt-StB Teil 26: Spaltzug-Schwellversuch – Bestimmung der Steifigkeit. Ausgabe 2018. Köln, 2018
- [82] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Technische Prüfvorschriften für Asphalt TP Asphalt-StB Teil 24: Spaltzug-Schwellversuch – Beständigkeit gegen Ermüdung. Ausgabe 2018. Köln, 2018
- [83] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Technische Prüfvorschriften für Asphalt TP Asphalt-StB Teil 46 A: Kälteeigenschaften: Einaxialer Zugversuch und Abkühlversuch. Ausgabe 2013. Köln, 2013
- [84] BECKEDAHL, H. J.; SIVAPATHAM, P.; JANSSEN, S.: Versuchsstrecke für Hoch belastete Busspuren aus Asphalt in Wuppertal: Vergleich der Spurbildung im Labor und in situ (Dresdner Tief- und Straßenbaukolloquium). Dresden, April 2018
- [85] SIVAPATHAM, P.; BECKEDAHL, H. J.; HOFFMANN, T.: Influence of Mechanical Properties of Compacted Asphalt and Temperature on Fatigue (6th International Conference on Road & Airfield Pavement Technology 2008). Sapporo Japan, 20. – 23. Juli 2008
- [86] BECKEDAHL, H. J.; SIVAPATHAM, P.; NEUTAG, L.: Performance of Asphalt Pavements with High Polymer Modified Bitumen – A Life-Cycle Study (Gebrauchsverhalten von Asphaltstraßen mit hochpolymermodifiziertem Bitumen: eine Lebenszyklusbetrachtung) (4<sup>th</sup> Euraspalt & Eurobitume Congress 2008). Kopenhagen, Dänemark, 21. – 23. Mai 2008

## Bilder

- Bild 2-1: Fossile Kohlenstoffdioxidemissionen weltweit, in Deutschland und den EU 28; Eigene Darstellung auf Grundlage der Daten aus Tabelle 2-1
- Bild 2-2: Treibhausgasemissionen weltweit und in Deutschland; Eigene Darstellung auf Grundlage der Daten aus Tabelle 2-2
- Bild 2-3: Emissionspfade des AR5 im Zeitraum von 2000 bis 2100 für unterschiedliche Szenarien [17]
- Bild 4-1: Original DWD-Daten (HYRAS-Gebiet) TagW – August – Beobachtung (1971 – 2000)
- Bild 4-2: Zuschnitt DWD-Daten (BRD-Gebiet) TagW – August – Beobachtung (1971 – 2000)
- Bild 4-3: TagW- August – nahe Zukunft (2031 – 2060) – RCP 4.5 – 85. Perzentil
- Bild 4-4: TagW- August – ferne Zukunft (2071 – 2100) – RCP 4.5 – 85. Perzentil
- Bild 4-5: Klimatische Entwicklung der warmen Tage im Monat August über alle Zeitscheiben im RCP4.5
- Bild 4-6: Kombi 1 – August – Beobachtung (1971 – 2000)
- Bild 4-7: Kombi 1 – August – RCP4.5 – ferne Zukunft (2071 – 2100) – 85. Perzentil
- Bild 4-8: Kombi 1 – August – ferne Zukunft (2071 – 2100) – RCP8.5 – 15. Perzentil
- Bild 4-9: Kombi 1 – August – ferne Zukunft (2071 – 2100) – RCP8.5 – 85. Perzentil
- Bild 4-10: Kombination 1 – August – Verteilung des Klimaindex über das BRD-Gebiet
- Bild 4-11: TagH – August – Beobachtung (1971 – 2000)
- Bild 4-12: TagH – August – RCP4.5 – ferne Zukunft (2071 – 2100) – 85. Perzentil
- Bild 4-13: TagH – August – ferne Zukunft (2071 – 2100) – RCP8.5 – 15. Perzentil
- Bild 4-14: TagH – August – ferne Zukunft (2071 – 2100) – RCP8.5 – 85. Perzentil

- Bild 4-15: TagH – August – Verteilung des Klimaindex über das BRD-Gebiet
- Bild 4-16: NachtT – August – Beobachtung (1971 – 2000)
- Bild 4-17: NachtT – August – RCP4.5 – ferne Zukunft (2071 – 2100) – 85. Perzentil
- Bild 4-18: NachtT – August – ferne Zukunft (2071 – 2100) – RCP8.5 – 15. Perzentil
- Bild 4-19: NachtT – August – ferne Zukunft (2071 – 2100) – RCP8.5 – 85. Perzentil
- Bild 4-20: NachtT – August – Verteilung des Klimaindex über das BRD-Gebiet
- Bild 4-21: NachtW – August – Beobachtung (1971 – 2000)
- Bild 4-22: NachtW – August – RCP4.5 – ferne Zukunft (2071 – 2100) – 85. Perzentil
- Bild 4-23: NachtW – August – ferne Zukunft (2071 – 2100) – RCP8.5 – 15. Perzentil
- Bild 4-24: NachtW – August – ferne Zukunft (2071 – 2100) – RCP8.5 – 85. Perzentil
- Bild 4-25: NachtW – August – Verteilung des Klimaindex über das BRD-Gebiet
- Bild 6-1 Schema des Wärmestroms an der Fahrbahnoberfläche
- Bild 6-2: Darstellung des standardisierten Oberbaus
- Bild 6-3: Eine schematische Konfiguration für ein Einzelschichtmodell
- Bild 6-4: Ausschnitt der Netz-Konfiguration für das mehrschichtige Finite-Elemente-Modell
- Bild 6-5: Fahrbahnoberflächentemperaturen für eine Woche bei einer maximalen Globalstrahlung von  $890 \text{ W/m}^2$
- Bild 6-6: Fahrbahnoberflächentemperaturverlauf für einen Monat bei einer maximalen Globalstrahlung von  $890 \text{ W/m}^2$
- Bild 6-7: Temperaturverlauf in verschiedenen Tiefen für eine Woche bei einer maximalen Globalstrahlung von  $890 \text{ W/m}^2$
- Bild 6-8: Fahrbahnoberflächentemperatur für eine Woche bei verschiedenen Tagesganglinien der Lufttemperatur
- Bild 6-9: Fahrbahnoberflächentemperaturen bei unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten
- Bild 6-10: Fahrbahnoberflächentemperaturen bei unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten im Asphaltoberbau
- Bild 6-11: Temperaturgradienten um 15:00 Uhr für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten im Asphaltoberbau
- Bild 6-12: Temperaturgradienten in unterschiedlichen Tiefen zwischen 06:00 und 24:00 Uhr
- Bild 6-13: Lufttemperatur und Globalstrahlung in Mannheim für den Monat August 2003
- Bild 6-14: Fahrbahnoberflächentemperatur für einen Monat unter Verwendung der Klimadaten von Mannheim im August 2003
- Bild 6-15: Temperaturgradienten an einer idealisierten Asphalttschicht mit verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten
- Bild 6-16: Temperaturgradienten an einer idealisierten Asphalttschicht mit verschiedenen spezifischen Wärmekapazitäten
- Bild 6-17: Temperaturgradienten an einer idealisierten Asphalttschicht mit verschiedenen Rohdichten.
- Bild 7-1: Messgerät: Heizbrückenverfahren Transient Hot Bridge (THB)
- Bild 7-2: Grundprinzip und Probenanordnung des THB (eigene Darstellung nach [68])
- Bild 7-3: Sensoren THB 6N (82 x 42 mm) links und THB6K/MFR (42 x 22 mm) mit Metallrahmen rechts
- Bild 7-4: MPK SMA-2 mit plangeschliffenen Schnittkreisflächen (o. l.), Platzierung des Messensors auf der Oberfläche (o. r.), Platzierung des Messensors zwischen zwei Marschallprobekörpern (u. l.), Belastung der Probekörper durch Stempel (u. r.)

- Bild 7-5: Wärmeleitfähigkeit für Deckschichtvarianten aus Asphaltbeton (ACD) und Splittmastixasphalt (SMA) mit unterschiedlichen Gesteinsarten (Diabas: grün; Quarzit: gelb; EOS: blau) 27 Stunden bei einer Bestrahlung von ca. 600 W/m<sup>2</sup>
- Bild 7-6: Spezifische Wärmekapazität für Deckschichtvarianten aus Asphaltbeton (ACD) und Splittmastixasphalt (SMA) mit unterschiedlichen Gesteinsarten (Diabas: grün; Quarzit: gelb; EOS: blau)
- Bild 7-7: Temperaturleitfähigkeit für Deckschichtvarianten aus Asphaltbeton (ACD) und Splittmastixasphalt (SMA) mit unterschiedlichen Gesteinsarten (Diabas: grün; Quarzit: gelb; EOS: blau)
- Bild 7-8: Oberflächenbilder der untersuchten Asphaltprobekörper
- Bild 7-9: Horizontaler Schnitt durch die RHOWIN-Ulbrichtkugel [70]
- Bild 7-10: Beispielfotos der Probekörper für die Bestrahlungsanlage
- Bild 7-11: Bestrahlungsstand mit zwei unterschiedlichen Asphaltaufbauvarianten und Pyranometer in der Mitte
- Bild 7-12: Temperaturgradienten der Versuchsreihen 1-1 und 1-2 nach 1, 8 und 27 Stunden bei einer Bestrahlung von ca. 600 W/m<sup>2</sup>
- Bild 7-13: Temperaturgradienten der Versuchsreihen 1-1, 2-1 und 2-2 nach 1, 8 und 27 Stunden bei einer Bestrahlung von ca. 600 W/m<sup>2</sup>
- Bild 7-14: Temperaturgradienten der Versuchsreihen 1-1, 2-2, 3-1 und 3-2 nach 1, 8 und 27 Stunden bei einer Bestrahlung von ca. 600 W/m<sup>2</sup>
- Bild 7-15: Temperaturgradienten der Versuchsreihen 1-1, 3-1, 3-2, 4-1 und 4-2 nach 1, 8 und 27 Stunden bei einer Bestrahlung von ca. 600 W/m<sup>2</sup>
- Bild 7-16: Temperaturgradienten der Versuchsreihen 1-1, 3-2, 4-1, 5-1 und 5-2 nach 1, 8 und 27 Stunden bei einer Bestrahlung von ca. 600 W/m<sup>2</sup>
- Bild 7-17: Temperaturgradienten der Versuchsreihen 1-1, 4-1, 6-1 und 6-2 nach 1, 8 und 27 Stunden bei einer Bestrahlung von ca. 600 W/m<sup>2</sup>
- Bild 7-18: Temperaturgradienten der Versuchsreihen 7-1 und 7-2 nach 1, 8 und 27 Stunden bei einer Bestrahlung von ca. 600 W/m<sup>2</sup>
- Bild 7-19: Temperaturänderungen nach 27 Stunden aller Versuchsreihen ohne Wiederholungsmessungen in der ADS [ $\Delta T(20\text{mm})$ ] und ATS [ $\Delta T(220\text{mm})$ ] sowie die Summe der Temperaturdifferenzen [ $\Delta T(\Sigma)$ ] als Indikator für die gesamte Temperaturerhöhung im gesamten Aufbau (gelb = helle ADS; grün = dunkle ADS)
- Bild 7-20: Modellrechnung am dreischichtigen Asphaltoberbau in Netzdarstellung für Versuchsreihe 5-2 nach einer Stunde (links), acht Stunden (Mitte) und 27 Stunden (rechts)
- Bild 7-21: Vergleich der Modellberechnungen mit den Laborergebnissen in 20 mm Tiefe (gelb = helle ADS; grün = dunkle ADS)
- Bild 7-22: Vergleich der Modellberechnungen mit den Laborergebnissen in 220 mm Tiefe (gelb = helle ADS; grün = dunkle ADS)
- Bild 8-1: Mittlere Kriechkurve der Varianten ACD-1, ACD-2, ACD-3, ACD-7 und ACD-9 bei einer Prüftemperatur von 50 °C
- Bild 8-2: Mittlere Kriechkurve der Varianten ACB-1, ACB-2, ACB-3 bei einer Prüftemperatur von 50 °C
- Bild 8-3: Mittlere Spurrinntentiefe der Varianten ACD-1, ACD-2, ACD-3, ACD-7 und ACD-9 bei einer Prüftemperatur von 60 °C und der Varianten ACD-1 und ACD-2 bei einer Prüftemperatur von 70 °C
- Bild 8-4: Hauptkurven der Varianten ACD-1, ACD-2, ACD-3, ACD-7 und ACD-9 bei der Referenztemperatur  $T_0 = 20$  °C
- Bild 8-5: Steifigkeits-Temperaturfunktionen der Varianten ACD-1, ACD-2, ACD-3, ACD-7 und ACD-9 für die Frequenz  $f = 10$  Hz
- Bild 8-6: Hauptkurven der Varianten ACB-1, ACB-2 und ACB-3 bei der Referenztemperatur  $T_0 = 20$  °C

- Bild 8-7: Steifigkeits-Temperaturfunktionen der Varianten ACB-1, ACB-2 und ACB-3 für die Frequenz  $f = 10$  Hz
- Bild 8-8: Hauptkurven der Varianten ACT-1, ACT-2 und ACT-3 bei der Referenztemperatur  $T_0 = 20$  °C
- Bild 8-9: Steifigkeits-Temperaturfunktionen der Varianten ACT-1, ACT-2 und ACT-3 für die Frequenz  $f = 10$  Hz
- Bild 8-10: Ermüdungsfunktionen der Varianten ACB-1, ACB-2 und ACB-3
- Bild 8-11: Ermüdungsfunktionen der Varianten ACT-2 und ACT-3
- Bild 8-12: Bruchtemperatur und Bruchspannung bei Versagen der Varianten ACD-1, ACD-2, ACD-3, ACD-7 und ACD-9
- Bild 8-13: Bruchtemperatur und Bruchspannung bei Versagen der Varianten ACB-1, ACB-2 und ACB-3
- Bild 8-14: Maximalwert der Zugfestigkeitsreserve der Varianten ACD-1, ACD-2, ACD-3, ACD-7 und ACD-9
- Bild 8-15: Maximalwert der Zugfestigkeitsreserve der Varianten ACB-1, ACB-2 und ACB-3
- Tabellen**
- Tab. 2-1: Fossile Kohlenstoffdioxidemissionen [Mt CO<sub>2</sub>/Jahr] weltweit, in Deutschland und den EU 28; Eigene Darstellung nach [9]
- Tab. 2-2: Treibhausgasemissionen [Mt CO<sub>2</sub> Äq/ Jahr] weltweit, in Deutschland und den EU 28; Eigene Darstellung nach [9]
- Tab. 2-3: Weltweite anthropogene CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossilen Brennstoffen und anderen industriellen Quellen [Gt CO<sub>2</sub>] in den Jahren 2010, 2030, 2050, 2060, 2070 und 2100 (ohne AFOLU); Eigene Darstellung und Berechnungen nach [10]
- Tab. 2-4: Weltweite anthropogene CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossilen Brennstoffen und anderen industriellen Quellen [Gt CO<sub>2</sub>] in den Jahren 2010, 2030, 2050, 2060, 2070 und 2100 (inkl. AFOLU); Quelle: eigene Darstellung und Berechnung nach [10]
- Tab. 2-5: Gesamte globale Treibhausgasemissionen im Jahr 2030 im 2005-policies(no-policy)-Basis-szenario und Current Policy-Szenario (Median und 10. bis 90. Perzentilbereich) in Gt CO<sub>2</sub> Äq [8]
- Tab. 2-6: Globale Treibhausgasemissionen im Jahr 2030 für verschiedene Szenarien (Median und 10. bis 90. Perzentilbereich), Temperature Auswirkungen und der resultierenden Emissionslücke [8]
- Tab. 2-7: Treibhausgasemissionen [Mt CO<sub>2</sub>Äq] und Kohlendioxidemissionen [Mt CO<sub>2</sub>] in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft in Berichten und Szenarien (Stand: 11.12.2019) [7, 10, 19, 21]
- Tab. 3-1: Mögliche mittlere Änderungen bzw. Häufigkeiten des Auftretens im Jahresmittel bis Mitte des 21. Jh. (2041 bis 2070) im Vergleich zu heute (1961 bis 1990) [29]
- Tab. 4-1: Zur Analyse der zukünftigen Klimarandbedingungen verwendeter Katalog der Klimaindizes nach [40]
- Tab. 4-2: Übersicht über die Global- und Regionalmodellpaare pro verwendetem RCP-Szenario nach [40]
- Tab. 5-1: Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität ausgewählter Gesteinstypen [58]
- Tab. 5-2: Übliche Albedo-Werte einer Asphaltdeckschicht [59]
- Tab. 5-3: Mischgutkonzeptionen für Asphaltdeckschichten, Asphaltbinderschichten und Asphalttragschichten
- Tab. 6-1: Thermische Eigenschaften für die Schichten einer Straßenbefestigung mit Asphaltdecke
- Tab. 7-1: Auswertung der THB-Messungen
- Tab. 7-2: Varianten und Beschreibung der untersuchten Proben
- Tab. 7-3: Solare Strahlungsreflexionsgrade nach ASTM E 903-12 [70]
- Tab. 7-4: Übersicht der im Bestrahlungsstand untersuchten Aufbauten
- Tab. 7-5: Aufbauten der Versuchsreihen 1-1 und 1-2

- Tab. 7-6: Aufbauten der Versuchsreihen 1-1, 2-1 und 2-2
- Tab. 7-7: Aufbauten der Versuchsreihen 1-1, 2-2, 3-1 und 3-2
- Tab. 7-8: Aufbauten der Versuchsreihen 1-1, 3-1, 3-2, 4-1 und 4-2
- Tab. 7-9: Aufbauten der Versuchsreihen 1-1, 3-2, 4-1, 4-2, 5-1 und 5-2
- Tab. 7-10: Aufbauten der Versuchsreihen 1-1, 3-2, 4-1, 6-1 und 6-2
- Tab. 7-11: Aufbauten der Versuchsreihen 7-1 und 7-2
- Tab. 7-12: Variable Eingangswerte für die Modellrechnung je Versuchsreihe
- Tab. 8-1: Übersicht der Variante je Bindemittel und Zusatzstoff
- Tab. 8-2: Übersicht der Bindemittelprüfungen am PmB 25/55-55A, StB 50/70 und SynB
- Tab. 8-3: Mittlere Kriechrate und mittlere Gesamtaxialdehnung der Varianten ACD-1, ACD-2, ACD-3, ACD-7 und ACD-9 bei einer Prüftemperatur von 50 °C
- Tab. 8-4: Mittlere Kriechrate und mittlere Gesamtaxialdehnung der Varianten ACB-1, ACB-2 und ACB-3 bei einer Prüftemperatur von 50 °C
- Tab. 8-5: Minimaltemperaturen nach 1, 8 und 27 Stunden und entsprechende Steifigkeitsmodule für Asphaltdeckschichtvarianten
- Tab. 8-6: Minimaltemperaturen nach 1, 8 und 27 Stunden und entsprechende Steifigkeitsmodule für Asphaltbinderschichtvarianten
- Tab. 8-7: Minimaltemperaturen nach 1, 8 und 27 Stunden und entsprechende Steifigkeitsmodule für Asphalttragschichtvarianten
- Tab. 8-8: Ermüdungsfunktion und Bestimmtheitsmaß der Asphaltbinderschichtvarianten
- Tab. 8-9: Ermüdungsfunktion und Bestimmtheitsmaß für Asphalttragschichtvarianten

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Straßenbau“

## 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 Asphalteigenschaften 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 duraBAS

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.

**S 149: Untersuchungen zur Durchsickerung von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen**

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

**S 150: Abschätzung des Restwerts im PMS am Ende des Bewertungszeitraums**

Stöckner, Sagnol, Brzuska, Wellner, Blasl, Sommer, Krause, Komma € 19,50

**S 151: Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Waschbetonfahrbahndecken mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze**

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

**S 152: Wiederverwendung von RC-Baustoffen aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken**

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

**S 153: Optimierung von Fugensystemen in Betonfahrbahndecken – Messtechnische Grundlage zur Ermittlung realer Beanspruchungen in situ**

Recknagel, Spitzer, Hoppe, Wenzel, Pirskawetz € 23,00

**S 154: Prozessoptimierung der Asphaltextraktion mit Oktansäuremethylester (OME)**

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

**S 155: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton – Verteilungsfunktion und Extremwerte**

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

**S 156: Asphaltoberbau und extreme Temperaturen**

Beckedahl, Schrödter, Koppers, Mansura, Reutter, Thelen  
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](http://www.schuenemann-verlag.de)

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