
Anpassung der Dimensionierung an den Klimawandel

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Straßenbau Heft S 219

Anpassung der Dimensionierung an den Klimawandel

von

Lukas Renken, Jan Lehmkuhl, Johannes Neumann, Chenwen Liu
ISAC GmbH Ingenieurgesellschaft für Straßenwesen Aachen

Max Ulrich
AtmoVera, Leipzig

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Straßenbau Heft S 219

Die Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen. 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 BASt, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG bezogen werden. Seit 2015 stehen sie zusätzlich als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung: <https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 04.0332
Anpassung der Dimensionierung an den Klimawandel

Fachbetreuung:
Dirk Jansen

Referat:
Analyse und Entwicklung von Straßenoberbauten

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

Redaktion:
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:
MedienMélange:Kommunikation

Druck, Verlag und Produktsicherheit:
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 0 | E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9323 | ISBN 978-3-95606-865-2 | <https://doi.org/10.60850/bericht-s219>

Bergisch Gladbach, Juli 2025

Kurzfassung

Mit der Veröffentlichungen der IPCC (2018) und Bundesregierung (2022) wird die Dringlichkeit der Anpassung der Dimensionierung der Straßen an den Klimawandel deutlich. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde ein Verfahren zur Anpassung der Regelwerke zur rechnerischen und empirischen Dimensionierung der Straße an den Klimawandel auf Basis projizierter Klimadaten erstellt. Hierfür wurde zunächst entsprechende Referenz- und Zukunftsdatensätze vorbereitet. Im Anschluss daran wurde ein umfangreiches thermisches Finite-Volumen-Methode (FVM)-Modell mit Open Source Field Operation and Manipulation (OpenFOAM) erstellt, um den Temperaturverlauf in der Straßenkonstruktion durch die Fourier-Gleichung zu berechnen. Das Modell wurde für mehrere von Dakota beliebig gewählte räumliche Probestellen innerhalb Deutschlands in der Cloud berechnet. Die Ergebnisse des Modells wurden verwendet, um Klimainduzierte Straßentemperaturkarte (KiST-Karte) für die Betonbauweise zu erstellen. Für die Asphaltbauweise wurde die KiST-Karte nach der Regressionsmethode aus Augter und Kayser (2016) (KiST-Methode) erstellt. Die KiST-Karten zusammen mit der Frosteinwirkungszonenkarte (FWZ-Karte) bieten dabei eine Orientierungshilfe, um Anpassungsmaßnahmen zu priorisieren und umzusetzen. Danach wurden mechanische Modelle für Beton und Asphalt erstellt, um die Auswirkungen der Temperaturänderung auf die Nutzungsdauer (ND) der Verkehrsflächenbefestigungen (zulässige Lastwechselzahl) zu bewerten. Nach der Sensitivitätsanalyse der ND mithilfe der Modelle zeigte es sich, dass die Sonnenstrahlung (SSR) und Lufttemperatur in 2m Höhe (T2M) einen großen Einfluss auf die ND der Beton- und Asphaltbauweise haben:

$$\Delta ND_B = 2,78\Delta SSR + 6,88\Delta T2M, \Delta ND_A = 10\Delta T2M.$$

Auf Grundlage der Erkenntnisse wurde ein Schwellenwert von 5 Jahren für die Aktualisierung der KiST-Karten für die Beton- und Asphaltbauweise vorgeschlagen. Für FWZ-Karte ist die Sensitivitätsanalyse nicht möglich und die Schwellenwert für die Aktualisierung wurde nicht festgelegt.

Das Ziel, ein Verfahren zur Anpassung der Regelwerke zur rechnerischen und empirischen Dimensionierung an den Klimawandel auf Basis projizierter Klimadaten zu erstellen, wurde erreicht. Die Erweiterbarkeit dieses Verfahrens und des entsprechenden Programmiercode ermöglichen eine zukünftige Aktualisierung der KiST-Karten mit den neuen Klimaszenarien, neuen Dimensionierungsmodellen, neuen Klimamodellen sowie neuen Daten für die Nachhaltigkeitsbewertung.

Abstract

With the publications of the IPCC (2018) and German Government (2022), the urgency of adapting the design of pavement to climate change becomes clear. In the context of this research project, a procedure for adapting the regulations for the pavement design to climate change based on projected climate data was developed. For this purpose, appropriate reference and future data sets were first prepared. Subsequently, an extensive thermal Finite Volume Method (FVM) model with Open Source Field Operation and Manipulation (OpenFOAM) was created to calculate the temperature profile in the pavement structure using the Fourier equation. The model was calculated for several spatial sample points within Germany chosen at random by Dakota in the cloud. The results of the thermal model were used to create Climate induced Road Thermal State Map (KiST Map) for concrete pavement. For the asphalt pavement, the KiST Map was created according to the Regression Method from Augter und Kayser (2016) (KiST Method). The KiST Maps together with the Frost Impact Zone Map (FWZ Map) provide guidance to prioritize and implement adaptation measures. After that, mechanical models for concrete and asphalt were created to assess the effects of temperature change on the Service Life (SL) of the pavement surfaces (permissible load change number). After the sensitivity analysis of the SL using the models, it was shown that the Solar Shortwave Radiation (SSR) and Air Temperature at 2m height (T2M) have a significant influence on the SL of the concrete and asphalt pavement:

$$\Delta SL_B = 2,78\Delta SSR + 6,88\Delta T2M, \Delta SL_A = 10\Delta T2M.$$

Based on the findings, a threshold of 5 years for updating the KiST Maps for concrete and asphalt construction was proposed. For FWZ Map, the sensitivity analysis is not possible and the threshold for updating was not determined.

The goal of creating a procedure for adapting the regulations for computational and empirical dimensioning to climate change based on projected climate data was achieved. The extensibility of this procedure and the corresponding programming code enable a future update of the KiST Maps with new climate scenarios, new dimensioning models and new climate models.

Summary

Adaptation of Road Design to Climate Change

With the publications of the IPCC (2018) and German Government (2022), the urgency of adapting the design of pavement to climate change becomes clear. Although the regulations for the design of pavements have been adapted to the current climate state in recent years (Augter and Kayser 2016; Blume and Plehm 2009; Villaret et al. 2019), the impacts of future climate changes on the pavements have not yet been taken into account. The methodology for updating the regulations for the design of pavements to climate change is described in Augter and Kayser (2016), Blume and Plehm (2009) and Villaret et al. (2019), but when and how often the regulations need to be updated has not yet been investigated. As part of this research project, the impacts of climate change on the design of pavements should be investigated. In addition, a procedure for adapting the regulations for computational and empirical design to climate change based on predicted climate data should be created.

1 Preparation of the Weather Database

For a sufficient data basis, current and future weather data had to be acquired first. These data (especially Solar Shortwave Radiation (SSR) and Air Temperature at 2m height (T2M)) are crucial for calculating the thermal load in pavements, as they form the basis for all subsequent calculations. To ensure high precision, a target resolution of spatially 5x5 km and temporally one hour was aimed for. The input data consist of reference data sets, which were already available in this spatial and temporal target resolution, as well as climate projection data, which had the spatial, but not the desired temporal resolution, as they only contain daily values.

To bring these climate projection data to the desired resolution, various techniques such as quantile mapping for bias correction and multivariate statistical interpolation for increasing the temporal resolution were applied. These approaches make it possible to downscale the daily data of the climate models to an hourly resolution. For this purpose, a statistically deterministic, multivariate regression interpolation of daily climate averages to hourly weather data was used based on historical reference data to define the daily change of the climate variables.

The climate projection datasets was derived from the regional climate projection ensembles of the Deutscher Wetterdienst, the DWD core ensemble. For this project, climate models for three different climate scenarios could be used: RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5. These scenarios represented different assumptions about future greenhouse gas emissions and their impacts on the climate. RCP2.6 is a scenario with effective global climate protection measures, RCP8.5 is a scenario without effective global climate protection, and RCP4.5 is a middle ground. By using these three scenarios, a wide range of possible future climate conditions could be covered.

The prepared climate data were processed so that they could be used directly in thermal and mechanical models. This allows the calculation of surface temperatures, temperature gradients and the resulting mechanical stresses with the models provided for this purpose.

The applied methodology ensured that the climate data have a level of detail that is suitable for the project-specific technical and scientific requirements.

2 Calculation with the Models

Subsequently, a comprehensive thermal FVM model was created with Open Source Field Operation and Manipulation (OpenFOAM). This model allows the calculation of the temperature profile within pavements through a Fourier equation and provides important insights into the effects of various weather conditions (including the SSR and the T2M) on the roads. The model was configured to process the weather data from the previous step. Since the calculation of the temperature profile in pavements is very computationally intensive, the model was optimized so that the meshing of the model is as coarse as possible, but only as fine as necessary. Other configurations of the model, such as the calculation step size, the tolerance of convergence, and the saving of results, were also optimized to speed up the calculation.

In the next step, the mechanical models for concrete and asphalt were created to investigate the effects of temperature change on the Service Life (SL) of pavements (permissible load repeat number). The input data for the thermal load came from the thermal model. The mechanical model for concrete was based on the method according to RDO Beton Entwurfsfassung (2018) and a FEM model from Neumann et al. (2023). The sensitivity analysis of the SL carried out with the help of the models showed that the temperature and solar radiation change has a large influence on the SL of the concrete construction method:

$$\Delta SL_B = 2,78\Delta SSR + 6,88\Delta T2M.$$

The mechanical model for asphalt was based on the method according to RDO Asphalt (2009). To simplify the creation of Climate induced Road Thermal State Map (KiST Map) for asphalt, the damage accumulation according to the Regression Method from Augter and Kayser (2016) (KiST Method) were also calculated. The sensitivity analysis showed that the temperature change has a large influence on the damage accumulation or the SL:

$$\Delta SL_A = 10\Delta T2M.$$

To automate the calculation of the thermal load both locally and in the cloud, the model was provided in a Docker container. This significantly facilitated access to and use of the model. The programming code along with instructions was submitted along with the report to use data from new climate models for the creation and updating of the design guidelines.

3 Creation of Climate Maps

Further investigations included the creation of Frost Impact Zone Map (FWZ Map) for RStO (2012) and KiST Map for RDO Asphalt (2009) and RDO Beton (2009).

A creation of FWZ Maps for the historical reference period 1991 to 2020 and for future climate periods under the scenarios RCP 2.6, 4.5 and 8.5 was carried out to understand the impacts of climate change on frost penetration depth. These maps are based on the 30-year recurrence value of frost penetration depth, which is derived from the duration and intensity of frost periods with negative average temperatures. Longer frost periods lead to deeper frost penetration, which is particularly relevant for frost-proof subgrade in road construction. The FWZ Maps for the reference period show that the frost penetration depth has already decreased in comparison with the old map in RStO (2012) and that this trend will continue to varying degrees under the different climate scenarios. This means that in many regions of Germany in the future, the frost-proof subgrade could be less strong than before, especially under the assumption of the climate scenarios RCP4.5 and RCP8.5. Under the assumptions of an RCP2.6, no significant change in frost penetration depth is to be expected. Although the detailed FWZ Maps for the future periods are not yet available, the general reduction in frost penetration depth is a clear sign of the changes that climate change brings. Adapting the frost-proof subgrade to the changed conditions could lead to cost savings in road construction and enable more efficient use of resources. Overall, the FWZ Maps provide a scientifically sound basis for planning a sustainable and future-proof infrastructure that takes into account the impacts of climate change and can be integrated into practical planning and construction considerations.

The creation of the KiST Maps for the asphalt construction method of the reference period 1991-2020 and future climate periods is based on the KiST Method according to Augter and Kayser (2016). This representation makes it possible to clearly identify spatial differences in the extent of the thermal damage potential. The results of the project clearly show that asphalt surfaces will be subject to higher thermal loads in the future due to increased temperatures. The expected changes in total damage are so significant for the climate scenarios RCP4.5 and RCP8.5 that the currently highest observed damage values will likely be exceeded at all locations in Germany in the future. The KiST Maps provide a guide to prioritize and implement adaptation measures.

The creation of the KiST Maps for the concrete construction method is based on a combination of the results from thermal-mechanical modeling with weather data, see also Villaret et al. (2019). In this process, the results of point calculations for the mechanical equivalent temperature gradient in the concrete pavement were related to climate variables. Since the solar radiation in the climate models hardly or only moderately changes due to increasing periods with high sunshine duration, the change in the mechanical equivalent temperature gradient and its frequency distribution was also relatively small. This distribution, or its

90th percentile, was shown on the KiST Maps for concrete pavement. The KiST Maps for concrete pavement provide an important guide to minimize future damage and adapt the concrete pavement more effectively to the expected climatic conditions. They enable targeted planning and implementation of construction and maintenance work that is tailored to the specific requirements and risks of each region.

4 Impacts of Climate Change on Regulations

The update of the KiST Maps has shown that the frost penetration depth will decrease overall due to climate change, which should lead to lower material and construction costs for frost protection of the road structure. On the other hand, the thermal boundary conditions, especially for asphalt, but also for concrete pavement, will deteriorate. This requires adjustments both in the construction methods and in the thickness of the pavement and the chosen material parameters. Such adjustments must also be reflected in the regulations to meet the new challenges. Under climate scenario RCP 2.6, however, only minor significant changes were expected compared to the reference period. However, the scenarios RCP 4.5 and 8.5 already showed relevant changes in the near future, which were particularly intensified under RCP 8.5. This underscored the need to adapt future construction projects and infrastructure measures to the expected climatic conditions.

Equally important is continuous climate monitoring. This plays a crucial role in decision-making about adaptation processes and allows planning based on the most likely developments of future greenhouse gas emissions and the associated climatic changes. Regular monitoring provides the necessary data basis to be able to react to changes in a timely and effective manner and is thus essential for the sustainable design and maintenance of infrastructure. For this purpose, threshold values were determined with the sensitivity analysis for the update of the KiST Maps: 5 years reduction of the SL. For the FWZ Maps, no sensitivity analysis was possible, so no threshold values were determined. These threshold values are relevant to ensure that the maps are always up-to-date and representative of the current environmental conditions.

5 Summary

The goal of creating a procedure for adapting the regulations for computational and empirical design to climate change based on predicted climate data has been achieved. The extensibility of this procedure and the corresponding programming code allow a future update of the KiST Maps with the new climate scenarios, new design models and new climate models.

Inhalt

Akronyme	12
Symbole	14
1 Einführung	16
1.1. Forschungsziel	16
1.2. Vorgehen	17
2. Stand der Technik	19
2.1. Thermische Modellierung	19
2.1.1. Klimarandbedingungen	19
2.1.2. Energiebilanz an der Oberfläche	20
2.1.3. Bodentemperatur	25
2.1.4. Einfluss des Klimawandels	25
2.2. Mechanische Modellierung	29
2.2.1. Frosteinwirkung und Verwendung in den RStO	29
2.2.2. Asphalt	30
2.2.3. Beton	35
3. Bereitstellung der meteorologischen Datensätze	45
3.1. Hydrometeorologische Rasterdaten (HYRAS)-Datensatz	45
3.2. ECMWF Reanalysis v5 (ERA5) Datensatz	46
3.3. Klimaprojektionen des DWD-Kernensembles	46
3.4. Datenverschnitt	48
3.5. Zeitliches Downscaling	48
3.6. Projektion in die Zukunft	49
3.7. Herausforderungen der Klimadaten im Projekt	50

4.	Erstellung des deterministischen Modells	54
4.1.	Erstellung des thermischen Straßenmodells	54
4.2.	Erstellung des strukturmechanischen Straßenmodells	57
4.2.1.	Ein- und Ausgabedaten	58
4.2.2.	Dimensionierung nach RDO Asphalt (2009)	58
4.2.3.	Dimensionierung nach RDO Beton (2009)	60
4.3.	Kopplung der deterministischen Modelle	63
5.	Implementierung der Stochastik und Deployment in die Cloud	64
5.1.	Inbetriebnahme von Dakota	64
5.2.	Lokale Plausibilitätsanalyse	65
5.2.1.	Deutsche Wetterdienst (DWD) Daten	65
5.2.2.	Thermisches Modell	68
5.2.3.	Mechanisches Modell	72
5.2.4.	Parallelisierung in Dakota und Postprocessing	73
5.3.	Deployment in der Cloud	74
5.4.	Berechnungen für Referenz- und Klimaprojektionsdaten	75
5.4.1.	Anpassung des Modellaufbaus	76
5.4.2.	Anpassung des Kriteriums für das Erstellen der KiST-Karte	77
5.4.3.	Anpassung der Stochastik	78
5.4.4.	Zusammenfassung der erforderlichen Zeit	82
6.	Erstellung der Karten	84
6.1.	Zonierung der Frosteinwirkung 1991-2100	84
6.1.1.	Referenzperiode 1991-2020	84
6.1.2.	Methodik zur Erstellung zukünftiger Frosteinwirkungszonen	88
6.1.3.	Zukünftige Frosteinwirkung	90
6.2.	Erstellung der KiST-Karten für die Klimaperioden 1991-2100	96
6.2.1.	KiST-Karten Referenzperiode 1991-2020	96
6.3.	Erstellung von KiST-Karten mit projizierten Daten	101
6.3.1.	Änderung relevanter Klimakenngrößen	104
6.3.2.	Zukünftige KiST-Karten Asphalt	106
6.3.3.	Zukünftige Kist-Karten Beton	111

7.	Berücksichtigung des Klimawandels in der Dimensionierung	117
7.1.	Sensitivitätsanalyse der vorliegenden Modelle	117
7.1.1.	Unabhängige Variablen	118
7.1.2.	Sensitivitätsanalyse der Betonbauweise	118
7.1.3.	Sensitivitätsanalyse der Asphaltbauweise	126
7.1.4.	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	130
7.2.	Aktualisierung der KIST-Karten bei neuen Klimamodellen	131
7.2.1.	Definition der Kenngrößen	131
7.2.2.	Definition der Schwellenwerten	136
8.	Die Auswirkungen auf die Regelwerke	140
8.1.	Auswirkung des Klimas	140
8.2.	RDO Asphalt (2009)	141
8.3.	RDO Beton (2009)	142
8.4.	RStO (2012)	142
8.5.	ZTV Beton-StB (2007) und TL Beton-StB (2007)	143
8.6.	ZTV Asphalt-StB (2013), TL Asphalt-StB (2007) und TL Bitumen-StB (2013)	145
9.	Zusammenfassung und Ausblick	147
	Literatur	154
	Tabellen	160
	Abbildungen	161
	Anhänge	165
	Anhang A. OpenFoam Eingabedaten	166
	Anhang B. Octave Eingabedaten für das Asphaltmodell	172
	Anhang C. Kopplung der thermischen und mechanischen Modelle	177
	Anhang D. JavaScript Eingabedaten für das Betonmodell	193
	Anhang E. Dakota Eingabedaten	196
	Anhang F. Docker Eingabedaten	202

Akronyme

ND	Nutzungsdauer.
SSR	Sonnenstrahlung.
T2M	Lufttemperatur in 2m Höhe.
ALK	Achslastklasse.
AMOC	Atlantic Meridional Overturning Circulation.
ATS	Asphalttragschicht.
DWD	Deutscher Wetterdienst.
EPM	empirisch-physikalisches Modell.
ERA5	ECMWF Reanalysis v5.
EVA	Extremwertanalyse.
FEM	Finite-Elemente-Methode.
FI	Frostindex.
FI30	Frostindex für die 30-jährige Wiederkehrzeit.
FVM	Finite-Volumen-Methode.
FWZ-Karte	Frosteinwirkungszonenkarte.
HYRAS	Hydrometeorologische Rasterdaten.
IPCC	International Panel of Climate change.
KDE	Kernel Density Estimation.
KiST-Methode	Regressionsmethode aus Augter und Kayser (2016).
KiST-Zone	in KiST-Karten geteilte Zone.
KiST-Rate	Schadensumme berechnet nach Augter und Kayser (2016).
KiST-Zonen	Klimainduzierte Straßentemperaturzonen.
KiST-Karte	Klimainduzierte Straßentemperaturkarte.

LHS	Latin hypercube sampling.
ncT	normierte charakteristische Temperaturverläufe.
OpenFOAM	Open Source Field Operation and Manipulation.
PmB	Polymermodifiziertes Bitumen.
RCP	Emissionspfade.
RV	Regenvolumen.
TFO	Temperatur der Fahrbahnoberfläche.
TFU	Temperatur der Fahrbahnunterseite.
THG	Treibhausgasen.
WCSS	Within-Cluster Sum of Square.
WWF	World Wide Fund For Nature.

Symbole

α_T	Wärmedehnzahl [10 ⁻⁶ /K].
b	Fiktiver Radius der kreisförmigen Ersatzaufstandsfläche [mm] nach Westergaard.
B_n	Anzahl äquivalenter Achsübergänge.
c_1	Faktor zur Ermittlung des Temperaturgradienten, häufigkeitsabhängig.
MAEG	Mechanisch äquivalenter Temperaturgradient.
E	E-Modul bzw. Steifigkeit der Betondecke.
ε	Die Emissivität.
h_d	Betondeckendicke.
h_m	Mitternachtsstunde nach der Einheit aus DWD-Datenbank.
h_{max}	Maximale Stunde der DWD-Datenbank.
h_{min}	Minimale Stunde der DWD-Datenbank.
h_r	Zufällige Stunde ausgewählt von Dakota.
h_{tc}	Wärmeübergangskoeffizient.
$H_{V,i}$	Auftretenshäufigkeiten der Achslastklasse i.
l	Elastische Länge.
m_{bL}	Lagerungsfaktor.
M_{ET}	Einwirkendes Moment infolge Temperatur pro mm Plattenstreifen [Nmm/mm].
M_{EV}	Einwirkendes Moment infolge Verkehrsbelastung pro mm Plattenstreifen [Nmm/mm].
M_{Rd}	Aufnehmbares Moment pro mm Plattenbreite [Nmm/mm].

m_{T1}	Anpassungsfaktor für die Temperaturbeanspruchung aus Überlagerung.
m_{T3}	Anpassungsfaktor Temperaturgebiet.
N_{zul}	Zulässige Lastwechselzahl.
$q_{B,b}$	Lastkollektivquotient.
$Q_{rad,solar}$	Von der Sonne auf der Erdoberfläche eintreffende Strahlung.
$Q_{sensible}$	Fühlbarer Wärmestrom.
R	Reynoldszahl.
S	Schadensumme.

Kapitel 1.

Einführung

Mit der Veröffentlichung der IPCC u. a. (2018) und Bundesrigierung (2022) wird die Dringlichkeit der Anpassung an den Klimawandel deutlich. Obwohl die Regelwerke für die Dimensionierung von Verkehrsflächen in den letzten Jahren an den aktuellen Klimazustand angepasst wurden (Augter und Kayser 2016; Blume und Plehm 2009; Villaret u. a. 2019b), sind die Auswirkungen der zukünftigen Klimaänderungen auf die Verkehrsflächen noch nicht berücksichtigt. Die Methodik für die Aktualisierung der Regelwerke für die Dimensionierung von Verkehrsflächen an den Klimawandel ist in Augter und Kayser (2016), Blume und Plehm (2009) und Villaret u. a. (2019b) beschrieben, aber wann und wie oft die Regelwerke aktualisiert werden müssen, wird noch nicht untersucht.

Ziel des Projektes ist es, ein Verfahren zur Anpassung der Regelwerke zur rechnerischen und empirischen Dimensionierung an den Klimawandel auf Basis projizierter Klimadaten zu erstellen.

Die verschiedenen Regelwerke für Asphalt und Beton können nach den Vorgängerprojekten Augter und Kayser (2016) und Villaret u. a. (2019a) mit den KiST-Karten ergänzt werden, indem die Klimadaten aus verschiedenen Klimaszenarien genutzt werden. Bei der Erstellung der KiST-Karten wird ein umfangreiches empirisches physikalisches Modell erstellt, welches eine zukünftige Aktualisierung ermöglicht.

Für die RDO Asphalt und die RDO Beton werden für kommende Auslegungszeiträume aktualisierte Faktoren und KiST-Karten bereitgestellt. Diese Verfahren werden vollständig automatisiert und als Software-Image bereitgestellt, so dass eine Aktualisierung mit zukünftigen Klimamodellen für den Auftraggeber (AG) möglich wird.

1.1. Forschungsziel

Im Rahmen des Projektes werden die Richtlinien zur Dimensionierung von Straßenoberbauten an den Klimawandel angepasst. Die klimatologische Datenbasis für die

Dimensionierung wird von der Verwendung von Daten aus der Vergangenheit auf eine Projektion in die Zukunft umgestellt.

Limitierte Computerressourcen machten es bisher nötig, statistische Näherungsmethoden und Annahmen zur Berechnung der Beanspruchungsgrößen zu integrieren und erschwerten das ingenieurmäßige Verständnis der Berechnungsvorschrift. Dies führt zu vielfältigen Wechselwirkungen und der Einführung von schwer abschätzbaren Fehlern in die Modellierung der Temperaturbelastungen und damit in die Dimensionierung. Es werden daher statistische Ansätze durch physikalische Modellierung ersetzt und Synergien durch die Verwendung von stochastischen Methoden zur Verbesserung der Rechenperformance genutzt. Dabei werden Methoden verwendet, die nur physikalische Größen als Parameter nutzen. Die wiederholbare Berechnung der benötigten Ergebnisse wird vollständig automatisiert und kann bei beliebigen Cloud-Anbietern mit einem Software-Image durchgeführt werden. Diese werden dabei mit vergangenen als auch mit projizierten Klimadaten durchgeführt, um die zukünftig benötigten Adaptionen durchführen zu können.

Im Anschluss an die Berechnungen wird die Auswertung der orts- und zeitabhängigen zulässigen Lastwechselzahlen durchgeführt, um eine einfache Verwendung der projizierten Klimaänderungen in den Richtlinien zu ermöglichen. Die RDO Asphalt kann wie bisher verwendet werden und benötigt nur für die geplanten Auslegungszeiträume angepasste Faktoren und eventuell normierte charakteristische Temperaturverläufe (ncT). Da die RDO Beton bislang die Häufigkeiten der Temperaturprofile nicht sinnvoll verwenden kann, wird auf eine Lösung zurückgegriffen, die sie sich an existierenden Sicherheitsniveaus orientiert. Die Berechnung für zukünftige Bezugszeiträume erfolgt dabei als Skalierung zu historischen Daten. Perspektivisch wird empfohlen, eine Adaption des Verfahrens der RDO Asphalt auf die RDO Beton vorzunehmen.

Zum Abschluss werden Handlungsanweisungen für den Auftraggeber erstellt, um zu entscheiden, ob bei Veröffentlichung von neuen Klimamodellen eine Neuberechnung durchzuführen ist.

1.2. Vorgehen

Um den neuesten Stand der Technik in der numerischen Modellierung zu erfassen, wird zunächst eine Literaturrecherche (Kapitel 2) durchgeführt. Diese sichert zum einen die neuesten Erkenntnisse zur Behandlung von Temperaturzuständen in Straßenaufbauten ab und wird auch die Erkenntnisse zur Behandlung der Schließung der Energiebilanz an der Fahrbahnoberflächen einbeziehen.

Im nächsten Schritt (Kapitel 4) wird die Modellierung zur Dimensionierung von Straßenoberbauten durch die physikalisch motivierte Berechnung von bauweisenabhängigen Temperaturzuständen durchgeführt. Dazu wird ein deterministisches Modell zur Ermittlung von Temperaturverläufen erstellt.

Die deterministischen Berechnungen werden mit meteorologischen Daten für die Referenzperiode 2001-2015 gefüttert und mit einem stochastischen Modell zur Reduktion des Rechenaufwandes gekoppelt (Kapitel 5). Dadurch können Fehler, die durch statistische Näherungsmethoden und die Verwendung von groben Annahmen gemacht werden, vermieden werden. Der Programmcode wird für die Anwendung in Cloud-Servern erstellt und es wird beachtet, dass Anpassungen ohne Schwierigkeiten durchgeführt werden können. Anschließend werden hiermit die Referenzkarten erstellt (Kapitel 6).

Zur Berücksichtigung des Klimawandels werden in Absprache mit dem Expertennetzwerk des BMDV Anforderungen für Datensätze formuliert und die Daten der neusten Klimamodelle berücksichtigt. Das gekoppelte numerische Modell zur Berechnung der Belastungszustände durch den Einflussfaktor Temperatur wird nun mit den in die Zukunft projizierten Daten angetrieben (Abschnitt 5.4). Mit den Ergebnissen einer Sensitivitätsanalyse können die Regelwerke angepasst und neue KiST-Karten für zukünftige Klima- und Planungsszenarien erstellt werden (Abschnitt 7.1). Außerdem werden Kenngrößen und zugehörige Schwellenwerte definiert, die dem Anwender Entscheidungskriterien liefern, anhand derer eine Aktualisierung der Richtlinien zur Dimensionierung beschlossen werden kann (Abschnitt 7.2). Dies ist der Fall, wenn sich der stattfindende Klimawandel deutlich von den Klimamodellen unterscheidet oder die Erkenntnisse neuer Klimamodelle deutlich von den in diesem Projekt verwendeten Daten abweichen.

Nach Projektende wird dem Auftraggeber der Programmiercode übergeben. Dieser beinhaltet auch eine Dokumentation die es ermöglicht, Änderungen und Anpassungen an der OpenSource-basierten Software vornehmen zu können.

Kapitel 2.

Stand der Technik

2.1. Thermische Modellierung

In diesem Abschnitt werden die Voraussetzungen, wissenschaftlichen Neuerungen und Datengrundlagen beschrieben. Außerdem wird die geplante Anwendung der Datensätze sowie Modellierungstechniken erläutert. Der Zweck der Klimamodellierung in diesem Projekt liegt in der Tatsache des derzeitigen sowie der Abschätzung des möglichen zukünftigen Klimawandels begründet: Durch die derzeit stattfindende globale Erwärmung steigen nicht nur die mittleren und extremen Temperaturen in Deutschland, sondern auch andere Klimakenngrößen ändern sich, die sich auf die Temperaturverteilung in Straßenaufbauten auswirken.

Für die Modellierung des Belastungsfalles Temperatur muss das vertikale Temperaturprofil berechnet werden. Dabei wird die Wärmeleitung im Straßenkörper nach der Fourierschen Wärmeleitungsgleichung bestimmt. Hier gehen unveränderte Konstruktions- und Materialdaten ein. Entscheidend für die Modellierung sind die thermischen Randbedingungen, die im Folgenden beschrieben werden.

2.1.1. Klimarandbedingungen

Um die vertikalen Temperaturverläufe in Straßenaufbauten simulieren zu können, müssen thermische Randbedingungen bekannt sein. In typischen Straßenaufbauten auf offener Strecke ergeben diese sich durch die oberen und unteren Ränder der Straße, welche jeweils durch die Oberflächentemperatur an der Fahrbahnoberseite (Temperatur der Fahrbahnoberfläche (TFO)) sowie die Bodentemperatur an der Fahrbahnunterseite (Temperatur der Fahrbahnunterseite (TFU)) beschrieben werden können. Die TFO wird direkt durch die Energiebilanz der Oberfläche beschrieben, welche durch folgende Klimakenngrößen maßgeblich bestimmt wird:

- Solarstrahlung
- Terrestrische Strahlung
- Windgeschwindigkeit
- Lufttemperatur
- Luftfeuchte
- Niederschlag

Zusätzlich spielen Material- und Bodeneigenschaften bei der Bestimmung von Wärmeflüssen eine wichtige Rolle. Letztere sind in der Tiefe des Bodens bestimmend für die TFU. Die TFU wurde bisher mit einem Wert von $9,5\text{ °C}$ in $12,5\text{ m}$ Tiefe als konstant angenommen (Villaret u. a. 2019a). Jedoch sind durch Messungen Trends zu zunehmenden TFU bestätigt worden (Henning und Limberg 2012).

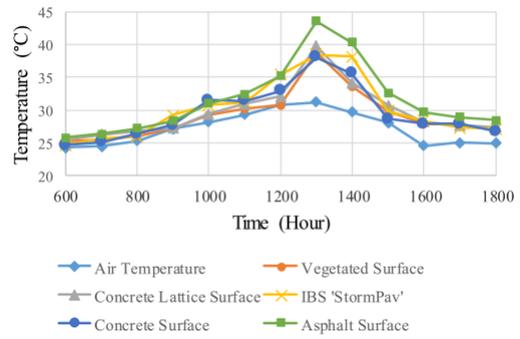
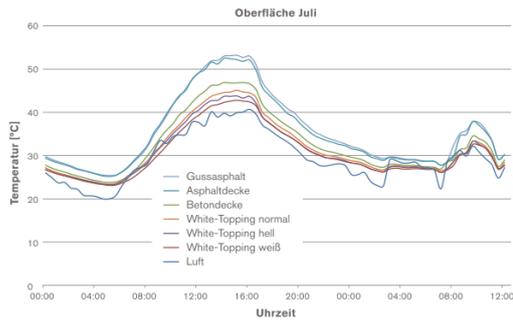
2.1.2. Energiebilanz an der Oberfläche

Die TFO wird durch die Energiebilanz an der Fahrbahnoberfläche bestimmt. Dabei ergibt sich die TFO aus der nötigen Abstrahlung zum Ausgleich der an die Fahrbahnoberfläche übertragenen Energie. Hierfür wird angenommen, dass der Ausgleich ohne zeitliche Verzögerung eintritt und damit die Situation stationär ist.

Üblicherweise wird auch angenommen, dass die horizontale Verteilung der Klimakenngrößen bzw. der Energieflüsse homogen ist, also keine Energieflüsse durch horizontale Gradienten auftreten. Es zeigt sich jedoch, dass bereits kleinere horizontale Gradienten von Temperatur oder Luftfeuchtigkeit mit zusätzlichen Beiträgen zur Energiebilanz verknüpft sein können (Raabe u. a. 2002).

Im Falle von Straßenaufbauten sind aufgrund der sehr unterschiedlichen Eigenschaften bezüglich Wärmeleitung und Strahlung zwischen Asphalt- bzw. Betonoberflächen und benachbarten Gras- und Waldflächen deutliche Gradienten der Temperatur und Luftfeuchtigkeit zu erwarten. In Abbildung 2.1 sind gemessene kurzzeitige Verläufe der TFO von verschiedenen Oberflächen, insbesondere von typischen Fahrbahnoberflächen, dargestellt. Die Daten zeigen unter anderem, dass die TFO von Asphalt höher ist, als die von Beton.

Deshalb wird in diesem Projekt die Annahme der Stationarität gewahrt, jedoch die Annahme der horizontalen Uniformität verworfen. Dadurch wird eine empirische Schließung der Energiebilanz ermöglicht, welche gleichzeitig auf physikalischen Gegebenheiten beruht.



(a) Juli in Europa, mutmaßlich im Bereich Wien. Quelle: Peyerl u. a. (2016, Abb. 12).

(b) Zu unbekanntem Monat bei Sawarak in Malaysia. Quelle: Ibrahim u. a. (2018, Abb. 09).

Abbildung 2.1.: Gemessene TFO verschiedener typischer Oberflächen.

Die horizontalen Gradienten von Temperatur und Feuchte bewirken eine zusätzliche vertikale Querzirkulation mit Zusatzbeiträgen für latente und fühlbare Wärmeströme (Mauder u. a. 2020). Diese Terme können in Abhängigkeit von der Differenz der Oberflächentemperaturen zwischen der Straße und der Umgebung parametrisiert werden. Eine solche Parametrisierung muss durch eine entsprechende Kalibrierung von Datensätzen aus Messungen der TFO abgeleitet werden.

Im Folgenden wird die Energiebilanz an der Fahrbahnoberfläche ($z = 0$) aufgestellt und die einzelnen Terme diskutiert. Der linke Teil der Gleichung ist die Randbedingung für die Wärmeleitungsgleichung in der Straße und entspricht dem Wärmestrom der in die Straße eindringt.

$$\begin{aligned}
 k_{solid} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = & (1 - \alpha_{short}) Q_{rad,solar} \\
 & + (1 - \alpha_{long}) Q_{rad,atmosphere} \\
 & + Q_{rad,surface} \\
 & + Q_{latent} \\
 & + Q_{sensible} \\
 & + Q_{soilheat,eddies} \\
 & + Q_{latent,eddies}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

- Kurzwellige Globalstrahlung $Q_{rad,solar}$ ist die von der Sonne auf der Erdoberfläche eintreffende Strahlung. Oftmals wird dabei noch zwischen direkter und diffuser Globalstrahlung unterschieden. Direkte Strahlung bezeichnet dabei die direkt

von der Sonne eingestrahlte Energie und diffuse Strahlung erreicht die Erde durch Streuvorgänge in der Atmosphäre sowie am Rand von Wolken. In heutigen Klimamodellen und deren Datensätzen werden beide Größen zur Globalstrahlung zusammengefasst.

Die Albedo-Zahl α bezeichnet das Vermögen einer Oberfläche, Strahlung zu reflektieren. Reflektierte Strahlung wird in die Atmosphäre zurückgeworfen und beeinflusst die Energiebilanz nicht, während absorbierte Strahlung zur Energiebilanz beiträgt.

- Abwärts gerichtete langwellige Strahlung $Q_{rad,atmosphere}$ ist die durch die temperaturbedingte Emission der Atmosphäre sowie die Reflexion von langwelliger Strahlung an reflektiven Oberflächen, wie etwa Eiskristallen und Wassertröpfchen von Wolken, auf der Erdoberfläche auftreffende langwellige Strahlung. Die abwärts gerichtete Strahlung wird durch das vertikale Profil von Feuchtigkeit, Temperatur und Eis- bzw. Wassergehalt bestimmt. Diese Beiträge werden in Klimamodellen zusammengefasst.
- Langwellige Abstrahlung $Q_{rad,surface}$ wird durch die Temperatur nach dem Stefan-Boltzmann Gesetz gesteuert. Die Wellenlänge sowie die abgestrahlte Energie eines Körpers bestimmt sich nach der Temperatur und der Emissivität eines Körpers.

$$Q_{rad,surface} = \varepsilon \sigma_B T^4 \quad (2.2)$$

Die Emissivität ε bezeichnet das Vermögen einer Oberfläche, langwellige Strahlung aufgrund der Temperatur zu emittieren. Ein idealer schwarzer Körper hat eine Emissivität von $\varepsilon = 1$.

- Latenter Wärmestrom Q_{latent} speist sich aus dem Phasenübergang von Wasser an der Oberfläche. Dabei wird bei Verdunstung von Wasser an der Oberfläche Energie an die Atmosphäre abgegeben, da Energie aus der Oberfläche zum Phasenübergang genutzt wird und der Wasserdampf dann in die Atmosphäre diffundiert. Bei Kondensation von atmosphärischem Wasserdampf an der Oberfläche wird hingegen der Oberfläche latente Wärme und damit Energie zugeführt.

$$Q_{latent} = \lambda E \quad (2.3)$$

Der latente Wärmestrom wird durch das Produkt von spezifischer Verdunstungswärme und der Menge an verdunstendem Wasser bestimmt, der Evapotranspiration. Die potentielle Evapotranspiration wird dabei in diesem Projekt durch die Gleichung von Penman-Monteith bestimmt (Zotarelli u. a. 2010). Die Bestimmung der potentiellen Verdunstung ergibt sich in Abhängigkeit von Bodenwärmestrom,

Strahlung, Windgeschwindigkeit und Sättigungsdefizit der untersten Luftschicht. Für die Bestimmung der tatsächlichen Verdunstung über Straßenoberflächen wird die potentielle Verdunstung als Obergrenze festgelegt. Falls kein Wasser zur Verdunstung zur Verfügung steht, kann auch kein latenter Wärmeübergang stattfinden. Dieses Phänomen ist bei Straßenoberflächen besonders ausgeprägt, da Oberflächenwasser auf Straßenoberflächen schnell durch Oberflächenabfluss abgeführt wird. Deshalb wird nur dann ein latenter Wärmestrom berechnet, wenn Niederschlag zu verzeichnen ist bzw. bis zu einer Zeit, in der 1 mm Niederschlagswasser verdunstet ist nach Ende einer Niederschlagsperiode.

- Fühlbarer Wärmestrom $Q_{sensible}$ wird durch die konvektive und molekulare Wärmeleitung zwischen Luft und Fahrbahnoberfläche verursacht. Die Richtung des Wärmeflusses ist dabei entgegen dem Temperaturgradienten, also von warm zu kalt. Dies bedeutet in der Regel in der Nacht einen Wärmegewinn der kalten Oberfläche durch H aus der untersten Luftschicht und am Tage einen Wärmeverlust der Oberfläche an die Luft.

$$Q_{sensible} = htc(T_{air} - TFO) \quad (2.4)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient htc wird aus empirischen Modellen bestimmt, wobei das von Chen u. a. (2019) vorgeschlagene Vehrenkamp-Modell verwendet wird.

- Zusatzterm latente Wärme durch thermische vertikale Querzirkulation $Q_{latent,eddies}$: Durch den horizontalen Temperaturgradienten zwischen Fahrbahnoberfläche und Umgebung entsteht eine aufwärts gerichtete Luftströmung über der wärmeren Fahrbahnoberfläche. Diese Luftströmung transportiert durch zusätzliche konvektive Wärmeleitung Wasserdampf von der untersten Luftschicht in höhere Luftschichten. Dadurch wird das Sättigungsdefizit in der untersten Luftschicht in geringerem Umfang verringert, sodass ein größerer latenter Wärmestrom entsteht im Falle einer im Vergleich zur Umgebung wärmeren Oberfläche. Entsprechend ist der latente zusätzliche Wärmefluss proportional zur potentiellen Verdunstung und dem Temperaturunterschied zwischen Fahrbahnoberfläche und Umgebung.
- Zusatzterm fühlbare Wärme durch thermische vertikale Querzirkulation $Q_{sensible,eddies}$: Der gleiche Mechanismus, der zur Erhöhung des latenten Wärmestromes durch horizontale Temperaturgradienten führt, bewirkt auch eine Erhöhung des sensiblen Wärmeflusses. Der zusätzliche fühlbare Wärmestrom ist somit proportional zur Temperaturdifferenz zwischen TFO und Umgebung sowie zur Reynoldszahl R . Letztere beschreibt die Laminarität der Strömung, höhere Werte von R bedeuten eine größere Tendenz zu turbulenten Strömungen und damit größeren zusätzlichen Wärmeflüssen.

Wichtige Bedingung für das Ermitteln einer TFO ist die Schließung der Energiebilanz in Gleichung 2.1, d. h. die Summe aller eingehenden und ausgehenden Energiebeiträge muss gleich groß sein. Zur Ermittlung der relevanten Beiträge auf der Basis von lokalen Messungen wird in der Regel angenommen, dass die Annahmen von Stationarität und horizontaler Homogenität gewährleistet sind (Raabe u. a. 2002). Es ist seit längerem bekannt, dass dies bei der Auswertung von Datensätzen aus Messkampagnen dazu führt, dass die Energiebilanz nicht geschlossen werden kann, also Energiebeiträge bestehen, die nicht mit den getroffenen Annahmen zu erfassen sind (Mauder u. a. 2020). Es wird häufig beobachtet, dass zur Schließung der Energiebilanz am Tage mehr Energie abgeführt werden muss, als aus den Messungen ersichtlich ist (Mauder u. a. 2020). Als mögliche Erklärungen sind vielfach die Ungenauigkeit der Messungen und die zeitliche Mittelung der Messwerte ins Feld geführt worden, über eine Vielzahl an Studien konnte sich dies jedoch nicht als Erklärung für die fehlende Schließung der Energiebilanz bestätigen (Mauder u. a. 2020). In einer früheren Studie zur Modellierung der TFO ist von Wellner und Kayser (2007) zur Schließung der Energiebilanz ein Tagesgang für den Koeffizienten des konvektiven Wärmeübergangs eingeführt worden, der zum fühlbaren Wärmestrom $Q_{sensible}$ beiträgt. Dieser Koeffizient ist zwar sicherlich von der Temperatur und anderen Umgebungsbedingungen abhängig, jedoch in nur geringem Umfang, $Q_{sensible}$ wird maßgeblich von der vertikalen Temperaturdifferenz bestimmt. Aus meteorologischer Sicht ist ein solches Vorgehen nicht eingängig, da mit dem Tagesgang eine Schein-Abhängigkeit hergestellt wird, die sich nicht hinreichend auf physikalischen Beobachtungen gründet. Tomographische Messungen mit Ultraschall-Sensorik haben bereits früher gezeigt, dass die fehlenden Beiträge in der Energiebilanz mit der Größenordnung kleinskaliger horizontaler Temperaturgradienten in Verbindung stehen (Raabe u. a. 2002). Dies dürfte vertikale Querkirkulationen verursachen, die zusätzliche vertikale Wärmeflüsse unterschiedlicher Vorzeichen und Größenordnungen an unterschiedlichen Orten bewirken (Mauder u. a. 2020). Weitere Mechanismen zur Entstehung zusätzlicher Wärmeflüsse sind die horizontale Advektion durch das Windfeld sowie Wärmeübergänge an Pflanzen- und anderen Materialien der Umgebung (Mauder u. a. 2020). Letztlich sind die genauen physikalischen Vorgänge sowie deren Beschreibung, die eine vollumfängliche und damit geschlossene Betrachtung der Energiebilanz möglich machen noch Gegenstand der Forschung (Mauder u. a. 2020; Sun u. a. 2021), sodass in diesem Projekt eine sinnvolle Annahme getroffen werden muss und ein entsprechendes Modell kalibriert werden muss. Das System Straßenoberfläche – Umgebung ist durch stark unterschiedliche Oberflächeneigenschaften bezüglich Wärmeleitung und Albedo gekennzeichnet. Z. B. der Asphalt besitzt eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit und Albedo, weshalb sie sich stärker erhitzt unter Einstrahlung als die Umgebung. Im Vergleich dazu ist die Wärmeabhängigkeit und Albedo von Betonoberflächen höher, weshalb sie sich weniger stark erwärmen. Deshalb ist das Auftreten kleinräumiger horizontaler Temperaturgradienten aus unserer Sicht ein relevanter Faktor für die Verursachung zusätzlicher vertikaler Energieflüsse. Um dies modellieren und testen zu können, müssen verlässliche Datensätze von Glättemeldean-

lagen und naheliegenden Wetterstationen bereitgestellt werden. Die Bestimmung der beiden zusätzlichen Beiträge in Abhängigkeit von horizontalem Temperaturgradienten muss über die Bestimmung von physikalisch motivierten und empirisch bestimmten latenten und fühlbaren Wärmeübergangskoeffizienten geschehen.

2.1.3. Bodentemperatur

Bisher wurde die Temperatur in 12,5 m Tiefe auf einen Wert von 9,5 °C festgelegt (Vilaret u. a. 2019a). Durch den Klimawandel, aber auch durch zunehmende Versiegelung, erhöht sich die Bodentemperatur jedoch stetig (Henning und Limberg 2012). Für dieses Forschungsprojekt werden daher die Daten aus einer Auswertung von Böhme und Böttcher (2011) herangezogen, indem die dekadischen Trendsignale der Bodentemperatur in 12,0 m Tiefe mit den Trendsignalen der Lufttemperatur korreliert werden. Die so gefundene Regressionsgleichung wird dann auch auf die Klimadaten der Zukunft angewandt, um so die Bodentemperatur als untere Randbedingung bestimmen zu können.

2.1.4. Einfluss des Klimawandels

Durch die zusätzliche Emission von Treibhausgasen (THG) wie CO_2 , Methan und weiteren durch menschliche Aktivitäten wie Industrie, Verkehr und Energiegewinnung, verändert sich die globale Energiebilanz durch größere langwellige Rückstrahlung. Dadurch bedingt steigen im Gegenzug die bodennahen Temperaturen an. Global sind die Temperaturen seit 1880 um etwa 1,1 °C gestiegen (Zhongming u. a. 2021). In Deutschland ist das Jahresmittel der Lufttemperatur seit 1880 um etwa 1,5 °C angestiegen (DWD 2023). Neben der Änderung des mittleren Temperaturniveaus ändern sich auch die Intensität und Häufigkeit des Auftretens von Wetterlagen, zum Teil verursacht durch regional unterschiedliche Erwärmung und Folgeeffekte wie etwa das Schmelzen der Polkappen (Zhongming u. a. 2021).

Für dieses Projekt wichtig sind die Auswirkungen des Klimawandels auf die TFO in Deutschland. Bisherige Auswertungen haben in Beobachtungsdaten aus den letzten 20 Jahren einen Anstieg der Intensität und Häufigkeit von sehr hohen TFO bestätigt (Beckedahl u. a. 2020). Gleichzeitig ist die Intensität - d. h. Länge und Frostscharfe - und Häufigkeit von Frostperioden zwar zurückgegangen (DWD 2023), jedoch sind extrem tiefe Temperaturen weiterhin möglich. Die Folgen des Klimawandels zeigen sich in einer verringerten projizierten Nutzungsdauer der Straßenaufbauten durch erhöhten temperaturbedingten Beanspruchungen. Die Rissbildung durch Wechselfrostperioden wird in diesem Projekt nicht betrachtet, da die Rissbildung von der Oberfläche ausgeht und durch die Dimensionierung nicht verändert wird.

Abgesehen von bisherigen Klimaveränderungen, wird sich der Klimawandel weiter fortsetzen. Das Ausmaß der zukünftigen Klimaveränderungen hängt dabei von den heutigen und zukünftigen THG-Emissionen ab. Auf globaler Ebene wurden deshalb repräsentative Emissionspfade (RCP) entworfen, welche unterschiedliche Annahmen zur Entwicklung der THG-Emissionen in Szenarien zusammenfassen (Van Vuuren u. a. 2011). Dabei sind drei wesentliche Emissionspfade für diese Untersuchung relevant: Das RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5. Die Zahlen stehen dabei jeweils für die Änderung der globalen Energiebilanz durch erhöhte THG-Konzentrationen ausgedrückt in W/m^{-2} . Das RCP2.6 ist ein Szenario mit effektivem globalen Klimaschutz („Klimaschutzszenario“), während das RCP4.5 ein mittleres Szenario („moderates Szenario“) ist und das RCP8.5 ein Szenario mit weiter steigenden THG-Emissionen („Hochemissionsszenario“). Entsprechend sind die regionalen und globalen Klimaänderungen im RCP8.5 am größten und im RCP2.6 am geringsten ausgeprägt (Ulrich 2021; Zhongming u. a. 2021).

Der aktuelle, sechste Sachstandbericht des International Panel of Climate change (IPCC) aus 2022 (AR6, Zhongming u. a. 2021) bezeichnet das Erreichen des $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ – Ziels als möglich, es müssten aber sofortige, effektive Maßnahmen eingeleitet werden. Werden diese nicht vor dem Jahr 2025 umgesetzt, ist die Wahrscheinlichkeit, dass dieses Ziel verfehlt wird sehr groß (Zhongming u. a. 2021). Mit jeder weiteren Erwärmung um $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ steigt die Wahrscheinlichkeit extremer Hitzewellen global deutlich an. Aufgrund der derzeitigen Entwicklung der globalen THG-Emissionen ist kaum davon auszugehen, dass das RCP2.6 als ein realistisches Klimaszenario einzuschätzen ist.

Hitzewellen und Frostperioden sind Temperaturextreme, die Straßenoberbauten durch thermische Belastungen vor Herausforderungen stellen. Hitzewellen werden in der Wissenschaft teilweise unterschiedlich definiert, je nach räumlichem Bezug, grundsätzlich gemein ist diesen Definitionen jedoch, dass ein bestimmter Schwellenwert der Tageshöchsttemperatur für eine Anzahl von aufeinanderfolgenden Tagen überschritten werden muss. Auf Deutschland bezogen, definiert der Deutsche Wetterdienst eine Hitzewelle, wenn die Tageshöchsttemperatur an drei aufeinanderfolgenden Tagen mindestens $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ beträgt und das 98. Perzentil der Tageshöchsttemperatur überschreitet¹. Diese Definition für Hitzewellen wird auch in diesem Projekt angewandt. Frostperioden werden ebenfalls teilweise unterschiedlich definiert. In diesem Projekt wird eine Frostperiode über die Anzahl der aufeinanderfolgenden Tage mit Tagestiefsttemperatur unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ definiert, wobei eine Frostperiode als ununterbrochen gilt, solange nicht mehr als zwei frostfreie Tage hintereinander auftreten.

Auf europäischer Ebene ist eine Zunahme von extremen Hitzewellen sowie eine Zunahme von Sonnenscheindauer bzw. Globalstrahlung bereits im aktuellen Klima (1991-2020) im Vergleich zur näheren Vergangenheit (1961-1990) zu verzeichnen (Service 2021). Sowohl

¹Siehe <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=624852&lv2=101094> [03.07.2024]

die Anzahl und Intensität, als auch zeitliche und räumliche Ausdehnung von Hitzewellen hat signifikant zugenommen (Service 2021). In Bezug auf Deutschland bestätigt sich der Trend zur steigenden Anzahl und Intensität von Hitzewellen sowie zunehmender Globalstrahlung (DWD 2023). Die mittlere Lufttemperatur eines Jahres in Deutschland ist seit 1880 um etwa 1,5 °C angestiegen (DWD 2023). Frostperioden werden insgesamt kürzer, jedoch sind Fröste unter -10 °C und auch extrem tiefe Temperaturen im Bereich der tiefsten Messwerte nach wie vor kurzfristig möglich (DWD 2023). Der Februar 2021 ist mit bis unter $-25,0\text{ °C}$ in Thüringen und Sachsen ein gutes Beispiel für solche Kälteeinbrüche. Dadurch, dass die Arktis sich jedoch bereits deutlich stärker erwärmt hat und somit die Luftmasse, die zu negativen Temperaturrekorden in Deutschland führt, ist das Erreichen von extrem tiefen Temperaturen an eine vorhergehende starke Zufuhr unüblich kalter Luft gebunden, was damit die Häufigkeit und Andauer solcher Perioden reduziert (Ulrich 2021). In Zukunft dürfte mit einer Zunahme der Temperatur um 1,6 °C (RCP2.6) bis 5,5 °C (RCP8.5) die Tendenz zu mehr Hitzewellen weiter zunehmen (Beckedahl u. a. 2020; Ulrich 2021). Außerdem ist der Trend zu zunehmender Globalstrahlung in Teilen Mitteleuropas auch in den Klimaprojektionen bis 2100 zu finden (Beckedahl u. a. 2020). Die Quantifizierung der Zunahme der Globalstrahlung bis 2100 ist jedoch aufgrund der geringen Dichte und Länge von Messreihen sowie der großen Unsicherheiten innerhalb der Klimaprojektionen schwierig (Ulrich 2021). Es dürfte jedoch außer Frage stehen, dass der Klimawandel heute und in Zukunft nicht nur durch höhere Temperaturen, sondern auch durch veränderte Häufigkeiten und Typen von Großwetterlagen (GWL) zu Tage tritt. Veränderte GWL können bereits im heutigen Klima festgestellt werden, mit einer Tendenz zu einer geringeren Verlagerungsgeschwindigkeit von Wetterlagen aufgrund geringerer Temperaturunterschiede zwischen Polargebieten und Subtropen auf der Nordhalbkugel (Zhongming u. a. 2021). Diese Tendenz wird durch die stärkere Erwärmung der Arktis im Vergleich zu südlicheren Breiten verursacht. Dadurch werden Wetterlagen mit längerer Nutzungsdauer und geringerer Dynamik befördert, die entweder zu langanhaltenden Phasen sehr trockener und sonniger Witterung oder anhaltenden Perioden mit Niederschlägen führen können (DWD 2023; Ulrich 2021).

Die Klimamodelle, die den Klimaprojekten zugrunde liegen, lassen jedoch einige mögliche Mechanismen außer Acht, die zu plötzlichen und regional stark abweichenden zusätzlichen Klimaänderungen führen können, den sogenannten „Kipppunkten“ (Wunderling u. a. 2022). Diese Kipppunkte können durch bereits geringere globale Erwärmung angestoßen werden und unumstößbare, selbstverstärkende Wirkungen hin zu einem nochmals deutlich veränderten und erwärmten globalen Klima herbeiführen:

- Arktisches Seeeis könnte im Sommerhalbjahr vollständig verschwinden. Folge für Deutschland könnte eine deutlich stärkere Tendenz zu meridionalen und anhaltenden GWL sein, die wahrscheinlich zu größerer Erwärmung führen (PIK-2019).

- Arktische Permafrostböden schmelzen und können so seit Jahrtausenden gespeicherte THG wie Methan in die Atmosphäre speisen, was zu einer deutlich verstärkten und beschleunigten Erwärmung führen könnte (PIK-2019).
- Methadonvorräte Ozeanböden könnten durch geringe Erwärmung von Tiefenwasser in die Gasphase wechseln und zu einer verstärkten Erwärmung beitragen (PIK-2019).
- Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) ist bereits dabei begriffen, sich zu verlangsamen. Daran gekoppelt ist die Abschwächung des Nordatlantik-Stromes. Die Abschwächung der AMOC könnte für Deutschland eine vorübergehender starke Dämpfung der Erwärmung insbesondere im Winterhalbjahr bedeuten, würde aber wahrscheinlich von der globalen Tendenz zur Erwärmung mindestens kompensiert werden (PIK-2019). Dies könnte die Erwärmung in Deutschland im Winterhalbjahr abschwächen.
- Maritimer & kontinentaler Kohlenstoffkreislauf wird durch den Klimawandel gestört und könnte zu einer geringeren Umwandlung von THG zu terrestrischem Kohlenstoff führen, was wiederum zu verstärkter Erwärmung führen könnte.
- Arktischer Polarwirbel könnte sich deutlich abschwächen und somit die Tendenz zu länger anhaltenden Wetterlagen verstärken.

Insgesamt ist die Auslöseschwelle für die Kippunkte bisher nicht hinreichend verstanden und nicht in den heutigen Klimamodellen repräsentiert. Deshalb sind Klimaprojektionen für die Zukunft mit starken Unsicherheiten behaftet und in Zukunft müssen die Klimaprojektionen mit verbesserten Modellen fortgeschrieben werden. Die Auswirkungen der eingetretenen und zu erwartenden Klimaänderungen auf die TFO haben bereits zu einer Zunahme besonders hoher TFO geführt und diese Tendenz wird je nach Klimaszenario auch weiter anhalten bzw. sogar zunehmen (Beckedahl u. a. 2020). Die Häufung von GWL mit geringer Bewölkung und hoher Temperatur dürfte dazu führen, dass längere Phasen mit anhaltender starker thermischer Belastung zunehmen, sodass die Nutzungsdauer von Straßenoberbauten sich im Vergleich zu früheren oder heutigen Klimabedingungen verkürzt (Beckedahl u. a. 2020).

Die oben dargestellten klimatischen Verhältnisse sowie deren Projektion in die Zukunft zeigen, dass ein Bedarf besteht, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Parameter zu untersuchen, welche für die Dimensionierung relevant sind und gegebenenfalls die Richtlinien zur Dimensionierung zu aktualisieren.

2.2. Mechanische Modellierung

Es ist allgemein anerkannt, dass die Auswirkungen von Temperaturunterschieden auf Straßen und deren räumliche und zeitliche Verteilung einen großen Einfluss auf die Nutzungsdauern haben. Innerhalb Deutschlands ist eine tendenzielle Zunahme der Temperaturbelastung von Nord nach Süd zu beobachten. Kleinskalige Unterschiede werden beispielsweise durch das Geländere relief verursacht. Diesen lokalen Unterschieden kann durch Aufschläge der Dicke der Straße Rechnung getragen werden. Die Dickenaufschläge sind notwendig um die Mehrbelastung auszugleichen. Die sogenannten Klima induzierte Straßentemperaturzonen (KiST-Zonen) werden anhand von Differenzen der Dicke von mindestens

- 1 cm für Asphalt (Augter und Kayser 2016) und
- 0,5 cm für Beton (Villaret u. a. 2019b)

festgelegt. Im Allgemeinen stellen sich im Straßenbaukörper nichtlineare Temperaturprofile ein. Diese führen aufgrund der unterschiedlichen thermomechanischen Materialeigenschaften und der damit einhergehenden Konstruktionsdetails zu sehr unterschiedlichen Auswirkungen. Allen Bauweisen ist gemein, dass der Oberbau vor Frost geschützt werden muss.

2.2.1. Frosteinwirkung und Verwendung in den RStO

Die RStO (2012) berücksichtigen lediglich die Einwirkung durch Frost auf den Oberbau von Straßen durch die Aufteilung Deutschlands in drei Frosteinwirkungszonen. Hintergrund ist die Verhinderung des Verlusts der Tragfähigkeit insbesondere während Tau perioden und die Vermeidung von Frosthebungen durch Eislin senbildung. Je nach Eindringtiefe werden in den RStO (2012, Tab. 7) bauweisenunabhängige Aufschläge auf die Dicke des frostsicheren Oberbaus von 5 cm oder 15 cm vorgeschrieben. Die Datengrundlage besteht aus den Tagen mit negativen Temperaturen an 221 Wetterstationen in den Wintern 1955 bis 2004. Die Berechnung der Frostindizes erfolgte auf der Basis eines 1 km²-Rasters unter Berücksichtigung der geografischen Lage, der Höhe über dem Meeresspiegel und der Maritimität. Der Einfluss durch Bebauung — wie etwa Urban Heat Islands — bleibt unberücksichtigt. Die Karte der Frosteinwirkungszonen findet sich in den RStO (2012, Abb. 6) oder kann über die Website der BAST² heruntergeladen werden.

²https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Publikationen/Regelwerke/Strassenbau/S2-Karte-Frostwirkungszonen.pdf [03.07.2024]

2.2.2. Asphalt

Asphalt übernimmt die meisten seiner Eigenschaften vom Bindemittel Bitumen. Bitumen ist ein elastoviskoplastisches Material mit starker Wärmeabhängigkeit. Es verfestigt sich und wird beim Abkühlen letztendlich spröde; dies ist der sogenannte glasartige Zustand. Beim Erhitzen durchläuft es kontinuierlich die Stadien von fest, dann hochviskos, bis es bei Temperaturen im Bereich von 150 °C bis 200 °C zu einer dünnen Flüssigkeit wird. Bei noch höheren Temperaturen beginnt es sich zu zersetzen. Im Gegensatz zu Wasser hat Bitumen keinen festen Schmelzpunkt, sondern weist einen Schmelzbereich auf, da die Komponenten des Kohlenwasserstoffgemisches unterschiedliche Schmelzpunkte haben. Die Eigenschaften von Bitumen ändern sich mit der Zeit, es altert. Der Verlust von flüchtigen Bestandteilen bei erhöhten Temperaturen und die Oxidation werden als die beiden Hauptfaktoren für diese Veränderungen angesehen, die zu einer erhöhten Steifigkeit und Sprödigkeit führen (Hofko u. a. 2017). Die erhöhte Steifigkeit kann bei hohen Oberflächentemperaturen vorteilhaft sein, jedoch führt die erhöhte Sprödigkeit bei tiefen Temperaturen zu Problemen, da Spannungen nicht mehr abgebaut werden, sondern Rissbildung auftritt (Oeser u. a. 2012). Somit ist auch die Schädigung ein Phänomen, das berücksichtigt werden muss. Im Prinzip kann Bitumen bei Temperaturen oberhalb des Glasübergangsbereichs enorme Verformungen erfahren. Im Anwendungsbereich sind die Verformungen jedoch gering und die kinematische Nichtlinearität kann vernachlässigt werden.

Heutzutage wird häufig Polymermodifiziertes Bitumen (PmB) nach DIN EN 12697-26; DIN EN 14023 verwendet. PmB ist Bitumen gemischt mit 3 m.% bis 5 m.% Polymeren (Hutschenreuther und Wörner 2017). PmB hat den Vorteil der leichteren Verarbeitbarkeit (bessere Verdichtung) beim Bau, es ist steifer bei hohen Temperaturen (weniger Spurrinnenbildung) und zäher bei niedrigen Temperaturen (weniger Rissbildung). Außerdem ist sein Haft- und Alterungsverhalten verbessert.

Asphalt ist ein Verbundwerkstoff, der aus Bitumen, mineralischen Zuschlagstoffen, feinen und groben Gesteinskörnungen, Hohlräumen und manchmal zusätzlichen Füllstoffen, wie z.B. Zellulosefasern, besteht. Er erbt die meisten seiner mechanischen Eigenschaften vom Bitumen, verhält sich jedoch bei erhöhten Temperaturen fester, als reines Bitumen. Nach Oeser u. a. (2012) sind die Hauptanforderungen:

- Stabilität: Keine bleibenden Verformungen unter Last.
- Rissfestigkeit: Ausreichende Viskosität bei niedrigen Temperaturen, um Spannungen abzubauen. Kennzeichnet meist eine Rissbildung von oben nach unten.
- Ermüdungsbeständigkeit: Aushalten der Belastung in hohen Zyklen ohne Rissbildung. Kennzeichnet meist die Rissbildung von unten nach oben.

- Einbaubarkeit: Transport und Einbau ohne Entmischung. Gute Verdichtbarkeit.

Die Beanspruchung auf Planum und Tragschichten hängt vor allem von den Steifigkeiten der darüber liegenden Asphalt-schichten ab. Eine Asphaltstraße verformt sich nicht im makroskopischen Sinn, die Illustration der Beanspruchung durch Verkehr in Abbildung 2.2 ist zu Darstellungszwecken überhöht. Obwohl eine signifikante Dehnungslokalisierung innerhalb des Bindemittels bzw. des Bindemittel-Mörtels stattfindet, sind die Verformungen dennoch klein. Die großen Verformungen von Spurrinnen sind das Ergebnis eines inkrementellen Prozesses, an dem Tausende von Lastwechseln vor allem bei hohen TFO beteiligt waren, und treten nicht ad hoc auf.

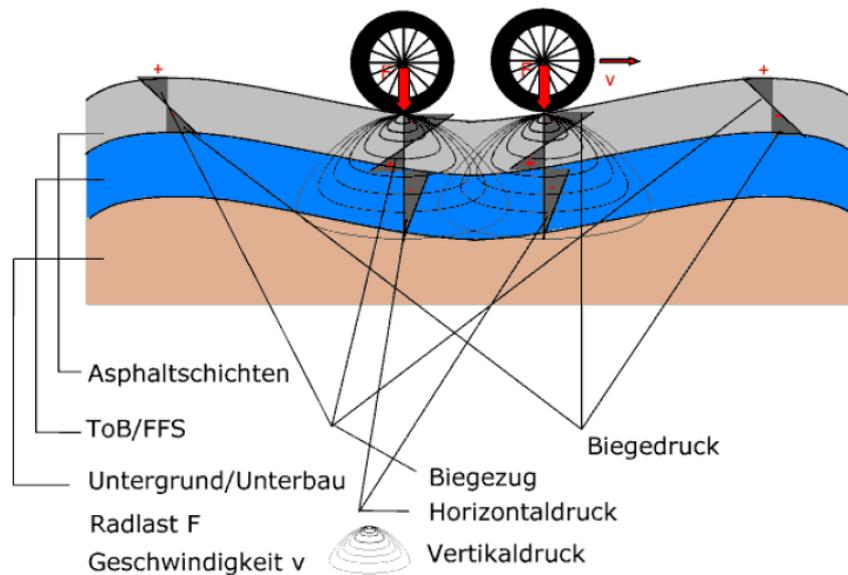


Abbildung 2.2.: Beanspruchung einer Asphaltbefestigung. Quelle: Oeser u. a. (2015).

Die behinderte Längsdehnung führt zu Zwangsspannungen, die aufgrund des viskoelastischen Verhaltens von Asphalt bei ausreichend hohen Temperaturen relaxiert werden können. Bei tiefen Temperaturen können jedoch aufgrund der dann hohen Steifigkeit kryogene Zugspannungen und damit Risse entstehen. Das Verformungsverhalten einer Asphaltstraßenbefestigung wird vom vertikalen Steifigkeitsprofil und damit vom vertikalen Temperaturprofil bedingt.

Vorgehen der RDO Asphalt

Aufgrund des komplexen Materialverhaltens existieren auch verschiedene Schädigungsmechanismen, die die Nutzungsdauer einer Straße begrenzen. Die Nachweisführung

nach RDO Asphalt (2009, Kap. 7) berücksichtigt vier Nachweise, welche prinzipiell alle temperaturabhängig sind. Diese sind die

- Beanspruchung auf dem Planum,
- Beanspruchung von Tragschichten mit und ohne hydraulische Bindemittel,
- der Ermüdungsnachweis für Asphaltsschichten und die
- Spurrinnengefährdung.

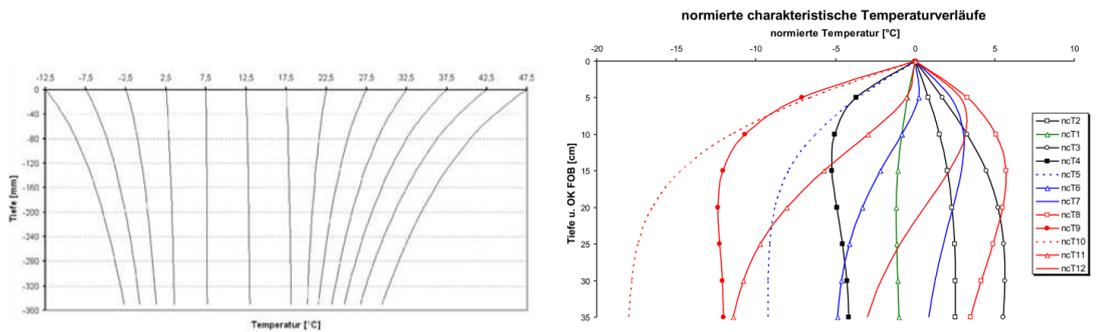
Die Spurrinnengefährdung ist derzeit experimentell zu bewerten. Alle anderen Nachweise berechnen eine Anzahl zulässiger Lastwechsel (Grenzlastwechselzahl) und verwenden das Versagenskriterium nach Miner (1945) und Palmgren (1924)

$$S = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{H_{V,i} H_{\Theta,j} N}{N_{zul,i,j}}, \quad (2.5)$$

mit den Auftretenshäufigkeiten der Achslastklasse (ALK) i , $H_{V,i}$, und des Temperaturzustands j , $H_{\Theta,j}$. Vor allem der Ermüdungsnachweis ist im Kontext des Klimawandels relevant, er wird auch einzig von Augter und Kayser (2016) zur Überarbeitung der KiST-Zonen herangezogen. Nach RDO Asphalt (2009, S. 30) muss für den Nachweis der Ermüdung das Verfahren der Mehrschichtentheorie (MST) verwendet werden. Gemeint ist die MST mit Hankel-Transformation (siehe ADtoPave). Das Verfahren ist geometrisch und materiell linear. Daher wird das Verhalten von Asphalt als linear elastisch vereinfacht. Es ergibt sich also eine lineare Abhängigkeit der Belastungsgrößen (Verformungen, Dehnungen und Spannungen) von der angesetzten Radlast. Entsprechend einer Überrollgeschwindigkeit von 80 km/h wird eine Belastungsfrequenz von 10 Hz angenommen. Die Hauptkurven des Betrags des komplexen E-Moduls werden auf Basis der Zeit-Temperatur-Äquivalenz für diese Frequenz aufgestellt. Aus ihnen kann der temperaturabhängige Modul bestimmt werden. Die Querkontraktionszahl beträgt $\nu = 0.35$. In aktuellen Entwurfsfassungen der RDO Asphalt 21 (Entwurf) (2021) wird die Festlegung auf die MST abgeschwächt, es muss bei Verwendung anderer Verfahren jedoch anhand der FGSV AP 65 (2006) und RStO (2012) kalibriert werden.

Bei Betrachtung des Ermüdungsnachweises (RDO Asphalt 2009, Kap. 7.5.1) steigt mit abnehmender Steifigkeit die üblicherweise dimensionierungsrelevante Biegezugdehnung an der Unterseite der Asphalttragschicht an. Die Anzahl zulässiger Lastwechsel, N_{zul} , nimmt ab, der Asphalt schädigt schneller. Daher müssen für die rechnerische Dimensionierung Verfahren gewählt werden, die die Temperaturprofile berücksichtigen können.

Bereits die RDO Asphalt (2009, Anhang 2) berücksichtigen die auftretenden Profile durch eine Logarithmus-Funktion, die je nach auftretender TFO-Klasse unterschiedlich parametrisiert wird, siehe Abbildung 2.3a. Die Klassenbreite beträgt dabei 5 K. Die unterschiedlichen Auftretenshäufigkeiten der TFO-Klassen sind 4 Histogrammen zu entnehmen, welche die KiST-Zonen definieren. Für jede Kombination aus $J = 13$ TFO-Klassen (Hess 1998) und $I = 11$ ALK, also 143 Belastungszuständen, ist die Teilschädigung auszurechnen und zur Miner-Summe zu summieren. Allerdings hat aufgrund der Linearität des Verfahrens die ALK einen linearen Einfluss auf die Dehnung im Nachweispunkt, daher muss praktisch nur eine Achslastklasse berechnet werden. Die Belastungen aller anderen ALK ergeben sich durch lineare Skalierung. Bei Temperaturen im Nachweispunkt $\leq 5^\circ\text{C}$ sind zusätzlich die kryogenen Zugspannungen zu berücksichtigen.



(a) Temperaturprofile in einer Asphaltbefestigung in Abhängigkeit der TFO. Quelle: RDO Asphalt (2009, Bild A 2.1). (b) Normierte charakteristische Temperaturprofile. Quelle: Wellner und Kayser (2007, Abb. 2.9).

Abbildung 2.3.: Aktuelle Temperaturprofile in den RDO Asphalt und FGSV AP EDS 2 (2023).

Dieses Verfahren wurde bezüglich der thermischen Belastung von Wellner und Kayser (2007) überarbeitet. Hierzu wurde ein thermisches Modell der Straße verwendet. Die Einteilung in 13 TFO-Klassen bleibt unverändert, die vertikalen Profile hingegen wurden deutlich verändert, vergleiche Abbildung 2.3b. Diese 12 ncT weisen im Vergleich zu früher nun teilweise ausgeprägte Wendepunkte auf. Es ergeben sich $J = 156$ absolute charakteristische Temperaturprofile mit ihren jeweiligen Auftretenshäufigkeiten. Dies war notwendig um insbesondere das Verhalten in den Nachtstunden besser abbilden zu können, siehe beispielsweise ncT08 in Abbildung 2.3b.

In aktuellen Entwurfsversionen der RDO Asphalt wurde weiterhin die Unterteilung der ALK auf $I = 26$ anstatt den früheren 11 verfeinert. Für eine vollständige Berechnung sind also prinzipiell $26 \times 156 = 4056$ Einzelrechnungen notwendig. In der Praxis sind allerdings manche Auftretenshäufigkeiten 0. Da das kalibrierte MST-Verfahren nach wie

vor materiell und geometrisch linear ist, ergibt sich immer noch eine lineare Abhängigkeit der Biegezugdehnung im Nachweispunkt von der ALK, siehe etwa RDO Asphalt 21 (Entwurf) (2021, Tab. 7.11 und 7.12).

Anpassung an den Klimawandel

Durch die Arbeit von Augter und Kayser (2016) sollten die KiST-Zonen aktualisiert werden, um den infolge der Klimaerwärmung steigenden Lufttemperaturen sowie dem weiter ausgebauten Messnetz meteorologischer Stationen Rechnung zu tragen. Das von Wellner und Kayser (2007) verwendete thermische Modell der Straße wird aufgrund eines behaupteten hohen Rechenaufwands nicht zur Berechnung der KiST-Zonen verwendet. Daher sei die erweiterte grafische Darstellung der KiST-Zonen auf der Grundlage von Modellrechnungen nicht möglich. Als Ersatz werden lediglich die mittlere TFO eines Tages und die Tagesamplitude der TFO auf Basis von Lufttemperatur, Globalstrahlung und teilweise des Spreads (Luftfeuchte) mittels Fitting bestimmt. Die verwendeten Daten stammen von DWD-Wetterstationen (Lufttemperatur, Globalstrahlung und Luftfeuchte) und von Glättemeldeanlagen (TFO). Aus der mittleren TFO und der Amplitude eines Tages werden anschließend Stundenwerte und deren Häufigkeiten errechnet. Vermutlich werden die ncT den TFO rein auf Basis der von Wellner und Kayser (2007) angegebenen Amplituden zugeordnet.

Es wird ein punktueller Vergleich mit dem thermischen Modell auf Basis unterschiedlich aktueller Wetterdaten angestellt. Dabei fällt auf, dass die berechneten Teilschädigungen unterschiedlich sind. Als problematisch wird durch die Autoren selbst festgestellt, dass die Messdaten von Glättemeldeanlagen nicht zu denen des thermischen Modells passen. Einerseits wird das damit begründet, dass das thermische Modell Windeinfluss berücksichtigt, während das Fitting einen konstanten konvektiven Austausch durch Verkehr unterstellt. Andererseits bestehen die Messeinrichtungen der Glättemeldeanlagen aus anderen Materialien als die umgebende Straße selbst. Damit wird eine andere Temperatur gemessen, als sie im Straßenkörper eigentlich vorliegt.

Die Autoren sind der Ansicht, dass die alleinige Betrachtung der TFO problematisch ist, da damit keine Aussage über die Veränderung der Temperaturprofile durch den Klimawandel getroffen werden kann. Möglicherweise verändern sich auch die ncT mit fortschreitendem Klimawandel. Das Fitting-Modell von Augter und Kayser (2016) ermöglicht die Analyse nicht. Weiterhin ist es fraglich, ob die verwendete Klassierung der TFO nach Hess (1998) noch gültig ist. Die oberste Temperaturklasse nach berücksichtigt alle auftretenden TFO $> 45\text{ °C}$ mit der charakteristischen Temperatur von $47,5\text{ °C}$. Wie in Abbildung 2.1a dargestellt ergeben sich allerdings in Europa bereits jetzt TFO von Asphalt, die eher im Bereich von 55 °C liegen.

Augter und Kayser (2016) schlussfolgern, dass ein thermisches Modell der Straße besser geeignet sei, als ein Fitting-Modell. Es wird vorgeschlagen das Modell von Wellner und Kayser (2007) um einen Term für den konvektiven Luftaustausch durch Verkehr zu ergänzen.

2.2.3. Beton

Frischbeton entwickelt sich von einer pastösen Mischung hin zu einem Festkörper großer Steifigkeit und Festigkeit. Es zeigt sich auf langfristigen Zeitskalen ein viskoelastisches Verhalten, welches im Straßenbau üblicherweise keinen Eingang in die rechnerische Dimensionierung findet. Maßgeblichen Einfluss auf diese Größen haben die Umweltbedingungen zum Zeitpunkt des Betonierens, wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind und Globalstrahlung. Weiterhin sind die Betonrezeptur und die Nachbehandlung entscheidend. Die Entwicklung von Festigkeit und Steifigkeit sind eng mit der exothermen Hydratation und den sogenannten Nullspannungstemperaturen des jungen Betons verknüpft. Definitionsgemäß baut der Frischbeton ab der ersten Nullspannungstemperatur Druckspannungen auf, die Maxima von Temperatur und Druckspannung fallen zusammen. Diese Spannungen können allerdings größtenteils relaxiert werden. Nach Überschreiten des Temperaturmaximums zieht sich der Beton zusammen und es entstehen Zugspannungen, da die Steifigkeit des Beton ansteigt. Die zweite Nullspannungstemperatur kennzeichnet dabei den Übergang von Druck- zu Zugspannungen. Die Spannungsverteilung über den Querschnitt ist aufgrund der inhomogenen Temperaturverhältnisse nicht konstant. Die präzise Vorhersage des Spannungsaufbaus ist äußerst diffizil. Neben der Entwicklung der Steifigkeit ist die Entwicklung der Festigkeit maßgebend für das sich entwickelnde Rissbild im Beton. Die in Deutschland übliche Bauweise mit Querscheinfugen hat den Anspruch das wilde Reißen des Betons zu vermeiden. Für weitere Informationen hierzu wird auf die Arbeiten von Bamforth (2007), Eierle (1999) und Ren (2015) und die darin enthaltenen Referenzen verwiesen.

Das Materialverhalten von Beton ist im Kontext des für die Auswirkungen des Klimawandels auf den Straßenbau relevanten Temperaturbereichs als temperaturunabhängig anzusehen. Es kann daher mit konstanten Parametern für lineare Elastizität gerechnet werden. Im Gegensatz zu Asphalt verformt sich Beton unter Einwirkung gleichmäßiger und ungleichmäßiger Temperaturprofile, siehe Abbildung 2.5. Im Allgemeinen sind die Temperaturverläufe und damit die Spannungszustände nichtlinear, wie bereits Teller und Sutherland (1935) berichteten, siehe Abbildung 2.4. Die auftretenden Spannungen werden im Zeitbereich der täglichen Temperaturgänge nicht relaxiert. Die Längsspannungen werden aufgrund der Querscheinfugen im Abstand von ≈ 5 m nicht nennenswert aufgebaut. Bei großer gleichmäßiger positiver Änderung gegenüber der zweiten Nullspannungstemperatur kann es jedoch zu Druckspannungen aus Zwang

kommen. Diese können im schlimmsten Fall in Hitzeschäden, wie etwa Ausknicken und Kantenabplatzern, resultieren.

Der Anteil aus ungleichmäßiger Temperaturprofile wird vereinfachend in einen linearen und einen nichtlinearen Anteil zerlegt. Der lineare Anteil bedingt dabei die Plattenbiegung. Aus veränderter Biegung resultieren die Wölbspennungen. Der nichtlineare Anteil verursacht einen Eigenspannungszustand, der meist zu Rissen an Ober- oder Unterseite der Platte führt, aber nicht zu Biegung. Die Ergebnisse verschiedener Forschergruppen zeigen, dass die in Betonfahrbahnen auftretenden nichtlinearen Temperaturprofile zu einer signifikanten Abweichung der entstehenden Spannungen gegenüber dem linearen Fall führen (Ioannides und Khazanovich 1998; Masad u. a. 1996; Pane u. a. 1998; Richardson und Armaghani 1987). Untersuchungen von Mohamed und Hansen (1997) ergeben, dass insbesondere nachts und am frühen Morgen Zugspannungen sowohl auf der Plattenoberseite, als auch auf der Unterseite auftreten, und dass dieser Effekt nur durch einen nichtlinearen Temperaturverlauf abzubilden sei.

Verfahren zur rechnerischen Dimensionierung von Betonstraßen

Üblicherweise werden Temperatur- und Verkehrsbelastung getrennt berechnet und die Ergebnisse anschließend addiert. Die Näherungslösungen von Westergaard (1927, 1948) sind die Grundlage der Berechnung der Verkehrsbelastung von Betonfahrbahnen seit den 1920er Jahren. Diese Lösungen gelten nur für drei spezielle Einzellastfälle, nämlich Plattenmitte, -ecke, und -rand und setzen darüber hinaus unendliche, oder halb-unendliche Plattendimensionen voraus. Die zugrundeliegende Plattentheorie ist die der sogenannten Kirchhoff-Love-Platte. Als Bodenmodell kommt dabei das Winklersche Federmodell (Winkler 1867) zum Einsatz.

Die zumeist verwendete Methodik zur Berücksichtigung der durch ungleichmäßige Erwärmung der Platten einwirkenden Momente geht auf Eisenmann (1970) zurück. Mit dieser Methodik ist die Berücksichtigung nichtlinearer Temperaturverläufe nicht möglich. Lechner (1996) hingegen präsentiert ein analytisches Verfahren zur Berücksichtigung nichtlinearer Temperaturverläufe. Für einen Überblick der Entwicklung sei auf Ioannides (2006), sowie auf das Arbeitspapier zur Dimensionierung von Verkehrsflächenbefestigungen B2: Plattentheorie verwiesen (FGSV 2011).

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) wird in der Forschung und Entwicklung von Betonfahrbahnen bereits seit geraumer Zeit eingesetzt. Bei Verwendung der FEM ist die Modellierung von Temperatur- und Verkehrsbelastung gleichzeitig möglich. Frühere Modelle beschränkten sich aus Gründen des Rechenaufwands auf die Modellierung in 2D, doch spätestens seit Ende der 1980er Jahre werden vornehmlich realistischere 3D Modelle eingesetzt.

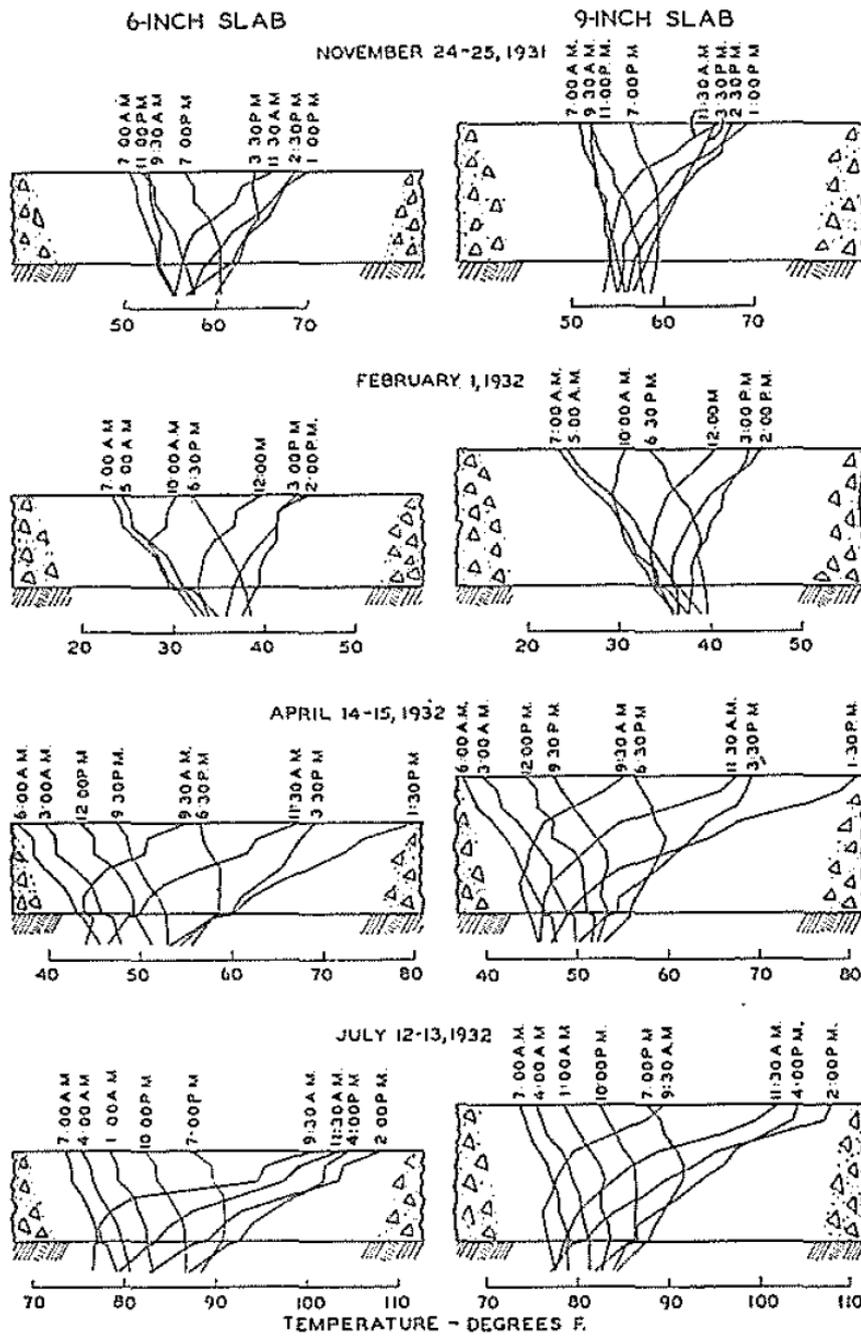


Abbildung 2.4.: Nichtlineare Temperaturprofile in Betondecken. Quelle: Teller und Sutherland (1935, Bild 9).

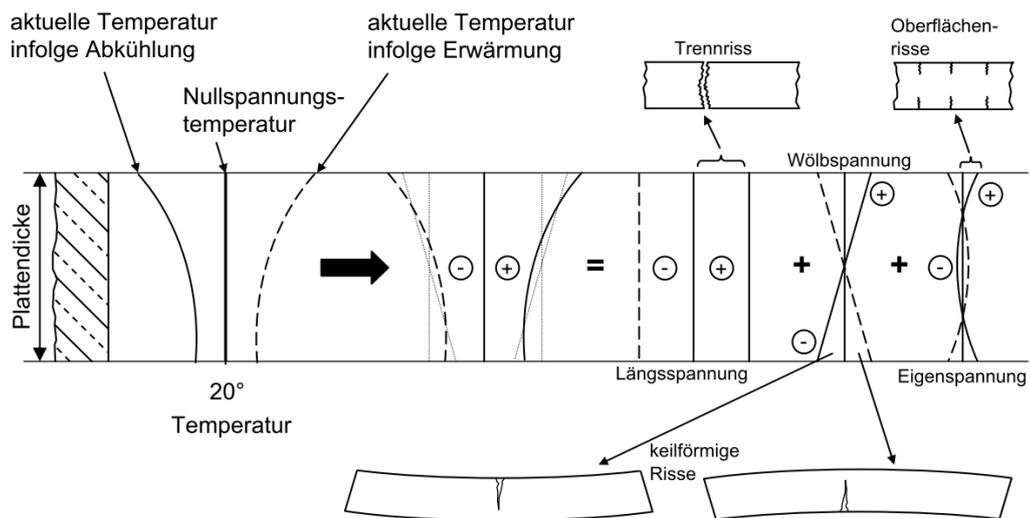


Abbildung 2.5.: Schematische Darstellung von Temperaturspannungen in Betonplatten mit idealisierter konstanter Nullspannungstemperatur. Quelle: Foos (2006, Abb. 2.9).

Die meisten Untersuchungen von Betonfahrbahnen mittels der FEM verwenden (meistens kommerzielle) Allzweck-FE Programme. So zum Beispiel ANSYS (Mahboub u. a. 2004), Abaqus (El-Maaty u. a. 2016; Masad u. a. 1996; Pane u. a. 1998), DIANA (Foos 2006), LS-Dyna (Shoukry u. a. 2007) und Calculix (Villaret u. a. 2019a). Manche Forschergruppen entwickeln jedoch auch spezialisierte alleinstehende Lösungen. Brill und Parsons entwickelten das von der amerikanischen Federal Aviation Administration verwendete Programm FAARFIELD für die Dickendimensionierung von Flugverkehrsflächen. FAARFIELD selbst wird derzeit noch gepflegt und ist frei verfügbar (FAA 2017). Davids (2019), Davids u. a. (2003) und Davids u. a. (1998) entwickelten ebenfalls ein frei verfügbares alleinstehendes Programm namens EverFE, welches in neueren Versionen nichtlineare Temperaturverläufe über die Plattendicke abbilden kann.

Vorgehen der RDO Beton

Im deutschen Regelwerk finden nichtlineare Temperaturprofile keine Berücksichtigung. Der Nachweis der Dimensionierung gilt als erbracht, wenn die Summe aus einwirkendem Moment aus Verkehrsbelastung und einwirkendem Moment aus Temperaturbelastung kleiner oder gleich dem aufnehmbaren Moment ist.

$$M_{EV} + M_{ET} \leq M_{Rd} \quad (2.6)$$

Wie im Reinhardt (2023) ausgeführt, lassen sich linear verteilte Normalspannungen und Biegemomente mit folgender Formel direkt ineinander umrechnen

$$M = \frac{1}{6} \sigma_{max} h_d^2 \quad (2.7)$$

wobei σ_{max} jeweils die Spannung in der Randfaser der Platte ist. Es erwächst keinerlei Vorteil durch die Verwendung von Momenten.

Daher kann der Nachweis anstatt über Momente wie in Gleichung 2.6 auch über Spannungen geführt werden.

$$\sigma_V + \sigma_\Theta \leq f_d \cdot \quad (2.8)$$

Einwirkende Belastung aus Verkehr Das Moment aus Verkehrsbelastung wird in den RDO Beton nur für die Plattenkante bestimmt. Die Last gilt als an der Kante befindlich, falls sie sich in beträchtlichem Abstand zu einer Ecke befindet. Als Bodenmodell kommt dabei das Winklersche Federmodell (Winkler 1867) zum Einsatz. Einige Details im Verhalten von Betonfahrbahnen entziehen sich jedoch einer analytischen Lösung. Die drei wichtigsten sind Lastübertragung in Fugen durch Verbinder (Anker, Dübel), die Auswirkungen von Unterschieden in der Lagerung sowie das Verhalten unter dynamischen Lasten (Davids u. a. 2003, Seite 92). Weiterhin sind auch die Modellierung von über die linear-isotrope Elastizität (Hooke) hinausgehendem Materialverhalten sowie nichtlinearer Temperaturverläufe, nicht möglich. Für einen Überblick der Entwicklung sei auf Ioannides (2006), sowie auf das Arbeitspapier zur Dimensionierung von Verkehrsflächenbefestigungen B2: Plattentheorie verwiesen (FGSV 2011) verwiesen. Die in den RDO Beton (2009, Gleichung 6-2) enthaltene Variante lautet

$$M_{EV} = m_{bL} \times m_{bD} \times F \times 1000 \times \left[0,55 \times \log_{10} \left(\frac{l}{b} \right) + 0,1 \times \frac{b}{l} - 0,011 \right] \quad (2.9)$$

l ist die elastische Länge³ nach Westergaard (1926, Formel 1) oder RDO Beton (2009, Gleichung 6-7)

³Engl.: radius of relative stiffness

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)K}} . \quad (2.10)$$

l ist ein Maß dafür, wie schnell die Einflüsse von Lasten mit steigendem horizontalem Abstand abklingen. Dafür werden die Steifigkeit der Betondecke, E , und der Bettungsmodul, K , in ein Verhältnis gesetzt.

b ist der Radius der Ersatzauflandsfläche⁴ nach Westergaard (1926, Formel 8) beziehungsweise RDO Beton (2009, Gleichung 6-6)

$$b = \sqrt{1,6r^2 + h_d^2} - 0,675h . \quad (2.11)$$

Gleichung 2.9 kann mit Hilfe von Gleichung 2.7, der in den RDO Beton angenommenen Querkontraktionszahl von $\nu = 0,2$ und dem Ersatz des Lastradius r durch b aus

$$\sigma_V = \frac{3(1+\nu)F}{\pi(3+\nu)h^2} \left[\ln \left(\frac{Eh^3}{100kr^4} \right) + 1,84 - \frac{4}{3}\nu + \frac{1-\nu}{2} + 1,18(1+2\nu)\frac{b}{l} \right] \quad (2.12)$$

berechnet werden, es fehlt lediglich die Multiplikation mit den Anpassungsfaktoren. Gleichung 2.12 entspricht Westergaard (1948, Gleichung 12).

Anpassungsfaktoren in der Berechnung der Verkehrsbelastung m_{bL} und m_{bD} sind Anpassungsfaktoren für die Lagerungsart und Lastübertragung in Fugen durch Dübel und/oder Anker.

m_{bL} Lagerungsfaktor, Anpassung auf die Art der Tragschicht, etwa Asphalt, Magerbeton (HGT) oder Schotter (RDO Beton 2009, Tabelle A 2.1).

m_{bD} Dübelfaktor, Berücksichtigung der Querkraftübertragung durch eventuell vorhandene Dübel und Anker (RDO Beton 2009, Tabelle 4.4).

⁴Engl.: equivalent radius

Einwirkende Belastung aus Temperatur Die RDO Beton behandeln die einwirkende Belastung aus ungleichmäßiger Temperaturverteilung über die Dicke im Gebrauchszustand. Das exotherme Erhärungsverhalten des Betons und die damit eng verbundenen Längsspannungen aus gleichmäßiger Temperaturverteilung über die Dicke im Gebrauchszustand werden nicht berücksichtigt.

Die in den RDO Beton (2009, Gleichung 6-10) verwendete Formel lautet

$$M_T = \alpha_T E \gamma_{tot} m_{T1} m_{T2} m_{T3} \frac{h_d^3 \text{MAEG}}{12}, \quad (2.13)$$

dabei sind E der E-Modul, α_T der Wärmeausdehnungskoeffizient und MAEG der Temperaturgradient in K/mm. Weiterhin sind die folgenden einheitenlosen Anpassungsfaktoren enthalten

- γ_{tot} Berücksichtigung des durch Relaxation verringerten E-Moduls des Betons (RDO Beton 2009, Anhang 4.2).
- m_{T1} Anpassung auf Überlagerung von Temperaturbeanspruchung und Schwerverkehr zu bestimmten Tageszeiten (RDO Beton 2009, Tabelle Anhang 2.3).
- m_{T2} Anpassung der Belastung auf aktuelle Plattendimensionen. Ausgehend von der kritischen Länge (RDO Beton 2009, Tabelle Anhang 2.4).
- m_{T3} Anpassung des Temperaturgradienten an verschiedene Temperaturgebiete (KiST-Zonen, siehe FE 89.0305 (Augter und Kayser 2016)). Im Dimensionierungsbeispiel (RDO Beton 2009, S. 38) wird auf Tabelle Anhang 2.5 verwiesen. Diese existiert jedoch nicht. Aktuell noch deaktiviert durch $m_{T3} = 1,0$.

Der absolute Temperaturgradient MAEG besteht im Allgemeinen aus den drei in Abbildung 2.5 dargestellten Anteilen:

- Einem Anteil aus gleichmäßiger Erwärmung, MAEG_{const} ,
- einem Anteil aus linear verteilter ungleichmäßiger Erwärmung, $\text{MAEG}_{lin} = (T_o - T_u)/h_d$ und
- einem beliebig nichtlinearen Anteil MAEG_{nl} .

Der Temperaturverlauf wird dabei als linear idealisiert.

Die Spannung aus Verkehrsbelastung, σ_V und die Berechnungsfestigkeit, f_d , bleiben von Klimaänderungen unberührt. Einzig σ_Θ ändert sich je nach herrschender Temperaturverteilung und muss ständig neu berechnet werden.

Aus dem Elastizitätsgesetz des Stabes (Schnell u. a. 1995, Abschnitt 4.9)

$$\sigma = E\epsilon - E\alpha_T\Delta T . \quad (2.14)$$

kann unter Verwendung des linearen Anteils

$$\Delta T = \text{MAEG}h_d \quad (2.15)$$

und Vernachlässigung des ersten Terms durch verhinderte Wölbung die linear über die Höhe verteilte Normalspannung

$$\sigma(z) = E\alpha_T\text{MAEG}z \quad (2.16)$$

berechnet werden. Durch Auswerten bei $z = \pm h/2$ erhält man als positiven Extremwert die Wölbspannung im Stab (Eisenmann 1970, Formel 7a)

$$\sigma_w = E\alpha_T\frac{h\text{MAEG}}{2} . \quad (2.17)$$

Mit Hilfe von Gleichung 2.7 erhält man

$$M_{ET} = \alpha_T E \frac{h_d^3 \text{MAEG}}{12} , \quad (2.18)$$

also das Moment infolge Temperatur nach RDO Beton Entwurfsfassung (2018, Gleichung 6-14) ohne die Anpassungsfaktoren. Für eine Platte müsste diese Formel $(1 - \nu)$ im Nenner stehen haben (Eisenmann 1970; Foos 2006; Lechner 1996). Die Querkontraktion wird vernachlässigt da der Nachweis für den Lastfall Plattenkante erbracht wird.

Im Allgemeinen kann also die Normalspannung unter beliebigen Temperaturverläufen mittels

$$\sigma_{\Theta}(z) = -E\alpha_T\Delta T_{inhom}(z) , \quad (2.19)$$

berechnet werden, wobei $\text{MAEG}_{inhom}(z) = \text{MAEG}_{lin} + \text{MAEG}_{nl}$ gilt.

Berücksichtigung des Klimawandels

Die Temperaturbelastung wird durch einen Faktor an die Verkehrsverteilung angepasst (m_{T1}). Die zugrundeliegenden Überlegungen und die Datenbasis sind leider unbekannt.

Die KiST-Zonen werden in der aktuell gültigen Fassung der RDO Beton (2009) noch nicht berücksichtigt. Geschehen soll dies über den Faktor m_{T3} , der enthalten, aber noch zu 1,0 gesetzt ist. In der finalen Entwurfsfassung der RDO Beton 21 werden die KiST-Zonen berücksichtigt, diese basieren auf Villaret u. a. (2019b).

Auf der Basis stündlicher meteorologischer Daten von 328 Messstationen des DWD wurden mit dem thermischen Modell nach Wellner und Kayser (2007) Straßenbefestigungen mit Betondecke gerechnet. An 50 dieser Stationen sind die Temperaturverläufe in den Betondecken für unterschiedliche Deckendicken ermittelt worden. Für alle berechneten Temperaturverläufe wurden die Temperaturanteile berechnet, welche eine Plattenbiegung (mechanisch äquivalenter Temperaturgradient) bzw. Plattendehnung (mittlere Plattentemperatur durch ΔT_{const}) bewirken. Der für die Biegung verantwortliche lineare Anteil wird durch ein Gleichsetzen des Moments aus angenommener linearer Spannungsverteilung und des Moments der echten nichtlinearen Spannungsverteilung errechnet.

Als Begründung für dieses Vorgehen wird festgehalten:

Der nichtlineare Temperaturanteil führt weder zu einer Plattendehnung, noch zu einer Biegung. Es kommt aber zu einer Querschnittsverwölbung, welche Zwangsspannungen erzeugt. Diese können in bestimmten Fällen (z. B. bei plötzlicher Abkühlung) relevante Größenordnungen annehmen. Die betreffenden Temperaturzustände treten aber nur selten und kurzzeitig auf. Der nichtlineare Temperaturanteil wird deshalb gegenwärtig in der nationalen und wie auch internationaler Dimensionierungspraxis nicht berücksichtigt. Eine mathematische Behandlung wäre auch weitaus komplizierter als im Fall der beiden anderen Temperaturanteile. Aus diesen Gründen werden in der vorliegenden Arbeit keine Verteilungen für den nichtlinearen Temperaturanteil bestimmt (Villaret u. a. 2019b, S.36).

Diese Begründung hinkt nach Ansicht der Auftragnehmer aus verschiedenen Gründen.

- Wölbung ist zweiachsige Biegung.
- Die Wölbung führt daher auch nur zu Zwangsspannungen, wenn sie behindert wird.
- Aus dem Studium der internationalen Literatur kann zweifelsfrei abgeleitet werden, dass nichtlineare Gradienten dimensionierungsrelevant sind. Siehe Abschnitt 2.2.3.

- Der nichtlineare Temperaturanteil wird in der Praxis schon seit geraumer Zeit berücksichtigt, siehe Davids u. a. (2003).

Die Behandlung nichtlinearer Spannungen über Momente bereitet Schwierigkeiten. Das hat aber keine mathematischen, sondern mechanische Gründe. Unterschiedliche nichtlineare Profile können zu identischen Momenten führen, obwohl der Eigenspannungszustand verschieden ist. Eine triviale Lösung dieses Problems besteht nach Ansicht der Auftragnehmer darin, dass auf Momente verzichtet und direkt mit den Spannungswerten gerechnet wird. Das ist auch nach derzeitigem Stand der RDO Beton (2009) problemlos möglich, da die Nachweisführung unverändert über Spannungen erfolgen kann, siehe Gleichung 2.8. Mit einem auf Spannungen basierenden Verfahren sind alle in Abbildung 2.5 dargestellten Spannungsanteile ohne Weiteres erfasst.

Auf der Grundlage statistischer Auswertungen wurden die mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten **MAEG** mit ihren Häufigkeitsverteilungen für unterschiedliche Deckendicken ermittelt. Da die RDO Beton allerdings die Häufigkeitsverteilung von Temperaturprofilen, wie die RDO Asphalt (2009) sie kennt, nicht berücksichtigt, ergeben sich hier wiederum verschiedene Probleme. Die drei Nachweisfälle verwenden an beiden Fugen jeweils einen konstanten linearen Temperaturgradient **MAEG** mit einer einzigen zugeordneten Häufigkeit c_1

$$\text{MAEG} = C_1 e^{-0.004h_d} \text{K/mm} . \quad (2.20)$$

Da es keine Summe über Teilschädigungen gibt in deren Summanden die Auftrenshäufigkeiten der Temperaturprofile sich zu 1 addieren, handelt es sich um ein unterbestimmtes System. Um auf den gleichen (mechanisch äquivalenten) Gradienten zu kommen, kann man in Gleichung 2.20 entweder c_1 oder die von h_d abhängige Funktion ändern. Da Villaret u. a. (2019b, Kapitel 11) auch beides machen, werden die Überschreitungshäufigkeiten (oder c_1) so festgelegt, dass die Temperaturgradienten denen der RDO Beton (2009) entsprechen. Damit ist zwar eine Abgrenzung klimatischer Verhältnisse durch KiST-Zonen möglich, eine Berücksichtigung eines Trends hin zu einer insgesamt höheren Temperaturbelastung in Deutschland kann derart jedoch nicht erfolgen.

Weiterhin wird in Villaret u. a. (2019b, Kap. 10.4.2) deutlich, dass ein Kriterium zur Begrenzung der Verformungen fehlt. Das in Villaret u. a. (2019b, Abb. 10.25) dargestellte Szenario der Unabhängigkeit der Spannungen vom Temperaturgradienten tritt dann auf, wenn die Platte sich von der Unterlage abhebt. Dabei bleiben zwar die Spannungen begrenzt, allerdings steigen die vertikalen Deformationen.

Kapitel 3.

Bereitstellung der meteorologischen Datensätze

Hier werden die meteorologischen Referenzdaten und Klimaprojektionsdaten beschrieben und auch die Methoden, wie diese Datensätze in der räumlichen und zeitlichen Dimension interpoliert sowie verschnitten werden. Um die meteorologischen Kenngrößen für die Berechnung der TFO örtlich und zeitlich differenziert darstellen zu können, müssen zunächst geeignete Datensätze bereitgestellt werden. Von Seiten des Deutschen Wetterdienstes stehen dazu räumlich hochaufgelöste Daten zur Verfügung (HYRAS), die jedoch lediglich in täglichen Zeitabständen verfügbar sind (Rauthe u. a. 2013; Razafimaharo u. a. 2020). Zusätzlich waren zum Zeitpunkt der Erstellung der hier genutzten Datensätze im Jahre 2022 einige wichtige meteorologische Kenngrößen wie Strahlung nicht im HYRAS-Datensatz vorhanden. Mit dem ERA5-Datensatz sind dann wiederum zum einen die fehlenden Daten verfügbar und auch eine stündliche Auflösung der Daten ist vorhanden. Jedoch ist der ERA5-Datensatz räumlich nicht so hoch aufgelöst und unterliegt einer weniger umfangreichen Qualitätskontrolle. Im weiteren sollen die Referenzdatensätze beschrieben werden als auch die Methoden, mit denen diese zu einem einheitlichen, zeitlich und räumlich hoch aufgelöstem Datensatz verschnitten werden. Als Referenzperiode für dieses Projekt wird die aktuelle klimatologische Referenzperiode 1991-2020 gewählt. Weiterhin stehen Daten aus dem DWD-Kernensemble für drei Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 zur Verfügung, mit denen die klimatischen Bedingungen der Zukunft abgebildet werden.

3.1. HYRAS-Datensatz

HYRAS ist das Kürzel für Hydro-meteorologische Rasterdaten und in diesem Datensatz sind mittlere Temperatur (T_{mit}), Tageshöchst- (T_{max}) und Tagestiefsttemperatur (T_{min}) sowie relative Luftfeuchte (H_{rel}) und Niederschlagsrate (P) enthalten (Razafimaharo u. a. 2020). Die zeitliche Auflösung beträgt einen Tag und erlaubt somit keine wesentlichen

Aussagen über Zwischenzeiträume. Die Daten liegen räumlich auf einem 5×5 km Gitter vor. Der HYRAS-Datensatz wird in vielen Projekten zur Untersuchung von Klimafolgen als Referenzdatensatz herangezogen (Ulrich 2021). Aufgrund der fehlenden Variablen und der groben zeitlichen Auflösung muss der HYRAS-Datensatz jedoch supplementiert werden, falls weitergehende Auswertungen, wie etwa die Strahlungsbilanz oder die Verdunstungsrate bestimmt werden sollen (Ulrich 2021). Die Daten werden in NetCDF (.nc) Format bereitgestellt, welches in Geowissenschaften wie Meteorologie oder Ozeanologie als übliches Datenformat für räumlich-zeitliche Datensätze verwendet wird.

3.2. ERA5 Datensatz

Im vorliegenden Projekt wird als Supplement der ERA5-Datensatz verwendet, welcher räumlich auf einem $0,25 \times 0,25^\circ$ Gitter sowie in stündlichen Zeitabständen vorliegt (Hersbach u. a. 2020). Mit der höheren Verfügbarkeit von Variablen, sowie der höheren zeitlichen Auflösung ist der ERA5-Datensatz sehr gut geeignet den hochwertigen HYRAS-Datensatz zu komplementieren. Aus dem ERA5-Datensatz werden neben Temperatur und Luftfeuchtigkeit auch weitere Variablen verwendet: Globalstrahlung, langwellige Rückstrahlung, Windvektor, Luftdruck sowie die Bodentemperatur über Gras. Auch ERA5-Daten werden im .nc Format bereitgestellt. Mithilfe der Modelltopographie aus ERA5 und HYRAS, werden die Temperaturvariablen sowie der Luftdruck des ERA5-Datensatz auf die 5×5 km Auflösung des HYRAS-Datensatzes interpoliert. Alle weiteren Variablen werden mithilfe der inversen Distanzgewichtung über das „Nearest-Neighbor-Verfahren“ der vier nächstgelegenen Gitterpunkte interpoliert, sowie dies z. B. in der Studie von (Teegavarapu u. a. 2012) angewandt worden ist. So entsteht ein räumlich mit HYRAS kompatibler Datensatz.

3.3. Klimaprojektionen des DWD-Kernensembles

In den Tabellen 3.2, 3.3 und 3.1 sind die regionalen Klimaprojektionen des DWD-Kernensembles dargestellt. Diese Tabellen bieten eine umfassende Übersicht über die verschiedenen Kombinationen von globalen Klimamodellen und deren Ensemblerealisierungen, die als Antriebskraft der regionalen Klimamodelle dienen. Spezifisch werden in diesen Tabellen die jeweiligen globalen Klimamodelle, ihre Ensemble-Versionen und die entsprechenden Regionalmodelle aufgelistet.

Die Daten der Klimaprojektionen erstrecken sich über den Zeitraum von 1951 bis 2100, wobei der Zeitraum von 2021 bis 2100 speziell für Zukunftsprojektionen genutzt

GLOBALES KLIMAMODELL	Ensemble	REGIONALES KLIMAMODELL
MOHC-HadGEM2-ES	r1	KNMI-RACMO22E
ICHEC-EC-EARTH	r12	KNMI-RACMO22E
ICHEC-EC-EARTH	r12	CLMcom-CCLM4-8-17
MIROC-MIROC5	r1	CLMcom-CCLM4-8-17
MPI-M-MPI-ESM-LR	r2	MPI-CSC-REMO2009

Tabelle 3.1.: Regionale Klimamodelle des DWD-Kernensembles für das RCP2.6

wird. In den Modellen des Ensembles sind die Variablen Temperatur, Solarstrahlung, Windgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit, alle in täglicher Auflösung, enthalten. Die Daten des DWD Kernensembles sind auf demselben Raster angeordnet wie die HYRAS-Daten.

GLOBALES KLIMAMODELL	Ensemble	REGIONALES KLIMAMODELL
ICHEC-EC-EARTH	r1	KNMI-RACMO22E
ICHEC-EC-EARTH	r12	KNMI-RACMO22E
ICHEC-EC-EARTH	r12	SMHI-RCA4
MOHC-HadGEM-ES	r1	CLMcom-CCLM4-8-17
MPI-M-MPI-ESM-LR	r1	MPI-CSC-REMO2009
MPI-M-MPI-ESM-LR	r2	MPI-CSC-REMO2009

Tabelle 3.2.: Regionale Klimamodelle des DWD-Kernensembles für das RCP4.5

Die Datensätze des DWD Kernensembles sind im NetCDF-Format verfügbar. Das DWD-Kernensemble ist ein anerkanntes Standard-Tool in Anwendungen der Klimaanpassung auf Bundes- und Länderebene. Diese Anerkennung macht die Ergebnisse des DWD-Kernensembles vergleichbar und belastbar.

GLOBALES KLIMAMODELL	Ensemble	REGIONALES KLIMAMODELL
ICHEC-EC-EARTH	r1	KNMI-RACMO22E
CCCma-CanESM2	r1	CLMcom-CCLM4-8-17
MOHC-HadGEM-ES	r1	CLMcom-CCLM4-8-17
MIROC-MIROC5	r1	GERICS-REMO2015
MPI-M-MPI-ESM-LR	r1	UHOH-WRF361H
MPI-M-MPI-ESM-LR	r2	MPI-CSC-REMO2009

Tabelle 3.3.: Regionale Klimamodelle des DWD-Kernensembles für das RCP8.5

3.4. Datenverschnitt

Das Ziel der Verschneidung der beiden Datensätze HYRAS und ERA5 ist es, einen einheitlichen, hochwertigen Datensatz auf dem 5×5 km Raster des HYRAS mit der stündlichen Auflösung des ERA5 sowie der Vielfalt an Variablen des ERA5 zu erzeugen. In einem ersten Schritt werden dabei die Parameter des ERA5 derart angepasst, dass der arithmetische Tagesmittelwert des jeweiligen Parameters mit dem des HYRAS übereinstimmt. Dies wird auf die Temperatur und Luftfeuchtigkeit angewandt. Für den Windvektor, den Luftdruck sowie die Strahlungsvariablen kann eine solche Korrektur nicht durchgeführt werden. Weitere Korrekturen im Sinne einer Bias-Korrektur oder eines dynamisch-statistischen Downscaling werden in diesem Projekt nicht durchgeführt. Um die Niederschlagsmenge sowie -form zu bestimmen, wird zunächst die dominierende Niederschlagsform aus dem HG-Produkt für eine 5×5 km Gitterzelle bestimmt. Aus dem Regenvolumen (RV)-Produkt werden dann die täglichen Mengen berechnet für eine solche Gitterzelle. Eine Korrektur mithilfe eines Faktors wird so durchgeführt, dass die Summe der 5-Minuten Mengen der Tagesmenge aus dem HYRAS-Datensatz entsprechen.

3.5. Zeitliches Downscaling

Für die in diesem Projekt angestrebten Modellierungen ist für die Modellberechnungen die Darstellung eines physikalisch realistischen Wertes für eine jeweilige Kenngröße zu einer bestimmten Zeit bis auf die Sekunde genau zu leisten: das Zeitinkrement ist mindestens 1 Sekunde beim thermischen Modell. Deshalb ist das Ziel für diesen Arbeitsschritt, eine Programmroutine zu erarbeiten, die es ermöglicht, die zeitliche Variabilität auf die stündlichen Mittelwerte anzuwenden. Dabei ergeben sich für die unterschiedlichen Klimavariablen unterschiedliche Wirkmechanismen, die sich entsprechend auf die Variabilität und damit die anzuwendende Interpolationsmethode auswirken. Im folgenden sollen die Methoden zur zeitlichen Interpolation der Klimakenngrößen beschrieben werden.

- Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Strahlungskenngrößen werden mit einer Spline-Approximation vierten Grades interpoliert. Es wird also ein Polynom der vierten Potenz für jeden Tag kalkuliert, das den Daten so angepasst wird, dass die Maximal-, Minimal- und Mittelwerte aus dem HYRAS-Datensatz erhalten werden und die stündlichen Werte aus dem ERA5-Datensatz die Schwankungsbreite vorgeben.

Die zeitliche Interpolation wird grundsätzlich nicht als Datensatz ausgegeben, da dies einen großen Aufwand in Bezug auf die Speicherung des Datenvolumens ergäbe. Anstelle

dessen werden die oben genannten Methoden in einer Anwendung hinterlegt, die auf die Daten eines Tages angewandt wird, welche jeweils in eine thermisch-mechanische Simulation eingebunden werden sollen.

3.6. Projektion in die Zukunft

Die Projektion von Klimadaten ist ein komplexer Prozess, der darauf abzielt, zukünftige klimatische Bedingungen auf der Grundlage historischer Daten und Klimamodelle zu antizipieren. Eine entscheidende Komponente dieses Prozesses ist die Verwendung historischer Basisperioden als Referenzpunkt. Für die hier beschriebene Methodik wird die Periode von 1991 bis 2020 als historische Basisperiode verwendet. Diese Wahl bietet eine aktuelle und relevante Datengrundlage, die die jüngsten klimatischen Veränderungen und Trends widerspiegelt.

Um diese Basisperiode in den hier verwendeten Klimaprojektionen aus dem EURO-Cordex Projekt abzubilden, ist es nötig, Datensätze aus historischen und projizierten Zeiträumen zusammenzusetzen, da die historischen Simulationen nur bis zum Ende des Jahres 2005 vorliegen und danach kommende Zeiträume schon von Projektionsläufen abgebildet werden. Dieses Vorgehen mag unorthodox sein, ist jedoch aufgrund der Tatsache, dass eine möglichst aktuelle Referenzperiode gewählt werden soll, in diesem Projekt nötig. Aussagen zu Veränderungen gegenüber sonst üblichen Referenzperioden wie 1971-2000 oder sogar 1961-1990 wäre in diesem Projekt nur schwer zu interpretieren, da bereits vorliegende Arbeiten 15-jährige Referenzperioden zwischen 2001 und 2015 nutzen. Zusätzlich ist die durch dieses Vorgehen hervorgerufene Unsicherheit bzw. Abweichung zwischen den einzelnen Klimaprojektionen sehr gering, da die Unterschiede der Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 im Zeitraum bis 2020 äußerst gering sind und diese Datensätze mithilfe der Referenzdaten mittels Quantilmapping korrigiert werden.

Ein zentrales Element der Methodik ist das sogenannte saisonale Quantilmapping. Dieser Ansatz konzentriert sich darauf, die Wahrscheinlichkeitsverteilungen – oder Häufigkeitsdichteverteilungen – für jede Klimavariablen für jeden Kalendermonat zu erstellen und zu analysieren. Für jede Variable werden diese Verteilungen sowohl für den historischen Zeitraum in jedem Klimamodell als auch für den Referenzdatensatz erstellt. Diese Verteilungen geben Aufschluss darüber, wie häufig bestimmte Werte (zum Beispiel Temperaturen oder Niederschlagsmengen) in einem bestimmten Monat auftreten.

Ein wichtiger Schritt in dieser Methodik ist die Entwicklung einer Transformationsfunktion. Diese Funktion dient dazu, die Unterschiede zwischen den Verteilungen des Klimamodells und des Referenzdatensatzes zu überbrücken. Effektiv beschreibt diese

Funktion die notwendige Bias-Korrektur, die angewendet werden muss, um die Daten aus den Klimamodellen an die real beobachteten Daten aus dem Referenzdatensatz anzupassen. Bias-Korrekturen sind notwendig, da Klimamodelle oft systematische Fehler aufweisen, welche zur Bewertung von Klimafolgen auf der Basis von Klimaänderungssignalen behoben werden. Durch die Anpassung an einen bekannten und validierten Datensatz können diese Abweichung minimiert und die Genauigkeit der Klimaprojektionen verbessert werden.

Nachdem die Bias-Korrektur definiert wurde, wird sie auf die zukünftigen Klimadaten aus den Modellen angewendet. Dieser Schritt ist entscheidend, da er es ermöglicht, die projizierten Daten direkt zu verwenden, anstatt sie lediglich als rohe oder unkorrigierte Modelldaten zu betrachten.

Die Verwendung des saisonalen Quantilmappings in Verbindung mit der Bias-Korrektur ermöglicht eine detaillierte Projektion der tatsächlichen klimatischen Bedingungen. Jede Klimavariablen, sei es Temperatur, Globalstrahlung, Niederschlag oder Windgeschwindigkeit, kann auf diese Weise analysiert und projiziert werden.

3.7. Herausforderungen der Klimadaten im Projekt

Die bisher verfügbare Datensätze können sinnvoll zur Erreichung des Projektziels eingesetzt werden. Dazu zählt der HYRAS-Datensatz ebenso wie die auf 5x5 km skalierten Klimaprojektionen des Kernensembles des DWD. Wichtige Herausforderungen sind das Fehlen einzelner Variablen im HYRAS-Datensatz, sowie die bezüglich des Zweckes relativ grobe räumliche und zeitliche Auflösung der Datensätze. Die folgenden Umstände wirken sich auf die Qualität der Datenanalyse in diesem Projekt aus:

- Fehlende Datensätze zur Globalstrahlung (zum Zeitpunkt Mitte 2022): Die Angaben zur Globalstrahlung sind aus dem ERA5-Datensatz ergänzt worden und konnten aufgrund des Projektumfanges nicht hinreichend validiert werden mit Daten von Wetterstationen. Die Globalstrahlung ist jedoch ein wichtiger Teil der Bewertung der klimatischen Bedingungen für die Dimensionierung insbesondere von Betonoberbauten. Daten zur Globalstrahlung liegen nun im HYRAS-Datensatz vor und können bei einer Aktualisierung auch aus diesem Bezogen werden.
- Fehlende Datensätze zum Bodendruck: Der Bodendruck wird zur Berechnung der Taupunkttemperatur und andere Feuchtemaße benötigt. Daten zum Bodendruck wurden ebenfalls aus dem ERA5-Datensatz herangezogen, welcher im Zuge dieses Projektes nicht durch Biaskorrekturen oder ähnliche Verfahren an Messwerte angleicht werden konnte. Der Einfluss des Bodendruckes auf die Schadenssumme

berechnet nach Augter und Kayser (2016) (KiST-Rate) von Asphaltoberbauten dürfte jedoch äußerst gering sein.

- Fehlende Datensätze zum bodennahen Windvektor: Auch wenn in diesem Projekt der Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die thermische Belastung von Straßenoberbauten nicht untersucht worden ist, ist dennoch anzumerken, dass Daten zum Windfeld im HYRAS-Datensatz fehlen.
- Grobe räumliche Auflösung: Die Auflösung von 5x5 km bei HYRAS und den Klimaprojektionen ist gut geeignet, um klimatische Tendenzen zu untersuchen. Jedoch ist eine kleinräumige Betrachtung der klimatischen Verhältnisse und somit eine aussagekräftige Bereitstellung von Bemessungskarten für eine zukünftige Dimensionierung von Straßenoberbauten mit diesen Daten nicht möglich.
- Grobe zeitliche Auflösung: Die Datensätze liegen auf der Zeitskala von einem Tag vor. Für das Finite-Volumen-Methode (FVM)-Modell ist eine mindestens stündliche Auflösung nötig, weshalb für die Referenzperiode 1991-2020 Temperatur und Solarstrahlung aus den stündlichen Daten des ERA5-Datensatzes abgeschätzt wurden. Für zukünftige Zeiträume wurden charakteristische Tagesgänge bestimmt. Das Fehlen stündlicher Daten führt zu einer gewissen Unsicherheit, insbesondere dadurch, dass bei anhaltendem Klimawandel an Strahlungstage größere Tagesgänge der Temperatur auftreten dürften, welche sich wiederum auf die Temperaturverhältnisse in Straßenoberbauten auswirken dürften.

Aufgrund der beobachteten Herausforderungen sowie weiterer Bedingungen wurden Empfehlungen bzw. Anforderungen formuliert, die auf eine bemessungsgerechte Modellierung zukünftiger thermischer Belastungen abzielt. Die Anforderungen haben den Charakter von Empfehlungen, die sich auch positiv auf andere Handlungsfelder innerhalb und außerhalb des BMDV-Expertenetzwerkes auswirken können.

- Erweiterung des HYRAS-Datensatzes. Insbesondere die bodennahen Klimavariablen wie Solarstrahlung, Luftdruck und Windvektor sind für vielerlei Anwendungen im Bereich der Klimaanpassung und Wirkmodellierung von großer Bedeutung. Eine Erweiterung des HYRAS-Datensatzes um weitere, noch fehlende, Variablen ist deshalb wichtig für die Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels auf Straßenoberbauten und deren Dimensionierung. Der Mehrwert der Erweiterung liegt in der Tatsache, dass so ein konsistenter Datensatz von gesicherter Qualität geschaffen werden kann, der für die Bemessung der Dimensionierung von Straßenoberbauten und natürlich anderen Anwendungen genutzt werden kann, ohne dass zusätzliche, nicht mit HYRAS konsistenten, Datenquellen herangezogen werden müssen.

- Bewertung der Konsistenz von ERA5-Daten. Möglicherweise ist ein wichtiger Zwischenschritt oder eine Ersatzleistung die Bewertung der Konsistenz und der Qualität des ERA5-Datensatzes, insbesondere der Variablen, die nicht im HYRAS-Datensatz enthalten sind. Eine solche Bewertung kann für die Nutzung in Wirkmodellen, wie etwa den gekoppelten thermisch-mechanischen numerischen Modelle bei der Dimensionierung von Straßenoberbauten, eine gesicherte methodische Grundlage schaffen. Dazu ist es nötig, bisher bestehende Rasterdaten sowie Datensätze aus Wetterstationen mit ERA5-Daten zu vergleichen und zu evaluieren.
- Erhöhung der zeitlichen Auflösung. Für die Anwendung bei der Simulation von Temperaturverhältnissen in Straßenoberbauten ist eine stündliche Auflösung der Eingangsdaten hilfreich. Dies bezieht sich sowohl auf Reanalysedaten wie HYRAS als auch auf Projektionsdaten, wie dem Kernensemble des DWD.

Da die Bewertung der Klimarandbedingungen für die Dimensionierung in einer vorausschauende Betrachtungsweise umgewandelt werden sollte, ist es auch wichtig, dass Klimaprojektionsdaten für die nächsten 15 bis 30 Jahre vorliegen oder auch Klimavorhersagen, die bis zu 15 Jahre in die Zukunft reichen. Solche Klimavorhersagedaten für die nächsten 15 Jahre müssen dann höheren Anforderungen genügen und ein höheres Vertrauensniveau als bisher vorhandene Klimaprojektionsdaten. Eine Einbindung der interannualen und dekadischen Klimavariabilität in die Projektion von Klimadaten in die nahe Zukunft relativ zu einem Beobachtungszeitpunkt ist ein Unterfangen, das bisher noch als große Herausforderung gesehen wird. Das Forschungsprojekt MiKlip¹ hat hierfür schon erste Ansätze produziert. Außerdem bietet der DWD auch Modellsysteme für die Klimavorhersagen² an. Eine gezielte Anwendung der regionalen Klimavorhersagen auf die nahe Zukunft zur systematischen Erstellung einer zu erwartenden oder auch maximal zu erwartenden Klimaänderung könnte einen großen Beitrag zur Umstellung der Dimensionierung auf vorausschauende Klimadaten leisten. Sinnvollerweise kann so durch das BMDV-Expertenetzwerk zum Beispiel jedes Jahr ein Datensatz bereitgestellt werden, der die Entwicklung des Klimas der nächsten zwei bis drei Jahrzehnte wiedergibt. Mit derartigen Datendiensten könnte die Wirkmodellierung, wie die Berechnung von KiST-Karten, auf zukünftige Klimadaten umgestellt werden. Zur Ermöglichung der Bewertung von naturgemäß vorhandenen Unsicherheiten sollte dazu ein Ensemble an solchen Daten bereitgestellt werden, das jedoch möglichst klein gehalten werden sollte (z.B. drei Szenarien).

Weitere Möglichkeiten zur Optimierung des Datenbestandes bestehen in der Bereitstellung von direkt nutzbaren Klimadaten über eine Application Programming Interface (API). Eine solche Lösung würde die Verknüpfung von Klimadaten mit Anwendungen auf Softwareebene deutlich vereinfachen. Dies könnte die Operationalisierung für die

¹Siehe <https://www.fona-miklip.de/1/index.html> [03.07.2024]

²Siehe https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimavhs/klimavhs_node.html [03.07.2024]

Erstellung und Aktualisierung von KiST-Karten und anderen Datensätzen deutlich beschleunigen und den Ressourcenaufwand verringern. Mit einer API könnten dann auch Daten aus der KiST-Karten direkt in Dimensionierungsverfahren durch Nutzerinnen und Nutzer eingelesen werden.

Kapitel 4.

Erstellung des deterministischen Modells

Das deterministische Modell beschreibt die physikalischen Zusammenhänge in der Straße auf eine klassische ingenieurmäßige Art und Weise. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Transparenz und zukünftige Erweiterbarkeit mit neuen Erkenntnissen gelegt. Getroffene Annahmen werden auf ein Minimum begrenzt.

Das Modell berechnet für einen festgelegten Zustand aus folgender Liste die zugehörigen Spannungen bzw. Dehnungen.

- Ort
- Zeitpunkt
- Meteorologischen Zustandsgrößen
- Konstruktionsdaten inklusive Deckendicke
- Radlast

Dies funktioniert sowohl für die Asphalt- als auch Betonweise. Die Klima- und Konstruktionsdaten werden zur Programm-Laufzeit nicht als Parameter übergeben, sondern die einzelnen Modelle fragen die benötigten Informationen aktiv ab.

4.1. Erstellung des thermischen Straßenmodells

Das thermische Modell wird auf Basis von Open Source Field Operation and Manipulation (OpenFOAM) mit dem „laplacianFOAM“-Solver realisiert. ^{1 2 3} Dieser löst

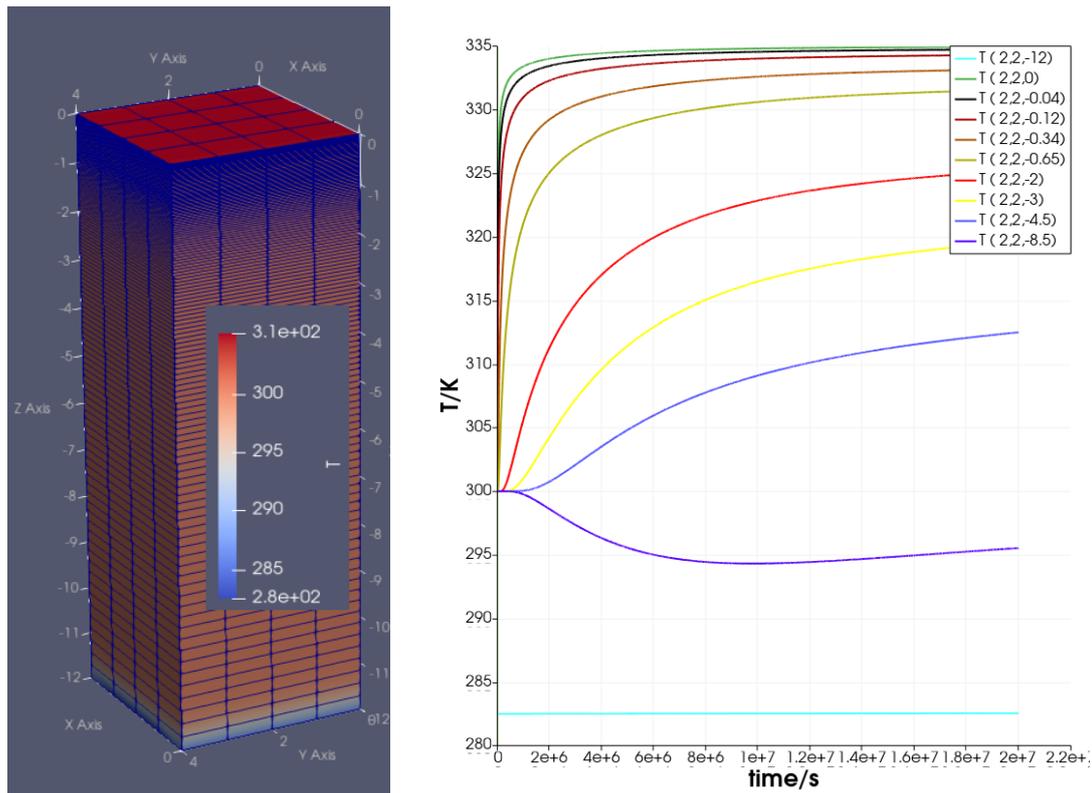
¹<https://cfd.direct/openfoam/user-guide/v7-standard-solvers/> [03.07.2024]

²<https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/> [03.07.2024]

³<https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-basic-laplacianFoam.html> [03.07.2024]

nur die transiente Laplace-Gleichung für den Wärmeübergang und wird nur innerhalb der Straße und dem darunterliegenden Boden bis zur Randbedingung in 12 m Tiefe berechnet.

In Abbildung 4.1a ist der Aufbau und die Temperaturverteilung einer exemplarischen Berechnung dargestellt. Das numerische Netz besteht aus von 'Blockmesh' erstellten Hexaedern mit einer feineren Auflösung an der Oberfläche, sodass die stationären numerischen Fehler klein sein sollten. Die Überprüfung kann allerdings erst erfolgen, sobald alle Modelle miteinander verknüpft sind und ein Postprocessing für die relevanten Werte vorhanden ist.



(a) Temperaturverteilung am Ende der Simulation

(b) Temperaturzeitverläufe des thermischen Modells automatisch ausgewertet mit Paraview

Abbildung 4.1.: Die Ergebnisse des thermischen Modells

Neben den thermophysikalischen Materialeigenschaften beeinflussen nur die obere und untere Randbedingungen die Physik. Die untere Randbedingung ist mit ihrer nahezu konstanten Temperatur relativ einfach zu modellieren (Quellcode 4.1), wobei sich die

Implementierung der Zeit (t) mit der Integration von Dakota im späteren Verlauf des Projekts noch ändern wird (siehe Abschnitt 2.1.3).

Quellcode 4.1: Untere Randbedingung des thermischen Modells.

```

1  this->valueFraction() = 1;
2  this->refValue() = (273 +9.5)+(0.08*t)/(3600*24*365);
3      // 9,5 degC in 12 m
4      // ab 1985 etwa 0,08 K/Jahr

```

Die obere Randbedingung umfasst die bereits in der Literaturrecherche diskutierte Physik und hat auf die Ergebnisse den größeren Einfluss (siehe Abschnitt 2.1.2). Die technische Schwierigkeit an dieser Stelle besteht darin, die Oberflächentemperatur (TFO) der Straße innerhalb der Randbedingung als Variable zu verwenden (Quellcode 4.2). Dafür wird die TFO aus den gespeicherten Werten aus dem vorherigen Zeitschritt ausgelesen.

Quellcode 4.2: Zugriff auf TFO

```

1  // get T_average_top_bc
2  const volScalarField& T_scalar_volume_field = this->db().
      objectRegistry::lookupObject<volScalarField>("T");
3  const fvMesh& mesh = patch().boundaryMesh().mesh();
4  label my_top_boundary_patch = mesh.boundaryMesh().
      findPatchID("top");
5  const scalarField& T_top_scalar_field =
      T_scalar_volume_field.boundaryField()[
      my_top_boundary_patch];
6  const scalar T_average_top_bc = gAverage(
      T_top_scalar_field);
7  Info << "Temperature_average_on_bc:_" << T_average_top_bc
      << endl;

```

Die Implementierung der APIs zu den zeitaufgelösten Wetterdaten wird in Abschnitt 5.1 durchgeführt. Daher sind hier aktuell nur abgeschätzte Werte für die solare und atmosphärische Einstrahlung und der Windgeschwindigkeit verwendet worden. Für die Konvektion und Oberflächenabstahlung sind die Modelle nach Chen u. a. (2019) implementiert worden. Die Konvektion ist dabei ein Vehrenkamp Modell. (siehe Quellcode 4.3)

Quellcode 4.3: Natural convection calculation

```

1  // calculate natural convection bc
2  const scalar htc_natural_convection =

```

```

3      698.24 *1
4      *(0.00144 *pow((T_average_top_bc + temperature_air) /2,
5          0.3) *pow(u_wind, 0.7)
6      + 0.00097 *(T_average_top_bc - temperature_air) );
7          // Vehrenkamp model from ChenWang2019
8      const scalar q_natural_convection = htc_natural_convection
9          *( temperature_air - T_average_top_bc );

```

Mit OpenFOAM wird der größte OpenSource-CFD-Code verwendet, sodass von einer Richtigkeit der Implementierung ausgegangen werden kann und nur das richtige Verhalten der Randbedingungen verifiziert werden muss.

Die transienten Temperaturverläufe aus Abbildung 4.1b werden dazu verwendet die Konvergenz und Stationarität der Lösung von OpenFOAM zu bewerten. Bemerkenswert ist, dass es eine Transiente von über einem halbem Jahr benötigt um einen komplett stationären Zustand zu erhalten und die Straße auch in 8,5 m durchzuwärmen. Dies ist aber auch erwartbar, da die Bodentemperatur in 12 m Tiefe nahezu konstant bleibt.

4.2. Erstellung des strukturmechanischen Straßenmodells

Die mechanischen Modelle übernehmen Temperaturverläufe über die Tiefe (z-Richtung) und berechnen die Anzahl zulässiger Überrollungen, N_{zul} , siehe Abbildung 4.2.

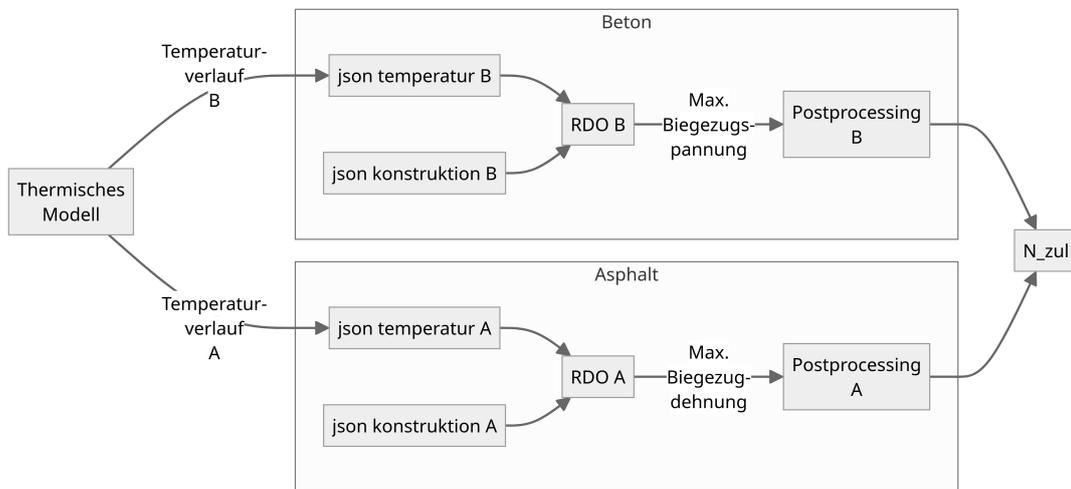


Abbildung 4.2.: Ablaufplan des mechanischen Modells.

Für die rechnerische Dimensionierung gemäß RDO Asphalt (2009) und RDO Beton (2009) stehen Werkzeuge zur Verfügung, die nur leichte Adaptionen benötigen um mit beliebigen Temperaturprofilen umgehen zu können.

4.2.1. Ein- und Ausgabedaten

Mit den wie in Abschnitt 4.1 beschrieben errechneten Temperaturprofilen und den Referenzaufbauten stehen die meisten benötigten Eingangsdaten zur Verfügung. Es verbleibt strukturmechanische Materialparameter sowie Randbedingungen zu wählen, welche sich an den zugrundeliegenden Regelwerken orientieren. Die Materialparameter werden in den kommenden Abschnitten beschrieben. Bezüglich der Kraft-Randbedingung wird eine vereinheitlichte Vorgehensweise angewendet. Die Normradlast der RDO Beton (2009), $F_n = 50 \text{ kN}$ entspricht (unter Vernachlässigung, dass die Erdbeschleunigung nicht 10 m/s^2 entspricht) der Achslastklasse (ALK) 5 der RDO Asphalt (2009). Aufgrund der Kompatibilität zur RDO Beton (2009) wird die 10 t-Achse (ALK5) gewählt.

Die Aufgabedaten sind in beiden betrachteten Fällen die Anzahl zulässiger Achsübergänge, N_{zul} , berechnet aus dem Ermüdungsnachweis.

4.2.2. Dimensionierung nach RDO Asphalt (2009)

Gemäß den RDO Asphalt (2009) können derzeit mit dem vorgeschriebenen Verfahren der Mehrschichtentheorie bereits beliebige Temperaturverläufe berücksichtigt werden. Es ist lediglich notwendig die errechneten Temperaturverläufe dem Code zur Verfügung zu stellen. Der im Rahmen von FE04.0303 erstellte Matlab-Code wurde in die freie Programmiersprache Octave transkribiert, damit dieser in einem Docker-Container lauffähig ist. Anhand der in RDO Asphalt (2009, Tabelle A 7.4) angegebenen Dehnungen für das Dimensionierungsbeispiel 1, wurde der Code verifiziert.

Zeile	Belastungsklasse	Bk100	Bk32	Bk10	Bk3,2	Bk1,8	Bk1,0	Bk0,3	
	B [Mio.]	> 32	> 10 - 32	> 3,2 - 10	> 1,8 - 3,2	> 1,0 - 1,8	> 0,3 - 1,0	≤ 0,3	
	Dicke des frostsich. Oberbaus ³¹⁾	55 65 75 85	55 65 75 85	55 65 75 85	45 55 65 75	45 55 65 75	45 55 65 75	35 45 55 65	
1	Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht								
	Asphaltdecke	12	12	12	10	4	4	4	
	Asphalttragschicht	22	18	14	12	16	14	10	
	Frostschutzschicht	34	30	26	22	20	18	14	
	Dicke der Frostschutzschicht	- 31 ³⁾ 41 51	25 ³⁾ 35 45 55	29 ³⁾ 39 49 59	- 33 ³⁾ 43 53	25 ³⁾ 35 45 55	27 37 47 57	21 31 41 51	

Abbildung 4.3.: Tafel 1, Zeile 1 der RStO (2012).

Augter und Kayser (2016) verwenden einen Asphaltaufbau gemäß Tafel 1, Zeile 1, Bk32 der RStO2012, siehe Abbildung 4.3. Aufgrund der Kompatibilität zur Betonbauweise wird hier die Bk100 gewählt.

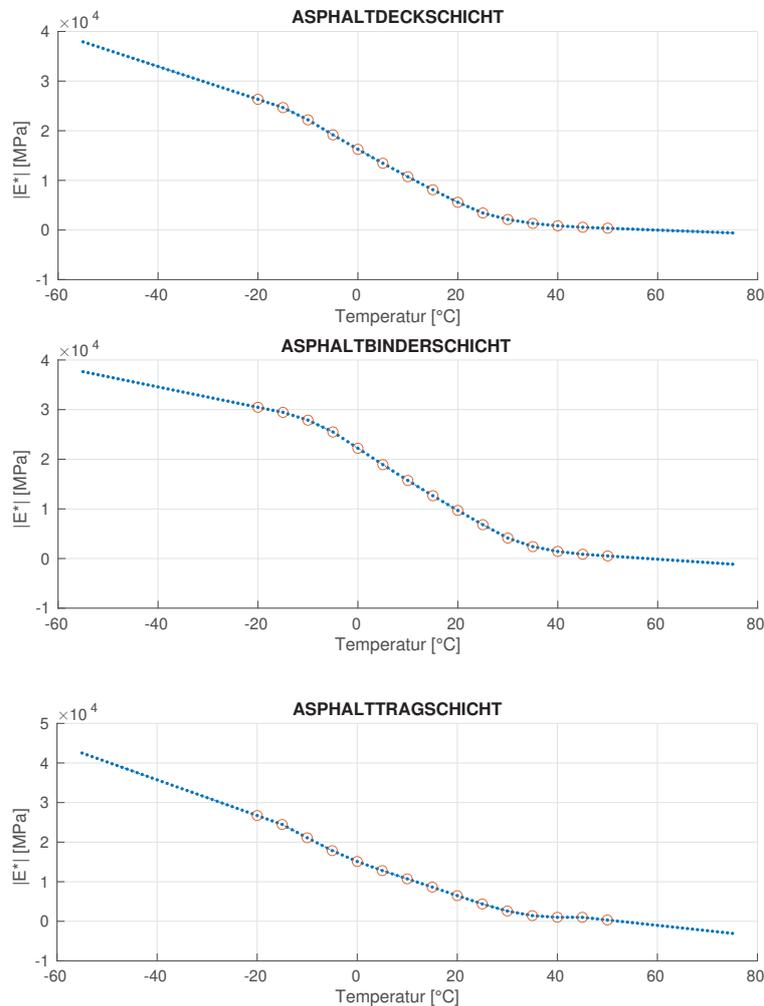


Abbildung 4.4.: Steifigkeits-Temperaturverläufe der Kalibrierasphalte aus den RDO Asphalt (2009).

Als Materialien werden die Kalibrierasphalte verwendet. Die Steifigkeits-Temperaturverläufe werden linear extrapoliert, siehe Abbildung 4.4. Problematisch ist hierbei, dass bei hohen Temperaturen die Extrapolation zu negativen Steifigkeiten führen kann, was zu einer Fehlermeldung des Codes führt. Dies wird mit der Überarbeitung der RDO

Asphalt durch die Beschreibung der Kalibrierasphalte mittels Regressionsfunktionen zukünftig ausgeschlossen.

Insbesondere werden die Parameter der Ermüdungsfunktion für den Kalibrierasphalt der Asphalttragschicht (ATS) verwendet. Diese lauten gemäß RDO Asphalt (2009, Gl. A6-16)

$$a = 2.8283 \quad (4.1)$$

$$k = -4,194 . \quad (4.2)$$

Die Mehrschichtentheorie berechnet die planare Dehnung im Nachweispunkt, ϵ . Üblicherweise befindet sich dieser an der Unterkante der ATS. Mit ϵ kann die zulässige Lastwechselzahl (Anzahl an Achsübergängen) für den gerade herrschenden Temperaturverlauf im Straßenkörper, $N_{zul,\Theta}$, berechnet werden

$$N_{zul,\Theta,ALK5} = \frac{SF}{F} a \epsilon_{\Theta,ALK5}^k \quad (4.3)$$

mit dem Shiftfaktor $SF = 1500$ und dem bauweisenabhängigen Sicherheitsbeiwert F gemäß RDO Asphalt (2009, Tab. 8.2).

4.2.3. Dimensionierung nach RDO Beton (2009)

Gemäß RDO Beton (2009) und derzeit Entwurfsfassungen können aktuell keine beliebigen Temperaturverläufe berücksichtigt werden.

Im ARS StB 18/2020 wird eine Referenzbauweise zwischen den RDO Beton (2009) und den verschiedenen Oberbauvarianten der RStO (2012, Tafel 2) festgelegt. Dazu wird die höchst mögliche B-Zahl der Belastungsklasse Bk100 mit 100 Mio. zu Grunde gelegt. Als Referenzbauweise ist die „Betondecke auf Schottertragschicht (STSuB)“ festgelegt. Diese Bauweise gilt somit als Referenzbauweise zwischen den RDO Beton 09 und den RStO 12 und der verschiedenen Oberbauvarianten der Tafel 2 der RStO 12.

Liegen gemäß RDO Beton eine B-Zahl von $100 \cdot 10^6$ bei einer Plattenbreite von 4,15 m und einer Plattenlänge von 5 m im Hauptfahrstreifen sowie einer charakteristischen Spaltzugfestigkeit von 3,3 MPa (entspricht Straßenbetonklasse StC 30/37-3,3) zugrunde, führt dies im Ergebnis zu einer erforderlichen charakteristischen Deckendicke beim 10 %-Quantil von 29 cm.

Nach RDO Beton (2009, Tabelle A4.2) beträgt für einen StC 30/37-3,3 $E_c = 39$ GPa. Die Wärmedehnzahl beträgt nach Tabelle A4.1 $\alpha_{cT} = 11 \cdot 10^{-6}/K$ bis $13 \cdot 10^{-6}/K$. Die Querdehnzahl beträgt nach Gleichung 4-4 $\nu = 0,2$.

Zeile	Belastungsklasse	Bk100				Bk32				Bk10				Bk3,2				Bk1,8				Bk1,0				Bk0,3			
	B [Mio.]	> 32				> 10 - 32				> 3,2 - 10				> 1,8 - 3,2				> 1,0 - 1,8				> 0,3 - 1,0				≤ 0,3			
	Dicke des frostsich. Oberbaus ¹⁾	55	65	75	85	55	65	75	85	55	65	75	85	45	55	65	75	45	55	65	75	45	55	65	75	35	45	55	65
3.2	Schottertragschicht auf Frostschuttschicht																												
	Betondecke																												
	Schottertragschicht	20				20				20				20				20											
	Frostschuttschicht	49				48				47				46				44											
	Dicke der Frostschuttschicht	-	-	26 ¹⁾	36	-	-	27 ¹⁾	37	-	-	28 ¹⁾	38	-	-	19 ¹⁾	29	-	-	21 ¹⁾	31								

Abbildung 4.5.: Betondecke auf STS auf FSS gemäß RStO (2012, Tafel 2, Zeile 3.2).

Die Belastung aus Verkehr ist temperaturinvariant und wird nach Gleichung 2.12 ermittelt. Die Belastung aus Temperatur ermittelt sich aus dem Elastizitätsgesetz des Stabes für beliebige vertikale Temperaturprofile nach Gleichung 2.19. Die in Abschnitt 2.2.3 aufgeführten Anpassungsfaktoren werden anschließend wieder dazu multipliziert. Dieses Verfahren ist notwendig, da ansonsten nicht klar ist, wie mit γ_{tot} umgegangen werden soll.

Die RDO Beton (2009) berechnet die Anzahl zulässiger Lastwechsel nicht direkt. Das Verfahren kann allerdings problemlos dahin umgestellt werden. Dies wird im Folgenden beschrieben.

Berechnung zulässiger Achsübergänge gemäß den RDO Beton

Die Nachweisführung der RDO Beton erfolgt, in dem die Deckendicke in einem iterativen Prozess solange erhöht wird, bis die Summe der einwirkenden Momente aus Verkehrs- und Temperaturbelastung das aufnehmbare Moment gerade nicht übersteigt. Der Grenzzustand ist der Zeitpunkt, bei dem die Summe der einwirkenden Momente/Spannungen und das aufnehmbare Moment/Spannung gleich sind: $f_d = \sigma_{\Theta} + \sigma_V$. Beim RDO Beton Verfahren wird die zulässige Lastwechselzahl durch die Berechnung der B_n vorgegeben. Damit wird die erforderliche Plattendicke berechnet.

Anders als das Verfahren in den RDO Beton wird in diesem Projekt die zulässige Lastwechselzahl erzielt. Die Plattendicke, die Materialparameter und der mechanisch äquivalente Temperaturgradient werden aus der Referenzbauweise vordefiniert. Die B_n bzw. N_{zul} werden als Ausgabedaten berechnet.

In der Regel ist der Lastfall „Ermüdung, Querrfuge“ maßgebend für die Wahl der Deckendicke, daher wird dieser im Folgenden verwendet. Die Berechnungsfestigkeit

berechnet sich in diesem Fall für Bundesautobahnen gemäß Gleichung 4.4

$$f_d = m_b \times f_d^0 = \frac{f_d^0}{\gamma_{c,fat}} , \quad (4.4)$$

mit dem Ermüdungsfaktor gemäß RDO Beton Entwurfsfassung (2018, Gl. 7-5 und 7-6)

$$\gamma_{c,fat} = 0.15 \log_{10}(\gamma_q B_n) + 0.6526 . \quad (4.5)$$

γ_q ist hierbei der Querverteilungsfaktor, welcher nach RDO Beton Entwurfsfassung (2018, Tab. 7-2) für den Nachweis an der Querruge deutlich höher ist als an der Längsfuge; der Nachweis für die Querruge ist unter anderem deshalb meist der kritische, siehe Abbildung 4.6.

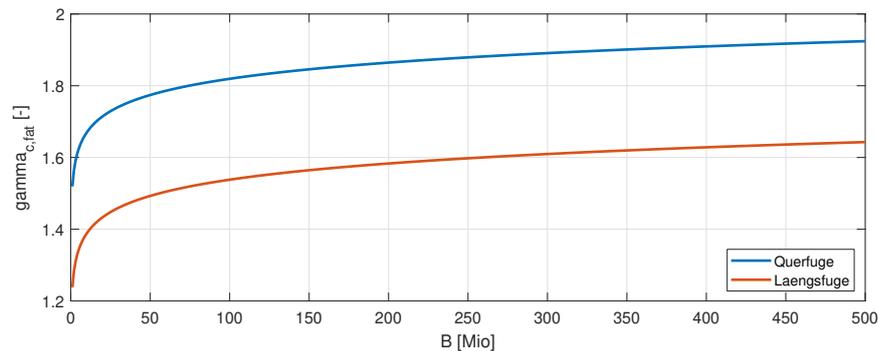


Abbildung 4.6.: Die Ermüdungsfunktion der RDO Beton: die Entwicklung von $\gamma_{c,fat}$ mit B_n .

Mit Hilfe von Gleichung 4.4 kann Gleichung 2.8 zum Zeitpunkt des Eintretens des GZT „Ermüdung“ umgestellt werden zu

$$\frac{f_d^0}{\sigma_{\Theta} + \sigma_V} = \gamma_{c,fat} . \quad (4.6)$$

Die Ermüdungsfunktion kann nach B_n aufgelöst werden

$$B_n = \frac{1}{\gamma_q} 10^{\left(\frac{\gamma_{c,fat} - 0.6526}{0.15}\right)} . \quad (4.7)$$

Mit Hilfe von Gleichung 4.6 erhält man eine explizite Abhängigkeit für B_n von den Spannungen aus Verkehrs- und Temperaturlast.

Der Zusammenhang zwischen B_n und N_{zul} wird dabei über den Lastkollektivquotienten $q_{B,b}$ nach RDO Beton Entwurfsfassung (2018, Tab. 7-1) hergestellt

$$N_{zul} = \frac{B_n}{q_{B,b}} . \quad (4.8)$$

4.3. Kopplung der deterministischen Modelle

Das Ziel der Kopplung der deterministischen Modelle besteht darin, die N_{zul} für die Asphalt- und Betonbauweise direkt anhand der Wetterdaten zu berechnen. Die N_{zul} wird dann für die Erstellung der KiST-Karten verwendet. Bei der Proberechnung für die Kopplung in Anhang C stellte sich jedoch heraus, dass die N_{zul} für die KiST-Karten nicht zielführend ist, da die Ergebnisse der N_{zul} für die Betonbauweise sprunghaft sind. Es werden lediglich zwei Extremwerte für die Betonbauweise berechnet. Daher konnte keine KiST-Karte für die Betonbauweise erstellt werden. Das Ziel der Kopplung der Modelle wurde somit nicht erreicht. Aus diesem Grund wird die N_{zul} bei der Erstellung der KiST-Karten nicht verwendet.

Dies liegt daran, dass das Dimensionierungsverfahren der Betonbauweise in den RDO Beton (2009) nicht direkt die N_{zul} berechnet, sondern die Plattendicke. Die Änderung der N_{zul} wird anschließend durch die erforderliche Plattendicke umgerechnet (Gleichung 4.8). Bei der Umrechnung wird die Formel von Eisenmann verwendet. Aufgrund der in den RDO Beton 2009 eingeführten kritischen Plattenlänge werden nur zwei Extremwerte der N_{zul} (bei höherer und tieferer Temperatur) berechnet. Daher bildet sich keine in KiST-Karten geteilte Zone (KiST-Karte) für die Betonbauweise.

Als Alternative für die Erstellung der KiST-Karten in Kapitel 6 werden die MAEG und TFO bzw. ncT verwendet. Diese Größen sind nur von den Wetterdaten abhängig und können mit dem thermischen Modell berechnet werden. Eine Kopplung mit den mechanischen Modellen ist nicht notwendig. In der Zukunft sollte die N_{zul} direkt nach der Berechnung des mechanischen Modells berechnet werden, wenn das Dimensionierungsverfahren optimiert wird. Aus Gründen der Vollständigkeit wird die Kopplung der Modelle jedoch nicht entfernt, sondern in Anhang C dargestellt. Die weiteren Anpassungen des Modells werden in Abschnitt 5.4 beschrieben.

Kapitel 5.

Implementierung der Stochastik und Deployment in die Cloud

Mit der Erstellung des deterministischen Modells können für beliebige Orte und Zeitpunkte die Temperaturverteilung und Spannungszustände innerhalb der Straße berechnet werden. Über das Monte-Carlo-Verfahren werden im Folgenden für zufällige Punkte innerhalb Deutschland aus der vergangenen Referenzperiode die Temperaturzustände bestimmt und im Anschluss mit dem mechanischen Modell ausgewertet. Hierfür müssen a priori keine zusätzlichen Annahmen zur Deterministik getroffen werden. Die Genauigkeit ergibt sich aus der Anzahl der Berechnungen („Sample“ in dem in Abschnitt 5.1 beschriebenen Dakota). Über die Daten des Samples können die notwendigen Informationen zur Erstellung der KiST-Karten für den vergangenen Referenzzeitraum (Abschnitt 6.2) und die Zukunft (Abschnitt 6.3) extrahiert werden.

5.1. Inbetriebnahme von Dakota

Dakota ist ein mehrstufiges, paralleles, objektorientiertes Framework für Designoptimierung, Parameterschätzung, Unsicherheitsquantifizierung sowie eine Sensitivitätsanalyse¹. Das Monte-Carlo-Verfahren wird vom Programm Dakota durchgeführt, wobei das deterministische Modell auf Dateisystemebene angesteuert wird. Auch die zurückgebenden Ergebnisse aus den deterministischen Berechnungen werden auf Dateisystemebene übergeben. Für diese Steuerungen sind die Schnittstellen zu schreiben und die Auswertung zu automatisieren.

Ein Beispiel der Eingabedatei wird in Quellcode E.4 dargestellt. Die Definition der Eingabedaten und die Durchführung der Berechnungen werden als Anleitung in Anhang E beschrieben.

¹<https://dakota.sandia.gov/get-started>

5.2. Lokale Plausibilitätsanalyse

Die erste Anwendung für Dakota stellte eine Sensitivitätsanalyse für wenige örtliche Punkte dar. Diese kann lokal durchgeführt und ausgewertet werden. Als Ergebnis soll hier der Zusammenhang zwischen thermischen Eingangsdaten und der Lastwechselzahl untersucht werden. Besonders wichtig ist es, hier Erfahrungen zu sammeln und Bugs zu entfernen, um bei den späteren rechenintensivierten Untersuchungen in der Cloud möglichst Fehlerfrei zu sein.

Je nach Aufbau des Modells werden verschiedene Teile des Modells überprüft, einschließlich der eingegebenen Wetterdaten, des thermischen Modells, des mechanischen Modells und der Ausgabe des gesamten Modells.

5.2.1. DWD Daten

In den Vorgängerprojekten (FE 89.0305/2015 (Asphalt), FE 08.0254/2017/KRB (Beton)) werden die Wetterdaten von verschiedenen Stationen in Deutschland bezogen. Diese Daten werden zunächst in das Modell implementiert und anschließend werden die Ergebnisse des Modells in eine 5 km × 5 km Karte interpoliert. Dieses Verfahren setzt voraus, dass die Wetterdaten und die Modellergebnisse linear voneinander abhängig sind.

In diesem Projekt werden die Wetterdaten jedoch zunächst vorverarbeitet, in dem der ERA5-Datensatz und der HYRAS-Datensatz zusammengeführt werden. Dieser Prozess wird bereits in Kapitel 3 diskutiert. In diesem Abschnitt werden die vorverarbeiteten Daten eines Zufallspunktes (Quellcode 5.1) überprüft. Die Lufttemperatur, die Sonneneinstrahlung und die Windgeschwindigkeit werden jeweils in Abbildung 5.1, Abbildung 5.3 und Abbildung 5.4 dargestellt. Die Daten stammen aus dem in Kapitel 3 beschriebenen Datensatz. Die geographische Position und der Zeitpunkt werden zufällig gewählt, die durch die Daten bestimmt werden:

Quellcode 5.1: Eingabe des zufällig ausgewählte Punktes

```
1 params_3_d = {  
2     'time':dwd_random_hour ,  
3     'longitude':7.478178759 ,  
4     'latitude':50.74903069 ,  
5 }
```

Zunächst wird die Lufttemperatur, die hauptsächlich für die langwellige Strahlung verantwortlich ist, überprüft. Wie in Abbildung 5.1 gezeigt, hat die tägliche Änderung

der Lufttemperatur den Maximalwert um etwa 16:00 Uhr und den Minimalwert um etwa 4:00 Uhr.

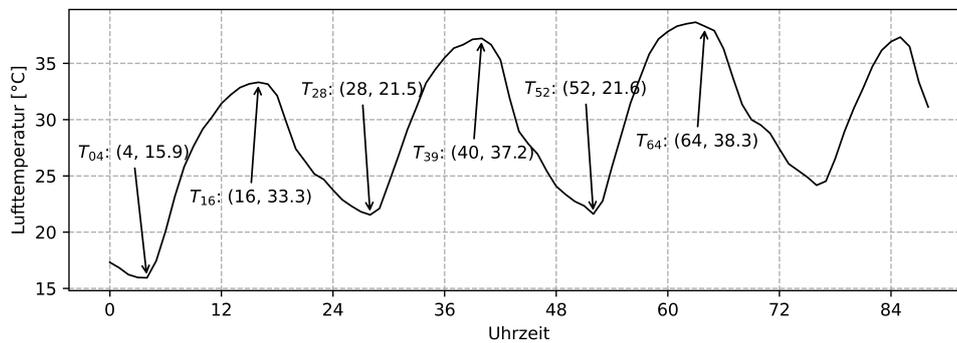


Abbildung 5.1.: Temperaturtagesgang aus dem in Kapitel 3 beschriebenen Datensatz.

An den beobachteten Tagen zeigt sich ein ansteigender Trend der Tagestemperatur. Dieses Beispiel stammt aus dem Monat Juli, dem wärmsten Monat des Jahres, so dass es nicht überraschend ist, dass die Lufttemperatur so hoch ist. Das Temperaturprofil könnte aus dem Innenstadtbereich stammen. Aufgrund des Wärmeinseleffektes überrascht es nicht, dass die Lufttemperatur erhöht ist. Im Vergleich zu einer Temperatur, die im ländlichen Bereich in Abbildung 5.2 gemessen wurde, ist diese Temperaturprobe deutlich höher.

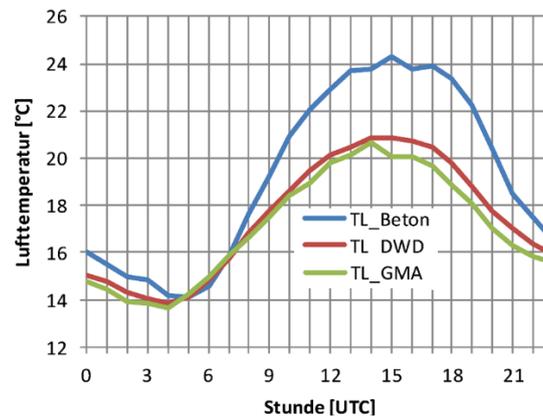


Abbildung 5.2.: Quelle: Villaret u. a. (2019b, Bild 6.3). Mittlere Tagesgänge der Lufttemperatur, Juli 2017; blau: gemessen über Beton (Fa. Villaret, Autobahnkreuz Vulkaneifel), rot: gemessen über Gras (DWD-Station Büchel), grün: gemessen neben der Autobahn (GMA Kelberg an der A1)

Aus Abbildung 5.2 wird ersichtlich, dass die Lufttemperatur über verschiedenen Medien

unterschiedliche Werte hat. Daraus folgt, dass die Temperatur von einigen Stationen angepasst werden muss, um in die Dimensionierung einbezogen werden zu können.

Der nächste thermische Faktor ist die Sonneneinstrahlung, hierbei handelt es sich um die Quelle des kurzwelligen Strahlungswärmeeintrags. Aus Abbildung 5.3 wird deutlich, dass sich der Tag-Nacht-Rhythmus der Sonnenstrahlung nicht so stark von Tag zu Tag ändert wie die Lufttemperatur. Im Vergleich zur Sonneneinstrahlung (Abbildung 5.3), die das Maximum um 12:00 Uhr und den Nullwert um 0:00 Uhr hat, weist die Lufttemperatur in Abbildung 5.2 eine deutliche Verzögerung auf.

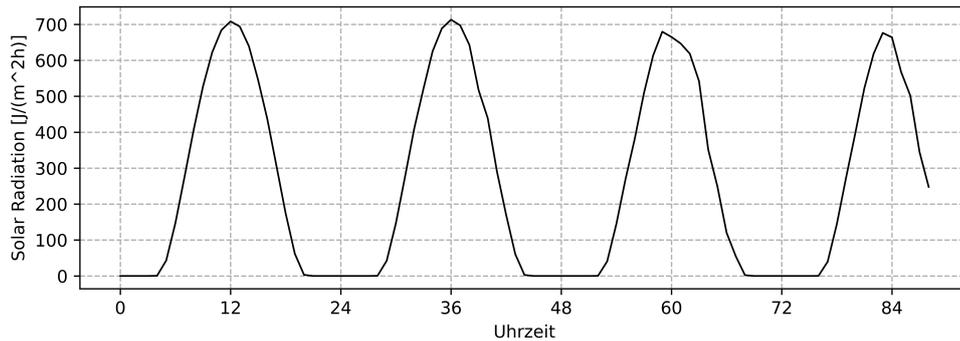


Abbildung 5.3.: Sonneneinstrahlung aus dem in Kapitel 3 beschriebenen Datensatz.

Als Nächstes wird die durch die Windgeschwindigkeit induzierte Konvektion von Wärme geprüft. In Bezug auf den natürlichen Wind, wie in Abbildung 5.4 gezeigt, unterliegt die Windgeschwindigkeit starken stündlichen Schwankungen. Eine Abhängigkeit von der Zeit ist nicht zu beobachten.

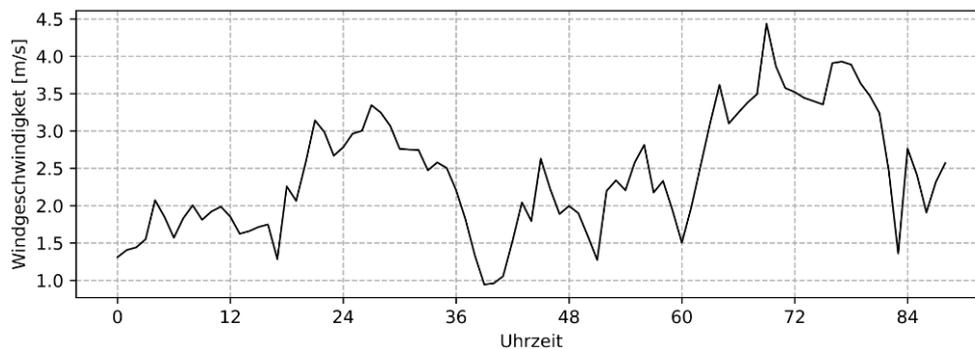


Abbildung 5.4.: Natürliche Windgeschwindigkeit aus dem in Kapitel 3 beschriebenen Datensatz

5.2.2. Thermisches Modell

Nach der Überprüfung der Wetterdaten werden diese als Randbedingung für das thermische Modell verwendet. Im thermischen Modell werden die Eingabedaten, das Modell selbst und die Ausgaben überprüft.

Die Wahl der thermischen Parameter

Für die Verifizierung des thermischen Modells werden in diesem Projekt die in Quellcode 5.2 dargestellte Materialparameter für Asphalt und Beton verwendet. Die Parameter stammen aus den Projekten FE 89.0305/2015 (Asphalt) und FE 08.0254/2017/KRB (Beton). Die Einheiten dieser Werte sind im Modell nicht angegeben, so dass der Benutzer bei der Einstellung der Werte achtsam sein sollte. Die Definition der Werte und der Einheiten wird im Glossar beschrieben, welche mit dem SI-Einheitensystem übereinstimmt.

Quellcode 5.2: Materialparameter von Asphalt und Beton für die Referenzberechnung, die Einheiten sehen Glossar.

```
1 material_data_asphalt = {
2     'material': 'asphalt',
3     'thermal_conductivity': 1.05,
4     'emissivity_surface': 0.93,
5     'albedo_surface': 0.1,
6     'specific_heat_capacity': 920,
7     'density': 2240,
8 },
9
10 material_data_concrete = {
11     'material': 'concrete',
12     'thermal_conductivity': 2.25,
13     'emissivity_surface': 0.85,
14     'albedo_surface': 0.4,
15     'specific_heat_capacity': 850,
16     'density': 2400,
17 },
```

In der Arbeit von Markus (2021, Tabelle 4.1) werden die Materialparameter der verschiedenen Schichten verwendet. Nach der Vorstudie des thermischen Modells in Abschnitt 4.1 hat dieser kleine Unterschied zwischen verschiedenen Schichten fast keinen Einfluss auf

die Ergebnisse. Bei einer Simulationsdauer von einer Stunde tritt die Temperaturänderung nur in den oberen 0,4 m der Straße auf. Der Einfachheit halber wird also für das 12 m tiefe Modell ein homogenes Material angenommen.

Einführung der verkehrsbedingten Windgeschwindigkeit

Der Wert des natürlichen Windes hat wenig Einfluss auf die Gesamtwärmebilanz der Straße. Ein zusätzlicher Einflussfaktor, der die TFO beeinflusst, ist der verkehrsbedingte Wind. Die entsprechende Windgeschwindigkeit ist nicht öffentlich zugänglich, weshalb hier Annahmen getroffen werden müssen. Die Geschwindigkeit ist hauptsächlich abhängig von dem Verkehrsaufkommen, welches tagsüber am größten ist und nachts bei fast null liegt. Obwohl das Verkehrsaufkommen normalerweise zwei Höhepunkte wegen des Berufsverkehrs hat, ist die Geschwindigkeit niedriger. Dies ist auf die Verkehrsmenge zurückzuführen. Der Einfachheit halber wird dieser Wert als eine sinusförmige Verteilung über den Tag hinweg mit einem Mittelwert von 80 km/h angenommen, welcher dem Minimalwert der Geschwindigkeit des Verkehrs entspricht. Der Wert beträgt um 12:00 Uhr 160 km/h und ist damit maximal. Der Minimalwert liegt bei 0 km/h um 0:00 Uhr auf der Hauptspur. Die sich daraus ergebenden $80/3,6 = 22,2\text{m/s}$ werden direkt mit der natürlichen Windgeschwindigkeit überlagert, wie in Abbildung 5.5 dargestellt. Nach der Überlagerung ist die natürliche Windgeschwindigkeit so gering, sodass der verkehrsinduzierte Wind maßgebend für den Wind über der Straßenoberfläche ist.

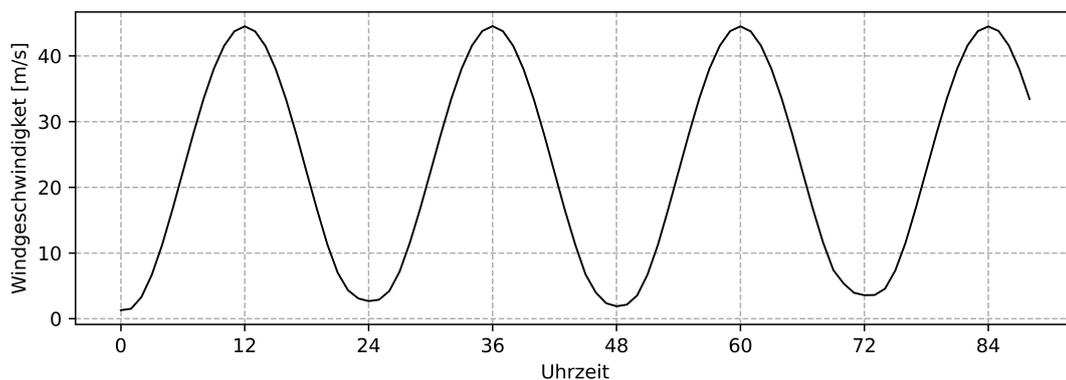


Abbildung 5.5.: Superposition der natürlichen und verkehrlichen Windgeschwindigkeit

Ein Effekt des verkehrsbedingten Windes ist, dass die Straßenoberfläche abgekühlt wird. Ein Beispiel dafür ist das Betonmodell im folgenden Abschnitt, bei welchem der maximale Temperaturgradient ohne verkehrsbedingten Wind bis zu 120 K/mm um 14 Uhr betragen kann. Dieser große Wert befindet sich nach (Villaret u. a. 2019b) außerhalb des erwartungskonformen Bereiches. Er kann daraus abgeleitet werden, dass die Temperatur

an diesem Punkt extrem hoch ist. Ein wahrscheinlicher Grund dafür ist die Unkenntnis eines thermischen Faktors im thermischen Modell. Nach der Einführung der durch den Verkehr induzierten Konvektion im Modell wird der Wert auf 75 K/mm gesenkt. Dieser Wert kann weiter auf 65 K/mm gesenkt werden, wenn die Dicke der Platte von 262 auf 300 mm erhöht wird.

Referenz Temperaturverlauf in vergangenen Projekten

Da keine in-situ Daten zur Verfügung stehen, kann eine quantitative Validierung des thermischen Modells nicht vorgenommen werden. Zum Zwecke der Validierung wird daher die tägliche Änderung der Oberflächentemperatur nach dem 24+n Stunden Algorithmus, wie in Anhang C, beschrieben überprüft. Das Ergebnis der Mitternachtsstunde ist nicht plausibel, deswegen müssen zusätzliche 24+n Stunden berechnet werden. Die entsprechende Temperaturverteilung bis 350 mm Tiefe wird mit der normierten charakteristischen Temperaturverteilung aus Augter und Kayser (2016) verglichen. Diese sind qualitativ miteinander konsistent. Zur Veranschaulichung ist die Temperaturverteilung um 12:00 Uhr in Abbildung 5.6 dargestellt. Sie entspricht nach Abbildung 5.7a dem ncT10 mit einer täglichen Temperaturänderungsamplitude $> 11,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

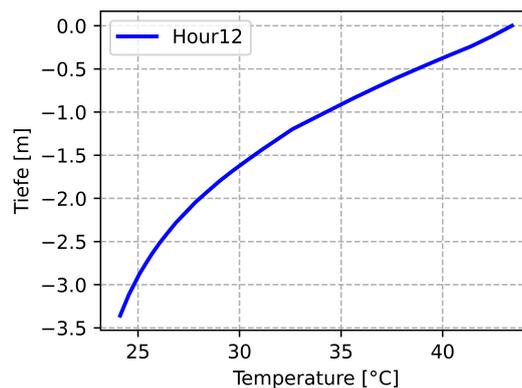
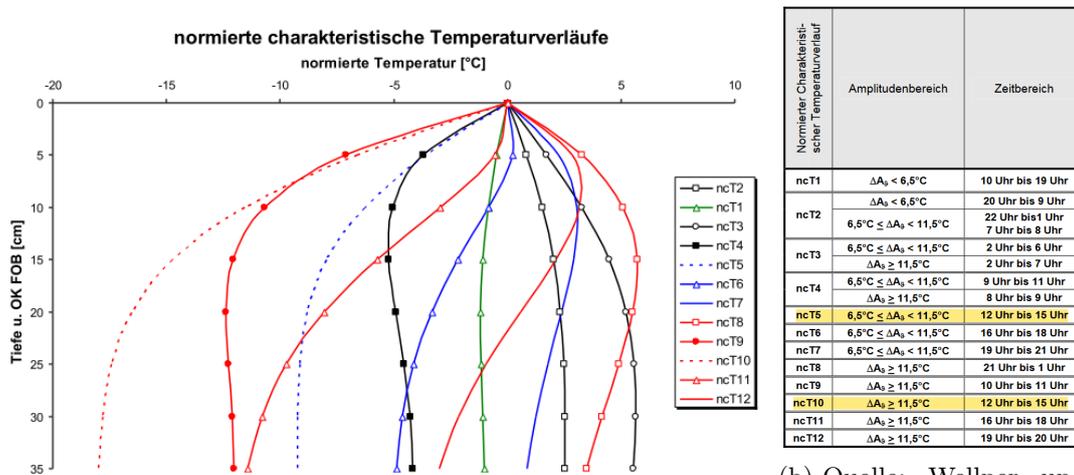


Abbildung 5.6.: Der Temperaturverlauf um 12:00 bis Tiefe 3,5 m

Eine weitere Referenztemperaturverteilung stammt aus den Ergebnissen des Berichts Villaret u. a. (2019b). Wie in Abbildung 5.8 dargestellt, ist die Temperatur der Betonoberfläche größer als die Temperatur der Luft, wobei die Temperaturdifferenz $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ am Mittag und $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ um Mitternacht beträgt. Dies wird durch das entwickelte Modell bestätigt. Aufgrund des Einflusses der Sonneneinstrahlung und der Eigenschaft der Wärmeleitung kommt es auch zu einer Verzögerung der Temperaturänderung bezüglich der Luft und der Betonoberfläche. Der Temperaturunterschied zwischen der Luft und

der Betonoberfläche beträgt 17 bis 19°C am Mittag und 1 bis 6°C um Mitternacht, siehe Abbildung 5.1 und Abbildung C.3. Zur weiteren Überprüfung des thermischen Modells sind in-situ-Daten erforderlich.



(a) Quelle: Wellner und Kayser (2007, Bild 58). Der normierte charakteristische Temperaturverlauf (ncT).

(b) Quelle: Wellner und Kayser (2007, Tabelle 18). Der Kategorisierung der ncT.

Abbildung 5.7.: Validierung des berechneten Temperaturverlaufes nach Wellner und Kayser (2007)

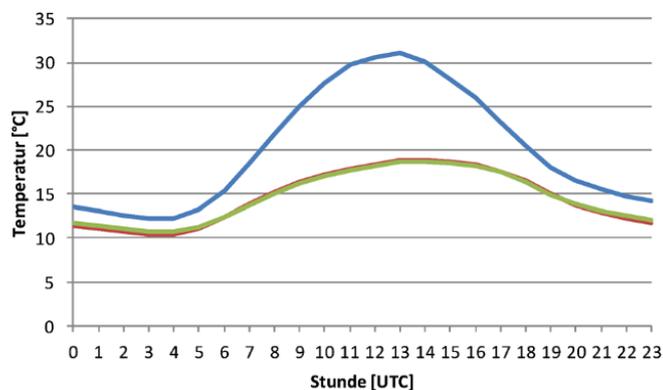


Abbildung 5.8.: Quelle: Villaret u. a. (2019b, Bild 6.6). Mittlere Tagesgänge der Temperatur; blau: Fahrbahnoberfläche, grün: Lufttemperatur an der GMA, rot: Lufttemperatur an der DWD-Station Rostock-Laage, April bis September, 2016-2016.

5.2.3. Mechanisches Modell

Asphalt

Es liegen keine Referenzdatensätze für die Berechnung des mechanischen Modells vor. Im Anhang der RDO Asphalt 09 werden nur einige wenige Beispiele genannt. Aus einem Beispiel in den RDO Asphalt 09 Anhang 7 beträgt die zulässige Lastwechselzahl 176 998 546 ($1,8 \cdot 10^8$, mit kryogener Dehnung) und 6 822 222 460 ($6,8 \cdot 10^9$ ohne kryogene Dehnung) unter TFO = $-12,5^\circ\text{C}$. Die Berechnung aus RDO Asphalt 09 berücksichtigt keinen Einfluss von kryogener Dehnung, wenn die TFO zwischen 15 bis 50°C liegt. Die aus dem Modell resultierende zulässige Lastwechselzahl mit einer Größen $1 \cdot 10^8$ bis $5 \cdot 10^8$ ist deswegen plausibel. Die detaillierten Ergebnisse sind im folgenden Abschnitt dargestellt.

Beton

Mit den vorgegebenen Materialparametern und dem Modellaufbau in Quellcode D ist der aus den RDO Beton berechnete Temperaturgradient

$$\delta_T = C_1 \times e^{-0,004 \times h_d} = 0,052 \times e^{-0,004 \times 262} = 0.018.$$

Die erforderliche Betondeckendicke beträgt damit 262 mm. Und die zulässige Lastwiederholung ist 338 439 464. Das einwirkende Verkehrsmoment ergibt sich zu 16 266 MPa und das einwirkende Temperaturmoment zu 6745 MPa.

Im Vergleich dazu ist der aus dem mechanisch äquivalenten Prinzip berechnete Temperaturgradient $-0,0057 \text{ K/mm}$, mit zulässiger Lastwechselzahl 35 383 357 752 397 um 0 Uhr, und $0,074 \text{ K/mm}$ mit zulässiger Lastwechselzahl 290 616 418 um 12 Uhr. Für die Berechnung der Temperaturgradienten ist die Betondeckendicke als 262 mm vorgegeben, um die vergleichbaren Lastwechselzahl zu berechnen. Da der negative Temperaturgradient nicht in der RDO Beton 09 definiert wird, wird der negative Wert für das RDO-Verfahren durch einen sehr kleinen Wert $0,000\,001 \text{ K/mm}$ ersetzt.

Die zeitlichen Verläufe der Temperaturgradienten sind in Abbildung 5.9b und Abbildung 5.9a dargestellt. Die Betondecke mit dünner Stärke weist einen größeren Temperaturgradient auf. Jedoch sind die meisten Temperaturgradienten von 8 bis 18 Uhr größer als die nach RDO Beton errechneten Temperaturgradienten.

Aus dem Vergleich wird ersichtlich, dass die Berechnung der Temperaturgradienten nach den RDO Beton konservativer ist als die Berechnung mit dem empirisch-physikalisches Modell (EPM). Die Temperaturbelastung aus den RDO Beton ist daher geringer als

den aus EPM berechnete MAEG. Diese Aussage entspricht nicht des in den RDO Beton eingeführten Faktor $0 \leq m_{T3} \leq 1$, welcher die Temperaturbelastung in verschiedenen Temperaturgebiete reduzieren soll. Ein Grund dafür kann sein, dass die Temperatur des ausgewählten Punktes tagsüber zu hoch ist Aus statistischer Sicht kann die jährlich mittlere Temperaturgradient kleiner sein.

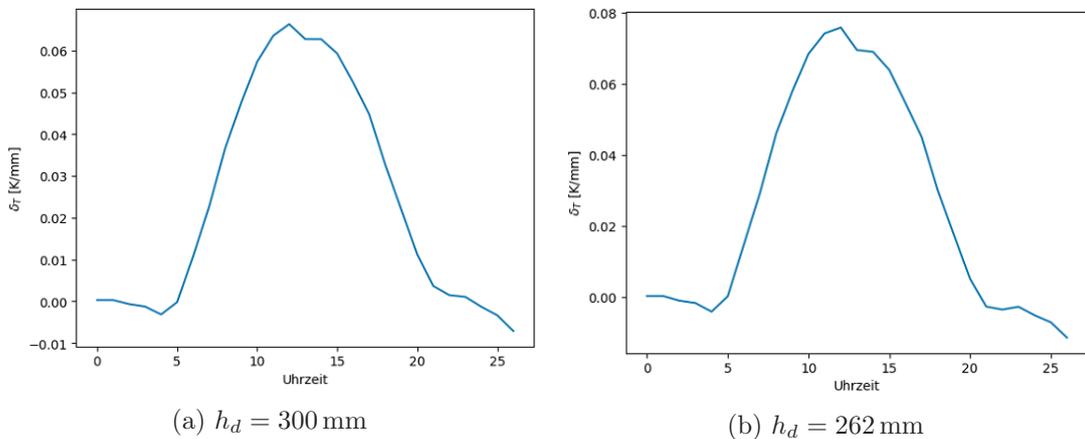


Abbildung 5.9.: Der Verlauf des Temperaturgradient mit verschiedenen Betondeckdicke h_d

5.2.4. Parallelisierung in Dakota und Postprocessing

Nach der Überprüfung einer einzelnen Simulation kann diese auf einer Workstation mit 32 Kernen, 62,8 GB Speicher und 490,6 GB Festplatte wiederholt werden. Diese Workstation wird in der ISAC GmbH eingesetzt und dient als Cloud-Server. Sie kann über ein SSH (Secure Shell) eingeloggt und remote gesteuert werden. Abbildung 5.10 zeigt die Auslastung des Systems, wenn 20 Kerne gleichzeitig laufen. Die Funktionsweise der Parallelisierung bei Dakota wird in Anhang E beschrieben.

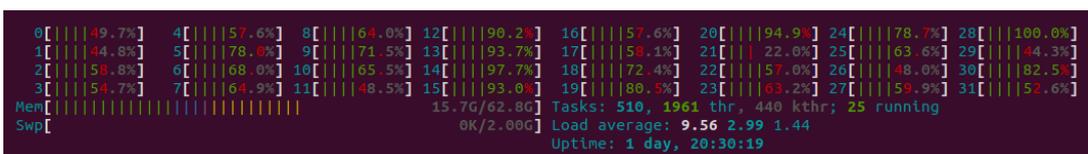


Abbildung 5.10.: Parallelisierung auf der Workstation mit 32 Kerne.

Für einen primären Test mit einem Datensatz aus einem kleinen Gebiet und einem kurzen Zeitraum kann diese Workstation die Aufgabe bereits erfüllen.

5.3. Deployment in der Cloud

Die Berechnungen für dieses Projekt sollen hauptsächlich in der Cloud durchgeführt werden. Darüber hinaus soll es am Ende dieses Projektes für den Auftraggeber möglich sein, die Ergebnisse zu reproduzieren oder neue Erkenntnisse zu implementieren. Daher werden die vollständigen Programme in Docker-Images zusammengestellt. Bei den Berechnungen in der Cloud werden diese zusammen mit den Eingangsdaten hochgeladen und dort ausgeführt, wodurch eine aufwändige Installationen und Inkompatibilitäten vermieden werden können.

Zur Erstellung eines Docker-Images wird ein sogenanntes „Dockerfile“ angelegt, welches das Grundsystem („FROM“) und die folgenden Installationsschritte („RUN“) definiert. Ein Beispiel für die Erstellung der im Projekt genutzten Anwendung befindet sich in Quellcode F.2.

Die gesamte Installation umfasst hierbei sowohl OpenFOAM für das thermische Modell, als auch „Octave“ für die strukturmechanischen Berechnungen und alle anderen für die Berechnung und Auswertung benötigten Tools. Die gesamte Erstellung eines Docker-Images kann bis zu 120 Minuten dauern und braucht aktuell ca. 6 GB Speicherplatz. Zusätzlich zur lokalen Erstellung der Docker-Images für Entwickler, wird das Image von einer GitLab-Pipeline automatisiert aufgebaut und auf `index.docker.io/isacgmbh/klimdim` hochgeladen, sobald neue Änderungen im Hauptzweig der Versionsverwaltung eingefügt werden.

Mit der entsprechenden Zugangsberichtigung kann sich jeder Nutzer oder jedes System das Docker-Images, Docker vorausgesetzt, „pullen“. (vgl. Abbildung 5.11)

```
docker pull    isacgmbh/klimdim:latest
docker run -it      klimdim:latest
```

Anschließend kann innerhalb von Sekunden ein neuer Docker-Container erstellt und aufgerufen werden, indem alle Berechnungen bei den gleichen Voraussetzungen auf verschiedenen Maschinen (auch virtuelle in der Cloud) ausgeführt werden. Außer der Installation von Docker sind noch der Code und die Eingangsdaten erforderlich, um die Berechnungen durchzuführen. Der Code und die Eingangsdaten werden am Ende des Projektes in einem GitLab Repository bereitgestellt, um die Pflege und die Aktualisierung des Programms zu ermöglichen.

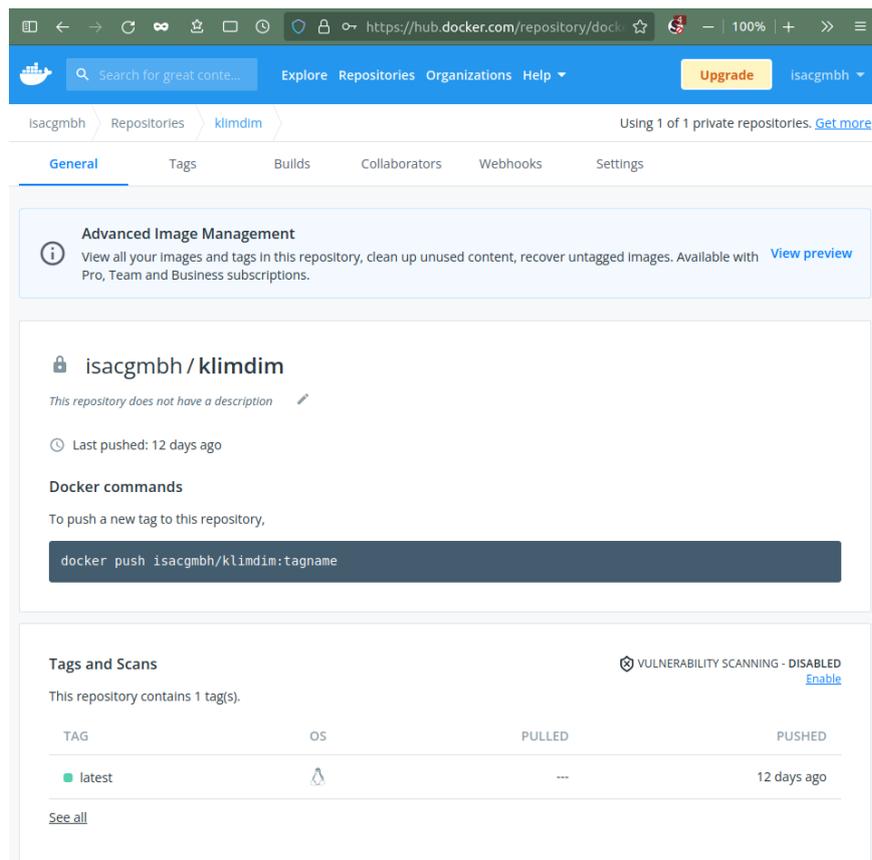


Abbildung 5.11.: Docker Image stored on <https://hub.docker.com/repository/docker/isacgmbh/klimdim>

5.4. Berechnungen für Referenz- und Klimaprojektionsdaten

Nach der Validierung der thermischen und mechanischen Modelle mit der lokalen Datenbasis in Abschnitt 5.2 wurden die beiden Modellen gekoppelt und nach Abschnitt 4.3 berechnet. Es hat sich jedoch gezeigt, dass der Berechnungsvorgang nach Anhang C, welcher in der Vorhabensbeschreibung vorgestellt wird, sehr langsam ist und die Anzahl der Stichproben nicht ausreicht, um KiST-Karten für die Asphalt- bzw. Betonbauweise zu erstellen. Darüber hinaus ist die Berechnung der N_{zul} für Beton nicht zielführend, um eine KiST-Karte zu erstellen, da die N_{zul} für Beton nach RDO Beton an die Annahme der kritischen Länge der Betonplatte gebunden ist. Um die Leistung der Berechnung zu erhöhen sowie eine detaillierte KiST-Karte zu erstellen, werden daher die folgende zusätzliche Anpassungen im Bezug auf Kapitel 4 vorgenommen:

- Optimierung des thermischen Modells.
- Auswahl neuer Kriterien für die KiST-Karten der Asphalt- und Betonbauweise.
- Anpassung des stochastischen Prozesses in Dakota.

Nach den Anpassungen wird das Verfahren mit der Referenzdatenbasis von 15 Jahren aus Kapitel 3 auf der Cloud (siehe Abschnitt 5.3) wiederholt. Danach werden die projizierten Daten in ausgewählte Klimaszenarien integriert (Kapitel 3) und die Berechnungen für die Zukunft ausgeführt. Das Postprocessing der Ergebnissen mit der Referenzdatenbasis erfolgt in Kapitel 6.

5.4.1. Anpassung des Modellaufbaus

Zunächst werden die Modell-Einstellungen überarbeitet. Beim thermischen Modell werden die Variablen auf die wesentlichsten reduziert. Dadurch sind die Anforderungen an die klimatischen Eingabedaten geringer und die Aktualisierung der KiST-Karten einfacher. Die kurzfristigen, natürlichen Variablen wie Niederschlag und Windgeschwindigkeit haben einen großen Einfluss auf die Extremwerte der Temperaturverteilung innerhalb der Straße, aber für die zeitliche Verteilung sind sie aus statistischer Sicht nicht entscheidend. Deshalb werden diese Variablen vernachlässigt.

Um das thermische Modell zu beschleunigen, wird das Mesh gröber gewählt. Zunächst werden die Netzpunkte in x- und y-Richtung auf zwei reduziert (ein Element in beiden Richtungen), da in den beiden Richtungen die Temperaturverteilungen konstant sind. Zudem wird das Mesh unter 350 mm auch gröber gewählt, da die Temperatur in diesem Bereich nur als Randbedingung gilt und keine detaillierte Darstellung der Temperatur erforderlich ist.

Nach der Optimierung des thermischen Modells werden die in Anhang C gekoppelten thermischen und mechanischen Modelle wieder entkoppelt. Zunächst wird die Temperaturverteilungszeitreihe berechnet und gespeichert, um das Ergebnis des thermischen Modells wiederzuverwenden. Als Ausgabe des thermischen Modells können die Temperaturverteilungen weiter zum Clustering der ncT für die Asphaltbauweise oder zur Berechnung der MAEG für die Betonbauweise benutzt werden. Als Alternative für die Asphaltbauweise ist die Regressionsmethode aus Augter und Kayser (2016) (KiST-Methode) zu verwenden, um die Temperatur an der Oberfläche und die Temperaturverteilung zu berechnen. Das reduziert die Berechnungszeit für das EPM. Im zweiten Schritt wird das mechanische Modell bei der Berechnung der erforderlichen Deckendicke für weitere Analysen der Nachhaltigkeit verwendet. Die Tabelle für das Schadenspotential der Asphaltbauweise kann auch durch das mechanische Modell nach dem Clustering der ncT aktualisiert werden.

5.4.2. Anpassung des Kriteriums für das Erstellen der KiST-Karte

Aus den Untersuchungen in Anhang C hat sich ergeben, dass sich die N_{zul} für Asphalt und Beton unterscheiden. Mit der Änderung der thermischen Bedingungen ändert sich die N_{zul} insbesondere bei Asphalt. Darüber hinaus gibt es eine breite Streuung der N_{zul} -Verteilung bei Asphalt, so dass weitere Analysen notwendig erscheinen. Die N_{zul} -Verteilung bei Beton zeigt eine Konzentration auf zwei Extremwerte. Zum einen ist die N_{zul} extrem groß bei einem negativen Temperaturgradient, da negative Temperaturen nicht in den RDO Beton berücksichtigt werden und bei der Berechnung mit den negativen Temperaturgradienten die thermische Belastung vernachlässigt wird. Dies führt zu einer großen N_{zul} . Zum anderen verändert sich die N_{zul} in einem sehr kleinen Bereich bei großen positiven Temperaturgradienten. Der Grund für den kleinen Bereich ist die in den RDO Beton vorgeschriebene kritische Länge der Betonplatte. Aufgrund der kritischen Länge der Betonplatten wird die N_{zul} bzw. die thermische Spannung nicht weiter erhöht, wenn die Temperaturgradienten den Wert erreichen, der der kritischen Länge der Betonplatte entspricht, siehe auch Villaret u. a. (2019b, Seite 79). Diese Konzentration der N_{zul} macht die Anzahl der resultierenden N_{zul} im mittleren Bereich sehr gering und eine Bestimmung der Grenze der KiST-Karten unmöglich. Im Extremfall gibt es nur zwei KiST-Zonen: eine mit der größten N_{zul} und die andere mit der kleinsten N_{zul} .

In Augter und Kayser (2016) basiert die Berechnung von N_{zul} auf der Dimensionierungsmethode selbst. Die Dimensionierungsmethode besteht aus der Verwendung der thermischen Bedingungen (ncT), die aus der KiST-Karte abgeleitet werden. Wenn die N_{zul} wiederum zur Erstellung der KiST-Karten verwendet wird, entsteht eine iterative Beziehung zwischen der KiST-Karten und der Dimensionierungsmethode. Diese iterative Beziehung zwischen der KiST-Karten und der Dimensionierungsmethode macht die Erstellung der KiST-Karten von den statistischen Annahmen der ncT-Clusterung abhängig, die sich mit dem Klimawandel ändern.

Daher wird empfohlen, die KiST-Karten sowohl für die Betonbauweise als auch für die Asphaltbauweise anhand der Wetterbedingungen statt der N_{zul} zu erstellen, wie es bei der Frosteinwirkungszonenkarte (FWZ-Karte) der Fall ist. Für verschiedene Straßenbauweisen werden unterschiedliche Kriterien in Abhängigkeit von den Wetterbedingungen berücksichtigt. Das Schadenspotenzial bzw. die KiST-Rate wird bei der Erstellung der KiST-Karten für Asphalt verwendet, während MAEG für Beton verwendet wird. Diese beiden Kriterien wurden in den Projekten Villaret u. a. (2019b) und Augter und Kayser (2016) implementiert und die aktuelle KiST-Karten wurde mit diesen Kriterien erstellt. In Kapitel 6 werden auch diese Kriterien verwendet, um die KiST-Karten zu erstellen.

5.4.3. Anpassung der Stochastik

Bei der Erstellung der KiST-Karten entstehen jedoch die Herausforderungen, die die Berechnung nach der Stochastik innerhalb des vorgegebenen Projektzeitraums behindern, siehe Anhang C. Deswegen ist eine Anpassung der Durchführung der stochastischen Berechnung notwendig. Der Berechnungszeitraum für das EPM wird zunächst auf ein Jahr reduziert, was für die weitere Berechnung repräsentativ ist. Die Berechnung für die Kenngrößen der anderen Jahren werden dann bei der Erstellung der KiST-Karten in Kapitel 6 durch Extrapolation berechnet, was schon in Augter und Kayser (2016) empfohlen und durchgeführt wurden.

Gemäß der Stochastik wird empfohlen, 300 Stichproben pro Jahr zu nehmen, da nach der Berechnung etwa die Hälfte der Stichproben in der Nacht stattfinden, wenn die Temperatur niedrig und nicht kritisch für das mechanische Verhalten der Deckenschicht ist. Daher wird bei der Auswahl von 300 Stichproben im Durchschnitt eine Stichprobe alle zwei Tage in Betracht gezogen. Es ist wichtig zu beachten, dass die Anzahl der stochastischen Stichproben in der zeitlichen Dimension ungefähr der Anzahl der Tage im Jahr entspricht, was bedeutet, dass die Berechnungen der stochastischen Stichproben nicht schneller ist als die Berechnung der insgesamt 365 Tage des Jahres, wenn die in Anhang C beschriebene $24+n$ Algorithmus bei der Stochastikprozess verwendet wird. Für die Berechnung der totalen 365 Tage für jeden räumlichen Stichpunkt werden insgesamt $24 \times 365 = 8760$ Stunden berechnet, um den stündlichen Temperaturverlauf eines Jahres zu erhalten. Im Vergleich zur stochastischen Stichprobe kann die Berechnung der gesamten Zeitreihe Duplikate einiger zeitlicher Punkte vermeiden und die Ergebnisse der Zeitreihe können für weitere statistische Zwecke verwendet werden. Die benötigte Berechnungszeit beträgt somit 210 240 s bzw. 2,43 Tage mit einer AWS Instanz mit 128 Kernen.

Diese Berechnung kann durch Reduzierung der Anzahl der berechneten Monate weiter optimiert werden. Laut Villaret u. a. (2019b) sind die 84., 92. und 97,5.-Perzentile der MAEG-Verteilung wichtig für die Erstellung der KiST-Karten für die Betonbauweise. Grundsätzlich erfordert die Berechnung dieser Perzentile die stündlichen MAEG-Werte. Die kalten Monate sind jedoch für die Bestimmung der oberen Perzentile nicht erforderlich, um die Berechnung zu beschleunigen. Als Beispiel wird ein zufällig ausgewählten Punkt an der Stelle Länge = 6,664 297 141, Breite = 49,600 747 64 ausgewählt. Die MAEG-Verteilung von 2003.01.01 bis 2004.01.01 ist in Abbildung 5.12 dargestellt.

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF für engl. Probability Distribution Function) der MAEG-Verteilung ist in Abbildung 5.12 dargestellt als grüne Fläche und mit der Lognormalverteilung (schwarze Kurve, nach Gleichung 5.1) verglichen. Die MAEG-Verteilung ist nicht normalverteilt, aber die Lognormalverteilung kann die Verteilung gut approximieren. Im Vergleich zu der Lognormalverteilung ist die MAEG-Verteilung

an der Stelle der Höhepunkt der Verteilung und am rechten Bereich etwas größer. Die Anpassungsparameter (μ , σ und x_0) werden auch in der Abbildung (mu, std und x_0) abgebildet. Der 84. Perzentil ist als blaue gestrichelte Linie dargestellt.

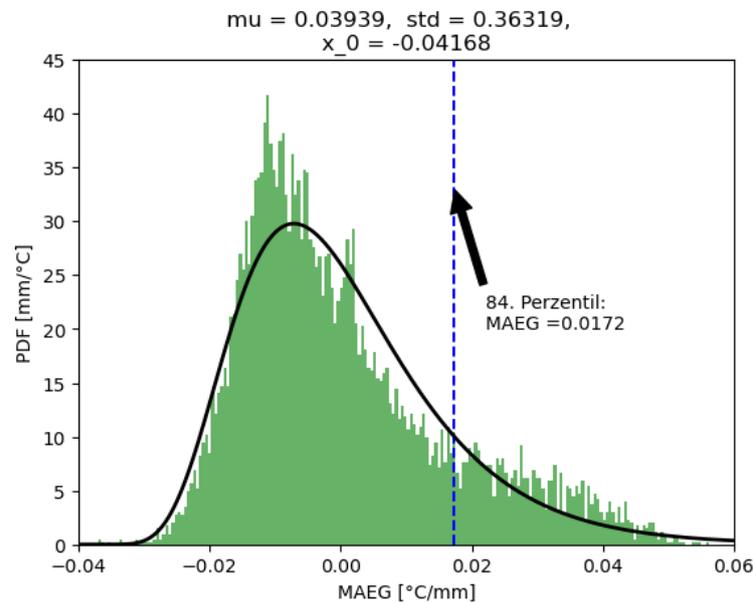


Abbildung 5.12.: Beispiel von MAEG-Verteilung aus 2003, Punkt an der Stelle Länge = 6,664 297 141, Breite = 49,600 747 64

$$f(x) = \frac{1}{(x - x_0)\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x-x_0)-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (5.1)$$

Die stündliche Änderung ist in der Abbildung 5.13 für ein ganzes Jahr (8760 Stunden) dargestellt. Hier werden die stündlichen MAEG-Werte in einem Jahr nach zeitlicher Reihenfolge sortiert. Der 84. Perzentil ist als gelbe Linie dargestellt. Die MAEG-Werte sind im Januar und Dezember, welche von der roten gestrichelten Linien angegrenzt werden, sehr klein. Das bedeutet, dass die Energiezufuhr von der Umwelt in der Straße in den zwei Monaten zu gering ist, um die MAEG-Werte zu erhöhen. Das 84. Perzentil des Jahres befindet sich nur in den Monaten Februar bis November, was bedeutet, dass diese beiden Monate (Januar und Dezember) bei der Berücksichtigung des 84. Perzentils ignoriert werden können, um schnellere Berechnungen durchzuführen. Der Ausschluss dieser Monate aus der Berechnung liefert eine repräsentative Schätzung, ohne die Verteilungsinformationen zu verlieren.

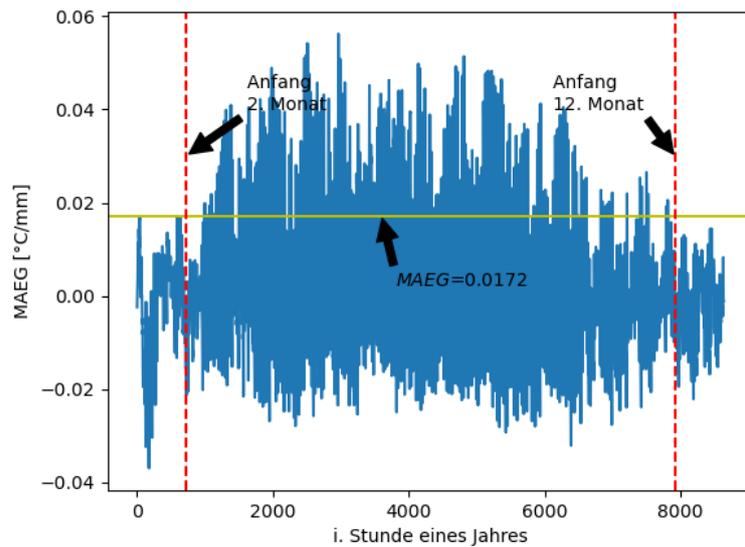


Abbildung 5.13.: Die Stündliche Entwicklung des MAEG.

Nachdem der Fokus auf die Daten auf Februar bis zu Dezember eingegrenzt worden ist, wird überprüft, welches Perzentil des neuen Datensatzes (ohne 1. und 12. Monat) dem 84. Perzentil des alten Datensatzes (mit 1. und 12. Monat) entspricht. Eine Schätzung des 84. Perzentils des neuen Datensatzes wird durch folgende Formel gegeben, wenn alle ausgeschlossenen Stunden unter dem 84. Perzentil liegen:

$$1 - \frac{16\%}{1 - 1/6} = 0,808.$$

Wenn 0,0172 °C/mm als Referenzwert angenommen wird, kann die Genauigkeit des entsprechenden Perzentils des neuen Datensatzes der stündlichen MAEG berechnet werden, wie in Tabelle 5.1 dargestellt ist.

Die Tabelle 5.1 zeigt, dass das 80,8. Perzentil des reduzierten Datensatzes ohne Januar und Dezember ein gleiches Ergebnis wie das 84. Perzentil des ursprünglichen Datensatzes mit Januar und Dezember liefert. Diese Konsistenz lässt sich auch durch einen Vergleich der Werte des 84. und 80,8. Perzentils im selben Plot beobachten, siehe Abbildung 5.14. In Abbildung 5.14 ist die MAEG-Verteilung für den Datensatz ohne Januar und Dezember in grüner Fläche dargestellt. Im Vergleich zu der MAEG-Verteilung mit dem Datensatz mit Januar und Dezember (Abbildung 5.12) ist der Verteilungsparameter μ bei der Verteilung ohne Januar und Dezember kleiner, während die Verteilungsparameter σ und x_0 größer, da die kleineren MAEG-Werte von Januar und Dezember vernachlässigt werden. Die senkrechte gestrichelte Linie zeigt das 80,4. Perzentil der MAEG-Verteilung für den Datensatz ohne Januar und Dezember, während die senkrecht rote Linie

das 84. Perzentil der MAEG-Verteilung für den Datensatz mit Januar und Dezember zeigt. Die Perzentile sind identisch: beide Werte betragen 0,0172 °C/mm. Durch diese Vereinfachung kann die Berechnung um 16,7 % beschleunigt werden.

Tabelle 5.1.: Ergebnisse der Reduzierung der Anzahl der berechneten Stunden im Jahr. Der Genauigkeitswert ist der Quotient des Perzentils des alten Datensatzes und des 84. Perzentils des neuen Datensatzes.

Perzentil	MAEG	Genauigkeit
80,50	0,0169	0,9858
80,60	0,0170	0,9893
80,70	0,0171	0,9958
80,80	0,0172	1,0001
80,90	0,0172	1,0026
81,00	0,0173	1,0071
81,10	0,0174	1,0099
81,20	0,0175	1,0171
81,30	0,0176	1,0260

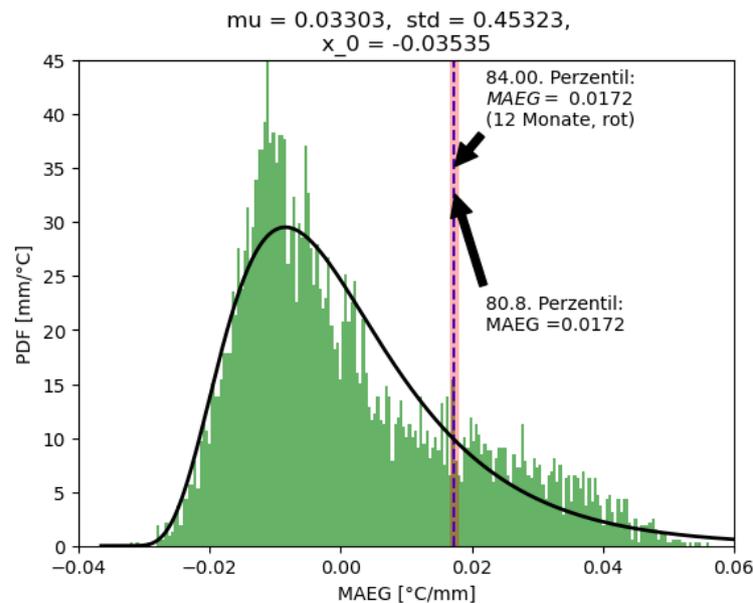


Abbildung 5.14.: Die MAEG-Verteilung mit dem Datensatz ohne Januar und Dezember für Punkt 1 in 2003.

5.4.4. Zusammenfassung der erforderlichen Zeit

Nach der oben genannten Anpassung des Modells und der Stochastik kann die Berechnung der KiST-Karten für die Asphalt- und Betonbauweise durchgeführt werden. Die erforderliche Zeit für die verschiedenen Berechnungsfälle 1-6 wird in Tabelle 5.2 zusammengefasst. Als Referenz wird die Berechnungszeit für die Berechnung der N_{zul} für die Betonbauweise mit einer lokalen Workstation und mit einer AWS Instanz mit einem Kern in der ersten Zeile angegeben. Die Berechnung in der Cloud bei AWS ist schneller als die lokale Berechnung, da die Ressourcen in der Cloud besser genutzt werden können. In Zeile zwei und drei werden die Berechnungszeiten für die Berechnung der Zeitreihe des MAEG mit oder ohne Januar und Dezember für eine räumliche Stichprobe angegeben. Die entsprechenden AWS-Instanztypen sind in Tabelle 5.3 angegeben. Die Berechnung der Zeitreihe des MAEG mit Januar und Dezember dauert etwa 3,65 Tage, während die Berechnung der Zeitreihe des MAEG ohne Januar und Dezember nur 3 Tage dauert. In der vierten und fünften Zeile werden die Berechnungszeiten für die Berechnung der Stichprobe des MAEG mit oder ohne Januar und Dezember für 128 räumliche Stichproben angegeben. Die Berechnung der lokalen Workstation dauert länger, während die Berechnung in der Cloud 192 mal schneller ist. In der sechsten Zeile wird die Berechnungszeit für die Berechnung nach der Stochastik mit 128 räumlichen Stichproben und 300 zeitlichen Stichproben für ein Jahr angegeben. Es zeigt sich, dass die Berechnung mit der Stochastik langsamer ist als die Berechnung der Zeitreihe des MAEG, da die Berechnung der Stochastik die in Anhang C beschriebene 24+n Methode verwendet um die Konvergenz zu erreichen.

Tabelle 5.2.: Vergleich der Berechnungszeit der Lokalworkstation und AWS Instanz. Variante 1: Referenzberechnung, Variante 2-5: Berechnung der Zeitreihe des MAEG, Variante 6: Berechnung der Stichprobe nach Stochastikprozess.

Variante	Anzahl zeitlicher Stichprobe	Anzahl räumlicher Stichprobe	Anzahl der Berechnungen	Lokal 1 core [s]	AWS [s]
1	1	1	1	36	24
2	8760	1	8760	315 360	210 240
3	7200	1	7200	259 200	172 800
4	8760	128	1 121 280	40 366 080	210 240
5	7200	128	921 600	33 177 600	172 800
6	300	128	1 382 400	49 766 400	259 200

Das Speedup und die Kosten für die Berechnung werden in Tabelle 5.3 angegeben. Das Speedup in Tabelle 5.3 ergibt sich aus dem Quotienten der Berechnungszeit der lokalen Workstation (Spalte 5 in Tabelle 5.2) und der Berechnungszeit der AWS Instanz

(Spalte 6 in Tabelle 5.2). Mit mehr Rechenkernen in der Cloud kann die Berechnungszeit erheblich reduziert werden. Durch ein Speedup kann eine Beschleunigung von bis zum 192-fachen erreicht werden, Laut der Tabelle 5.3 können Parallelberechnungen die verfügbaren Ressourcen voll ausnutzen und die Berechnungszeit erheblich reduzieren. Allerdings sollten bei der Auswahl des EC2-Instanztyps auch die Kosten der Berechnung berücksichtigt werden. Derzeit ist die maximale Anzahl an Kernen bei AWS 192 (c6a.48xlarge). Durch Änderung der Einstellungen der Steuerparameter in der Dakota-Eingabedatei kann die Anzahl der Kerne entsprechend angepasst werden.

Tabelle 5.3.: Vergleich der Effizienz und Kosten zwischen verschiedenen Instanz. Variante 1: Referenzberechnung, Variante 2-5: Berechnung der Zeitreihe des MAEG, Variante 6: Berechnung der Stichprobe nach Stochastikprozess.

Var- iante	Speedup	Local [Tag]	AWS [Tag]	Preis [€/h]	Preis- summe [€]	AWS EC2 Instanz
2	1,50	3,65	2,43	0,1746	10,20	c6a.xlarge
3	1,50	3,00	2,00	0,1746	8,38	c6a.xlarge
4	192,00	467,20	2,43	5,59	326,29	c6a.48xlarge
5	192,00	384,00	2,00	5,59	268,19	c6a.48xlarge
6	192,00	576,00	3,00	5,59	402,28	c6a.48xlarge

Zusammenfassend wird es empfohlen, eine Zeitserienberechnung anstelle einer Stochastik durchzuführen, da die Ergebnisse der Zeitreihe für weitere Analysen wiederverwendet werden können. Der stochastische Prozess ist nur sinnvoll, wenn die Konvergenz der Lösung beschleunigt werden kann.

Um die Anzahl der Stichproben in beiden räumlichen und zeitlichen Dimensionen zu erhöhen, sollte eine längere Berechnungszeit in Betracht gezogen werden. Im diesem Projekt wurden 128 Stichproben für die räumliche Dimension und 7200 Stichproben für die zeitliche Dimension gewählt.

Kapitel 6.

Erstellung der Karten

6.1. Zonierung der Frosteinwirkung 1991-2100

Das Erstellen der thematischen Karte zur Einwirkung von Frost auf Straßenaufbauten für die Referenzperiode 2001-2015 sowie zukünftige Klimareferenzperioden ist im Folgenden näher beschrieben, ebenso wird die neue FWZ-Karte gezeigt.

6.1.1. Referenzperiode 1991-2020

Die FWZ-Karte wird für jeden Gitterpunkt aus den berechneten Werten des Frostindex für die 30-jährige Wiederkehrszeit (FI30) Wiederkehrdauer FI30 erstellt. Die Berechnung des FI30 basiert auf der angesammelten Temperatur der kontinuierlich aufeinanderfolgenden Frosttage (Tage kälter als 0 °C) mit einem maximalen zeitlichen Abstand von 2 Tagen wärmer als 0 °C (Blume und Plehm 2009). Als Datengrundlage geht der bereits in Abschnitt 3.1 beschriebene HYRAS-Datensatz ein.

Die Daten zur Tagesmitteltemperatur aus dem HYRAS-Datensatz für die Periode 1951-2020 sind die Basis der Berechnung des FI30. Die verlängerte Periode wird deshalb gewählt, da der FI30 das Ergebnis einer generellen Extremwertanalyse (EVA) ist, deren Treffgenauigkeit durch die Hinzuziehung von längeren Datenserien verbessert wird. Es werden die Annahmen getroffen, dass (1) der langfristige Temperaturtrend über die Periode 2001-2015 annähernd linear ist und, dass (2) sich die klimatologische Variabilität des Frostindex (FI) von Jahr-zu-Jahr nicht wesentlich ändert über die Gesamtdauer der Periode. Diese Annahmen sind relativ grob, jedoch sind sie angesichts der Datenlage gerechtfertigt: Die EVA nur mit Daten aus den Jahren 1991-2020 durchzuführen, würde zu wesentlich größeren Unsicherheiten führen, da sich die klimatologische Variabilität in 30 Jahren nicht hinreichend niederschlägt, um eine optimale EVA zuzulassen. Im Laufe des Projektes sind diese Annahmen mithilfe von statistischen Verfahren überprüft worden. Um die Linearität zu überprüfen wurden unterschiedliche Regressionsverfahren zwischen Temperatur und Zeit erprobt und deren Ergebnisse mithilfe eines zweiseitigen

student-T Tests bewertet. Wären die Ergebnisse anderer Verfahren, zum Beispiel polynomischer oder exponentieller Natur oder Fouriertransformation erheblich repräsentativer für den Temperaturverlauf, dann wäre diese Annahme nicht mehr gerechtfertigt. Es wurde jedoch festgestellt, dass die Annahme eines linearen Temperaturtrends zutreffend ist, was auch mit aktueller Literatur zum Klimawandel in Deutschland konsistent ist (DWD 2023). Die Annahme, dass sich die Jahr-zu-Jahr Variabilität der trendbereinigten Temperaturabweichungen nicht wesentlich ändert wurde durch die Betrachtung und die Anwendung des Kolgomorov-Smirnoff-Tests auf die Verteilungen dieser Abweichungen überprüft und bestätigt. Dazu wurden die Abweichungen aus der ersten Hälfte mit denen der zweiten Hälfte des Zeitraumes verglichen, wobei keine wesentlichen Abweichungen festgestellt werden konnten.

In einem ersten Schritt werden die Zeitreihen der täglichen Mitteltemperatur aus dem HYRAS-Datensatz trendbereinigt. Dazu wird zunächst der lineare Trend mithilfe einer linearen Regression für jeden Gitterpunkt und jeden Monat des Kalenderjahres bestimmt und im Anschluss werden die Trendsignale für jeden Zeitpunkt subtrahiert. So entsteht eine Datenreihe, die den Mittelwert der Periode 1951-2020 (70 Jahre) aufweist und keinen linearen Trend aufweist.

Der zweite Schritt ist die Anpassung des Mittelwertes an die Periode 1991-2020, da die Ergebnisse des ersten Schrittes zunächst noch den Mittelwert der Periode 1951-2020 enthalten. Dazu wird der Mittelwert der Tagesmitteltemperatur der beiden Perioden für jeden Monat bestimmt und die Differenz aus den beiden Mittelwerten zum Ergebnis des ersten Schrittes hinzuaddiert.

Im dritten Schritt wird der jährliche Maximalwert des FI bestimmt. Dazu wird die Summe der negativen Tagesmitteltemperaturen für alle zusammenhängende Zeitschritte innerhalb einer Frostperiode gebildet. Als Frostperiode werden Zeitabschnitte definiert mit aufeinander folgenden negativen Tagesmitteltemperaturen. Sind zwei Frostperioden durch eine Phase von maximal zwei Tagen mit positiven Tagesmitteltemperaturen unterbrochen, werden sie zu einer Frostperiode zusammengeführt. Es entsteht so ein Wert des FI für jeden Tag, wobei Unterbrechungen von mehr als zwei Tagen zu einem Zurücksetzen des Wertes auf 0 führen und die höchsten Werte am Ende der Frostperiode erreicht werden. Es wird das jährliche Maximum des FI berechnet. Als Ergebnis stehen für jeden Gitterpunkt 70 Werte des FI zur Verfügung.

Im nächsten Schritt werden die 70 Werte des FI mithilfe einer EVA für eine Wiederkehrwahrscheinlichkeit von $\frac{1}{30}$ untersucht, um den FI30 zu bestimmen. Die EVA wird mithilfe von python-Software durchgeführt unter Verwendung des python3-Paketes *pyextremes*. Eine Wiederkehrdauer von 30-Jahren bedeutet nicht, dass ein solches Ereignis einmal in 30 Jahren oder alle 30 Jahre auftritt, es bedeutet hingegen, dass die Wahrscheinlichkeit eines solchen Ereignisses in jedem Jahr bei $\frac{1}{30}$ liegt. Für jeden

Gitterpunkt steht nun der FI_{30} zur Verfügung, welcher dann als Karte gezeigt werden kann. Die Daten liegen auch als netCDF oder falls gewünscht anderen GIS-lesbaren Formaten vor, sodass die Daten direkt eingesetzt werden können.

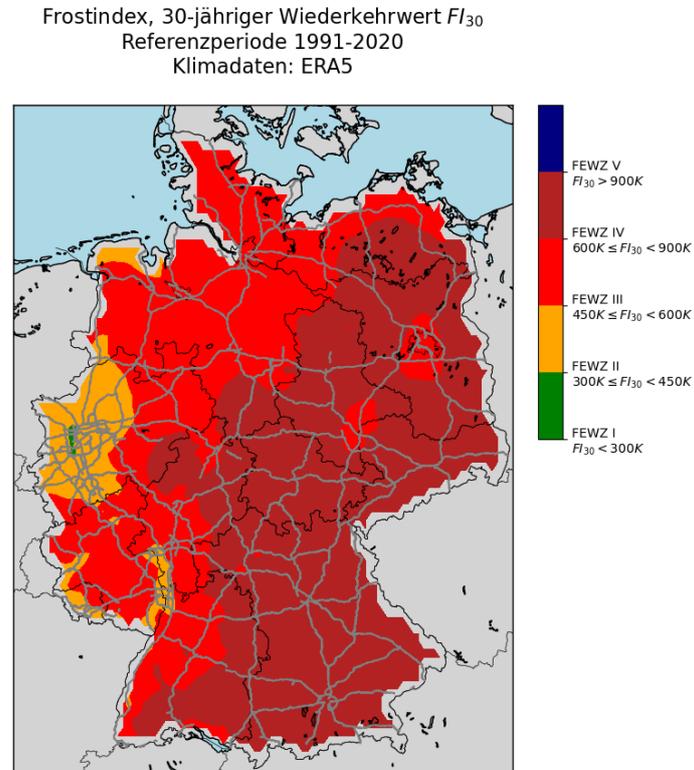


Abbildung 6.1.: Darstellung der Frosteinwirkungszonen mithilfe des FI_{30} für die Referenzperiode 1991-2020.

Die Zonierung der Karte in Abbildung 6.1 enthält fünf Frosteinwirkungszonen, welche sich leicht von den bisher verwendeten unterscheiden, um den klimatologischen Gegebenheiten besser Rechnung zu tragen.

- Zone I: $FI_{30} < 300 K$ – Diese Zone spiegelt die sehr wintermilden Klima entlang des Rheins und seiner Nebenflüsse wieder.
- Zone II: $300 K < FI_{30} \leq 450 K$ – Diese Zone deckt die tiefen Lagen der westlichen Mittelgebirge, die Küstenzonen sowie die westliche Hälfte des norddeutschen Tieflandes ab.
- Zone III: $450 K < FI_{30} \leq 600 K$ – Diese Zone schließt die kontinentaleren

Gebiete Ostdeutschlands sowie die höher gelegenen Teile Westdeutschlands und Süddeutschlands ein.

- Zone IV: $600 K < FI_{30} \leq 900 K$ – Diese Zone beschränkt sich auf höhere (über $700 m$) westliche sowie mittlere (ab $500 m$) und hohe östliche Mittelgebirgslagen.
- Zone V: $FI_{30} > 900 K$ – Diese Zone wird nur in den Kammlagen des Erzgebirges, des bayerischen Waldes sowie Alpenlagen oberhalb von $1200 m$ ausgewiesen.

Die Zone V ist für die Dimensionierung von Straßenaufbauten weitgehend irrelevant, jedoch ist durchaus empfehlenswert die Art des Bodens sowie die maximale Frosteindringtiefe, die sich aus klimatologischen Gegebenheiten ergibt explizit zu berechnen. Der dafür nötige Rechenaufwand ist etwas höher, die Information, die sich daraus ableiten lässt kann jedoch direkt zur Dimensionierung von frostsicheren Oberbauten herangezogen werden. Insgesamt ist festzustellen, dass die Frosteinwirkungszonen den wesentlichen Gradienten von kältebedingten Wettererscheinungen in Deutschland folgen: Eine Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Frostperioden mit (1) der Höhe, (2) von Westen nach Osten sowie (3) mit zunehmender Distanz von der Küste. Es ist zu erwarten, dass sich die Frostzonen durch den Klimawandel nachhaltig in die Richtung von geringeren Frosteindringtiefen entwickeln werden, wobei jedoch im Blick behalten werden muss, dass sich das Signal für die extremsten Ereignisse mit Wiederkehrdauern von 100 Jahren oder mehr möglicherweise anders verhält, etwa durch geänderte Großwetterlagen. Da diese Erwartung im Laufe der weiteren Arbeiten bestätigt worden ist, ist eine alternative Fassung der Frosteinwirkungszonen entwickelt worden, die im weiteren genutzt wird (Abbildung 6.2).

Die Frosteinwirkungszonen in Abbildung 6.2 sind feiner gegliedert und zeigen noch deutlicher den West-Ost-Gradienten als dominierendes Element der räumlichen Variabilität des Frostklimas der Referenzperiode in Deutschland. Frostperioden sind im Süden und Osten des Landes zum einen deutlich häufiger, dauern länger an und weisen ein tieferes Temperaturniveau auf. Diese Merkmale kennzeichnen das Frostklima in Deutschland am Übergang zwischen ozeanisch geprägtem und kontinental geprägten Mittelbreitenklima. Es ist jedoch zu bemerken, dass die höheren Werte des FI_{30} im Osten und Süden des Landes hauptsächlich durch die Einbeziehung sehr markanter Frostperioden früherer Jahre, wie etwa im Februar 1956 oder im Winter 1962/63 zustande kommen. Berücksichtigt man nur die Klimadaten des Referenzzeitraums 1991-2020, so nimmt der FI_{30} um 40 bis 60 % ab. Dies zeigt, wie mild diese Periode schon gewesen ist, aber auch, dass die Berücksichtigung eines zu kurzen Zeitraumes wahrscheinlich zu einer Unterschätzung der maximalen Frostintensität führt.

Frostindex, 30-jähriger Wiederkehrwert FI_{30}
Referenzperiode 1991-2020
Klimadaten: ERA5

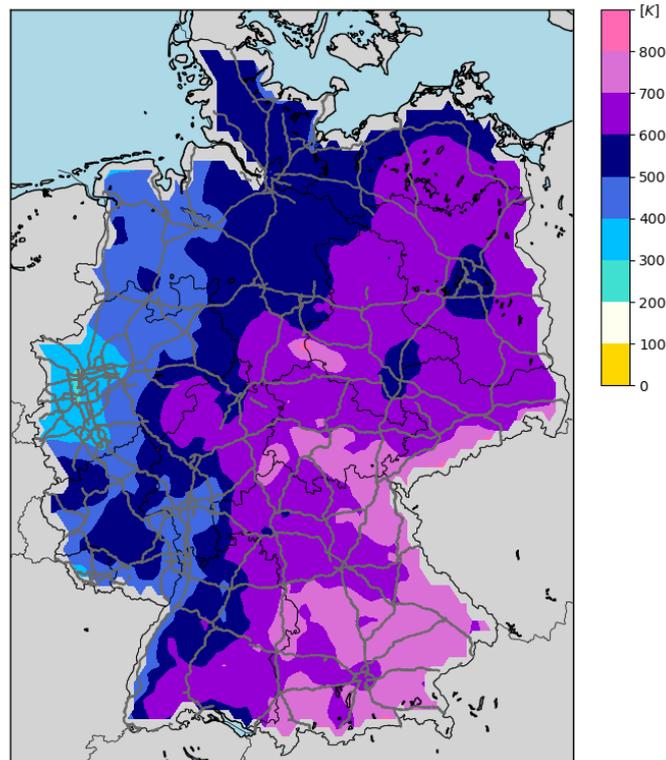


Abbildung 6.2.: Darstellung der Frosteinwirkungszonen mit der neuen Skalierung mithilfe des FI_{30} für die Referenzperiode 1991-2020.

6.1.2. Methodik zur Erstellung zukünftiger Frosteinwirkungszonen

Die Entwicklung der Karten für zukünftige Frosteinwirkungszonen stützt sich auf klimatologische Projektionsdaten und statistische Modelle. Dieser Prozess berücksichtigt die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 sowie Zeitperioden von 2031-2100 in jährlichen Abständen und 30-Jahres Schritten, um ein umfassendes Bild der zukünftigen Frosteinwirkungen zu zeichnen.

Auswahl der Klimamodelle und Szenarien

Die Auswahl der Klimamodelle für diese Studie basiert auf dem DWD-Kernensemble. Diese Modelle zeichnen sich durch eine hohe räumliche Auflösung von 5x5 km und eine tägliche zeitliche Auflösung aus, was eine Analyse auf der selben räumlichen und zeitlichen Skala wie der Analyse des Referenzzeitraumes 2001-2015 erlaubt. Die Streuung der Änderungssignale in den Modellen decken eine Vielzahl möglicher Klimazukünfte ab und ermöglichen es so, Unsicherheiten in den Projektionen abzubilden.

Datenaufbereitung und -analyse

Die Klimaprojektionsdaten für die Tagesmitteltemperatur werden für zukünftige 30-Jahresmittel analysiert, wobei das gleiche Verfahren wie für die Referenzperiode angewendet wird, um die Frosteindringtiefe zu bestimmen. Zusätzlich umfasst dies die Trendbereinigung der Daten und die Anpassung an die spezifischen Zeitperioden. Die Datenaufbereitung zielt darauf ab, Veränderungen in der Intensität und Häufigkeit von Frostereignissen über die Zeit zu identifizieren und zu quantifizieren. Die statistische Modellierung basiert auf der Analyse der historischen und projizierten Daten, um den Frostindex (FI) für zukünftige Perioden zu berechnen. Für jedes Klimamodell erfolgt die Berechnung des FI30 für jede der ausgewählten zukünftigen Klimareferenzperioden. Die Extrapolation des FI30 nutzt Extremwertanalysen (EVA), um die Wiederkehrwahrscheinlichkeit von Frosteindringtiefen zu bestimmen. Aus den Klimaprojektionen können so die Änderungssignale abgeleitet werden, die dann wiederum auf die Referenzwerte des FI angewendet werden, sodass die numerischen Werte des FI in der Zukunft berechnet werden können.

Kartenerstellung und Zonierung

Die Zonierung der Frosteinwirkungszonen für zukünftige Perioden basiert auf den extrapolierten FI30-Werten. Die Klassifizierungsintervalle der Zonen aus der neuen Referenzkarte in Abbildung 6.2 werden beibehalten. Für jede Kombination aus Zukunftszeitraum und Klimaszenario wird der Ensemblemittelwert sowie das Maximum und Minimum der Frosteindringtiefe zur Zonierung genutzt. Dies führt zu drei Karten für jeden Gitterpunkt und jede Zeitraum-Szenario-Kombination sowie einer zusätzlichen Karte, die die Schwankungsbreite darstellt. Diese Karten bieten eine visuelle Darstellung der erwarteten Verschiebungen in den Frosteinwirkungszonen und sind ein wesentliches Instrument für die Planung und Anpassung der Straßenbaudimensionierung in Bezug auf die Mächtigkeit der Frostschutzschicht. Der Einfachheit halber werden im Bericht

die Karten für die Ensemblemittelwerte und für die Zeiträume 2031-2060, die nahe Zukunft sowie 2071-2100, die ferne Zukunft gezeigt.

6.1.3. Zukünftige Frosteinwirkung

Die zukünftige Änderung der Frosteinwirkungszonen und damit des FI hängen allein von der Änderung der zukünftigen Temperaturen im Winterhalbjahr ab.

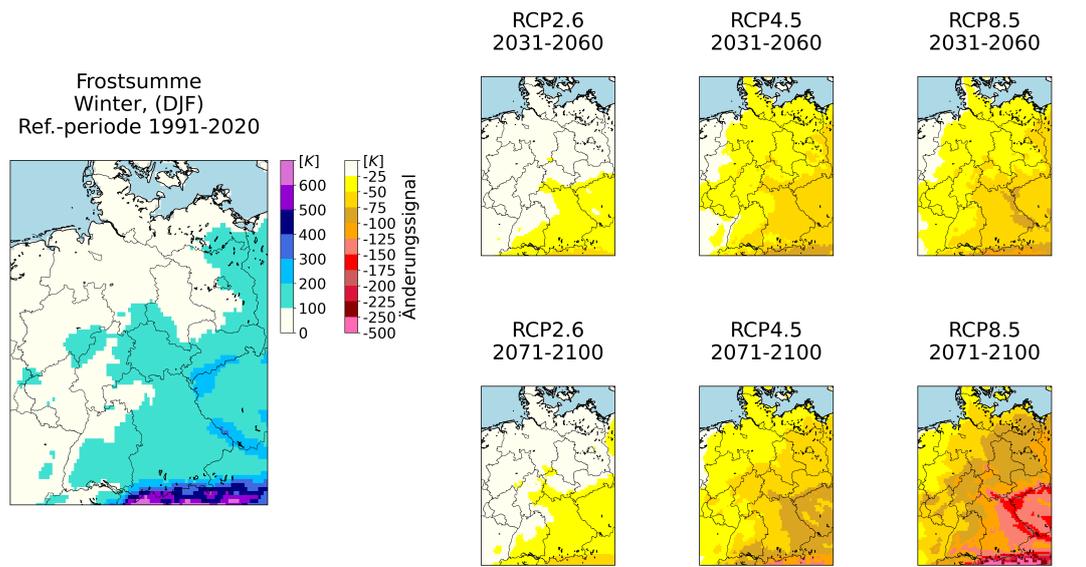
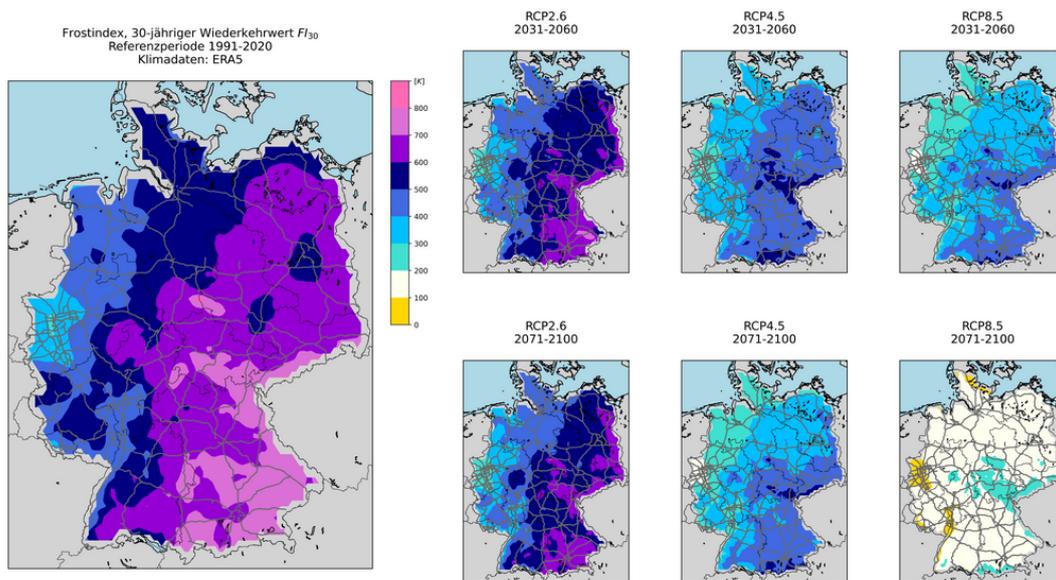
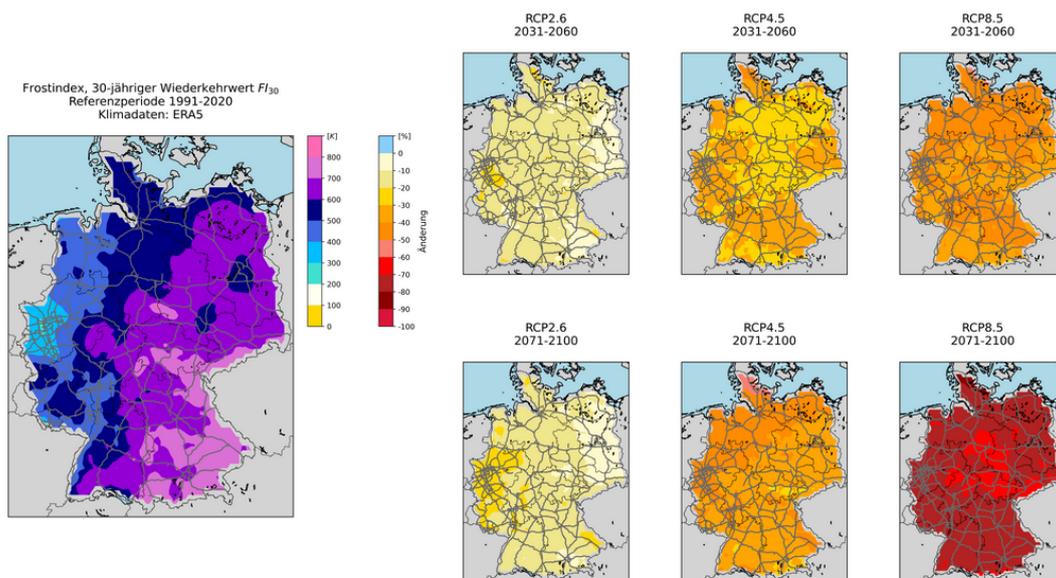


Abbildung 6.3.: Darstellung der winterlichen Temperatursumme für Tagesmitteltemperaturen unter dem Gefrierpunkt für die Referenzperiode 1991-2020 und die zukünftigen Zeiträume 2031-2060 sowie 2071-2100 für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5.

Um die zugrunde liegende Klimaänderung in den Klimaszenarien zu veranschaulichen, stellt Abbildung 6.3 die Änderung der winterlichen Frostsumme dar. Die winterliche Frostsumme berechnet sich aus der Summe der Beträge der negativen Tagesmitteltemperaturen in den Wintermonaten von Dezember bis Februar. Abbildung 6.3 zeigt ein klares Bild: Im RCP2.6 wird eine moderate Abnahme von etwa 20 bis 30 % projiziert, die auch nach 2060 stabil bleibt, während im RCP4.5 diese Abnahme rund 60 und im RCP8.5 80 bis 90 % beträgt in der fernen Zukunft. Abbildung 6.4 stellt die Absolutwerte und relativen Änderungssignale des FI in den betrachteten Zeiträumen und Klimaszenarien dar.



(a) Zukünftige Frosteinwirkungszonen



(b) Relative Änderungssignale

Abbildung 6.4.: Darstellung der zukünftigen Frosteinwirkungszonen und der relativen Änderungssignale mit der neuen Skalierung mithilfe des FI30 für die Referenzperiode 1991-2020 und die zukünftigen Zeiträume 2031-2060 sowie 2071-2100 für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5.

Im RCP2.6 ist nur eine geringe Abnahme feststellbar, während im RCP4.5 eine stärkere Abnahme stattfindet und im RCP8.5 die Werte des FI in der fernen Zukunft auch in den Mittelgebirgen niedriger, d.h. milder, sind, als während der Referenzperiode im milden Rheinland. Die Änderung bis zum Zeitraum 2031-2060 ist für RCP4.5 und RCP8.5 noch relativ ähnlich, während sich zum Ende des Jahrhunderts eine große Diskrepanz zwischen den beiden Klimaszenarien einstellt, obwohl auch im RCP4.5 die Erwärmung und damit die Frostabschwächung weiter voranschreitet.

Die regionale Verteilung bleibt in etwa gleich und die Zunahme des FI von Westen nach Osten bleibt das dominierende Element. In den Höhenlagen der Mittelgebirge und der Alpen ist die Abnahme des FI in relativen Einheiten ähnlich groß wie in den tiefen Lagen. Im RCP2.6 ist der Rückgang des FI im Osten Deutschlands relativ geringer als im Westen, während sich für die anderen Klimaszenarien kaum nennenswerte regionale Unterschiede in der relativen Änderung ergeben.

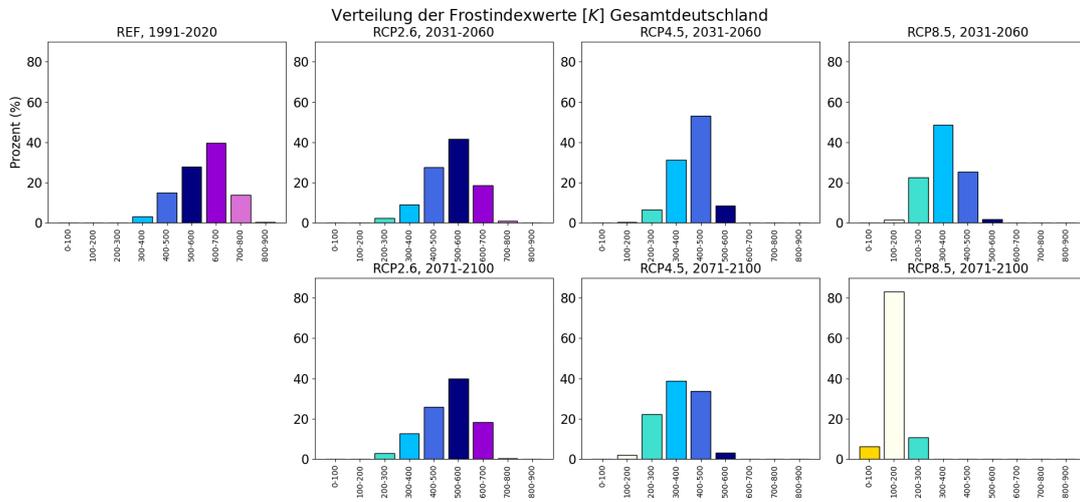
Die Histogramme in Abbildung 6.5 und Abbildung 6.6 zeigen die Häufigkeitsverteilung der Werte und relativen Änderungssignale des FI in Deutschland und an den Autobahnen in Deutschland. Insgesamt sind die Unterschiede zwischen den beiden Verteilungen gering, die sehr großen Werte des FI in den höheren Gebirgslagen treten an den Autobahnen weniger häufig, da diese weniger durch Gebirgsregionen verlaufen. Das dichtere Autobahnnetz im Westen Deutschlands sorgt dafür, dass geringere absolute Werte des FI im Autobahnnetz häufiger vertreten sind.

Während sich die Verteilung der Werte des Frostindex im RCP2.6 innerhalb der gebildeten Klassen der Frosteinwirkung nur sehr geringfügig ändern, verschiebt sich die Frosteinwirkung im RCP4.5 und RCP8.5 deutlich. In der nahen Zukunft von 2031-2060 verschiebt sich die Häufigkeitsverteilung des FI im RCP4.5 um eine Klasse und im RCP8.5 um zwei Klassen bzw. 200 K hin zu geringeren Werten. Für die ferne Zukunft verschiebt sich die Verteilung im RCP4.5 nochmals um eine und im RCP8.5 um nochmals zwei Klassen nach links, wobei die Breite der Verteilung, also der Abstand zwischen Minimum und Maximum abnimmt und eine Konzentration der Werte stattfindet.

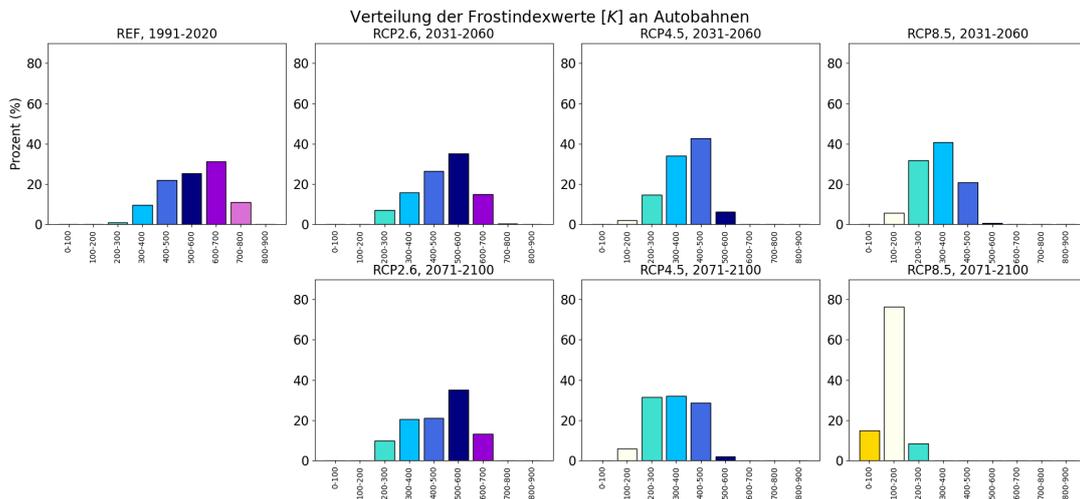
Da die relativen Änderungen regional kaum unterschiedlich sind, ist auch die Streuung der Häufigkeitsverteilung der relativen Änderungssignale des FI geringer ausgeprägt. Wesentliche Unterschiede zwischen den Verteilungen im Bundesgebiet und der Verteilung entlang der Autobahnen bestehen nicht.

Für das RCP2.6 beträgt in beiden betrachteten Zukunftszeiträumen die Abnahme zwischen 0 und 30 % mit einem Maximum zwischen 10 und 20 %. Für das RCP4.5 beträgt die Abnahme im Zeitraum 2031-2060 mehrheitlich zwischen 20 und 40, im Zeitraum 2071-2100 mehrheitlich zwischen 30 und 50 %. Abnahmen von 30-50 % stellen die Mehrheit in der Verteilung der relativen Änderungssignale im RCP8.5 für die nahe

Zukunft, während in der fernen Zukunft für die überwiegende Mehrheit von etwa drei Vierteln der Punkte eine Abnahme von 70 bis 80 % auftritt.



(a) Ganz Deutschland



(b) Deutschlands Autobahnen

Abbildung 6.5.: Darstellung der Häufigkeiten der zukünftigen Frosteinwirkungszonen mit der neuen Skalierung mithilfe des FI30 für die Referenzperiode 1991-2020 und die zukünftigen Zeiträume 2031-2060 sowie 2071-2100 für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5.

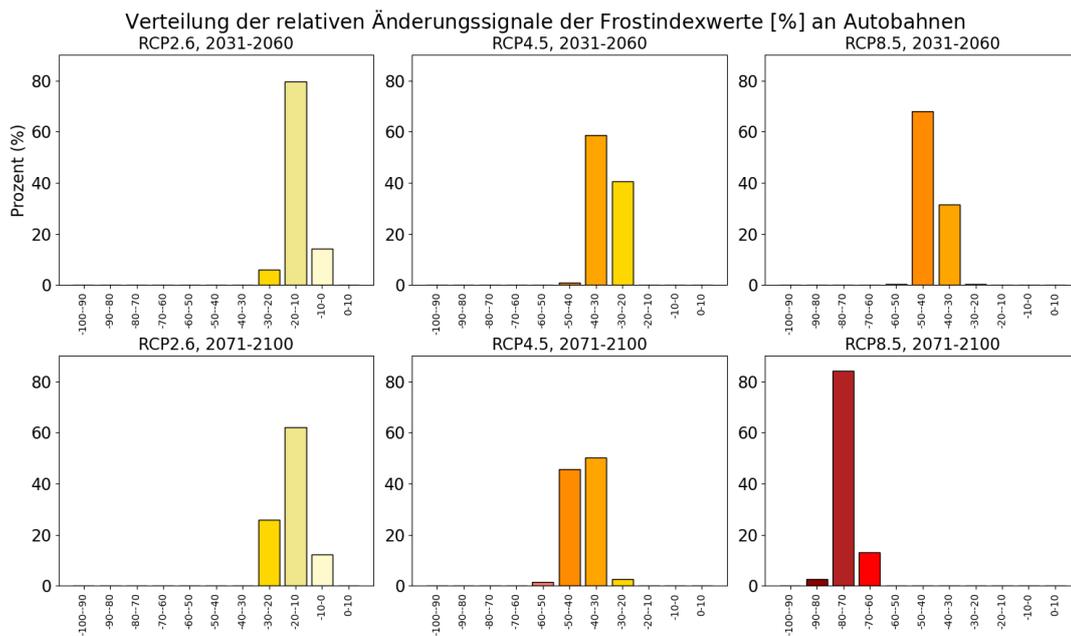
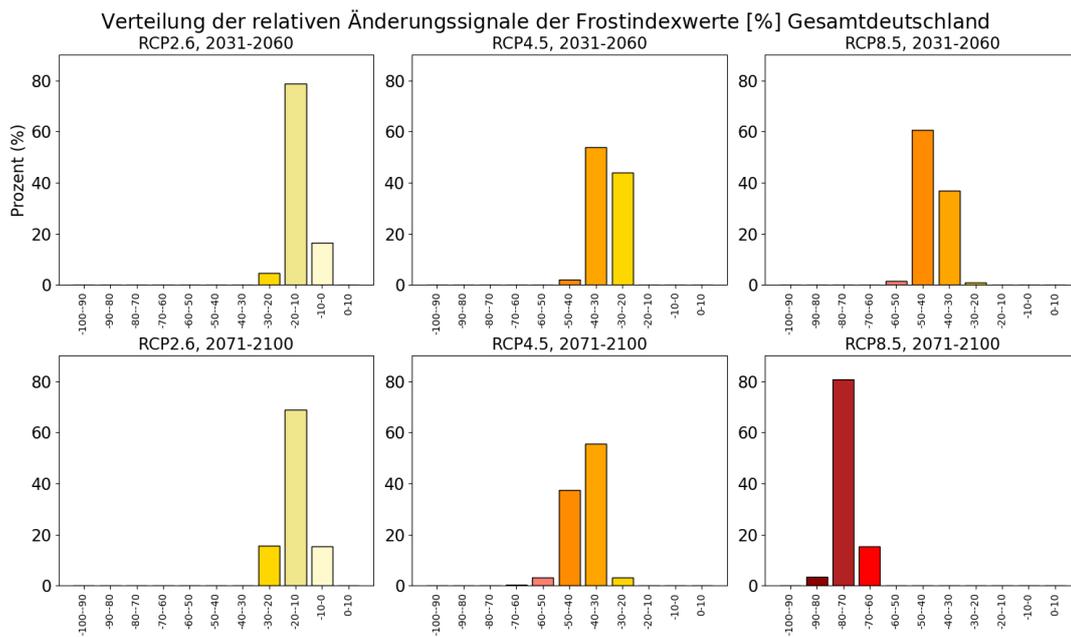


Abbildung 6.6.: Darstellung der Häufigkeiten der relativen Änderungssignale der zukünftigen Frosteinwirkungszonen mit der neuen Skalierung mithilfe des FI30 für die Referenzperiode 1991-2020 und die zukünftigen Zeiträume 2031-2060 sowie 2071-2100 für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5.

Die Änderung der Frosteindringtiefe und damit der Frosteinwirkung durch den zukünftigen Klimawandel ist innerhalb des Kernensembles unstrittig und auch die Klimaszenarien zeichnen sich deutlich ab, da diese Kenngröße alleine von der Temperatur abhängt, die innerhalb der Klimaprojektion in einem relativ engen Korridor im jeweiligen Klimaszenario projiziert wird. Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Änderung der Mittelwerte und Extremwertverteilungen können mit dem hier angewandten Verfahren bestimmt werden und zeigen eine nur geringe Abnahme für das RCP2.6, eine moderate Abnahme für das RCP4.5 und ein fast vollständiges Ausbleiben von Frostperioden im RCP8.5. Das für die Planung im Straßenbau ungünstigste Klimaszenario ist das Szenario RCP2.6, für das im wesentlichen eine Beibehaltung der bisherigen Richtlinien ausreichen dürfte. Die Kenntnis über die Auswirkungen von zentralen Kippelementen im Klimasystem auf die Frosteinwirkung könnte durchaus erheblich sein, falls zum Beispiel die atlantische Meridionalzirkulation (AMOC) zusammenbricht, da dann möglicherweise zumindest vorübergehend eine deutlich Abkühlung des winterlichen Klimas denkbar ist. Diese käme hauptsächlich durch eine Änderung der Zirkulationsformen zustande. Ein solches Szenario ist jedoch derzeit nicht absehbar und hat als Bedingung auch eine noch stärkere Erwärmung im Bereich des Nordmeeres, was wiederum mögliche Frostperioden in deren Intensität abschwächen würde. Normativ würde die Festlegung auf das ungünstigste Szenario RCP2.6 oder eine Beibehaltung der bisherigen Dimensionierung der Frostschutzschicht ausreichen, um ein solches Szenario mit hoher Wahrscheinlichkeit abfedern zu können. Die tatsächlich eintretenden Frostperioden der Zukunft in den Klimaszenarien RCP4.5 und RCP8.5 werden immer kürzer und auch weniger scharf, was plausibel ist, da die Erwärmung in der Arktis, wo die Luftmassen für starke Fröste in Deutschland abstammen, noch stärker als in Deutschland ist.

6.2. Erstellung der KiST-Karten für die Klimaperioden 1991-2100

In diesem Abschnitt werden die Erstellung der KiST-Referenzkarten sowie der zukünftigen KiST-Karten für den Prognosezeitraum 2021-2100 in jährlichem Abstand für 30-Jahreszeiträume beschrieben. Es werden KiST-Karten sowohl für Asphalt als auch Betonbauweisen nach bisherigen Methoden und mit heutigen und zukünftigen Klimadaten erstellt und verglichen.

6.2.1. KiST-Karten Referenzperiode 1991-2020

Die Berechnungen der Referenz-KiST-Karten für Asphalt und Beton stützen sich auf die Basis der Rasterdaten des DWD sowie ergänzender Datensätze für die Solarstrahlung aus dem ERA5-Datensatz. Der Referenzzeitraum erstreckt sich über die Jahre 1991 bis 2020, was eine Abweichung vom allgemeinen Verfahren in der Klimawissenschaft zur Darstellung von Effekten des Klimawandels ist, da die Periode 1991-2020 selbst schon durch den Klimawandel betroffen ist. Normalerweise wird dazu die Periode 1961-1990 verwendet, die jedoch für den Planungsgegenstand der Dimensionierung keine Relevanz mehr entfaltet, sodass aus Relevanzgründen die Referenzperiode 1991-2020 bestimmt worden ist. Die Rasterdaten sind allesamt auf das 5 x 5 km weite Gitternetz der HYRAS-Daten des DWD skaliert worden. Als Eingangsdaten wurden die mittlere, maximale und minimale Tagestemperatur, die relative Luftfeuchte sowie die Solarstrahlung in täglicher Auflösung herangezogen.

Für Asphalt ist zur Ermittlung der KiST-Zonen das Verfahren von Augter und Kayser (2016) zum Einsatz gekommen, bei dem ein Regressionsalgorithmus auf die Wetterdaten angewendet wird, um stündliche Schadenssummen zu berechnen. Diese wurden für den Zeitraum 1991-2020 über 15 Jahre aufsummiert und diese Werte dann über 30 Jahre gemittelt und sind in Abbildung 6.7 dargestellt.

Die Verteilung der KiST-Raten in Abbildung 6.7 ist annähernd identisch mit der in Augter und Kayser (2016). Abweichungen ergeben sich in den exakten Verläufen der Zonengrenzen, was durch die gewählte Auflösung von 5 km erklärbar ist. Die KiST-Raten für Asphalt unterscheiden sich regional stark und folgen im Wesentlichen der Temperaturverteilung des Sommerhalbjahres. Kühlere Temperaturen an der Küste sowie in den Mittelgebirgen verursachen geringere KiST-Raten, die höchsten Werte werden im sehr warmen Oberrheingraben erreicht. Diese Zonierung entspricht der Erwartung, da die Mitteltemperatur die Temperatur der oberen Asphaltsschicht bestimmt und diese wiederum die Schadenshöhen entscheiden moduliert.

KiST-Zonen Asphalt, Schädigung über 15 Jahre R_{kiST}
 30-jähriger Mittelwert, Referenzperiode 1991-2020
 Klimadaten: ERA5

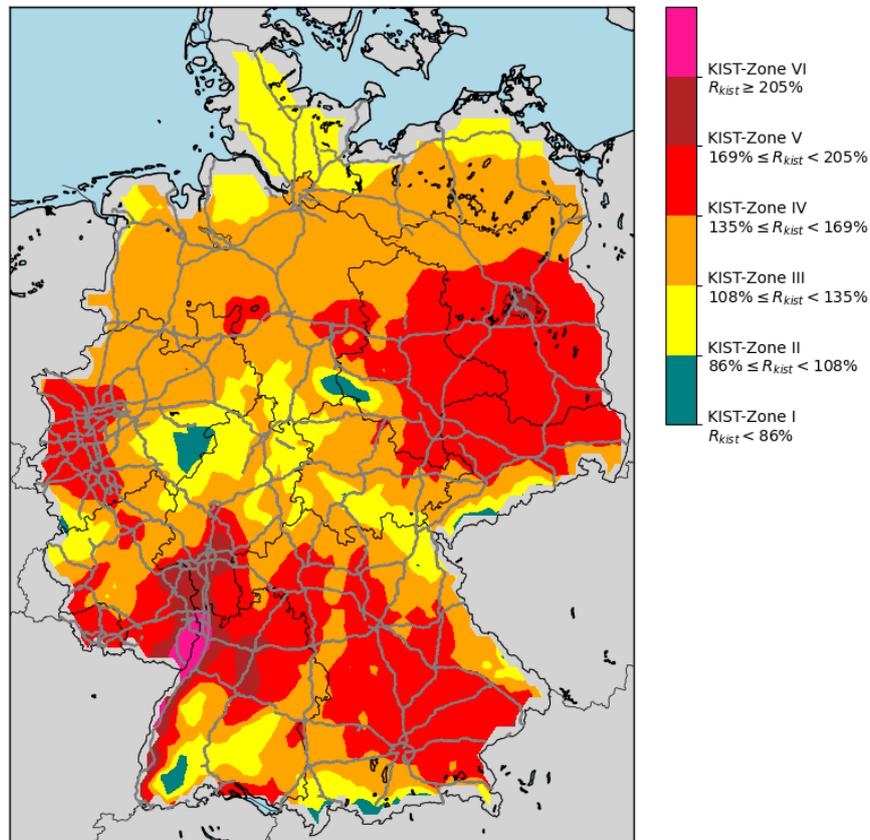


Abbildung 6.7.: KiST-Karte für Asphalt für den Referenzzeitraum 1991-2020 basierend auf KiST-Raten R_{kiST} 1991-2020.

In Abbildung 6.8 wurden die gleichen Referenzdaten nach feiner abgestimmten Zonen eingeteilt, welche zur Darstellung der Änderung der zukünftigen KiST-Raten herangezogen werden. Es sind im wesentlichen vier Hotspots mit erhöhten und höchsten KiST-Raten erkennbar: die höchsten Werte von über 200 % treten am (nördlichen) Oberrhein auf, Werte über 150 % treten auf im Rheinland, in den tiefen Lagen Ober- und Niederbayerns sowie im südlichen Ostdeutschland zwischen Magdeburger Börde, Lausitz und Berlin.

Für die Bestimmung des Schadenspotentials von Betonoberbauten durch Klimabe-

KiST-Zonen Asphalt, Schädigung über 15 Jahre R_{kist}
Referenzperiode 1991-2020
Klimadaten: ERA5

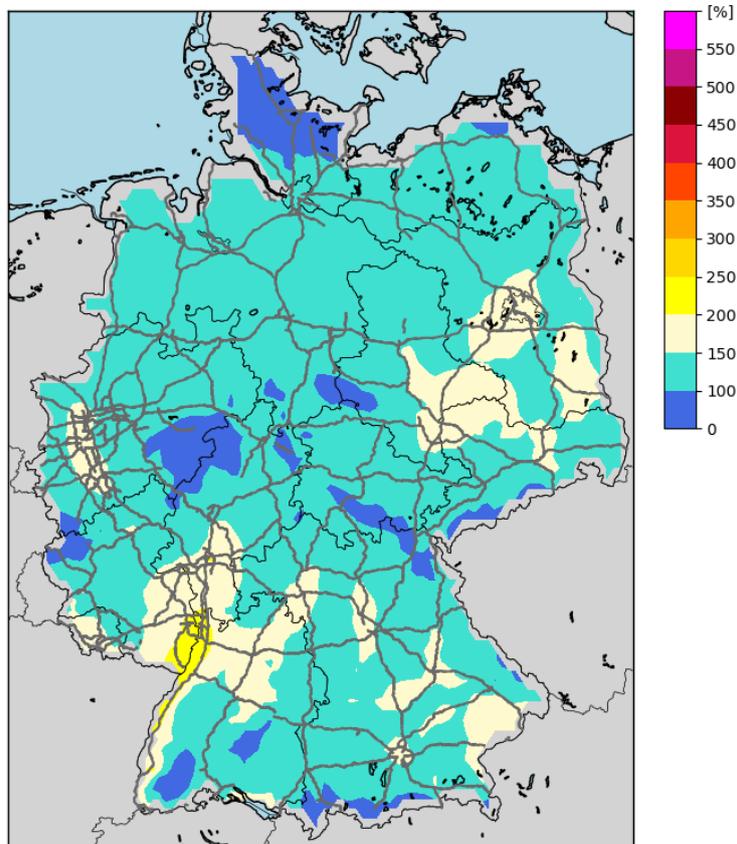


Abbildung 6.8.: KiST-Karte für Asphalt für den Referenzzeitraum 1991-2020 basierend auf KiST-Raten R_{kist} 1991-2020.

dingungen wurde das Verfahren von Villaret u. a. (2019b) angewendet. Dazu wurden zunächst für das Jahr 2003 für 128 zufällig über Deutschland verteilte Punkte die MAEG mithilfe eines finiten Volumen Modells in Abschnitt 5.4 berechnet. Die Berechnung wurde auf der Basis stündlicher Daten zu Lufttemperatur und Solarstrahlung durchgeführt. Das Jahr 2003 wurde gewählt, da zum einen eine sehr große Bandbreite an Temperaturen auftrat mit sehr niedrigen Wintertemperaturen und extrem warmen Sommertemperaturen. Dies bedeutet, dass ein Regressionsalgorithmus, der MAEG und die Wetterdaten in Verbindung bringt, besonders aussagekräftig sein dürfte. Im Anschluss

wurde der berechnete stündliche MAEG auf das tägliche Maximum reduziert ($MAEG_{max}$) und dadurch wurde es möglich, eine multi-variable Regression auf die Wetterdaten anzuwenden. Die Regression aus den MAEG-Daten für 2003 wurde auf die täglichen Datensätze der Referenzperiode 1991 bis 2020 angewandt. Die KiST-Karte wurde aus dem 90. Perzentil des $MAEG_{max}$ gebildet und ist in Abbildung 6.9 dargestellt. Die Zonierung basiert auf einer Darstellung von Zonen mit einem Abstand von 1,5 K/cm.

KiST-Zonen Beton, $MAEG_{p90}$
 30-jähriger Mittelwert, Referenzperiode 1991-2020
 Klimadaten: ERA5

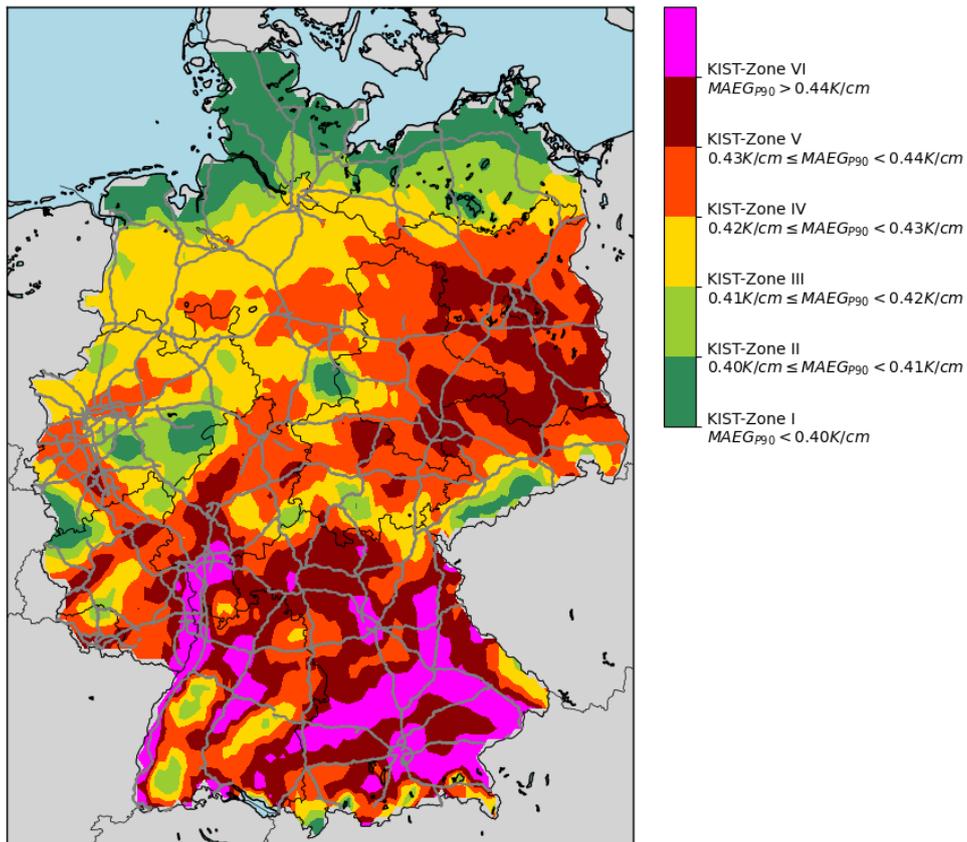


Abbildung 6.9.: KiST-Karte für Beton für den Referenzzeitraum 1991-2020. Gezeigt ist der 90. Perzentil des MAEG für den Referenzaufbau mit 300 mm Dicke.

Die Verteilung der KiST-Zonen für Beton gleicht der in Villaret u. a. (2019b), wobei die Lage der Zonengrenzen aufgrund des leicht geänderten Algorithmus und gewählten

Perzentils nicht identisch sind. Im allgemeinen folgt die Verteilung des $MAEG_{max}$ einen Nord-Süd Gradienten, der durch die Höhenlage modifiziert wird. Dies entspricht in etwa der Verteilung der durchschnittlichen Solarstrahlung, welche von Nord nach Süd aufgrund größerer Sonnenhöhe zunimmt. Höhere Lagen wie etwa das Sauerland oder der Schwarzwald und auch die unmittelbaren Alpenregionen weisen niedrigere Werte des $MAEG_{max}$ auf, da in diesen Regionen die Bewölkung deutlich größer ist und somit weniger Solarstrahlung anfällt.

KIST-Zonen Beton, $MAEG_{p90}$
30-jähriger Mittelwert, Referenzperiode 1991-2020
Klimadaten: ERA5

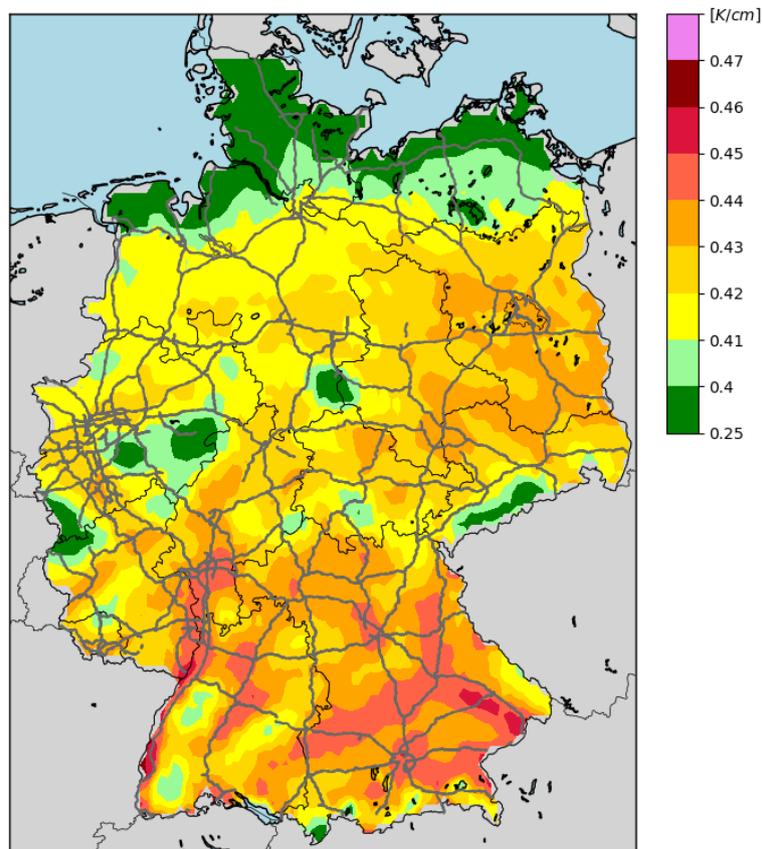


Abbildung 6.10.: KiST-Karte für Beton für den Referenzzeitraum 1991-2020. Gezeigt ist der 90. Perzentil des MAEG für den Referenzaufbau mit 300 mm Dicke.

Auch für Beton wurde eine neue Klassifizierung erarbeitet, die in Abbildung 6.10 dargestellt ist, um die Effekte des Klimawandels darstellen und abbilden zu können. Die Klassenbreite wurde beibehalten aber die Anzahl der Klassen um drei erhöht.

Die geringfügigen Abweichungen beider KiST-Karten von den bisher vorhandenen Referenzkarten aus Augter und Kayser (2016) sowie Villaret u. a. (2019b) lassen sich durch die gröbere Auflösung und den unterschiedlichen Datensatz erklären. Der HYRAS-Datensatz wird in diesem Projekt deshalb verwendet, da er die gleiche horizontale und zeitliche Auflösung hat wie die Daten der Klimaprojektionen. Eine Nachprozessierung der Karten auf eine höhere Auflösung ist grundsätzlich möglich, jedoch ist das Ziel des Projektes die Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die betreffenden Regelwerke. Dieses Ziel kann durch den gezielten Vergleich der hier dargestellten Referenzkarten mit KiST-Karten auf der Basis von Projektionen abgeleitet werden. Aus diesem Grund ist die gröbere Auflösung von 5 km in diesem Projekt dem Ziel angemessen.

6.3. Erstellung von KiST-Karten mit projizierten Daten

Anschließend zur Erstellung der Referenzkarten werden die KiST-Karten auf Basis von projizierten Klimamodellen erstellt, um eine zukünftige Veränderung des Klimas in den Richtlinien zur Dimensionierung abbilden zu können. Hierfür wurden in Abschnitt 3.7 die Anforderungen mit dem BMDV-Expertennetzwerk und dem DWD besprochen und die Abweichungen im ansonsten im BMDV-Expertennetzwerk üblichen Vorgehen erläutert. Mit den ausgewählten Datensätzen kann anschließend der Klimazustand der BP 1991-2020 auf der Basis von 3 verschiedenen Klimaszenarien mit jeweils 3 unterschiedlichen Ausprägungen in die Zukunft projiziert werden. Mit dem erstellten, statistischen und auf dem Cloud-basierten gekoppelten deterministisch-stochastischen Rechenmodell aufbauenden Verfahren, werden die Temperaturzustände für jedes Klimaszenario bis in das Jahr 2100 berechnet.

Dann werden KiST-Karten für zukünftige Klimazustände erzeugt. Diese Karten werden auf Veränderungen der Lage der Zone und möglicherweise neu auftauchende Zonen von Temperaturbelastungen untersucht. Sollten in der Zukunft neuere Klimamodelle verfügbar sein, welche von den aktuell verwendeten Modellen abweichen, kann eine Aktualisierung der vorgeschlagenen Änderungen an den Richtlinien notwendig werden.

Um die KiST-Karten mit Daten zum zukünftigen Klima zu erstellen, müssen die im Abschnitt 6.2 angewandten Verfahren auf entsprechende Klimadatensätze angewandt werden. Dazu gibt es theoretisch mehrere Herangehensweisen, zum Beispiel die direkte Verwendung der bias-korrigierten Klimaprojektionsdaten, wie es in diesem Projekt geplant ist. Diese Daten lassen sich entweder nach Klimaszenario und Zeitraum oder

nach Temperaturänderungsniveaus einordnen. In diesem Projekt wird entschieden, dass die Temperaturänderungsniveaus verwendet werden, da die Temperatur und die Solarstrahlung die wichtigste Rolle bei der Bemessung der dimensionierungsrelevanten Klimakenngrößen spielen. Zudem sind in den Klimaprojektionen Temperaturänderungen und Änderungen der Solarstrahlung stark miteinander korreliert, d.h., wenn die Temperatur ansteigt, steigt auch die Solarstrahlung (z.B. Ulrich, 2021).

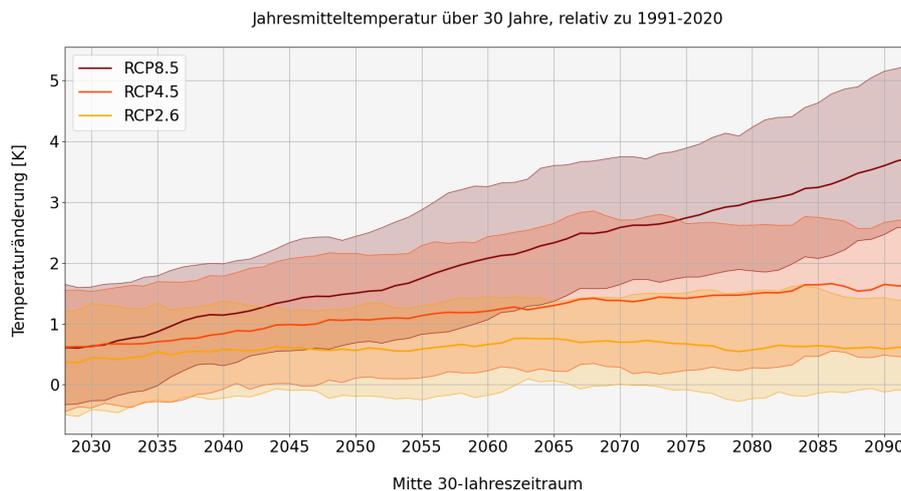


Abbildung 6.11.: Zeitlicher Verlauf der Temperaturänderungen der Gebietsmitteltemperatur in Deutschland für unterschiedliche Klimaszenarien. Abweichungen sind relativ zu 1991-2020.

Abbildung 6.11 zeigt den zeitlichen Verlauf der Änderungen der Jahresmitteltemperatur über Deutschland gegenüber dem Referenzzeitraum 1991-2020. Es ist deutlich zu sehen, dass sich die drei betrachteten Klimaszenarien voneinander unterscheiden, aber auch zwischen den Modellen der einzelnen Szenarien eine große Spannbreite liegt. Beim RCP2.6 erhöht sich die Temperatur um etwa +0,5 bis +0,7 K, ohne dass der Anstieg eine große zeitliche Variabilität aufweist. Innerhalb des Kernensembles schwankt die Erwärmung im RCP2.6 zwischen etwa 0 und +1,5 K. Das RCP4.5 weist einen ansteigenden Trend auf und die Erwärmung gegenüber der Referenzperiode nimmt im Mittel von +0,8 K um 2030 bis auf etwa +1,7 K gegen Ende des 21. Jahrhunderts zu. Die Schwankungsbreite des Kernensembles ist im RCP4.5 größer und liegt bei etwa +/-1,2 K um den Mittelwert. Wie zu erwarten steigt die Temperatur im RCP8.5 am stärksten und der ansteigende Trend bleibt von 2030 bis zum Ende des Zeitraumes etwa gleich stark. Im Mittel des Kernensembles steigt die Temperatur bis 2030 um rund +0,8 K, bis 2095 um rund +3,7 K gegenüber der Referenzperiode. Die Modelle des Kernensembles mit der schwächsten Änderung im RCP8.5 weisen ein etwa 1,2 K

geringeres Änderungssignal auf, während der obere Rand der Projektionen am Ende des Zeitraums etwa 1,5 K oberhalb des Mittelwertes liegt.

Die über das vorher durchgeführte Quantilmapping bias-korrigierten Daten der Klimaprojektionen zu Lufttemperatur, Luftfeuchte und Globalstrahlung werden durch die oben genannten Verfahren genutzt um KiST-Karten im Zuge des Klimawandels für zukünftige Perioden und Klimaszenarien zu erstellen:

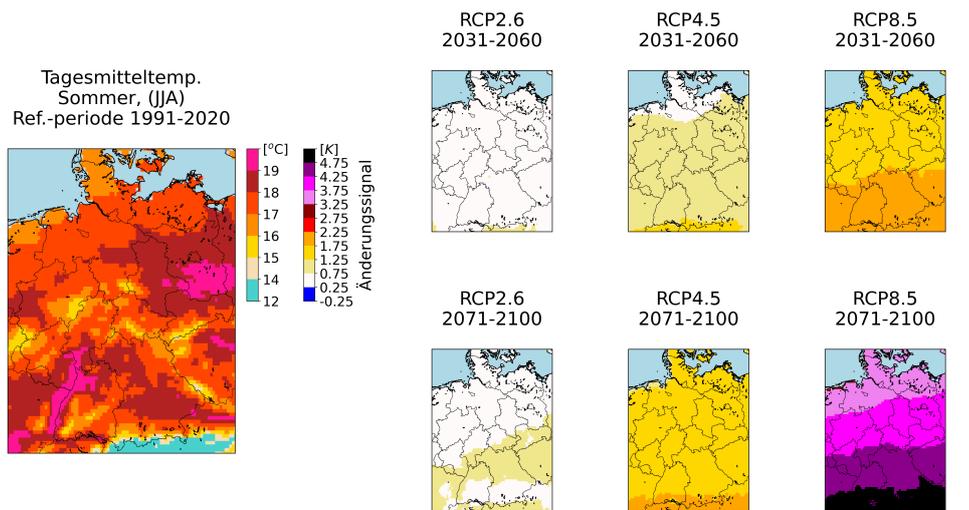
- Zukunftsperioden: Die Periode 2031-2100 ist die betrachtete Zukunftsperiode, der Einfachheit halber wird im Bericht auf die beiden Perioden 2031-2060 und 2071-2100 abgestellt, die nahe bzw. ferne Zukunft.
- Klimamodellensemble: Das verwendete Ensemble, das DWD-Kernensemble, ist eine Auswahl von 6 bis 7 Projektionen pro Klimaszenario, also eine geringe Anzahl von Klimamodellen, die in die Modellierung als Eingangsdatensätze verwendet werden. Die geringe Anzahl der Projektionen erlaubt die einfachere Verarbeitung für Anschlussmodellierung als das komplette Set des DWD-Referenzensembles. Klimaprojektionsensembles erlauben eine Abschätzung der oberen und unteren Grenzen der Klimaänderungen für jedes Szenario. Die Projektionsläufe des DWD-Kernensembles wurden von den Wissenschaftler:innen des DWD so ausgewählt, dass sie den Mittelwert und die Schwankungsbreite eines wesentlichen größeren Ensembles weiterhin abbilden können.
- RCP2.6: Dieses Szenario wird auch als „Klimaschutzszenario“ bezeichnet, da hierfür ab 2050 globale Klimaneutralität mit negativen Emissionen angenommen wird. Das RCP2.6 ist konform mit dem Pariser Klimaabkommen 2015 und somit einer globalen Erwärmung von unter +2 K. Rezente Forschung hat gezeigt, dass dieses Szenario, das ein günstiger Fall für die Klimaanpassung wäre, jedoch nicht mehr plausibel darstellbar ist (Marotzke u. a. 2021).
- RCP4.5: Diese auch als „moderates Szenario“ bezeichnete Szenario sieht den Pfad zur Klimaneutralität als länger anhaltend als das RCP2.6, Klimaneutralität wird dennoch erreicht und die Emissionen erreichen Mitte des 21. Jahrhunderts Werte, die ab etwa 2060 dafür sorgen, dass auf globaler Ebene der Temperaturanstieg gemindert und bei etwa +2,2 K stabil gehalten wird. Für Deutschland hat das RCP4.5 moderate Auswirkungen, jedoch ist auch diese relativ geringe Überschreitung des 2-Grad-Ziels mit einer deutlich höheren Wahrscheinlichkeit extremer Wetterereignisse verbunden, die jedoch in diesem Projekt weniger im Fokus stehen.
- RCP8.5: Dieses Szenario, das auch als „Hochemissionsszenario“ bezeichnet wird, nimmt anhaltende Verbrennung fossiler Brennstoffe und somit zunehmende CO_2 -Konzentrationen an. Dadurch bedingt steigt die Temperatur global bis 2100 um bis zu 5 K gegenüber der vorindustriellen Periode an. Zahlreiche tiefgreifende

Änderungen am globalen Klimasystem beeinflussen regionale Auswirkungen zusätzlich zum großen globalen Temperaturanstieg, sodass sich Großwetterlagen und Niederschlagsmuster sehr stark ändern. Dieses Szenario ist in den Klimaszenarien des DWD-Kernensembles sicherlich das ungünstigste und forderndste, was die Anforderungen an Klimaanpassung betrifft.

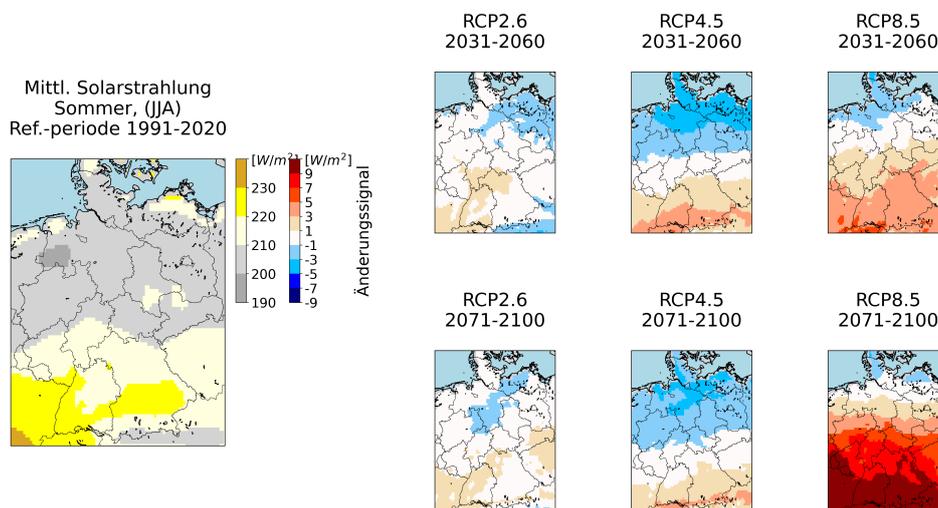
Aus diesen Vorüberlegungen wird klar, dass die Klimaszenarien eine deutlich unterschiedliche Wirkung auf die KiST-Zonen haben werden. Alleine die Änderung der mittleren Temperaturen hat einen großen Einfluss auf die KiST-Rate bei Asphalt, jedoch weniger bei Beton, wo die Solarstrahlung den größten Einfluss hat, da da langsamer Wärmetransport an strahlungsreichen Tagen zu hohen Temperaturgradienten in Betonschichten führt. In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Anwendung der Klimaprojektionen auf die Wirkmodelle für Asphalt und Beton gezeigt. Dabei wird zunächst ein Überblick über die Änderung der wichtigsten Klimakenngrößen gegeben und dann im Anschluss die resultierenden Änderungen der jeweiligen KiST-Zonen diskutiert. Die in diesem Projekt genutzten Wirkmodelle sind in der Hauptsache temperatur- und strahlungssensitiv, weshalb für die Bewertung und Diskussion der Änderungen der Verteilung der KiST-Zonen, ein Blick auf die Klimaänderungen der mittleren sommerlichen Temperatur und Globalstrahlung hilfreich ist. Der Fokus liegt auf den sommerlichen Klimakenngrößen, da diese hauptsächlich wirksam sind bei der Ermüdung und Schädigung von Asphalt- und Betonoberbauten.

6.3.1. Änderung relevanter Klimakenngrößen

Abbildung 6.12 zeigt die Änderungen der sommerliche Temperatur und Globalstrahlung für die nahe und ferne Zukunft für die drei betrachteten Klimaszenarien. Die Temperatur betreffend, zeigt sich ein klares Bild: Im RCP2.6 findet kaum eine Änderung statt mit maximal etwa +1 K gegenüber der Referenzperiode im Süden von Deutschland in der fernen Zukunft. Die größten Teile des Landes weisen eine Erwärmung von etwa +0,5 K auf. Das RCP4.5 zeigt für beide Zukunftsperioden einen deutlichen Nord-Süd-Gradienten der Erwärmung, der etwa 0,5 K beträgt, wobei die Erwärmung im Norden geringer ist als im Süden. Die Erwärmungsrate liegt im RCP4.5 für den Zeitraum 2031-2060 bei +0,7 bis +1,2 K, im Zeitraum 2071-2100 findet eine weitere Erwärmung statt auf +1,3 bis +1,8 K gegenüber der Referenzperiode 1991-2020. Das RCP8.5 zeigt ebenfalls eine stärkere Erwärmung im Süden des Landes als im Norden für beide Zukunftszeiträume. In der nahen Zukunft erwärmen sich die Sommer im Mittel um weitere +1,5 bis +2,0 K, in der fernen Zukunft ist die Erwärmung und auch der Nord-Süd-Gradient mit Werten von +3,4 bis +5,1 K deutlich stärker ausgeprägt.



(a) Tagesmitteltemperaturen



(b) Mittlere Globalstrahlung

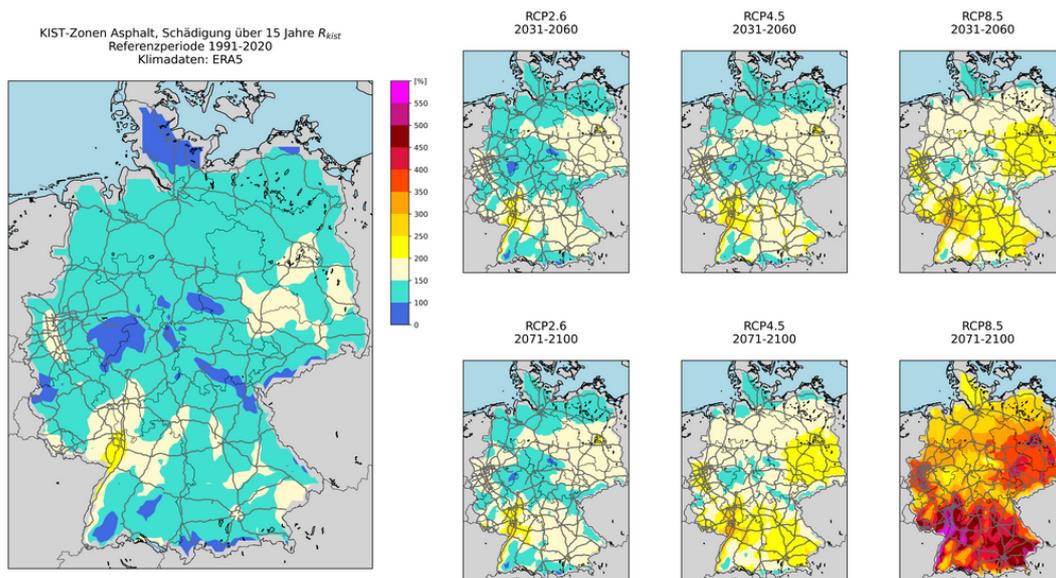
Abbildung 6.12.: Darstellung der Klimadaten für die Referenzperiode 1991-2020 und die zukünftigen Zeiträume 2031-2060 sowie 2071-2100 für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5.

Für die Globalstrahlung zeigt Abbildung 6.12b ein uneinheitliches Bild über die Klimaszenarien und auch in der Detailbetrachtung stimmen die Richtungen der Änderungssignale

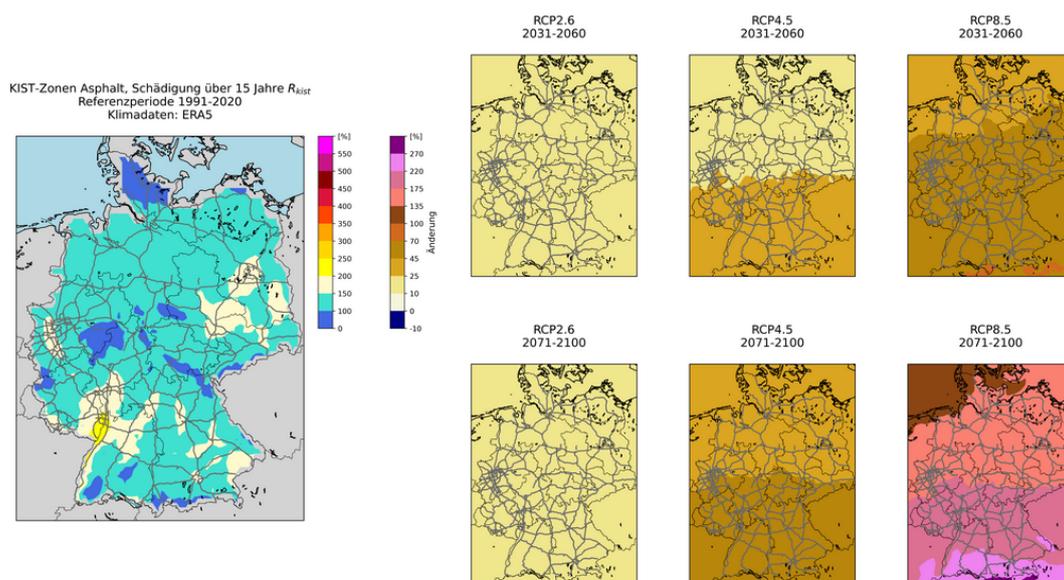
der einzelnen Projektionen nicht miteinander überein, sodass kein klares Signal hervortritt und keine klare Aussage getroffen werden kann. Diese Unsicherheit der Änderung der Globalstrahlung durch den Klimawandel bzw. die Schwierigkeit, diese Größe mit den derzeitigen Klimaprojektionen abbilden zu können, ist auch für dieses Projekt relevant, da die Globalstrahlung einen wesentlichen Einfluss, bei Beton sogar den bestimmenden Einfluss auf die thermisch induzierte Belastung hat. Die Ergebnisse der Auswertung der Klimaprojektionen zeigt, dass im RCP2.6 nur geringfügige Änderungen auftreten dürften, während im RCP4.5 moderate und im RCP8.5 auch stärkere Änderungssignale gezeigt werden. Dabei wird grob für den küstennahen Bereich Deutschlands eine Abnahme der Globalstrahlung und für den Süden eine teils deutliche Zunahme von bis zu 10 % im RCP8.5 für die ferne Zukunft projiziert. Eine Zunahme der Solarstrahlung ist durch die Verlagerung der subtropischen Hochdruckzelle nach Norden plausibel, da damit ein Unterdrücken von Bewölkungsbildung unter Hochdruckeinfluss einhergeht. Die Abnahme der Solarstrahlung im Norden des Landes beträgt zwischen 1 und 5 %, wobei die Ursache dafür in diesem Projekt nicht untersucht worden ist. Möglicherweise wird durch höhere Temperaturen, stärkere Instabilität der unteren Troposphäre und größere Unterschiede zwischen Wasser- und Landoberflächentemperatur vermehrt eine Konvektion begünstigende Ausprägung der Land-Seewindzirkulation simuliert, wie sie in tropischeren Gefilden wie etwa Florida, durchaus üblich ist. Dadurch könnte sich mehr Bewölkung bilden, was jedoch an dieser Stelle nicht weiter untersucht wird.

6.3.2. Zukünftige KiST-Karten Asphalt

Abbildung 6.13 zeigt die absoluten Werte und relativen Änderungssignale der KiST-Raten für Asphalt unter den betrachteten Klimaszenarien für die nahe und ferne Zukunft. Im RCP2.6 ist eine geringe Zunahme der Schädigungsraten feststellbar, jedoch wird die Skala der bestehenden KiST-Zonen für die Referenzperiode auch denen im RCP2.6 auftretenden Verhältnissen gerecht. Für das RCP4.5 trifft dies in der nahen Zukunft auch noch im wesentlichen zu, während in der fernen Zukunft deutlich größere Schädigungsraten auftreten, sodass Werte von über 200 % sich auf die gesamte Fläche der vorher identifizierten vier Hauptregionen mit hoher Belastung erstrecken. Das RCP8.5 zeigt für den Zeitraum 2031-2060 noch moderate Änderungen, sehr ähnlich zu den Auswirkungen des RCP4.5 in der fernen Zukunft. Im Zeitraum 2071-2100 zeigt das RCP8.5 jedoch durch die starke Erwärmung selbst in den kühlestern Regionen des Landes KiST-Raten, die in der Referenzperiode nur im Oberrheingraben auftreten. In den nördlichen Hotspots, also Rheinland und südliches Ostdeutschland, treten nun Werte bis 400 % auf und in den südlichen Regionen Deutschlands bis zu 600 %, was dort etwa eine Verdreifachung bedeutet.



(a) Zukünftige KiST-Zonen für Asphalt



(b) Relative Änderungssignale

Abbildung 6.13.: Darstellung der zukünftigen KiST-Zonen für Asphalt und der relativen Änderungssignale gegenüber der Referenzperiode 1991-2020 für die zukünftigen Zeiträume 2031-2060 sowie 2071-2100 für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5.

Die relativen Änderungen der KiST-Raten für Asphalt zeigen die gleichen Muster, wie die Temperaturanstiege in den unterschiedlichen Klimaszenarien, mit geringeren Änderungen im Norden und höheren im Süden des Landes. Die Größenordnung der Änderung für die KiST-Raten ist nicht linear von der Temperaturänderung abhängig, sondern steigt noch stärker für höhere Temperaturänderungen. So beträgt die relative Änderung der Schädigungsraten im RCP2.6 unter +25 %, im RCP4.5 bis zu +70 % und im RCP8.5 bis über +250 % im Süden des Landes. Die Hotspot-Regionen bleiben im wesentlichen erhalten, jedoch ist durch die im Süden größere Erwärmungsrate dort auch die relative Änderung und somit die resultierende KiST-Rate größer, sodass fast das gesamte Süddeutschland zu einer großen Hotspotregion werden.

In Abbildung 6.14 und Abbildung 6.15 werden die Häufigkeitsverteilungen der absoluten Werte und der relativen Änderungssignale über dem Bundesgebiet und entlang der Autobahnen dargestellt. Bei den absoluten Werten sind die Verteilungen entlang der Autobahnen systematisch leicht zu höheren Werten verschoben, da die Netzdichte des Autobahnnetzes in den sehr warmen (kalten) Regionen des Landes höher (niedriger) ist. Bei den relativen Änderungssignalen sind in den Szenarien RCP2.6 und RCP4.5 nur geringe Unterschiede zu erkennen, während im RCP8.5 für beide Zeiträume jeweils die höchsten und niedrigsten Änderungsraten entlang der Autobahnen weniger häufig auftreten als im Bundesgebiet. Dies ist durch die geringe Autobahndichte ganz im Süden entlang der Grenze zu Österreich und der Schweiz und ganz im Norden nahe der Küsten zu erklären, wo ebendiese besonders hohen und niedrigen Änderungsraten auftreten im RCP8.5.

In der Referenzperiode liegen die absoluten Werte der KiST-Rate für Asphalt mehrheitlich, zu über 70 % im Bereich von 100 bis 150 %. Im RCP2.6 verteilen sich gute 90 % der Bereiche in der Bundesrepublik und entlang der Autobahnen auf die zwei Zonen zwischen 100 und 200 %, es findet also in einem gewissen Teil der Regionen eine Heraufstufung statt. Für das RCP4.5 zeigt die Auswertung, dass sich in der nahen Zukunft noch etwa 90 % der Werte im Bereich von 100 bis 200 % mit einer relativen Mehrheit bei 150 bis 200 % befinden. In der fernen Zukunft befinden sich nur noch 10 % der Werte im Bereich 100 bis 150 %, während die relative Mehrheit Werte zwischen 150 und 200 % aufweist, während ein nicht unerheblicher Teil von etwa 40 % des Bundesgebietes und 50 % der Regionen entlang der Autobahnen KiST-Raten von über 200 % aufweist. Das RCP8.5 zeigt in der nahen Zukunft für das Bundesgebiet noch eine relative Mehrheit mit KiST-Raten von 150 bis 200 %, für die Regionen entlang der Autobahnen liegt der Modus, also die häufigste Klasse, schon bei 200 bis 250 %. Rund 40 % des Bundesgebietes und 50 % der Regionen entlang der Autobahnen weisen im RCP8.5 schon während der nahen Zukunft KiST-Raten von mehr als 200 % auf. In der fernen Zukunft von 2071-2100 liegt der Modus der Verteilung im RCP8.5 bei 350 bis 400 %, wobei mehr als 95 % der Regionen Werte von über 250 % aufweisen, die in

der Referenzperiode noch nicht auftreten. Ein Viertel der Bundesrepublik und etwa ein Drittel der Autobahnen weist Asphalt-KiST-Raten von über 400 % auf.

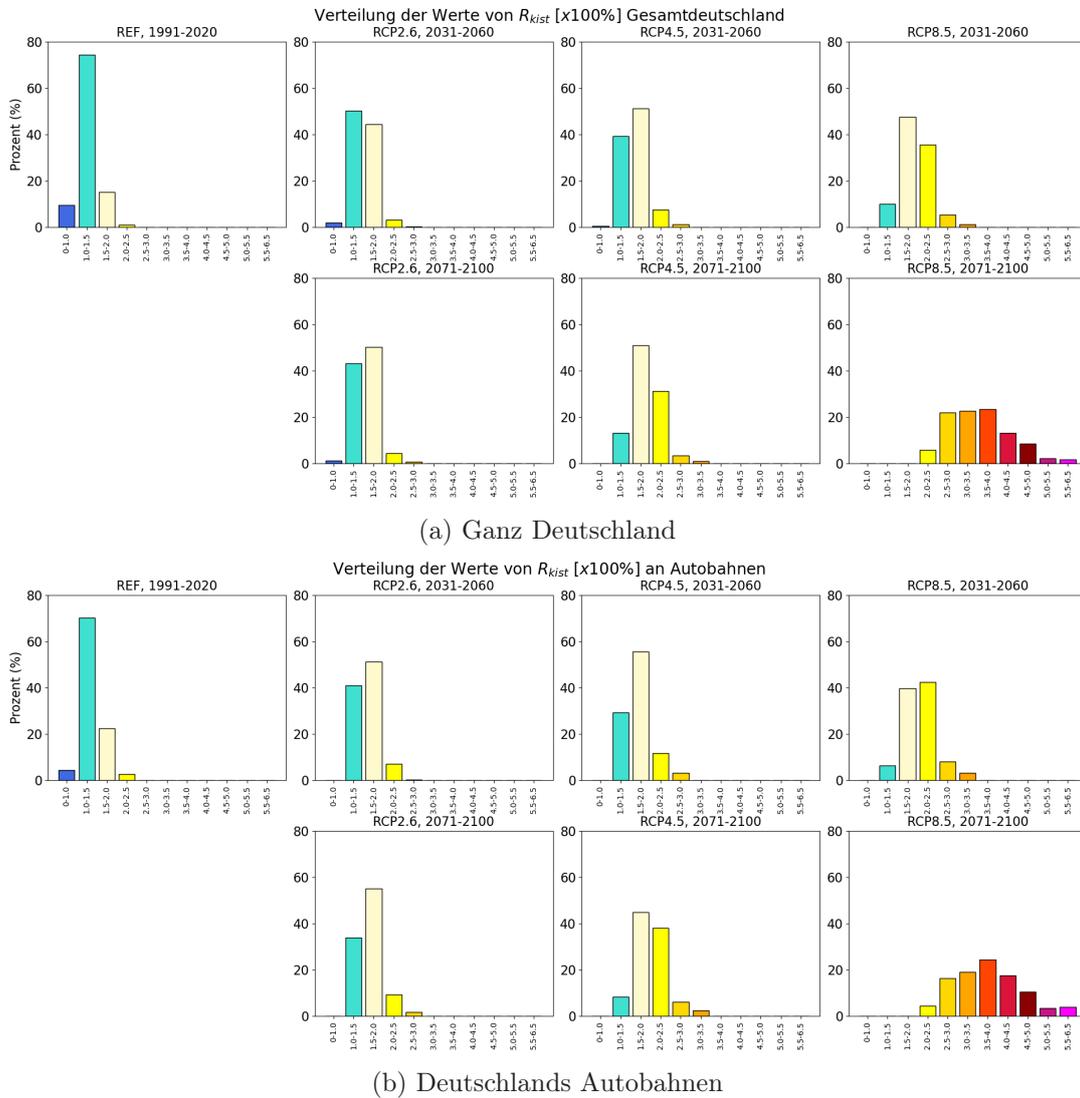
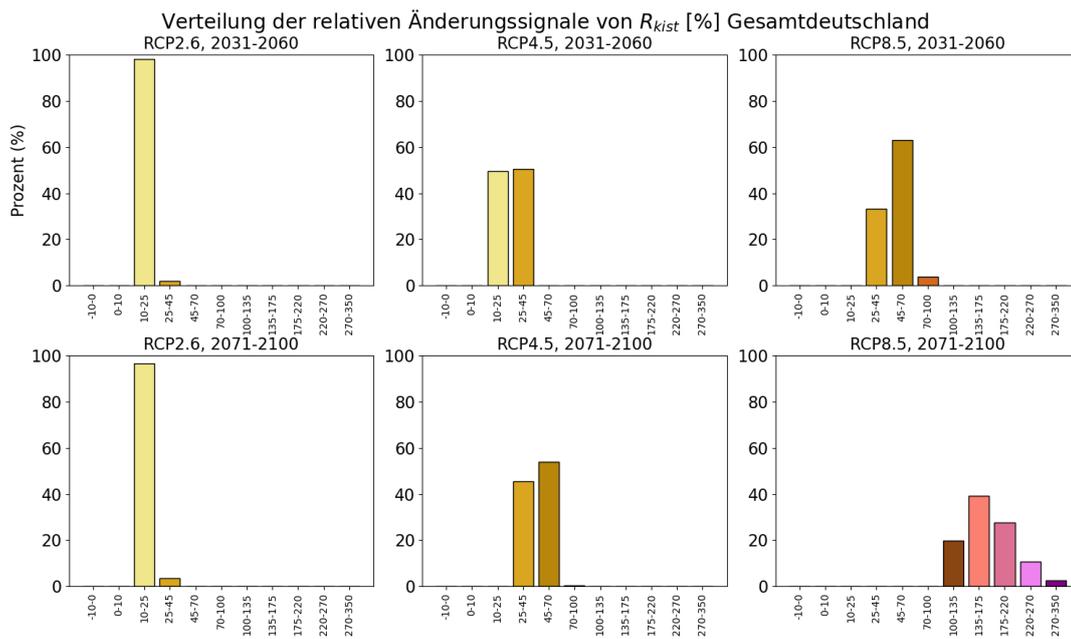
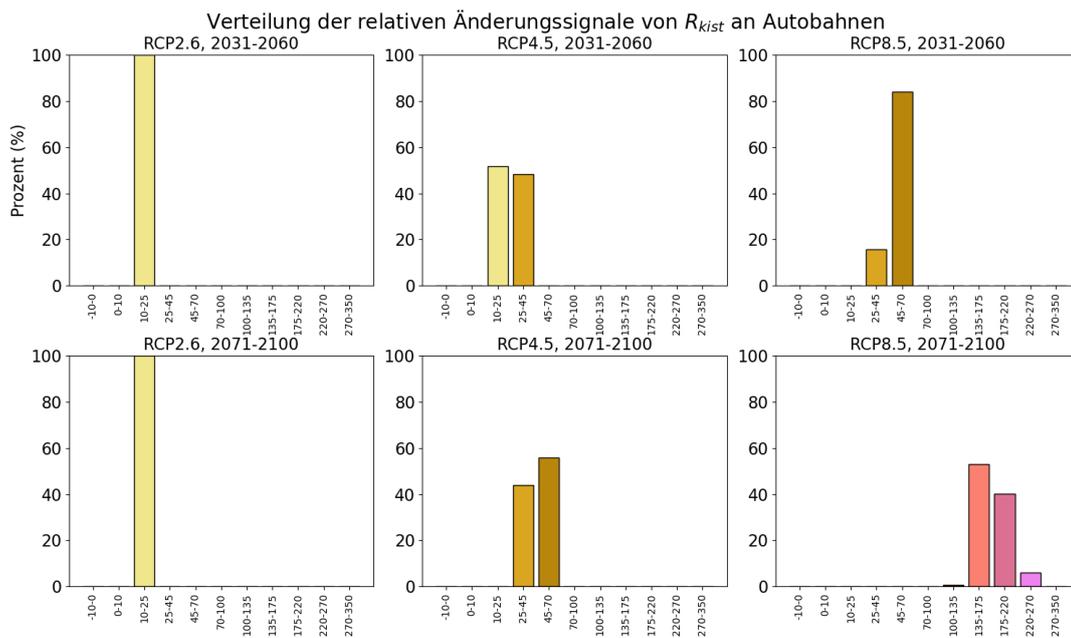


Abbildung 6.14.: Darstellung der Häufigkeiten der KiST-Zonen für Asphalt gegenüber für die Referenzperiode 1991-2020 und die zukünftigen Zeiträume 2031-2060 sowie 2071-2100 für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5.



(a) Ganz Deutschland



(b) Deutschlands Autobahnen

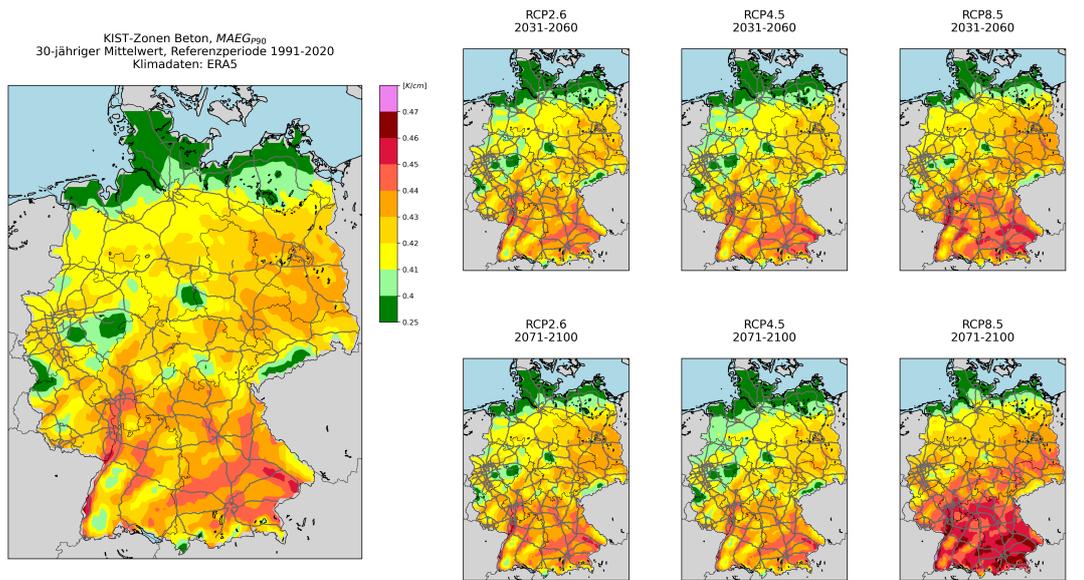
Abbildung 6.15.: Darstellung der Häufigkeiten der relativen Änderungssignale der KiST-Zonen für Asphalt für die Referenzperiode 1991-2020 und die zukünftigen Zeiträume 2031-2060 sowie 2071-2100 für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5.

Die relativen Änderungssignale zeigen für die Klimaszenarien und die beiden betrachteten Räume sehr enge Verteilungen auf, wie auch anhand der Karten zu vermuten ist. In den Szenarien RCP2.6 und RCP4.5 sind die Verteilungen von Autobahn und Bundesgebiet sehr ähnlich, im RCP8.5 konzentrieren sich die relativen Änderungen bei den Autobahnen auf die jeweils mittleren Klassen, die im Bundesgebiet auftreten. Der Modus liegt im RCP2.6 in allen Gebieten bei +10 bis +25 %, im RCP4.5 sind die Werte in der nahen Zukunft zwischen +10 und +45 % sehr ähnlich aufgeteilt und in der fernen Zukunft liegt der Modus mit knapp über der Hälfte der Werte bei +45 bis +70 %, wobei die KiST-Rate an den restlichen Orten etwas weniger stark zunimmt. Im RCP8.5 liegt der Modus bei +45 bis +70 % im Zeitraum 2031-2060, für den späteren Zeitraum 2071-2100 liegt der Modus bei +135 bis +175 %, also etwa einer Verzweieinhalbfachung.

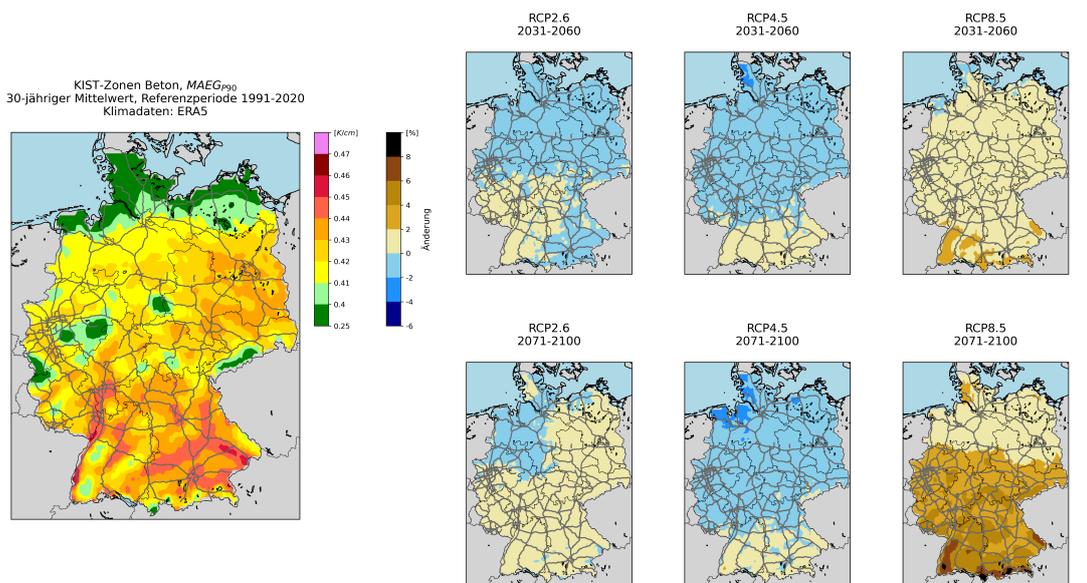
Die Änderung der Schädigungsraten von Asphalt sind für alle Klimaszenarien erheblich, für das RCP2.6 treten moderate, das RCP4.5 deutliche und das RCP8.5 durchgreifende Änderungen auf. Das dauerhaft erhöhte Temperaturniveau macht die Einführung neuer KiST-Zonen für Asphalt nötig und die Erhöhung der Schädigung sollte auch durch eine Veränderung der Asphaltbauweisen adressiert werden. Denn unter den Gegebenheiten von RCP4.5 und RCP8.5 sind die derzeit zum Einsatz kommenden Bauweisen nicht mehr in der Lage den Klimabedingungen und den dadurch zustande kommenden mechanischen Ermüdungserscheinungen standzuhalten.

6.3.3. Zukünftige Kist-Karten Beton

Abbildung 6.16 zeigt die absoluten Werte und relativen Änderungssignale gegenüber der Referenzperiode 1991-2020 für den Parameter MAEG. Die regionale Verteilung mit niedrigen Werten in Küstennähe und höheren Werten im Süden von Deutschland mit Hotspots im Oberrheingraben und im unteren Donaual sind für alle Klimaszenarien im wesentlichen gleich. Im RCP2.6 und RCP4.5 sind für alle Zeiträume von den absoluten Werten her kaum Änderungen auszumachen, im Norden des Landes ist sogar ein geringfügiger Rückgang der Temperaturgradienten zu erkennen. Im RCP8.5 dehnen sich die Zonen höherer Gradienten im Süden des Landes etwas aus, in der fernen Zukunft erscheint auch eine Zone an den bisherigen Hotspots mit um +0,1 K erhöhten Temperaturgradienten. In der Küstenregion bleibt der MAEG im wesentlichen auch im RCP8.5 unverändert. Es zeigt sich für das nördliche Deutschland die einander entgegengesetzte Wirkrichtung der leichten Reduktion der Globalstrahlung bei moderatem bis starkem Temperaturanstieg, der für den MAEG jedoch weniger ins Gewicht fällt.



(a) Zukünftige KiST-Zonen



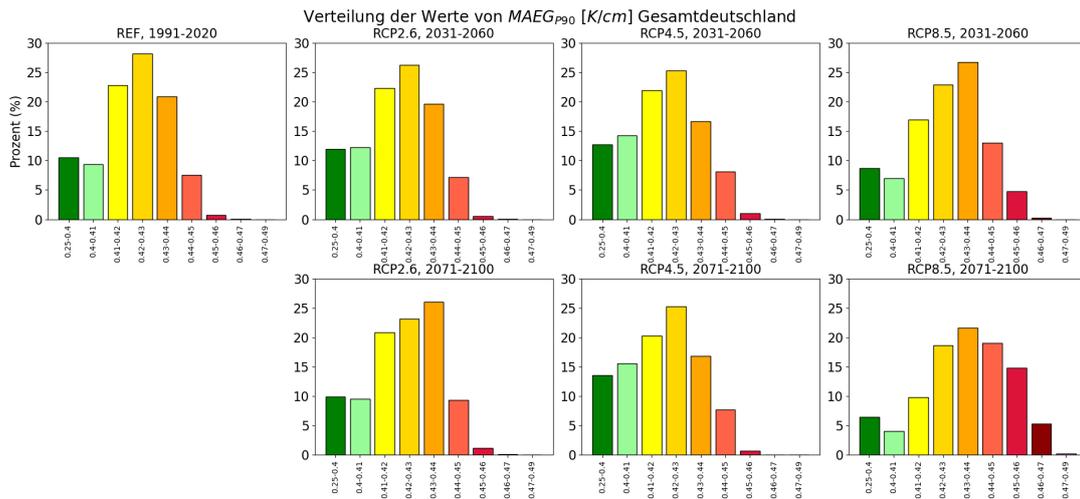
(b) Relative Änderungssignale

Abbildung 6.16.: Darstellung der zukünftigen KiST-Zonen und der relativen Änderungssignale für Beton gegenüber der Referenzperiode 1991-2020 für die zukünftigen Zeiträume 2031-2060 sowie 2071-2100 für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5.

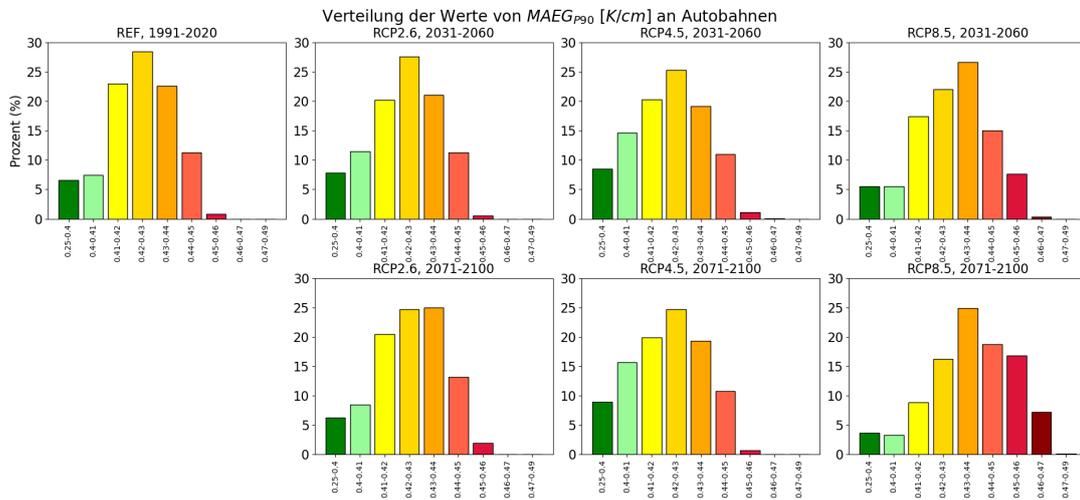
Bei den relativen Änderungssignalen zeigt sich für RCP2.6 und RCP4.5 im wesentlichen, dass keine starke Änderung stattfindet, über weiten Teilen liegen die Änderungsraten zwischen -2 und +2 %. Im RCP8.5 zeigt sich im nördlichen Drittel des Landes bis 2100 ebenfalls keine wesentliche Änderung. Im Süden zeigt sich eine geringe Zunahme von +1 bis +3 % in der nahen Zukunft. Für den Zeitraum 2071-2100 beträgt die Zunahme des MAEG im RCP8.5 im mittleren und südlichen Deutschland +2 bis +6 %, in den südlichen Gebirgsregionen auch +6 bis +10 %. Die höheren Änderungsraten in den südlichen Gebirgsregionen hängen wahrscheinlich mit den dort höheren Änderungen der Solarstrahlung zusammen, da diese Regionen in der Referenzperiode durch häufige dichte Konvektionsbewölkung von starker Solarstrahlung abgeschirmt werden. In der Zukunft nimmt diese Bewölkung dort unter der Annahme des RCP8.5 jedoch deutlich ab, da im RCP8.5 der subtropische Hochdruckgürtel großen Einfluss über Süddeutschland erlangt und dort Konvektion unterdrückt, ein Phänomen, das sich über den Bergländern Süddeutschlands mit einer deutlicheren Bewölkungsreduktion bemerkbar machen dürfte.

Die Histogramme in Abbildung 6.17 und Abbildung 6.18 zeigen die Häufigkeitsverteilung des MAEG und der relativen Änderungssignale über dem Bundesgebiet und entlang der Autobahnen. Die Häufigkeitsverteilung des MAEG ist entlang der Autobahnen für alle Zeiträume und Klimaszenarien etwas stärker zu höheren Werten verschoben im Vergleich zum Bundesgebiet. Dies liegt hauptsächlich daran, dass die Dichte von Autobahnen in den Regionen mit kleinerem MAEG, also den küstennahen Gebieten, geringer ist, als im Rest des Landes. Die relativ eng gesetzten Zonengrenzen zeigen für alle Klimaszenarien und Zeiträume eine ähnliche Form der Verteilung der Absolutwerte. In der Referenzperiode liegt der Modus der Werte bei 4,2 bis 4,3 K/cm, zwei Drittel der Werte liegen zwischen 4,1 und 4,4 K/cm. Im RCP2.6 verschiebt sich der Modus in der fernen Zukunft in die nächst-höhere Klasse. Dies geschieht im RCP4.5 nicht, hier bleibt die Verteilung im Wesentlichen gleich, wie in der Referenzperiode, was an der stärkeren Abnahme der Globalstrahlung im Norden des Landes liegt. Für das RCP8.5 wandert der Modus in der nahen Zukunft um eine Klasse hin zu höheren Werten des MAEG und im zeitraum 2071-2100 bleibt dies auch so, allerdings erhöht sich der Flächenanteil mit größeren Gradienten weiter.

Bei den relativen Änderungen ergeben sich keine erwähnenswerten Unterschiede zwischen den Häufigkeitsverteilungen entlang der Autobahnen im Vergleich zum Bundesgebiet. Im RCP2.6 überwiegt eine geringe Abnahme in der nahen und eine geringfügige Zunahme in der fernen Zukunft, wobei die Änderungen innerhalb von +/ - 2% liegen. Für das RCP4.5 überwiegen leichte Abnahmen von 0 bis -2%, in der fernen Zukunft weist ein kleiner Flächenanteil auch Abnahmen von -2 bis -4% auf. Unter den Bedingungen des RCP8.5 beträgt die relative Änderung in der nahen Zukunft fast überall 0 bis +2% und in der fernen Zukunft ist die Bandbreite größer mit 0 bis +10%. Der Modus liegt dann bei +2 bis +4%, wobei mehr als 50 % der Änderungssignale über +2% liegen.

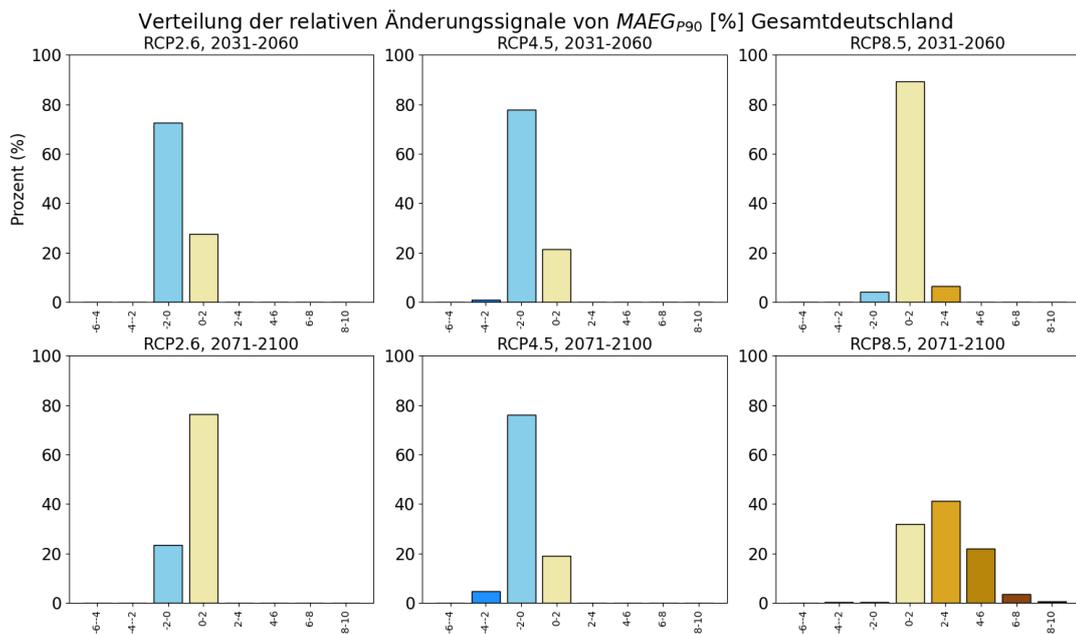


(a) Ganz Deutschland

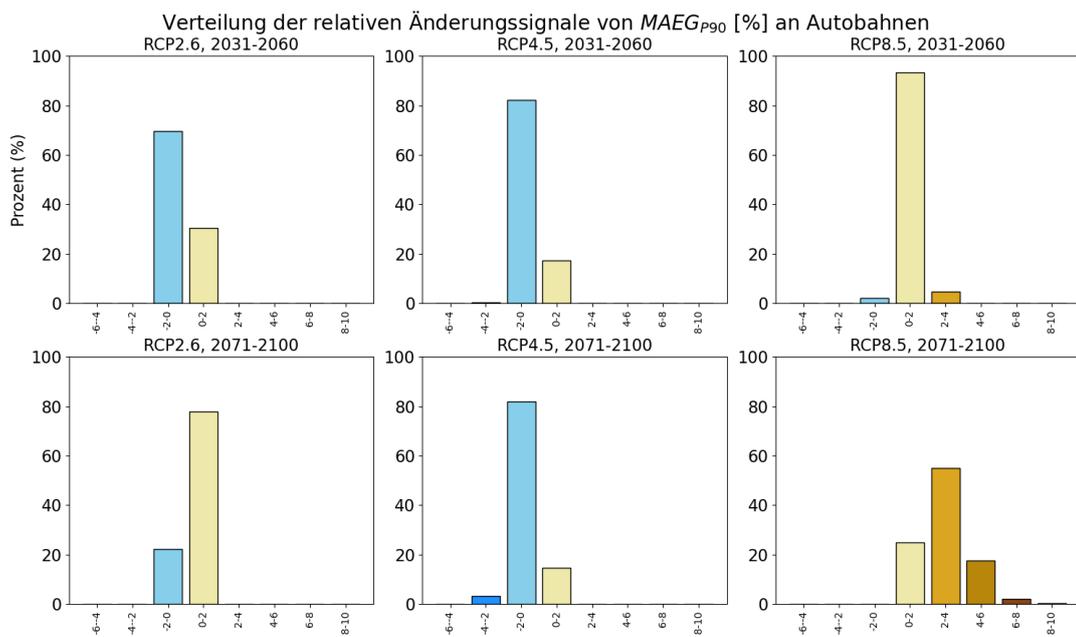


(b) Deutschlands Autobahnen

Abbildung 6.17.: Darstellung der Häufigkeiten der KiST-Zonen für Beton für die Referenzperiode 1991-2020 und die zukünftigen Zeiträume 2031-2060 sowie 2071-2100 für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5.



(a) Ganz Deutschland



(b) Deutschlands Autobahnen

Abbildung 6.18.: Darstellung der Häufigkeiten der relativen Änderungssignale der KiST-Zonen für Beton gegenüber der Referenzperiode 1991-2020 für die zukünftigen Zeiträume 2031-2060 sowie 2071-2100 für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5.

Die Ergebnisse der Modellierung zeigen, dass auch unter den extremen Änderungen im RCP8.5 die Änderungen der Temperaturgradienten in Betonbauweisen nicht sehr groß sein werden, da die Solarstrahlung eine der größten Einflüsse ausübt und für diese kein sehr klares Änderungssignal aus dem Kernensemble herauskommt. Dennoch kann diese geringe Änderung möglicherweise wichtige Änderungen im Regelwerk zur Folge haben, denn die Konstruktionsabmessungen dürften bei einer Änderung von $+0,1K/cm$ etwa bei $+1cm$ nötiger Betondecke liegen.

Ein weitere Grund für weitere Untersuchungen mit neueren oder auch mehr Klimaprojektionen oder einem anderen Ansatz, wie etwa der Berechnung der Sonnenscheindauer aufgrund der Veränderung von Häufigkeiten und Eigenschaften von Großwetterlagen scheint angebracht, denn die Änderungssignale der Solarstrahlung sind bei Klimaprojektionen noch mit Vorsicht zu interpretieren. Außerdem zeigen andere Auswertungen mit anderen Klimaprojektionen, wie zum Beispiel Ulrich (2021), dass sich dann auch größere Änderungssignale für die Solarstrahlung ergeben können, was wiederum für die Berechnung des MAEG Konsequenzen hätte. Die Anpassung von Betonbauweisen zu widerstandsfähigeren Betonsorten oder Betonsorten, die weniger große Temperaturgradienten erfahren bei gleichen Bedingungen sollte angestrebt werden, um die Klimaanpassung der Straßenoberbauten nachhaltig gestalten zu können.

Kapitel 7.

Berücksichtigung des Klimawandels in der Dimensionierung

Für die Dimensionierung ist die Nutzungsdauer ein entscheidender Faktor, welcher maßgeblich mit der Lastwechselzahl (N_{zul}) bzw. der Verkehrsbelastung zusammenhängt. Unter Annahme, dass die aufnehmbare Belastung des Straßenoberbaus konstant bleibt ist die einwirkende Verkehrsbelastung umso geringer, je höher die thermische Belastung ist. Deshalb werden in diesem Kapitel zunächst die Auswirkungen des Klimawandels auf die thermische Belastung von Straßenoberbauten untersucht, indem Klimadaten, Sonnenstrahlung und Lufttemperatur, mit der Temperaturbelastung des Straßenoberbaus (Beton bzw. Asphalt) in Beziehung gesetzt werden. Weiterhin wird eine Sensitivitätsanalyse der Klimadaten auf die thermische Belastung durchgeführt, um die Auswirkungen des Klimawandels auf die thermische Belastung von Straßenoberbauten zu untersuchen. Danach werden für die Klimamodelle Kenngrößen mit zugehörigen Schwellenwerten definiert, die bewerten, ob eine Neuberechnung der KiST-Karten zu empfehlen ist.

7.1. Sensitivitätsanalyse der vorliegenden Modelle

Die Sensitivität der Änderungen der Klimadaten auf die Änderungen der Temperaturbelastung werden durch eine eingehende Sensitivitätsanalyse berechnet. Für die Betonbauweise ist die Temperaturbelastung durch den MAEG definiert, während für die Asphaltbauweise die Temperaturbelastung durch die TFO definiert ist. Da der FI30 ein statistischer Wert ist (siehe Abschnitt 6.1), kann keine Sensitivitätsanalyse für die einzelnen Punkte durchgeführt werden. Hier sollte erwähnt werden, dass die Sonnenstrahlung keinen Einfluss auf den FI30 hat, da die Temperatur der FSS von der Langzeit-Temperatur in der Straße abhängt. Im Vergleich zur Lufttemperatur hat die Sonnenstrahlung weniger Einfluss auf das thermische Verhalten der unteren Schicht des Straßenaufbaus. Dies lässt sich auch in Abschnitt 5.2 erkennen.

Die Sensitivitätsanalyse kann für weitere Abschätzungen von Kenngrößen und Schwellenwerten zur Aktualisierungen der Regelwerke von Relevanz sein und weiterhin auch die Grundlage für eine Interpretation der Auswirkungen des Klimawandels bilden. Mit den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse kann bestimmt werden, wann und welche Kenngrößen und Zonen-Zuordnungen in den Regelwerken geändert werden müssen.

7.1.1. Unabhängige Variablen

Die Anzahl der Variablen in Abschnitt 5.4 wurde bereits auf zwei reduziert: die Sonnenstrahlung und die Lufttemperatur. Um den Änderungsbereich dieser Variablen zu bestimmen, werden folgende Referenzdaten verwendet:

- Aus dem Klimamodell MIROC_R1_REMO2015 für das Klimaszenario RCP8.5 beträgt die Änderung der sommerlichen Lufttemperatur $2,7^{\circ}\text{C}$ und der Sonnenstrahlung (SSR) $2,2\text{ W/m}^2$ für die Periode 2071-2100 im Vergleich mit der Referenzperiode 1991-2020.
- Die Analyse der Durchschnittswerte der solaren Strahlung und Lufttemperatur im Referenzzeitraum 1991 bis 2020 ergibt für die Ensemblemittel der jeweiligen Klimaprojektionen des DWD-Kernensembles die maximale Änderung der durchschnittlichen Sommerwerte für die Lufttemperatur in 2m Höhe (T2M) und SSR innerhalb Deutschlands im Zeitraum 2071-2100 $5,3^{\circ}\text{C}$ und 16 W/m^2 . Beide Werte treten in Süddeutschland auf und stammen aus dem Ensemble der Klimaprojektionen für das RCP8.5-Szenario.

Daher werden die Bereiche der absoluten Änderungen der Lufttemperatur von 0°C bis 10°C gewählt. Die Änderung der Sonnenstrahlung wird als die relativen Änderungen von 6 % bis 15 % umgerechnet. Der Grund für die relative Änderung anstelle der absoluten Änderung der SSR ist, dass die SSR in der Nacht Null beträgt. Die relative Änderung der SSR ist daher eine genauere Darstellung der Änderung der SSR während des Tages.

7.1.2. Sensitivitätsanalyse der Betonbauweise

Die Auswirkungen der Lufttemperatur und der Sonnenstrahlung werden sowohl auf Modell- als auch auf statistischer Ebene untersucht. Auf der Modellebene wird zunächst ein repräsentativer Tag gewählt, anschließend wird die stündliche Änderung der MAEG berechnet und abgebildet. Auf der statistischen Ebene wird die stündliche Änderung der MAEG in einem Jahr analysiert. Die Verteilung der MAEG wird außerdem analysiert und das 84. Perzentil für verschiedene Jahre gegenübergestellt.

Sensitivitätsanalyse für einen Tag

Gemäß der Berechnung in Abschnitt 5.4 erreicht der maximale MAEG Anfang Februar das 84. Perzentil des Jahres. Daher wird der Tag 01.02.2003 für die Analyse ausgewählt. Die Wetterdaten dieses Tages sind in Abbildung 7.1 dargestellt.

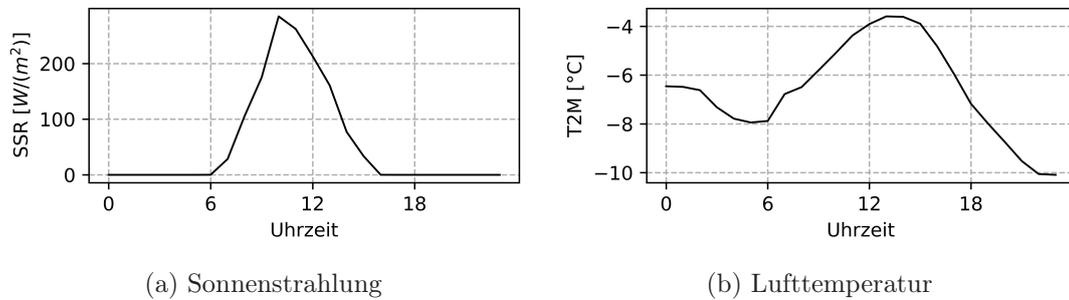


Abbildung 7.1.: Klimadaten am 01.02.2003 an Punkt 51,34 ° N, 12,37 ° E, in der Nähe von Leipzig. Hier ist die Sonnenstrahlung (SSR) in W/m² und die Lufttemperatur (T2M) in °C dargestellt.

Zunächst werden die Werte der Lufttemperatur um 1 °C bis 10 °C für jeden Stundenwert erhöht, wie in Abbildung 7.2 dargestellt ist.

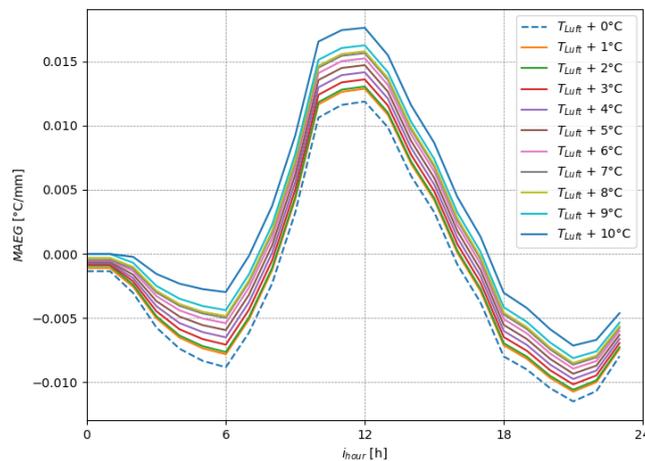
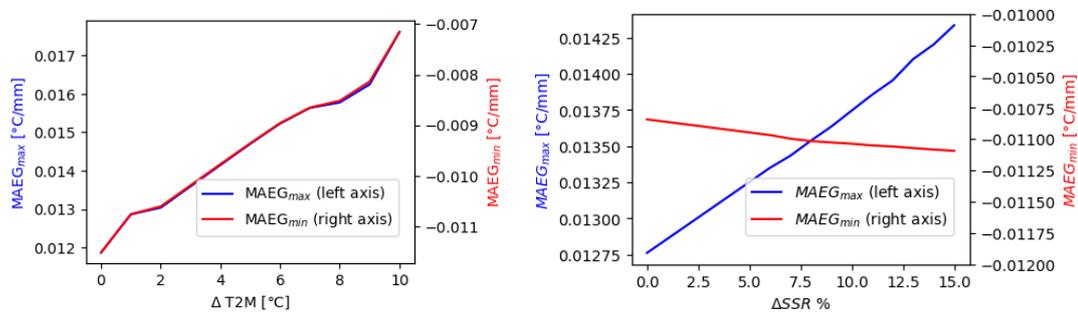


Abbildung 7.2.: Sensitivitätsanalyse der Betonbauweise am 01.02.2003 für die Lufttemperatur

Für die Mitternachtsstunde $i_{hour} = 0$ ist die einzige Klimavariablen für das thermische Modell die Lufttemperatur. Daher steigt mit der Erwärmung der Lufttemperatur

entsprechend der MAEG in der Mitternachtsstunde an. Dieser Mitternachtswert ist ein konvergierter Wert nach einem längeren Zeitraum, siehe auch Abschnitt 4.1. Dieser konvergierte Wert der Straßenoberflächentemperatur entspricht der Lufttemperatur. Es ist daher anzunehmen, dass bei einer quasi konstanten Temperatur an der Unterkante des Straßenmodells ein höherer MAEG vorliegt, wenn die Oberflächentemperatur der Straße steigt. Die Geometrie der Temperaturkurve ändert sich nicht signifikant, da die Richtung der Änderung der Lufttemperatur und der Sonnenstrahlung identisch sind. Obwohl die Lufttemperatur steigt, sind die absoluten Änderungen der Lufttemperatur gleich, da die Gesamtenergiezufuhr in das Straßenmodell unverändert bleibt.

Die Temperaturkurven werden linear mit der Änderung der Lufttemperatur verlegt. Um diese Verschiebung deutlicher zu sehen, sind die maximalen und minimalen Werte des MAEG in Abbildung 7.2 dargestellt. Werden die numerischen Fehler außer Acht gelassen, steigen die maximalen und minimalen Werte des MAEG linear mit dem Inkrement der Lufttemperatur.



- (a) Die Beziehung zwischen MAEG und der Änderung der minimalen und maximalen Lufttemperaturen (b) Die Beziehung zwischen der Sonnenstrahlung und dem MAEG.

Abbildung 7.3.: Sensitivitätsanalyse des Temperaturgradienten MAEG bei der Betonbauweise am 01.02.2003 für Lufttemperatur und Sonnenstrahlung

Die Kurven der maximalen und minimalen MAEG-Werte sind in Abbildung 7.3a identisch, in diesem Beispiel beträgt $\Delta MAEG_{10^{\circ}C-10^{\circ}C} = 0,005^{\circ}C/m$. Daher beträgt die Anstiegsrate des MAEG $0,000\,574\,7^{\circ}C/(m^{\circ}C)$. Das Sensitivitätsanalyse-Verfahren wird auch für den Tag 01.08.2003 durchgeführt, um die Anstiegsrate im Sommer zu bewerten. Die Anstiegsrate des MAEG im Sommer beträgt $0,000\,431\,2^{\circ}C/(m^{\circ}C)$. Der Grund für die geringere Erhöhung des MAEG ist die bereits höhere Lufttemperatur bzw. TFO im Sommer, was eine größere Energiezufuhr erfordert, um einen höheren MAEG zu erzielen.

Die Sensitivitätsanalyse der SSR (siehe auch in Glossar $Q_{rad,solar}$) ist in Abbildung 7.4 dargestellt. Wie bereits diskutiert, wird eine relative Verstärkung der Sonnenstrahlung

eingeführt, anstatt des absoluten Wertes der Sonnenstrahlung. In Abbildung 7.4 liegt der Faktor für die Verstärkung bei 1,06 bis 1,15. Da die Sonnenstrahlung in der Nacht Null ist, sind die konvergierten Ergebnisse am Anfang der Berechnung gleich. Mit Sonnenaufgang steigt die Sonnenstrahlung an und der MAEG steigt entsprechend. Wenn die Sonnenstrahlung nach 11 Uhr abnimmt, beginnt der MAEG zu sinken. Um 6 Uhr erreicht die Sonnenstrahlung wieder Null, die Änderung des MAEG wird jetzt wieder durch die Temperatur dominiert und die MAEG sind wieder identisch.

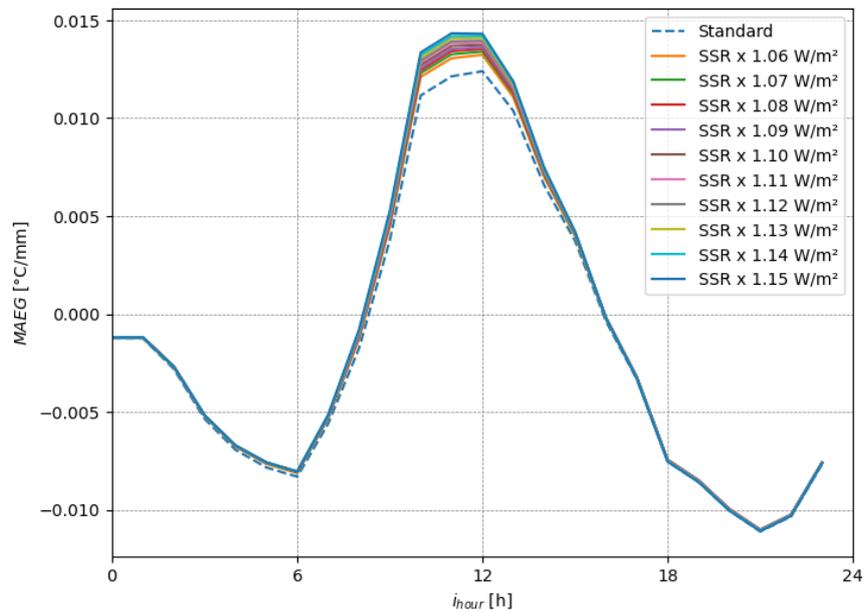


Abbildung 7.4.: Sensitivitätsanalyse der Betonbauweise am 01.02.2003 Tag für Sonnenstrahlung

Anhand von Abbildung 7.3b lässt sich erkennen, dass der maximale Wert des MAEG von der Sonnenstrahlung abhängig ist, während der minimale Wert durch die Lufttemperatur bestimmt wird. Wenn die Solarstrahlungsverstärkung von 0 auf 15% steigt, steigt der maximale Wert des MAEG von $0,012\ 761\ ^\circ\text{C}/\text{mm}$ auf $0,014\ 336\ ^\circ\text{C}/\text{mm}$. Daraus ergibt sich eine Anstiegsrate des MAEG $0,000\ 105\ ^\circ\text{C}/\text{m}$ pro % der Sonnenstrahlung.

Das Sensitivitätsanalyse-Verfahren wird auch für den 01.08.2003 durchgeführt, um die Anstiegsrate im Sommer zu bewerten. Die Anstiegsrate des MAEG beträgt im Sommer $0,000\ 301\ ^\circ\text{C}/\text{m}$ pro % der Sonnenstrahlung. Der Grund für die größere Erhöhung des MAEG ist die höhere Sonnenstrahlung im Sommer, was eine größere Energiezufuhr bei gleicher prozentualer Veränderung bedeutet.

Aus dieser Sensitivitätsanalyse lässt sich ableiten, dass der maximale Wert bzw. die

obere Grenze des MAEG durch die Sonnenstrahlung bestimmt wird, während der durchschnittliche Wert bzw. die untere Grenze des MAEG durch die Lufttemperatur bestimmt wird. Wenn die 84., 92. oder 97,5. Perzentile in den KiST-Karten berücksichtigt werden, wird die räumliche Verteilung des MAEG erheblich durch die räumliche Verteilung der Sonnenstrahlung beeinflusst.

Trotzdem sind die Änderungen von SSR und T2M, welche durch den Klimawandel entstehen, unterschiedlich. Mit den projizierten Wetterdaten aus den Klimamodellen in Abschnitt 3.7 ist die Änderung der Sonnenstrahlung so gering, dass die Änderung der KiST-Karten, die durch die Sonnenstrahlung verursacht wird, gering ist. Da die jährlich durchschnittliche Änderung der Sonnenstrahlung in einer Zeitspanne von 30 Jahre sehr gering ist, wird die Änderung der KiST-Karten hauptsächlich durch die Änderung der Lufttemperatur verursacht.

Zusammenfassend wird die zeitliche Änderung der KiST-Karten hauptsächlich auf die Änderung der Lufttemperatur zurückzuführen sein, während die räumliche Verteilung der KiST-Karten hauptsächlich durch die Sonnenstrahlung bestimmt wird. Dies ist auch in den KiST-Karten in Anhang 6.2 dargestellt.

Sensitivitätsanalyse für die MAEG-Verteilung in einem Jahr

Für die Sensitivitätsanalyse der MAEG-Verteilung werden 2 Punkte aus 4 Jahren (2001, 2003, 2008 und 2009) ausgewählt. Punkt 1 wird zufällig aus der Dakota-Software ausgewählt, die sich an der Position in der Nähe von Trier befindet (Länge = 6,664 297 141, Breite = 49,600 747 64). Punkt 2 ist von der Position in der Nähe von Bremen (Länge = 8,611 972 999, Breite = 53,778 521 33).

Tabelle 7.1 zeigt die Durchschnittswerte der Wetterdaten-Kenngröße T2M und SSR aus den Jahren 2001, 2003, 2008 und 2009. Das Jahr 2003 stellt ein extremes Jahr im Zeitraum von 2001 bis 2015 dar. Im Jahr 2003 war die Durchschnittstemperatur (19,650 °C) und die Sonnenstrahlung (236,53 W/m²) höher als in den anderen Jahren. Obwohl die Durchschnittstemperaturen in den Jahren 2003 und 2009 sehr ähnlich sind, war die solare Strahlung im Jahr 2009 etwa 4,2% höher als im Jahr 2001. Auf der anderen Seite war die durchschnittliche Sonnenstrahlung im Jahr 2001 und 2008 sehr ähnlich, die durchschnittliche Temperatur im Jahr 2008 war jedoch etwa 1,6% niedriger als im Jahr 2001.

Der höchste 84. Perzentil-MAEG erscheint im wärmsten Jahr 2003. Die 84. Perzentil-MAEG in 2001 und 2008 sind gleich und der MAEG in 2009 ist größer als diese beiden Jahre für größere SSR-Werte. Im Vergleich zu Punkt 2 zeigt Punkt 1 größere MAEG. Räumlich liegt Punkt 2 im nördlichen Niederungsgebiet Deutschlands, während Punkt 1 im südlichen Rheinland liegt. Die durchschnittlichen T2M- und SSR-Werte an Punkt 1 sind

im Allgemeinen größer als die Werte an Punkt 2. Daher sind die MAEG an Punkt 1 größer als die MAEG an Punkt 2. Grund dafür sind die größeren durchschnittlichen T2M- und SSR-Werte.

Tabelle 7.1.: Vergleich zwei Punkte aus den Jahren 2001, 2003, 2008 und 2009.

Jahr	T2M [°C]	SSR [W/m ²]	MAEG _{84,1} [°C/mm]	MAEG _{84,2} [°C/mm]
2001	17,178	212,12	0,0131	0,0098
2003	19,650	236,53	0,0172	0,0120
2008	17,452	215,57	0,0132	0,0099
2009	17,183	221,07	0,0145	0,0109

Die detaillierten Verteilungen der MAEG in Punkt 1 und 2 sind in Abbildung 7.5 und Abbildung 7.6 dargestellt. Die Verteilung wird als schwarze Linie an eine Lognormalverteilung (Gleichung 5.1) angepasst, wie sie in Villaret u. a. (2019b) beschrieben ist. Die Anpassungsparameter (μ , σ und x_0) werden in jeder Unterfigur (mu, std und x_0) dargestellt.

In Abbildung 7.5b beträgt das 84. Perzentil des MAEG an Punkt 1 in 2003 0,0172 °C/mm, was sich aus den höchsten Mittelwerten von SSR und T2M ergibt. Die Ergebnisse an Punkt 1 für 2001 (Abbildung 7.5a) und 2008 (Abbildung 7.5c) sind sehr ähnlich, da die Mittelwerte von T2M und SSR sehr ähnlich sind. Trotzdem sind die Verteilungsparameter (mu, std und x_0) nicht identisch. Dies liegt daran, dass die Verteilungsparameter nicht nur von den Mittelwerten, sondern auch von der Verteilung der T2M und SSR abhängen. Daraus lässt sich ableiten, dass die Mittelwerte der T2M und SSR ein gutes Signal für die 84. Perzentile der MAEG-Verteilung sind, aber nicht ausreichend für die Beschreibung der Verteilung der MAEG. Interessanterweise ist der MAEG für 2009 größer als der MAEG für 2001 und 2008, obwohl die durchschnittliche Lufttemperatur dieser drei Jahre sehr ähnlich ist. Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, werden die größeren Perzentile durch die Sonnenstrahlung bestimmt. Da die Sonnenstrahlung 2009 größer ist als 2001 und 2008, sind die MAEG von 2009 größer als die von 2001 und 2008.

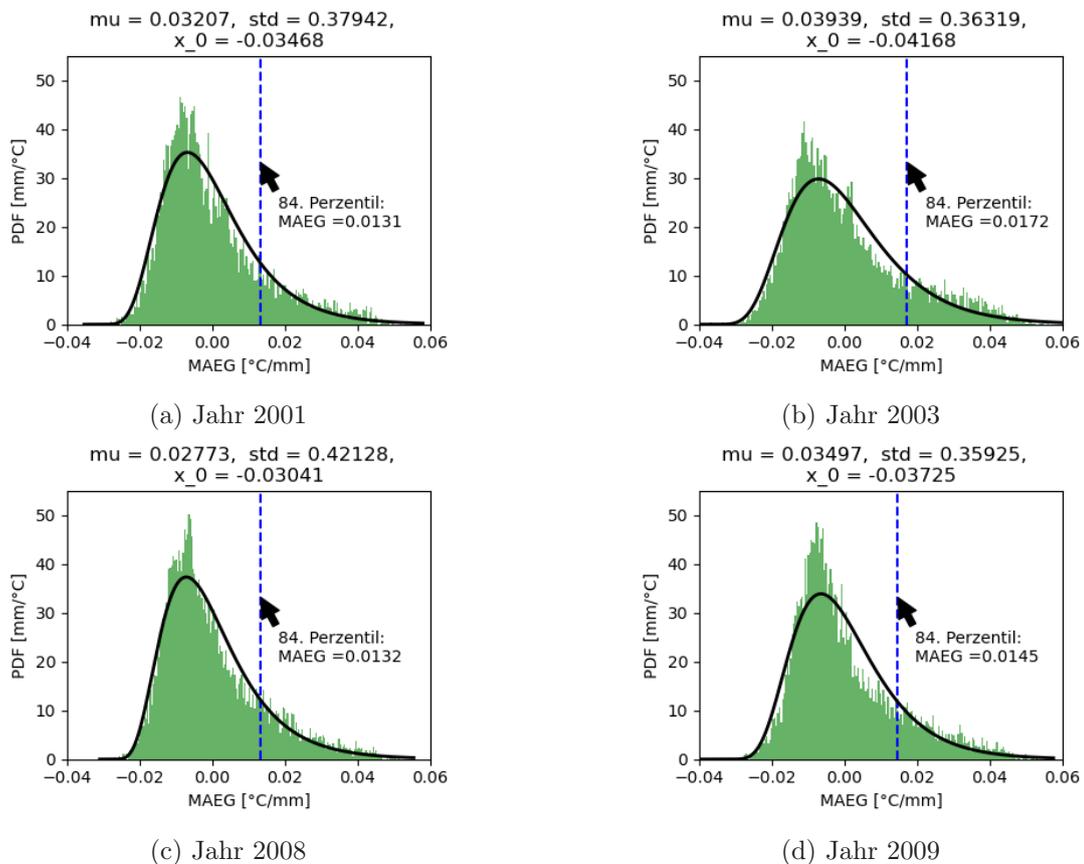


Abbildung 7.5.: Vergleich der MAEG der 4 Jahre in Punkt 1.

Hinsichtlich Punkt 2 in Abbildung 7.6 lässt sich erkennen, dass die MAEG-Verteilungen jedes Jahres bei Punkt 2 schlanker sind als die bei Punkt 1: die Spitze der Verteilung ist höher und die Verteilung ist schmaler. Trotzdem ändern sich die jährlichen MAEG-Verteilungen grundsätzlich in gleicher Richtung wie bei Punkt 1. Bei beiden Punkten sind die Mittelwerte (μ) der MAEG-Verteilung von 2003 und 2009 größer als der von 2001 und 2008, weiterhin sind die 84. Perzentile von 2001 und 2008 jedoch ähnlich. Dies liegt daran, dass die T2M und SSR in Punkt 2 in jedem Jahr räumlich anders sind als die in Punkt 1, aber die zeitliche Entwicklung dieser beiden Punkte aufgrund des Klimawandels ähnlich sind. Das bedeutet, dass durch die Änderung der Klimadaten die zeitliche Änderung der MAEG in Punkt 1 und Punkt 2 beschrieben werden kann, während die detaillierten räumlichen Verteilungen der MAEG in Punkt 1 und Punkt 2 durch die räumliche Verteilung der Sonnenstrahlung und Lufttemperatur bestimmt werden. Bei der Erstellung der KiST-Karten müssen die räumliche Verteilung und

zeitliche Entwicklung der MAEG gleichzeitig berücksichtigt werden.

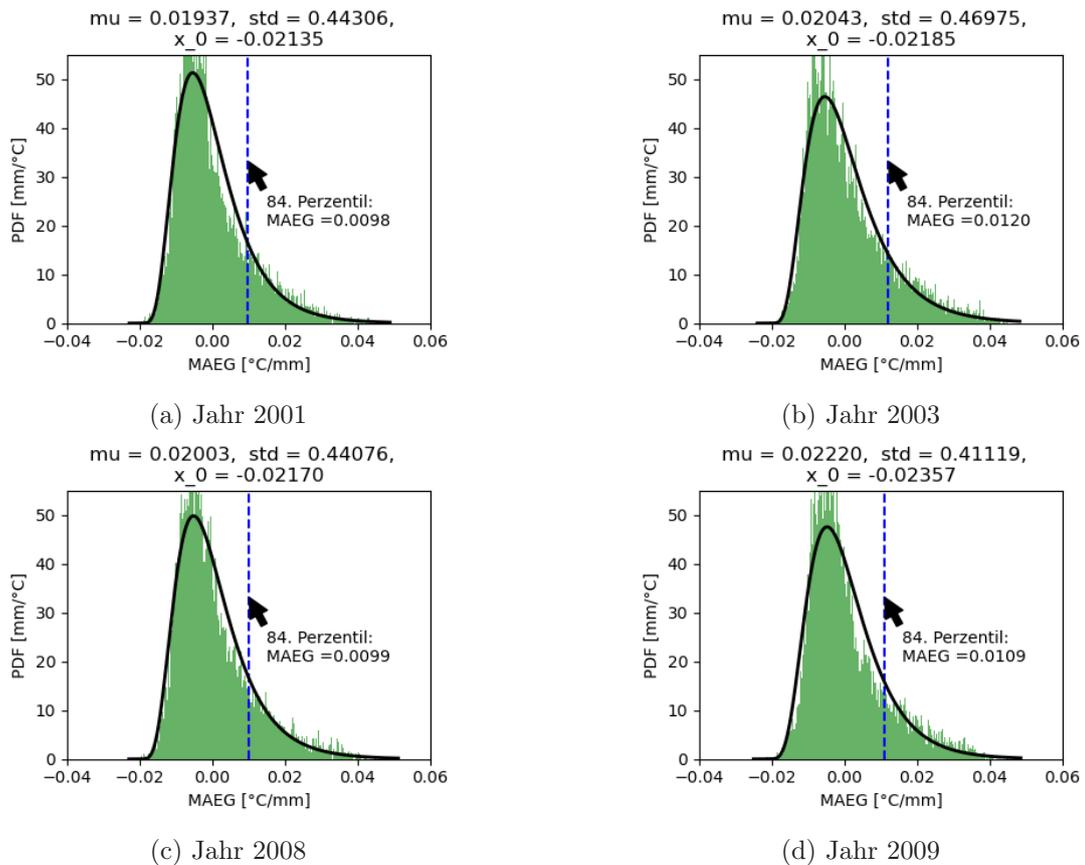


Abbildung 7.6.: Vergleich der MAEG der 4 Jahre in Punkt 2.

Durch diese Sensitivitätsanalyse der MAEG in verschiedenen Jahren und an unterschiedlichen Positionen kann festgestellt werden, dass der durchschnittliche Wert der Wetterdaten SSR und T2M ein gutes Signal ist, um die Veränderungen der 84. Perzentile der MAEG-Verteilung für verschiedene Positionen widerzuspiegeln. Es ist jedoch zu beachten, dass obwohl die 84. Perzentile unterschiedlicher Jahre ähnlich sind, die Verteilungsparameter (μ , std und x_0) Unterschiede aufweisen können. Es ist anzunehmen, dass beim Verwenden des 84. Perzentils Informationen verloren gehen. In wie weit das 84. Perzentil die räumliche Verteilung und zeitliche Entwicklung der MAEG beschreiben kann, muss weiter untersucht werden.

7.1.3. Sensitivitätsanalyse der Asphaltbauweise

Im folgenden Abschnitt werden die KiST-Methode sowie das EPM für die Berechnung der TFO und ncT der Asphaltbauweise dargestellt. Für die KiST-Methode wird die TFO und ncT direkt durch die Wetterdaten mit einer Annäherungsfunktion aus Augter und Kayser (2016) bestimmt. Für die EPM-Methode wird die TFO und ncT anhand der Wetterdaten mit einem thermischen Modell berechnet. Es konnte festgestellt werden, dass die Ergebnisse aus beiden Methoden ähnlich sind. Im Vergleich zum EPM, hat die KiST-Methode den Vorteil, dass die Berechnung der TFO und ncT sehr schnell ist, wie in Augter und Kayser (2016) bereits erläutert.

Berechnung der TFO mit der KiST-Methode

Gemäß der Regressionsformel aus Augter und Kayser (2016) (Seite 27, Tab. 4), führt jedes Grad ansteigende Lufttemperatur zu einem Anstieg von $0,949\text{ }^{\circ}\text{C}$ der durchschnittlichen Oberflächentemperatur \bar{T} . Auf der anderen Seite führt ein Anstieg der Sonnenstrahlung um 20 W/m^2 (ca. 10% der durchschnittlichen Sonnenstrahlung) zu einem Anstieg von $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ der durchschnittlichen Oberflächentemperatur. Die SSR und T2M höherer Ordnung sind durch die Änderung der Oberflächentemperatur weniger signifikant, so dass diese hier vernachlässigt werden kann.

Für die tägliche Amplitude der Oberflächentemperatur beträgt die Anstiegsrate für jedes Grad an Erhöhung der Lufttemperatur $0,84\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$. Auf der anderen Seite wird eine Erhöhung der Sonnenstrahlung um 20 W/m^2 (ca. 10% der durchschnittlichen Sonnenstrahlung) zu einer Erhöhung der durchschnittlichen Oberflächentemperatur von $0,88\text{ }^{\circ}\text{C}$ führen.

Sowohl der tägliche Durchschnitt als auch die tägliche Amplitude der TFO reagieren empfindlicher auf die Änderung der Lufttemperatur als die Änderung der Sonnenstrahlung. Auf der anderen Seite ist die Änderung der T2M größer mit einer Änderung der klimatischen Bedingungen als die Änderung der SSR. Daher werden die KiST-Karten stärker von den Werten der Lufttemperatur beeinflusst, was den KiST-Karten in Abschnitt 6.2 und Abschnitt 6.3 entnommen werden kann.

Es sollte beachtet werden, dass die KiST-Karten durch die Schadenssumme erzeugt wird, welche auf der Tabelle des Schadenspotentials (Augter und Kayser 2016, Seite 5, Tab. 1) basiert. Für die Erstellung dieser Tabelle sind wiederum die Clusterung der TFO und ncT erforderlich. Daher erfordert die Sensitivitätsanalyse der KiST-Methode selbst das Clustering-Verfahren, welches zu zeitintensiv, um in diesem Projekt berechnet zu werden. Daher wird auf eine Aktualisierung der Häufigkeitsverteilung von ncT und

TFO verzichtet. Für die KiST-Karten für die Asphaltbauweise in Abschnitt 6.2 und Abschnitt 6.3 wird die Tabelle aus Augter und Kayser (2016) verwendet.

Berechnung der TFO mit EPM

Eine Sensitivitätsanalyse von TFO mit T2M und SSR wird im Folgenden mit dem EPM durchgeführt, um den Einfluss der Klimadaten auf die Temperaturverteilung in den Asphaltsschichten zu untersuchen.

Zunächst werden die Werte der Lufttemperatur um 1 °C bis 10 °C für jeden Stundenwert erhöht, wie in Abbildung 7.7 dargestellt. Wie bei der Betonbauweise ist um Mitternacht $i_{hour} = 0$ Stunde die Lufttemperatur der einzige Umgebungsfaktor für das thermische Modell. Deshalb liegt es ein höherer TFO-Wert vor, wenn die Lufttemperatur steigt. Die Geometrie der Temperaturkurve ändert sich nicht signifikant, da die zeitliche Entwicklung der Lufttemperatur und der Sonnenstrahlung gleich sind. Obwohl die Anfangslufttemperatur steigt, bleibt die zeitliche absolute Änderung der Werte gleich, da die Gesamtenergiezufuhr im Straßenmodell unverändert bleibt.

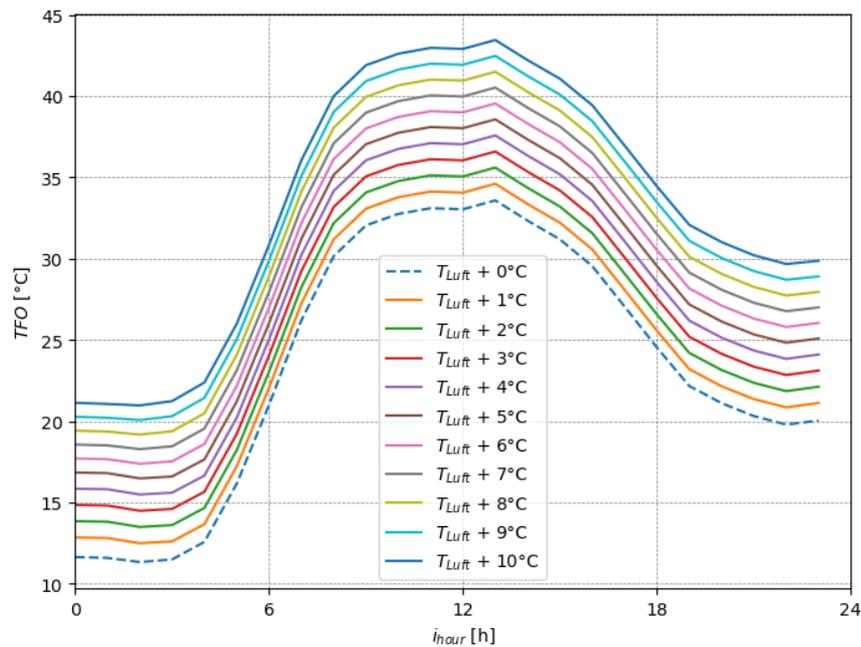
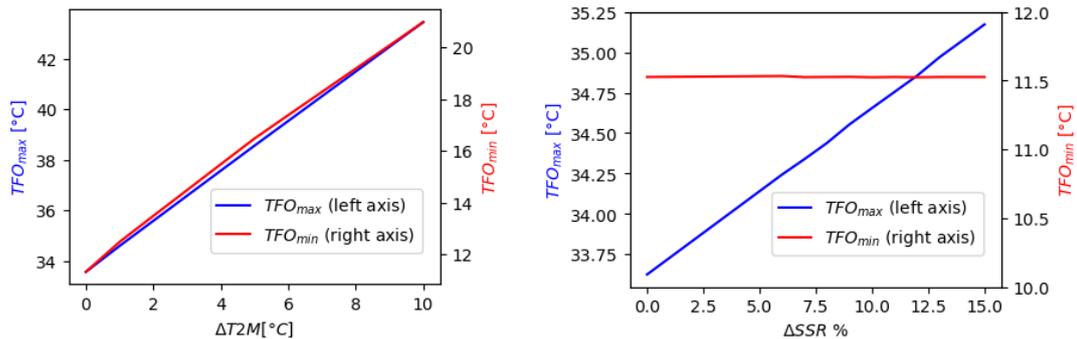


Abbildung 7.7.: Sensitivitätsanalyse des MAEG bezogen auf die Lufttemperatur.

In Abbildung 7.8a ist die Änderung der maximalen und minimalen Werte der TFO dargestellt. Die Maximalwerte entstehen überwiegend am Nachmittag, wenn die Son-

nenstrahlung am höchsten ist, während die Minimalwerte in der Nacht auftreten, wenn die Sonnenstrahlung Null ist. Es zeigt sich, dass die Änderung der maximalen und minimalen Werte fast gleich ist. Die maximale TFO ändert sich von 34 °C um 9 °C auf 43 °C, während die minimale TFO von 11,5 °C um 9 °C auf 20,5 °C steigt. Es lässt sich auch nur eine geringe Änderung der Amplitude der TFO im Vergleich zur Änderung der Lufttemperatur erkennen. Die Amplitude beträgt für jede ΔT_{2M} ca. 22,5 °C. Auf der anderen Seite steigen die TFO-Mittelwerte linear mit der Änderung der Lufttemperatur. Die Änderungsrate der TFO-Mittelwerte beträgt im Verhältnis zur T_{2M} 1 °C/°C. Die Ergebnisse stimmen mit der KiST-Methode überein.



- (a) Die Änderung der maximalen und minimalen Werte der TFO mit T_{2M} . (b) Die Änderung der maximalen und minimalen Werte der TFO mit SSR .

Abbildung 7.8.: Sensitivitätsanalyse der TFO bei der Asphaltbauweise am 01.02.2003 für Lufttemperatur T_{2M} und Sonnenstrahlung SSR .

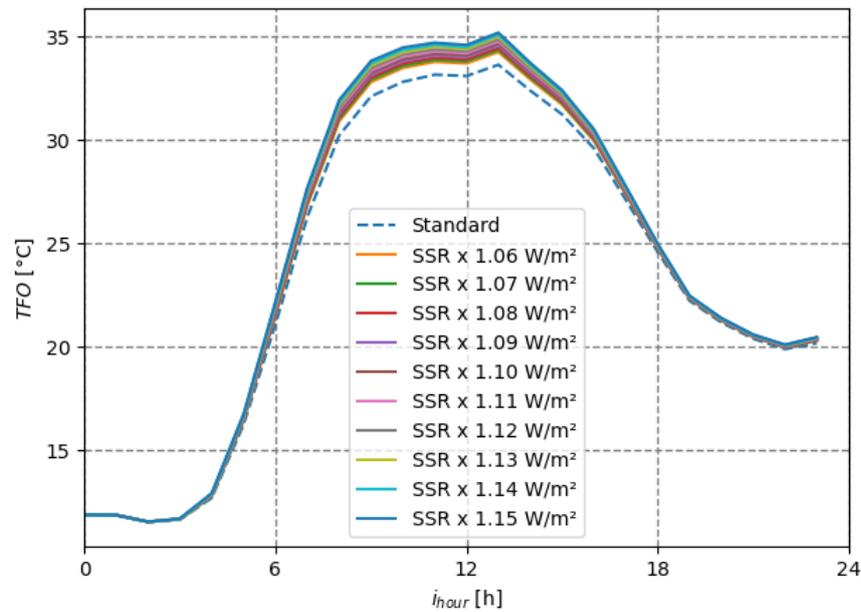


Abbildung 7.9.: Sensitivitätsanalyse des MAEG bezogen auf die Sonnenstrahlung.

Die Sensitivitätsanalyse der SSR ist in Abbildung 7.9 dargestellt, für welche der Faktor für die Verstärkung der SSR zwischen 1,06 und 1,15 liegt. Wie bei der Betonbauweise sind die konvergierten Ergebnisse der Asphaltbauweise am Anfang der Berechnung gleich. Wenn die Sonne aufgeht, steigt die Sonnenstrahlung, die TFO folgt entsprechend. Wenn die Sonnenstrahlung nach 11 Uhr abnimmt, beginnt die TFO zu sinken. Um 18 Uhr erreicht die Sonnenstrahlung wieder Null, die Änderung der TFO wird von der Lufttemperatur dominiert und die TFO-Werte nähern sich wieder an.

Aus Abbildung 7.8b lässt sich die Änderung der maximalen und minimalen Werte der TFO mit der Änderung der SSR erkennen. Es zeigt sich, dass die Änderung der maximalen Werte der TFO linear abhängig von der Änderung der Sonnenstrahlung ist, während die minimalen Werte der TFO fast konstant bleiben. Die Änderungsrate des TFO-Durchschnittswerts im Verhältnis zur SSR beträgt $0,05\text{ °C pro \%}$ -Änderung der Sonnenstrahlung, während die Änderungsrate der TFO-Amplitude im Verhältnis zur SSR $0,107\text{ °C pro \%}$ -Änderung der Sonnenstrahlung beträgt. Dies entspricht ebenfalls den Ergebnissen der KiST-Methode.

7.1.4. Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind in Tabelle 7.2 zusammengefasst, welche in Abschnitt 7.2 verwendet werden können. In der Kopfzeile sind Abh. und Unabh. die Abkürzung für Abhängige und Unabhängige. Hier beschreibt \overline{TFO} den Mittelwert der TFO und A(TFO) die Amplitude der TFO. Die W, S und $\overline{\text{Jahr}}$ unter Jahreszeit sind jeweils der Wert für Winter, der Wert für Sommer sowie der Jahresmittelwert.

Tabelle 7.2.: Zusammengefasste Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen.

Bauweise	Unabh. Variable	Abh. Variable	Methode	Jahr- eszeit	Anstie- gsrate	Einheit
Beton	SSR	MAEG	EPM	W	0,105	°C/mm pro %SSR
	T2M	MAEG	EPM	W	0,575	°C/mm pro °C
	SSR	MAEG	EPM	S	0,301	°C/mm pro %SSR
	T2M	MAEG	EPM	S	0,431	°C/mm pro °C
Asphalt	SSR	\overline{TFO}	KiST	$\overline{\text{Jahr}}$	0,042	°C pro %SSR
	SSR	\overline{TFO}	EPM	W	0,05	°C pro %SSR
	T2M	\overline{TFO}	KiST	$\overline{\text{Jahr}}$	0,949	°C pro °C
	T2M	\overline{TFO}	EPM	W	1	°C pro °C
	SSR	A(TFO)	KiST	$\overline{\text{Jahr}}$	0,088	°C pro %SSR
	SSR	A(TFO)	EPM	W	0,1	°C pro %SSR
	T2M	A(TFO)	KiST	$\overline{\text{Jahr}}$	0,949	°C pro °C
	T2M	A(TFO)	EPM	W	1	°C pro °C

Für die Betonbauweise sind die Einflüsse der SSR und T2M auf den MAEG in Winter und Sommer unterschiedlich. Die Energiezufuhr durch die Sonnenstrahlung ist im Sommer größer als im Winter, was zu einer größeren Änderung der Oberflächentemperatur führt. Die Änderung der Lufttemperatur ist im Winter größer als im Sommer, weil die Lufttemperatur im Winter niedriger ist.

Für die Asphaltbauweise ist der Einfluss der SSR so klein, dass die Unterschiede zwischen Winter und Sommer vernachlässigt werden können. Auf der anderen Seite ist der Einfluss der Lufttemperatur auf den MAEG im Winter und Sommer gleich, was identisch mit den Ergebnissen aus Augter und Kayser (2016) ist.

Auf Grundlage der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse wird abgeleitet, dass die Lufttemperatur sowie die Sonneneinstrahlung die entscheidenden Faktoren für die Änderung der KiST-Karten darstellen. Dies wird entsprechend in Abschnitt 7.2 berücksichtigt.

7.2. Aktualisierung der KiST-Karten bei neuen Klimamodellen

7.2.1. Definition der Kenngrößen

Die Ausgabe der Straßendimensionierung stellen die Dicken sowie die Materialien verschiedener Schichten dar, um die eingangs definierte Nutzungsdauer (ND) zu erfüllen. In Bezug auf Aspekte der Nachhaltigkeit der Straßenkonstruktion ist neben der Dicke sowie der Materialien die Nutzungsdauer von entscheidender Relevanz. Daher wird in diesem Abschnitt die Kausalität zwischen den Wetterdaten und der Nutzungsdauer untersucht, um das Änderungssignal zu bestimmen und die KiST-Karten zu aktualisieren. Anhand der Sensitivitätsanalyse in Abschnitt 7.1 sind sowohl die SSR als auch die T2M die Schlüsselfaktoren für die Bestimmung der KiST-Karten für Asphalt und Beton.

Aufgrund der unterschiedlichen Dimensionierungsmethoden von Asphalt und Beton sind die Einflüsse der Wetterdaten von unterschiedlicher Relevanz. Für den Beton bestimmt der Temperaturgradient die thermische Belastung, so dass die Änderung des Temperaturunterschieds an der Ober- und Unterseite bei der Betonbauweise entscheidend ist. Kein Materialparameter des Betons wird durch die Temperaturverteilung wesentlich beeinflusst. Dieser Temperaturunterschied ist jedoch empfindlicher gegenüber der Sonnenstrahlung als der Lufttemperatur.

Bei der Asphaltbauweise ist die Temperaturverteilung von größer Relevanz, da durch die Temperatur die Materialparameter, insbesondere die Steifigkeit, an der entsprechenden Position beeinflusst werden. Daher ist die Lufttemperatur bei der Berechnung des Gesamttemperaturzustandes innerhalb des Asphalts entscheidend.

Kenngrößen für Beton

Um die Änderung der Nutzungsdauer zu ermitteln, wird gemäß der Sensitivitätsanalyse das Verhältnis der Wetterdaten bestimmt:

$$\Delta ND = \Delta SSR \frac{\partial ND}{\partial SSR} + \Delta T2M \frac{\partial ND}{\partial T2M} \quad (7.1)$$

Dafür werden die partiellen Ableitungen wie folgt berechnet:

$$\frac{\partial \text{ND}}{\partial \text{SSR}} = \frac{\partial \text{ND}}{\partial h_d} \frac{\partial h_d}{\partial \text{MAEG}} \frac{\partial \text{MAEG}}{\partial \text{SSR}}, \quad (7.2)$$

$$\frac{\partial \text{ND}}{\partial \text{T2M}} = \frac{\partial \text{ND}}{\partial h_d} \frac{\partial h_d}{\partial \text{MAEG}} \frac{\partial \text{MAEG}}{\partial \text{T2M}}. \quad (7.3)$$

Diese Beziehung wird auch in der Abbildung 7.10 veranschaulicht.

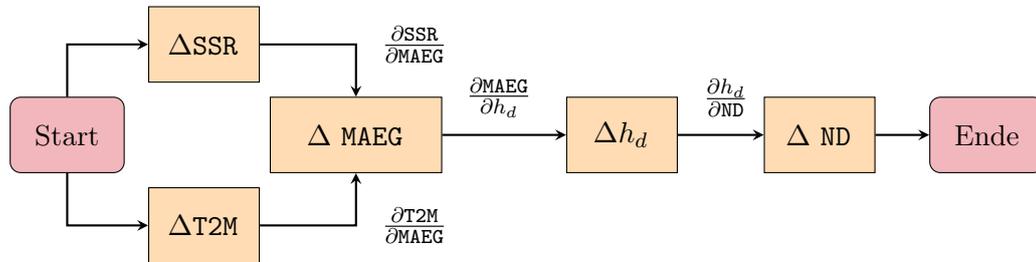


Abbildung 7.10.: Kausalitätskette der Nutzungsdauer in Abhängigkeit von den Klimadaten.

Das Verhältnis $\frac{\partial \text{MAEG}}{\partial \text{SSR}}$ wird durch das thermische Modell bestimmt, welches in Abschnitt 7.1 diskutiert wurde. Der jährliche Durchschnittswert von

$$\frac{\partial \text{MAEG}}{\partial \text{SSR}} = 0,000\,203 \text{ (}^\circ\text{C/mm) / \% SSR}$$

kann anhand der Tabelle 7.2 in Abschnitt 7.1 ermittelt werden.

$\frac{\partial \text{MAEG}}{\partial h_d}$ und $\frac{\partial h_d}{\partial \text{ND}}$ werden durch das mechanische Modell gemäß RDO Beton Entwurfsfassung (2018) bestimmt. Hierfür wird der Aufbau der Betonstraßenkonstruktion aus Abschnitt 4.2.3 verwendet, um die Änderung der Dicke der Betonplatten im Verhältnis zum MAEG zu untersuchen. Die Ergebnisse der Parameterstudie mit den RDO Beton sind in Abbildung 7.11a dargestellt. Die Änderung der erforderlichen Betonplattendicke h_d ist in Abbildung 7.11a in Abhängigkeit von MAEG dargestellt, wenn die Nutzungsdauer 50 Jahre beträgt. In der Darstellung lassen sich im Wesentlichen drei verschiedene Abschnitte erkennen. Im ersten Abschnitt von $\text{MAEG} = 0,01 \text{ }^\circ\text{C/mm}$ bis $0,0145 \text{ }^\circ\text{C/mm}$ nimmt die Plattendicke langsam mit steigendem MAEG zu, was eine kleinere Steigung $\frac{\partial h_d}{\partial \text{MAEG}} = 3000 \text{ mm}/(^\circ\text{C/mm})$ ergibt. Im zweiten Abschnitt von $\text{MAEG} = 0,0145 \text{ }^\circ\text{C/mm}$ bis $0,016 \text{ }^\circ\text{C/mm}$ nimmt die Plattendicke schnell mit zunehmendem MAEG zu, was eine größere Steigung $\frac{\partial h_d}{\partial \text{MAEG}} = 14000 \text{ mm}/(^\circ\text{C/mm})$ ergibt. Im letzten Abschnitt bleibt der Wert gleich, unabhängig von der Größe des MAEG. Der spontane große Sprung im zweiten Abschnitt könnte aus dem nichtlinearen Verhalten der gekrümmten Platte unter positivem Temperaturgradient resultieren. Um die Änderung der Plattendicke zu

untersuchen, wird der Wert $3000 \text{ mm}/(^{\circ}\text{C}/\text{mm})$ aus dem ersten Abschnitt verwendet. Es muss darauf hingewiesen werden, dass diese Kurve auf der analytischen Lösung von Eisenmann nach den RDO Beton (2009) für die thermische Belastung basiert.

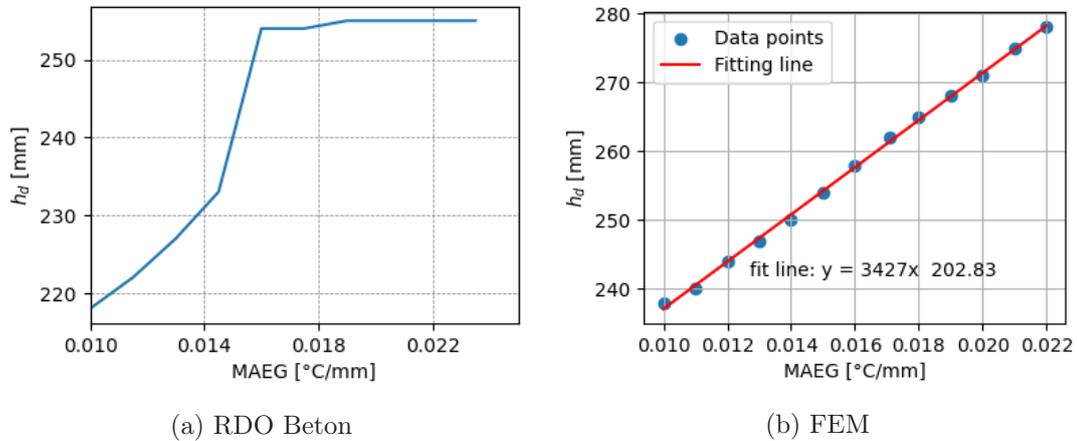


Abbildung 7.11.: Vergleich zwischen der Betondeckendicke und dem MAEG, mit $ND = 50$ Jahre.

Die Kurve verändert sich, wenn die Lösung gemäß FE-Modell angepasst wird, wie in Reinhardt (2023) dargestellt. Die Ergebnisse der Parameterstudie mit FEM sind in Abbildung 7.11b dargestellt. Die Änderung der erforderlichen Betonplattendicke h_d ist in Abbildung 7.11b gegen den MAEG aufgetragen, wenn die Nutzungsdauer 50 Jahre beträgt. Hier wird der lineare Zusammenhang zwischen der Betonplattendicke und dem MAEG bestätigt. Die Steigung ist konstant mit $\frac{\partial h_d}{\partial \text{MAEG}} = 3427 \text{ mm}/(^{\circ}\text{C}/\text{mm})$. Hier ist der Vorteil der FEM-Lösung, dass die Nichtlinearität der gekrümmten Platte besser berücksichtigt wird und die Kurve kontinuierlicher ist (ohne Sprung der Werte) als die analytische Lösung.

Der Quotient aus $\frac{\partial h_d}{\partial ND}$ wird durch die Änderung der vorgegebenen Nutzungsdauer mithilfe der RDO Beton Entwurfsfassung (2018) bestimmt. Der Anstieg der Nutzungsdauer führt zu einem Anstieg der Verkehrsbelastung bzw. des Ermüdungsfaktors, was wiederum eine erhöhte Plattendicke erfordert. Bei unveränderten weiteren Parametern ($\text{MAEG} = 0,02 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$) ergeben sich die resultierenden Betonplattendicken (Tabelle 7.3). Aus Tabelle 7.3 ergibt sich

$$\frac{\partial ND}{\partial h_d} = \frac{50 - 30}{255 - 250} = 4 \text{ Jahr}/\text{mm},$$

was bedeutet, dass ein Anstieg von 1 mm im Durchschnitt zu einer längeren Nutzungsdauer von 4 Jahren führt.

Tabelle 7.3.: Vergleich zwischen der Betondeckendicke h_d und der Nutzungsdauer ND

ND [Jahr]	30	35	40	45	50
h_d [mm]	250	251	252	254	255

Resultierend lässt sich folgender Zusammenhang festhalten:

$$\frac{\partial h_d}{\partial \text{SSR}} = \frac{\partial h_d}{\partial \text{MAEG}} \frac{\partial \text{MAEG}}{\partial \text{SSR}} = 3427 \times 0,000\,203 = 0,696 \text{ mm}/\% \text{SSR}$$

Dies bedeutet, dass 1 Prozent [%] des SSR-Anstiegs zu einer Erhöhung der Betonplattendicke um 0,809 mm führt. Wenn diese Anforderung an die Dicke nicht erfüllt wird, ist eine Reduzierung der Nutzungsdauer um $0,696 \times 4 = 2,78$ Jahre zu erwarten.

Die gleiche Berechnung kann auch für T2M durchgeführt werden. Es gilt

$$\frac{\partial h_d}{\partial \text{T2M}} = \frac{\partial h_d}{\partial \text{MAEG}} \frac{\partial \text{MAEG}}{\partial \text{T2M}} = 3427 \times 0,000\,503\,0 = 1,72 \text{ mm}/^\circ \text{C}.$$

Dies bedeutet, dass 1 Prozentpunkt [%] des SSR-Anstiegs zu einer Anforderung der Erhöhung der Betonplattendicke um 1,51 mm führt. Wenn diese Anforderung an die Dicke nicht erfüllt wird, ist eine Reduzierung der Nutzungsdauer um $1,72 \times 4 = 6,88$ Jahre zu erwarten.

Als Ergebnis beträgt die Änderung der Nutzungsdauer wie folgt:

$$\Delta \text{ND}_B = 2,78 \Delta \text{SSR} + 6,88 \Delta \text{T2M}.$$

Wenn die Änderungen von SSR und T2M beispielsweise + 2,6 K und + 1 W/m² betragen, ergibt sich eine Reduzierung der Nutzungsdauer um

$$\Delta \text{ND} = 2,78 \times 1/236,53 + 6,88 \Delta 2,6 = 17,90 \text{ Jahre},$$

wobei 236,53 W/m² die Sonnenstrahlung des Referenzzeitraums ist. Diese Änderung der Nutzungsdauer ist bereits sehr groß im Vergleich zu einer Nutzungsdauer von 30 Jahren.

Es ist jedoch zu beachten, dass die dargestellte Analyse auf der Beziehung aus dem Referenzaufbau mit bestimmter Geometrie und Material aus Abschnitt 4.2.3 basiert. Wenn sich das Material und die Verkehrsbelastung ändern, ändert sich auch der Wert $\frac{\partial h_d}{\partial \text{MAEG}}$. In Abbildung 7.11a ist der Wert $\frac{\partial h_d}{\partial \text{MAEG}} = 3000$ nur für MAEG = 0,01 bis 0,0145 $\frac{^\circ \text{C}}{\text{mm}}$ gültig. Mit den Ergebnissen aus dem FE-Modell in Abbildung 7.11b ist der Wert $\frac{\partial h_d}{\partial \text{MAEG}} = 3427$ für alle MAEG gültig.

Kenngrößen für Asphalt

Die Berechnung der Änderung der Kenngröße ΔND für die Asphaltbauweise kann wie auch bei der Betonbauweise durch partielle Ableitungen erfolgen. Hier wird die Schadenssumme S anstelle von $MAEG$ als Zwischenvariable gewählt, da die Untersuchung dieser Zwischenvariable schon in Riwe und Kiehne (2014) und Augter und Kayser (2016) untersucht wurde.

$$\frac{\partial ND}{\partial T_{2M}} = \frac{\partial ND}{\partial S} \frac{\partial S}{\partial T_{2M}}. \quad (7.4)$$

Diese Beziehung wird auch in der Abbildung 7.12 veranschaulicht.

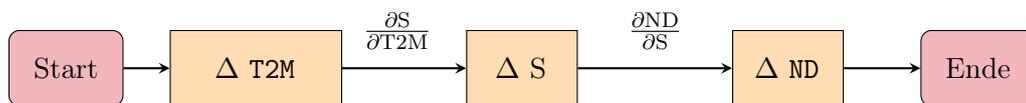


Abbildung 7.12.: Kausalitätskette der Nutzungsdauer in Abhängigkeit von den Klimadaten.

In diesem Fall wird die Sonnenstrahlung vernachlässigt, da aus der Sensitivitätsanalyse aus Abschnitt 7.1 die Auswirkungen der SSR vergleichsweise gering sind. Im Projekt FE 07.0252/2011/ERB Riwe und Kiehne (2014) werden Schadenssummen von 9 verschiedenen Punkten aus Deutschland nach dem Verfahren in den RDO Asphalt (2009) berechnet. Aus diesen Punkten können die partiellen Ableitungen $\frac{\partial S}{\partial T_{2M}} = 0,5 / ^\circ C$ (Wert von Schleswig) und $\frac{\partial ND}{\partial S} = 20$ Jahre (mit Reduzierung der Nutzungsdauer von 4 Jahre pro 20% Erhöhung der Schadenssumme, siehe Riwe und Kiehne (2014, Seite 29)) für den Referenzaufbau Bk32 aus RStO bestimmt werden. Wie in Riwe und Kiehne (2014) bereits erläutert, haben die partiellen Ableitungen jedoch einige Unschärfen. Daher stellen diese Werte bei der Asphaltbauweise nur Annäherungen an die tatsächlichen Werte dar. Als Ergebnis ergibt sich folgender Parameter

$$\frac{\partial ND}{\partial T_{2M}} = \frac{\partial ND}{\partial S} \frac{\partial S}{\partial T_{2M}} = 20 \times 0,5 = 10 \text{ Jahre}/^\circ C.$$

Dies bedeutet, dass bei jedem Grad Erhöhung der Lufttemperatur die erwartete Nutzungsdauer um 10 Jahre reduziert wird. Bei einer Erwärmung der Lufttemperatur um $2,6^\circ C$ wird die erwartete Nutzungsdauer im vorhergesagten Jahr 2100 mit dem Modell RCP 4.5 um

$$\Delta ND = 10 \times 2,6 = 26 \text{ Jahre}$$

reduziert. Es sollte jedoch beachtet werden, dass auch die Nichtlinearität der partiellen Ableitungen in der Realität berücksichtigt werden müssten. Diese Nichtlinearität resultiert teilweise aus der Materialnichtlinearität des Asphalts. Dies bedeutet jedoch nicht,

dass nach der Erwärmung um 3 °C keine Nutzungsdauer mehr zu erwarten ist. Die hier angegebenen Werte stellen eine qualitative Annäherung an die lokalen Ableitungen dar. Um eine bessere Schätzung der Ableitungen zu erhalten, sollte die Beziehung zwischen der Schadenssumme und dem T2M im Detail untersucht werden. Diese Beziehung wird durch das Eingangsmaterial und die lokalen Bedingungen bestimmt. beispielsweise haben die 9 in Riwe und Kiehne (2014) untersuchten Punkte verschiedene Werte für die Ableitung $\frac{\partial S}{\partial T2M}$. Daher können die Ableitungen als Parameter zur Aktualisierung der KiST-Karten nur für einen kurzen Zeitraum und eine begrenzte Region verwendet werden.

7.2.2. Definition der Schwellenwerten

Die Nutzungsdauer (ND) aus Abschnitt 7.2.1 kann als Kenngröße für die Aktualisierung der KiST-Karten verwendet werden. Darauf aufbauend wird der Schwellenwert definiert.

Für Beton wird die Änderung der Nutzungsdauer wie folgt berechnet:

$$\Delta ND_B = 2,78\Delta SSR + 6,88\Delta T2M.$$

Nach Riwe und Kiehne (2014) wurde eine Bauweise als kritisch eingestuft, wenn die Nutzungsdauer um mehr als 15% ($30 \times 0,15 = 4,5$) absinkt. Wenn der Schwellenwert von ΔND_B als 5 Jahre gewählt wird, beträgt die maximale zulässige Änderung der SSR 1,80 %, während die zulässige Änderung der Lufttemperatur 0,73 °C beträgt. Die klimatologischen Auslöseschwellen der Änderung der KiST-Karten für Beton betragen für den gewählten Schwellenwert von $\Delta ND_B = 5$ Jahren $\Delta SSR = 1,80 \%$ bzw. $\Delta T2M = 0,73 \text{ °C}$.

Für Asphalt wird die die Änderung der Nutzungsdauer folgendermaßen ermittelt:

$$\Delta ND_A = 10\Delta T2M.$$

Wenn der Schwellenwert von ΔND_A als 5 Jahre gewählt wird, ergibt sich eine zulässige Änderung der Lufttemperatur von 0,5 °C. Die klimatologischen Auslöseschwellen der Änderung der KiST-Karten für Asphalt betragen für den gewählten Schwellenwert von $\Delta ND_A = 5$ Jahren $\Delta T2M = 0,5 \text{ °C}$.

Wie der Schwellenwert für die Aktualisierung der KiST-Karten im Laufe der Zeit festgelegt wird, wird im Folgenden genauer betrachtet. Wenn die Änderung der Wetterdaten den Schwellenwert überschritten hat, ist eine Aktualisierung der KiST-Karten erforderlich. Es ist wichtig, die Entwicklung der zukünftigen Klimaverhältnisse bei der Veröffentlichung von verbindlichen KiST-Karten zu berücksichtigen. Dies ist von

wesentlicher Relevanz, da sich durch veränderte Klimabedingungen während der Nutzungsdauer eines Straßenoberbaus eine Veränderung der thermischen Belastung ergeben kann. Diese Veränderung muss in den KiST-Karten berücksichtigt werden, um die Planungspraxis der Dimensionierung erfolgreich an den Klimawandel anzupassen. Im Folgenden werden unterschiedliche Varianten der vorausschauenden Integration und des Monitorings der Klimafolgen beschrieben. Ein wesentlicher Aspekt bei der Veröffentlichung und Kommunikation von aktualisierten und vorausschauenden KiST-Karten ist die Wahl eines repräsentativen Klimaszenarios. Da sich die vorhandenen Klimaszenarien im Zeitraum von 30 Jahren kaum unterscheiden und ein Klimafolgenmonitoring die zukünftig eintretenden Entwicklung von Emissionen und Klimakenngrößen berücksichtigt, sollte das Klimaszenario mit den größten bzw. ungünstigsten zu erwartenden Änderungen verwendet werden. Dadurch wird eine Maximierung an Nutzungsdauer sowie eine Reduktion der Nutzungskosten sichergestellt. Denn bei weniger ausgeprägtem Klimawandel verlängert sich die operative Nutzungsdauer, was als positiver Nebeneffekt angenommen werden kann.

Variante 1: Jährliche oder regelmäßige Aktualisierung

Die KiST-Karten werden auf der Basis der Klimaentwicklung bis zum jeweiligen Zeitpunkt sowie der wahrscheinlich eintretenden maximalen Erwärmung in den nächsten 15 Jahren jährlich erstellt. Hierfür ist es wichtig, die Nutzbarkeit und Vertrauenswürdigkeit der dafür einzusetzenden Klimavorhersagen zu evaluieren und daraus zu ziehende Schlussfolgerungen entsprechend einzuordnen. Der Vorteil dieses Verfahrens ist der geringe Aufwand zur Entscheidungsfindung, ob und wann eine Aktualisierung stattfindet. Außerdem kann so auf die normative Entscheidungsfindung zur Definition eines Klimaszenarios verzichtet werden, da diese bei den Klimavorhersagen nicht angewandt werden. Eine Aktualisierung muss im Umkehrschluss dann auch nicht unbedingt eine Neubewertung der Bedingungen für die Dimensionierung bedeuten. Der Nachteil dieser Variante ist der jährliche bzw. regelmäßige Aufwand sowie die Kommunikation und Verwaltungsarbeit bei der Verbreitung und Annahme der KiST-Karten. Weiterhin ist die Technik der Klimavorhersage derzeit noch Gegenstand der Forschung und nicht hinreichend validiert, sodass Schlussfolgerungen für die nächsten 10-15 Jahre auf dieser Basis nicht den Grad an Robustheit erreichen, der für die Erneuerung der Bemessungskenngrößen nötig wäre. Diese Nachteile entstehen bei allen dynamischen Regelwerken, sind aber durch gezielte Vorbereitung handhabbar. Abgesehen von einer jährlichen Aktualisierung müssen die KiST-Karten natürlich auch dann aktualisiert werden, wenn vom DWD oder dem BMDV-Expertenetzwerk Empfehlungen für die Verwendung neuer Klimaprojektionsdaten ausgesprochen werden. Dazu muss eine Nivellierung der Richtlinien sowie geeignete Kommunikationskanäle geschaffen werden, auf denen auch andere Neuerungen kommuniziert werden können. Der Aufwand zur Erzeugung neuer

KiST-Karten sollte verhältnismäßig gering sein und mit bestehenden Programmroutinen durchführbar sein. Ein Nachteil regelmäßiger mehrjähriger Aktualisierungsintervalle ist die Möglichkeit, dass die Klimadaten aufgrund unerwarteter Entwicklungen nicht mehr gültig sind und somit die Nutzungsdauer stark verkürzt werden könnte.

Variante 2: Schwellenwertbasierte Aktualisierung basierend auf Zukunftsdaten

Im Vorhinein können $MAEG_{P90}$ für Beton und KiST-Rate für Asphalt für unterschiedliche Klimabedingungen berechnet werden, sodass für jedes Szenario bereits eine KiST-Karte bereit liegt, die sich auf eine Konfiguration von Klimakennwerten bezieht. Die Grenzwerte und Schwankungsbereiche der Klimakennwerte, die für die Definition der jeweiligen Klimakonfiguration herangezogen werden, müssen klar abgegrenzt und definiert werden. Dazu eignet sich die Definition der Nutzungsdauer und ihrer Änderung. Akzeptable Klassenbreiten und Änderungen der Nutzungsdauer müssen in einer Beratung festgelegt werden, dann kann auf dieser Basis der akzeptable Bereich der Klimakenngrößen und ihrer Änderungsraten berechnet werden. Ein Beispiel nach der Abstimmung mit dem Auftraggeber für eine solche Nutzungsdaueränderung wäre der maximale Verlust von 5 Jahren Nutzungsdauer durch das zu erwartende Klima während der nächsten 30 Jahre. Zusätzlich zum akzeptablen Änderungssignal an einem Standort muss der Flächenanteil definiert werden, an dem sich die Zonenzuordnung ändern würde, denn es erscheint wenig praktikabel eine Änderung der KiST-Karten dann auszulösen, wenn nur ein äußerst geringer Anteil der Fernstraßen überhaupt betroffen ist. Ein Beispiel für den Schwellenwert der Aktualisierung der Asphaltbauweise könnten $0,5\text{ °C}$ Änderung der Lufttemperatur sein. Dabei kann diskutiert werden, ob sich dies auf die Fläche des Landes bezieht oder auf den Anteil der Änderungen im Streckennetz. Durch ein jährliches Klimafolgenmonitoring kann sichergestellt werden, dass der aktuelle Zustand des Klimas auf der Basis der letzten 30 Jahre bekannt ist und eine Extrapolation in die Zukunft über die Anwendung des stärksten Klimaszenarios gelingt. Überschreitet die erwartete Klimaänderung in den nächsten 30 Jahren den festgelegten Schwellenwert bei der Nutzungsdauer oder einer anderen Anforderungsgröße wie der KiST-Rate, dann wird eine Aktualisierung ausgelöst. Es ergeben sich die gleichen kommunikativen Herausforderungen wie in Abschnitt 7.2.2, die durch den Umstand, dass die Intervalle der Aktualisierung nicht regelmäßig sind, noch erschwert werden. Der Vorteil dieser Variante ist, dass die aktuellen KiST-Karten nicht unnötig oft berechnet werden müssen und somit eine Änderung automatisch auf eine gravierende Änderung des erwarteten Klimas hinweist.

Variante 3: Schwellenwertbasierte Aktualisierung basierend auf Historischen Daten

Analog zu Abschnitt 7.2.2 können die Schwellenwerte auch in Bezug auf die historische Klimaentwicklung definiert werden. Dies bietet den Vorteil geringerer Unsicherheiten, setzt aber die Wahl eines starren Klimaszenarios voraus, das Änderungssignale der relevanten Kenngrößen für jedes Jahr im Vorhinein festlegt. Ein solches Vorgehen hat den Vorteil, dass für jedes Jahr in der Zukunft bereits jetzt ein Änderungssignal für die folgenden 30 Jahre festgelegt werden kann, das wiederum auf das dann beobachtete langjährige Mittel der Klimakenngrößen angewandt werden kann. Diese Klimaänderungssignale müssen nur dann aktualisiert werden, wenn neue qualitätsgesicherte Klimaprojektionsdaten verfügbar werden. Dann lassen sich mit den Grenzwerten der Anforderungsgrößen Nutzungsdauer und Flächenanteil jeweils jährlich die zu erwartenden Änderungen berechnen. Diese werden im Unterschied zu Variante 2 aus den Messungen des jeweiligen Referenzklimas gewonnen und beziehen starre Änderungssignale mit ein. Der Nachteil ist, dass wieder jährliche KiST-Karten berechnet werden müssen, um die Schwellenwerte abzubilden und deren Einhaltung zu überprüfen.

Insgesamt bieten alle diese Varianten eine vorausschauende Betrachtung der relevanten Klimakenngrößen und sind somit geeignet, die Dimensionierungsverfahren an den Klimawandel anzupassen. Die Behandlung der Unsicherheiten von Klimaänderungen ist insbesondere durch jährliche und auf Klimamonitoring beruhende Schwellenwertverfahren nicht vollständig leistbar, da am Ende eine Bemessungszahl stehen muss. Deshalb wird empfohlen, in jedem Fall nach Variante 3 das RCP8.5 Klimaszenario zur Grundlage der Berechnung der zukünftigen Klimakenngrößen für die nächsten 30 Jahre zu machen. Die Unterschiede zwischen den drei Klimaszenarien sind auf langfristigen Projektionsskalen groß, auf 30-jährige Zeiträume und spezifisch die Änderungsraten innerhalb dieser Zeiträume bezogen, jedoch relativ klein, zumindest bis etwa 2060. Dies steht zunächst scheinbar im Widerspruch mit dem Ziel, den Klimawandel auf ein erträgliches Ausmaß zu reduzieren. Jedoch ist die Botschaft kongruent mit dem Ziel, eine klimaresiliente Infrastruktur zu schaffen. Im Sinne von Nachhaltigkeitszielen dürfte die Annahme des RCP8.5 im Straßenbau zu höherem Materialeinsatz, also höheren Emissionen von Treibhausgasen führen, wenn ein Bauprojekt betrachtet wird. Wird eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt dürfte die verlängerte Nutzungsdauer jedoch die Mehremissionen durch den zusätzlichen Materialeinsatz überkompensieren, sodass insgesamt auch ein klimafreundlicheres Dimensionierungsverfahren entsteht.

Kapitel 8.

Die Auswirkungen auf die Regelwerke

In diesem Kapitel werden die Auswirkung des Klimawandels auf die deutschen Regelwerke für den Straßenbau diskutiert. Unter anderem sind die folgenden Regelwerke für den Straßenbau relevant:

- RStO (Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen): die Schichtdicken des Oberbaus werden aus den Standardaufbauten gewählt.
- RDO Beton/RDO Asphalt (Richtlinien zur rechnerischen Dimensionierung des Oberbaus): Für die nicht in den RStO geregelten Fälle werden die Schichtdicken rechnerisch dimensioniert.
- ZTV Beton-StB/ZTV Asphalt-StB (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen) : hier werden die Anforderungen an die Verkehrsflächenbefestigungen geregelt. Neben den konstruktiven Anforderungen wie Dübel, Fugen und Einbaubedingungen sind zwei weitere Faktoren bei der Dimensionierung des Oberbaus entscheidend: die Schichtdicke und das Material.
- TL Beton-StB/TL Asphalt-StB (Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische): sie regeln die Anforderungen an die Baustoffe sowie Baustoffgemische.

8.1. Auswirkung des Klimas

Um die Auswirkung des Klimawandels auf die Regelwerke zu untersuchen werden zunächst die relevante Aspekte des Klimawandel kurz erläutert und der Unterschied zwischen Wetterschwankungen und Klimawandel dargestellt. Gemäß einer Definition von World Wide Fund For Nature (WWF)¹ bezeichnet der Klimawandel die Abkühlung

¹<https://www.wwf.de/themen-projekte/klimaschutz/klimawandel> [03.07.2024]

oder Erwärmung des Klimas auf der Erde über einen langen Zeitraum. Im Vergleich dazu beschreiben Wetterschwankungen gemäß der Definition von DWD² die kurzfristige Veränderung der Faktoren wie bspw. der Temperatur und des Niederschlages. Es ist nicht möglich, den Einfluss des Menschen auf das Klima der Erde für die nächsten Jahre und Jahrzehnte genau zu beschreiben. Möglich sind aber Annahmen über den wahrscheinlichen Verlauf. Diese Annahmen werden in der Wissenschaft als Szenarien bezeichnet. Durch die Klimaszenarien wird der Klimawandel beschrieben.

Im Rahmen dieses Projektes werden die relevanten Faktoren, die Lufttemperatur und die Sonnenstrahlung, aus verschiedenen Klimaszenarien untersucht, siehe Abschnitt 7.1. Die langfristige Veränderung der Faktoren hat hauptsächlich Einfluss auf die RStO (2012), die RDO Beton (2009) und die RDO Asphalt (2009). Die kurzfristige Veränderung der Faktoren hat maßgebend Einfluss auf die ZTV Beton-StB (2007), die ZTV Asphalt-StB (2013), die TL Beton-StB (2007) und die TL Asphalt-StB (2007). Diese Regelwerke werden im Folgenden diskutiert.

8.2. RDO Asphalt (2009)

In den aktuellen RDO Asphalt (2009) ist die Häufigkeitsverteilung der TFO nach KiST-Zonen in den Diagrammen (Abbildung A2.3a bis A2.3d in den RDO Asphalt (2009)) dargestellt. Für die Dimensionierung der Asphaltbefestigungen wird die TFO in ncT umgerechnet. Mit TFO und ncT wird die kritische Spannung oder Dehnung innerhalb der Asphaltbefestigungen bestimmt, die für das Schadenspotential verantwortlich ist. Nach der in diesem Projekt vorgestellten Aktualisierung (Schwellenwert von Reduzierung der Nutzungsdauer um 5 Jahren, siehe Abschnitt 7.2) der KiST-Karten in den RDO Asphalt (2009) ist die Häufigkeitsverteilung der TFO nach KiST-Zonen (Abbildung A2.3a bis A2.3d in den RDO Asphalt (2009)) zu aktualisieren.

In den noch in Bearbeitung befindlichen RDO Asphalt 21 (Entwurf) (2021) wird die TFO von der ncT entkoppelt. Die TFO und ncT werden als unabhängige Variablen betrachtet und die Häufigkeitsverteilung ist in einer Tabelle mit diesen zwei Variablen dargestellt, siehe Wellner und Kayser (2007, Tabelle 47). Um diese Tabelle an Klimawandel anzupassen, wird die KiST-Karte zuerst beim Erreichen der in Abschnitt 7.2 vorgestellten Schwellenwerten nach der KiST-Methode aktualisiert. Die Aktualisierung der KiST-Karten wurde schon in Abschnitt 6.2 und Abschnitt 6.3 vorgestellt. Danach wird die Häufigkeitsverteilung der TFO und ncT nach KiST-Zonen (Tabelle 47 Wellner und Kayser 2007) angepasst.

²<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/W/Wetter.html> [03.07.2024]

8.3. RDO Beton (2009)

Der Abschnitt für die Berechnung der thermischen Belastung in den RDO Beton (2009) wird nach den in Abschnitt 7.2 beschriebenen Schwellenwerten aktualisiert, um die Auswirkungen des Klimawandels an die RDO Beton (2009) anzupassen. Die Aktualisierung der KiST-Karten wurde schon in Abschnitt 6.2 und Abschnitt 6.3 vorgestellt. Die Vorgehensweise bei der Aktualisierung wird wie in Villaret u. a. (2019a) beschrieben für die neuen KiST-Karten durchgeführt. Die Annäherungsformel für die Berechnung der Temperaturgradienten (Gleichung A 2-1 in den RDO Beton (2009) und Gleichung 6-16 in RDO Beton Entwurfsfassung (2018)) wird gegebenenfalls angepasst, indem die Anpassungsfaktoren neu berechnet werden. Der Faktor C_1 wird für verschiedene Nachweismfälle aktualisiert, um die Temperaturgradienten in verschiedenen Grenzzustände zu unterscheiden. Der Faktor m_{t3} wird für verschiedene Klimazonen adaptiert, um die thermische Belastung in verschiedenen Klimazonen zu unterscheiden.

8.4. RStO (2012)

In den RStO (2012) wird der Einfluss des Klimawandels hauptsächlich in der FWZ-Karte berücksichtigt. Der Schwellenwert für die Aktualisierung der FWZ-Karte-Karten kann nicht wie in Abschnitt 7.2 durch die Sensitivitätsanalyse bestimmt werden, da hier eine analytische Methode zur Bestimmung der Änderungen der FI30 fehlt. Die Beziehung zwischen der FI30 und der Nutzungsdauer ist nicht bekannt. Qualitativ kann es angenommen werden, dass die Erhöhung der Lufttemperatur die Gefahr der Frosteinwirkung in den Boden verringert, und die Nutzungsdauer der Straßenbefestigungen erhöht. Das bedeutet, dass der Einfluss der Lufttemperatur auf die FWZ-Karte-Karten entgegengesetzt zu dem Einfluss der Lufttemperatur auf die KiST-Karten ist.

Die Aktualisierung der FWZ-Karte für die RStO (Seite 14 2012, 3.2.3 Mehr- oder Minderdicken bei Faktor A) wird nach Blume und Plehm (2009) durchgeführt. Die Vorgehensweise bei der Aktualisierung wird in Abschnitt 6.1 diskutiert. Nach der Aktualisierung der FWZ-Karte wird die Frosteinwirkung bei der Festlegung der Frostschutzschichtdicken berücksichtigt, siehe RStO (Seite 16 2012, 3.2.3 Mehr- oder Minderdicken bei Faktor A):

- Zone I: $A = + 0$ cm,
- Zone II: $A = + 5$ cm,
- Zone III: $A = + 15$ cm.

Hier stellt A die Mehrdicken der Frostschuttschichtdicken dar. In Zone I müssen keine Mehrdicken angesetzt werden. In den Zonen II und III betragen die Mehrdicken jeweils 5 cm und 15 cm. Es ist zu beachten, dass die lokalen Besonderheiten bei der Dimensionierung von Straßenaufbauten berücksichtigt werden müssen, wie in Blume und Plehm (2009) erwähnt wird:

Die Tiefe der Frosteindringung in den Boden hängt nicht nur von der Höhenlage des Geländes ab, sondern u.a. auch von der Wärmeleitfähigkeit im Untergrund/Unterbau, den Feuchtigkeitsverhältnissen im Boden und im Oberbau und den Wärmestrahlungsbedingungen, z. B. in bebauten Gebieten. Da Messungen für solche Einflussgrößen sehr aufwändig und somit nur in besonders gelagerten Einzelfällen sinnvoll sind, sollten bei der Dimensionierung eines Oberbaus langjährige Erfahrungen und Kenntnisse über die örtlichen Verhältnisse einbezogen werden.

8.5. ZTV Beton-StB (2007) und TL Beton-StB (2007)

Die ZTV Beton-StB (2007) enthalten Anforderungen für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, die bei der Herstellung von Oberbauschichten im Straßenbau und anderen Verkehrsflächen zu beachten sind. Beim Einbau der Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton werden die Hinweise an die Lufttemperatur wie folgt definiert:

- Die Lufttemperatur darf nicht unter 5 °C fallen und 25 °C überschreiten, wenn die Betonfahrbahndecke mit einer Betondeckschicht versehen wird. Sind während der Betonierarbeiten Lufttemperaturen unter +5°C oder über 25 °C zu erwarten, sind Maßnahmen nach den Abschnitten 3.3.1.7 bzw. 3.3.1.8 gemäß ZTV Beton-StB (2007) erforderlich. Frischbeton mit einer Temperatur von mehr als +30 °C darf nicht verarbeitet werden. (ZTV Beton-StB 2007, Seite 46)
 - Muss bei Lufttemperaturen unter +5 °C betoniert werden, sind geeignete Maßnahmen zu ergreifen (siehe TL Beton-StB (2007)). Schutzmaßnahmen sind stets vorzubereiten, wenn während der Betonierarbeiten niedrige Temperaturen zu erwarten sind. Ziel aller Maßnahmen muss sein, dass die Temperatur des Betons möglichst lange — mindestens in den ersten 3 Tagen seiner Erhärtung — nicht unter +5 °C absinkt. Die beim Einbau des Betons zu beachtenden Abhängigkeiten von der Lufttemperatur TL und der Betontemperatur TB sind in der Tabelle 1 angegeben. (ZTV Beton-StB 2007, Seite 44)

- Gegen hohe Frischbetontemperaturen sind geeignete Maßnahmen zu ergreifen (siehe TL Beton-StB (2007)). Wird bei Lufttemperaturen über +25 °C gearbeitet, muss die Temperatur des Frischbetons an der Einbaustelle kontrolliert werden, diese darf +30 °C nicht überschreiten. (ZTV Beton-StB 2007, Seite 44)
- Die Verwendung von Zement der Festigkeitsklasse 42,5 R kann vorteilhaft sein, wenn der Beton bereits in jungem Alter eine hohe Festigkeit erreichen soll, z.B. um die Dauer verkehrslenkender Maßnahmen zu verkürzen. Auch wenn der Beton bei niedrigen Temperaturen schneller erhärten soll, kann die Verwendung von Zement 42,5 R zweckmäßig sein. (ZTV Beton-StB 2007, Seite 39)
- Der Beton ist beim Einbau und in den ersten 2 Stunden nach Fertigstellung der Decke vor Niederschlägen zu schützen. Bei Lufttemperaturen über +25 °C ist die Decke unmittelbar nach dem Schneiden der Kerberf/Fugen mindestens dreimal im Abstand von 2 bis 3 Stunden flächendeckend anzunässen. Die Decke darf in dieser Zeit nicht abtrocknen. Risse können entstehen, wenn ein durch hohe Tagestemperaturen und Hydratationswärme des Zementes stark aufgeheizter Beton während der Erhärtung — insbesondere in der ersten Nacht und am folgenden Morgen — durch Wärmeabstrahlung, kühle Luft und Verdunstungskälte an der Oberfläche stark abgekühlt wird. Die Gefahr des Aufheizens des Betons kann durch Anwendung eines Nachbehandlungsmittels mit erhöhtem Hellbezugswert (Weißwert) gemindert werden. Ist ein sehr rasches Abkühlen des eingebauten Frischbetons zu erwarten, muss der Beton bis zum Schneiden der Kerben durch eine wärmedämmende Abdeckung geschützt werden. (ZTV Beton-StB 2007, Seite 46)
- Bei Lufttemperaturen über +30 °C, starker Sonneneinstrahlung, starker Windeinwirkung oder einer relativen Luftfeuchte unter 50 % muss die Decke stets nach Abtrocknen des Nachbehandlungsmittels zusätzlich nass nachbehandelt werden. (ZTV Beton-StB 2007, Seite 47)

Diese Hinweise beziehen sich auf die kurzfristigen Einflüssen des Wetters auf die Betonfahrbahndecken. Schlechte Einbaubedingungen können durch die richtige Wahl der Einbauzeit vermieden werden. Die ZTV Beton-StB (2007) werden in diesem Projekt nicht weiter untersucht, weil die ZTV Beton-StB (2007) keine Anforderungen an die langfristige thermische Belastung enthalten.

Außerhalb der Einbaubedingungen muss auch das Materialverhältnis während der Nutzungsdauer berücksichtigt werden. Die TL Beton-StB (2007) enthalten die Anforderungen an die Baustoffe, die Baustoffgemische und die Einbaugemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Beton, die während der Nutzungsdauer zu beachten sind.

In den TL Beton-StB (2007) werden die folgenden Maßnahmen für die Betonfahrbahndecken vorgestellt:

- Für das Herstellen des Betons bei Temperaturen niedriger als +5 °C:
 - Erhöhung des Zementgehaltes,
 - Verwendung von Zementen höherer Anfangsfestigkeit,
 - Erhöhung der Frischbetontemperatur.
- Für das Herstellen des Betons bei Temperatur höher als 25 °C:
 - Die Temperatur des Frischbetons an der Einbaustelle muss kontrolliert werden. Diese darf 30 °C nicht überschreiten.
 - Gegen hohe Frischbetontemperaturen sind Maßnahmen, wie Beschatten der Gesteinkörnungen, Besprühen der groben Gesteinskörnungen mit Wasser, zu ergreifen.

Mit dem Klimawandel werden die Einbaubedingungen für die Betonfahrbahndecken verschlechtert. Beim Einbau muss daher das richtigen Zeitfenster gewählt werden, um schlechte Einbaubedingungen zu vermeiden. Die Einbaugemische müssen in Zukunft an den Klimawandel angepasst werden. Derzeit werden nur in Abschnitt 7.1 die Auswirkungen des Klimawandels auf die Betondeckendicke untersucht. Materialspezifische Anforderungen werden in diesem Projekt nicht weiter untersucht.

8.6. ZTV Asphalt-StB (2013), TL Asphalt-StB (2007) und TL Bitumen-StB (2013)

Da Asphalt empfindlicher gegenüber Temperaturveränderungen ist als Beton, werden die Anforderungen an die Einbaubedingungen in den ZTV Asphalt-StB (2013) und TL Asphalt-StB (2007) genauer beschrieben. Zusätzlich werden die Anforderungen an das Bitumen in den TL Bitumen-StB (2013) erläutert.

Die ZTV Asphalt-StB (2013) behandeln die Herstellung von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt. Die örtliche Besonderheiten werden in den ZTV Asphalt-StB (2013, Seite 12) hervorgehoben:

- wechselnde klimatische Einflüsse (z. B. Übergang von Waldstrecken zur freien Strecke),
- Wechsel zwischen normalen und besonderen Beanspruchungen,

- Wechsel in der topografischen Lage.

Für die Straßenabschnitte mit den oben genannten örtliche Besonderheiten sind unterschiedliche Bindemittelarten und/oder Bindemittelsorten (im Ausnahmefall auch anders als in den TL Asphalt StB genannte) zu wählen. Die für die örtlichen Besonderheiten verwendeten Bindemittelarten und/oder Bindemittelsorten müssen daher auch in Zukunft an den Klimawandel angepasst werden. Eine relevante Forschung wurde in Beckedahl u. a. (2020) durchgeführt.

Die TL Asphalt-StB (2007) enthalten Anforderungen an Asphaltmischgut, das für die Herstellung von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt verwendet wird. Um die Anforderungen an Asphaltmischgut (Asphaltbeton AC, Splittmastixasphalt SMA, Gussasphalt MA, Offenporiger Asphalt OPA) zu erfüllen, sind Erstprüfungen vor dem Einbau erforderlich.

Bei den Erstprüfungen ist die Prüftemperatur zu beachten. Die Prüftemperaturen müssen zukünftig nicht angepasst werden, weil die Temperatur für die Prüfungen zum Zeitpunkt der Erstprüfung berücksichtigt wird. Für den Klimawandel könnten in Zukunft neue Asphaltmischgüter entwickelt werden. Die Erstprüfungen in den TL Asphalt-StB (2007) sind im Allgemeinen auch bei neuen Asphaltmischgütern anwendbar.

Das Bitumen ist der empfindlichste Bestandteil des Asphaltmischguts. Die TL Bitumen-StB (2013) enthalten die Anforderungen an das Bitumen, welches für die Herstellung von Asphaltmischgut für die Verkehrsflächenbefestigungen verwendet wird. In den TL Bitumen-StB (2013, Tabelle 1: Anforderungen an Straßenbaubitumen) werden die Prüftemperatur oder Temperaturfenster angegeben. Die durchschnittlichen Temperaturänderung bei verschiedenen Klimaszenarien betragen nach Abschnitt 7.2 maximal bis 5 °C. Diese sind nicht entscheidend für die in den TL Bitumen-StB (2013) vorgegebenen Anforderungen, da die Temperatur des Bitumens bei den Prüfungen in der Regel eine große Spannweite aufweist, welche die hohe Temperatur bereits berücksichtigt. Die vorgegebenen Prüfmethoden sind allgemein anwendbar, weshalb die TL Bitumen-StB (2013) nicht an den Klimawandel angepasst werden muss.

Kapitel 9.

Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Projekt wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf die Dimensionierung der Verkehrsflächenbefestigungen untersucht. Die gewählte Vorgehensweise ist in Abbildung 9.1 dargestellt.

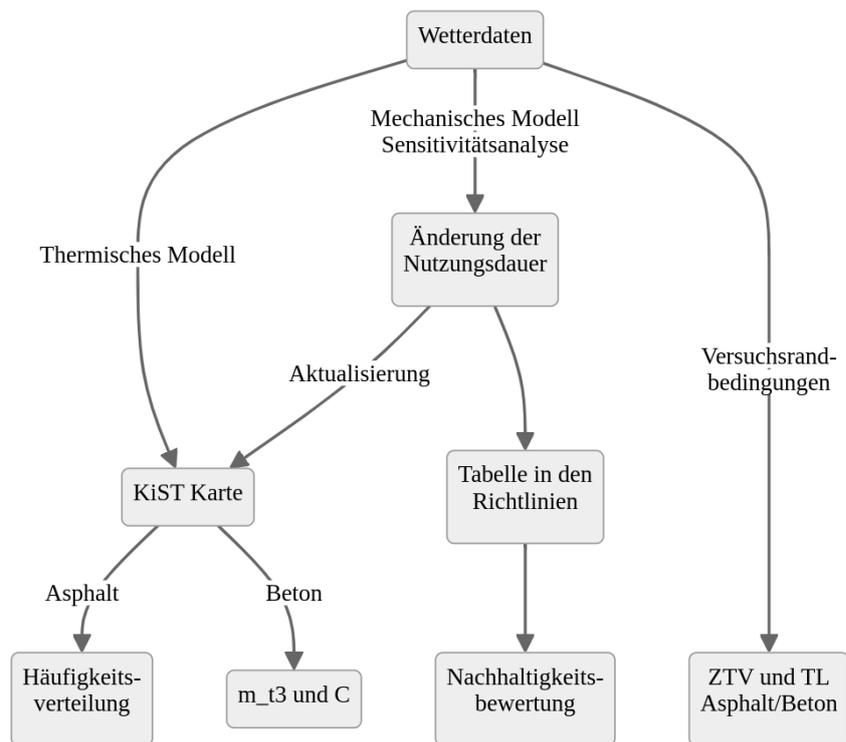


Abbildung 9.1.: Übersicht über die Struktur des Projektes

Begonnen wurde mit einer Vorbereitung der aktuellen und zukünftigen Wetterdatenbasis. Diese Daten (SSR und T2M) sind von entscheidender Bedeutung für die Berechnung

der thermischen Belastung in Verkehrsflächenbefestigungen, da sie die Grundlage für alle nachfolgenden Berechnungen bilden. Um eine hohe Genauigkeit zu gewährleisten, wird eine Zielauflösung von räumlich 5x5 km und zeitlich einer Stunde angestrebt. Die Eingangsdaten bestehen aus Referenzdatensätzen, die bereits in dieser räumlichen und zeitlichen Zielauflösung vorliegen, sowie Klimaprojektionsdaten, die zwar die räumliche, aber nicht die angestrebte zeitliche Auflösung aufweisen, da sie nur tägliche Werte beinhalten.

Um diese Klimaprojektionsdaten auf die gewünschte Auflösung zu bringen, wurden verschiedene Techniken wie das Quantilmapping zur Bias-Korrektur und die multivariate statistische Interpolation zur Erhöhung der zeitlichen Auflösung angewendet. Diese Ansätze ermöglichen es, die täglichen Daten der Klimamodelle auf eine stündliche Auflösung herunterzubrechen. Es wurde eine statistisch-deterministische, multivariate Regressionsinterpolation von täglichen Klimamitteln auf stündliche Wetterdaten auf der Basis der historischen Referenzdaten eingesetzt, um den Tagesgang der Klimavariablen zu bestimmen.

Die Klimaprojektionsdatensätze stammen aus den regionalen Klimaprojektionsensembles des Deutschen Wetterdienstes, dem DWD-Kernensemble. Für dieses Projekt liegen Klimamodelle für drei verschiedene Klimaszenarien vor: RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5. Diese Szenarien repräsentieren unterschiedliche Annahmen über zukünftige Treibhausgasemissionen und deren Auswirkungen auf das Klima. Das RCP2.6 ist ein Szenario mit wirksamen globalen Klimaschutzmaßnahmen, das RCP8.5 ein Szenario ohne wirksamen globalen Klimaschutz und das RCP4.5 ein Mittelweg. Durch die Verwendung dieser drei Szenarien kann ein breites Spektrum möglicher zukünftiger Klimabedingungen abgedeckt werden.

Die aufbereiteten Klimadaten wurden so verarbeitet, dass sie direkt in thermischen und mechanischen Modellen verwendet werden können. Dies ermöglicht die Berechnung von Oberflächentemperaturen, Temperaturgradienten und den daraus resultierenden mechanischen Beanspruchungen mit den dafür vorgesehenen Modellen.

Die Methodik stellt sicher, dass die Klimadaten eine Detailtiefe aufweisen, die für die projektspezifischen technische und wissenschaftliche Anforderungen geeignet ist.

Im Anschluss daran wurde ein umfangreiches thermisches FVM-Modell entwickelt. Dieses Modell ermöglicht die Berechnung des Temperaturverlaufes in Verkehrsflächenbefestigungen und liefert wichtige Erkenntnisse über die Auswirkungen verschiedener Wetterbedingungen auf die Straßenoberflächen, u.a. die Sonnenstrahlung und die Lufttemperatur. Hierauf aufbauend wurde ein mechanisches Modell erstellt, um die Auswirkungen der Temperaturänderung auf die Nutzungsdauer der Verkehrsflächenbefestigungen zu untersuchen. Eine Sensitivitätsanalyse zeigte sich, dass die Temperatur- und Sonnenstrahlungsänderung einen großen Einfluss auf die Nutzungsdauer hat.

Um die Berechnung der thermischen Belastung sowohl lokal als auch in der Cloud zu automatisieren, wurde das Modell in einem Docker-Container bereitgestellt. Dies erleichterte den Zugang und die Nutzung des Modells erheblich. Der Programmiercode zusammen mit einer Anleitung wurde an den Auftraggeber übergeben, um Daten aus neuen Klimamodellen für die Erstellung und Aktualisierung der Richtlinien zu verwenden.

Weitere Untersuchungen umfassten die Erstellung der FWZ-Karte für die RStO (2012). Darüber hinaus wurden die KiST-Karten für RDO Asphalt (2009) und RDO Beton (2009) erstellt. Die Erstellung von FWZ-Karten für die historische Referenzperiode 1991 bis 2020 und für zukünftige Klimaperioden unter den Szenarien RCP 2.6, 4.5 und 8.5 ist vorgenommen worden, um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Frosteindringtiefe zu verstehen. Diese Karten basieren auf dem 30-jährigen Wiederkehrwert der Frosteindringtiefe, die aus der Dauer und Intensität von Frostperioden mit negativen Mitteltemperaturen abgeleitet wird. Längere Frostperioden führen zu einer tieferen Frosteindringung, was besonders für den Frostschutz durch frostsicheren Unterbau im Straßenbau relevant ist. Die FWZ-Karten für die Referenzperiode zeigen, dass sich die Frosteindringtiefe bereits heute verringert und dass sich diese Tendenz unter den verschiedenen Klimaszenarien in unterschiedlichem Maße fortsetzen wird. Dies bedeutet, dass in vielen Regionen Deutschlands in Zukunft der frostsichere Unterbau von Straßenbauwerken weniger mächtig ausgeführt werden muss als bisher, insbesondere unter der Annahme der Klimaszenarien RCP4.5 und RCP8.5. Unter den Annahmen des RCP2.6 wird keine wesentliche Veränderung der Frosteindringtiefe auftreten. Obwohl die detaillierten FWZ-Karten für die zukünftigen Perioden noch nicht verfügbar sind, ist die allgemeine Verringerung der Frosteindringtiefe ein klares Zeichen für die Veränderungen, die der Klimawandel mit sich bringt. Die Anpassung des frostsicheren Unterbaus an die veränderten Bedingungen kann zu Kostenersparnissen im Straßenbau führen und eine effizientere Nutzung von Ressourcen ermöglichen. Insgesamt bieten die FWZ-Karten eine wissenschaftlich fundierte Grundlage für die Planung einer nachhaltigen und zukunftsfähigen Infrastruktur, die die Auswirkungen des Klimawandels berücksichtigt und in praktische Planungs- und Bauüberlegungen integriert.

Die Erstellung der KiST-Karten für die Asphaltbauweise für die Referenzperiode 1991-2020 und zukünftige Klimaperioden basiert auf einer etablierten Methodik, die die Oberflächentemperatur des Asphalts als zentralen Faktor berücksichtigt. Bei diesem Ansatz wird zunächst die Oberflächentemperatur des Asphaltkörpers berechnet. Anschließend wird jeder Zustand, basierend auf der Höhe der Oberflächentemperatur und deren tageszeitlichen Schwankungen sowie der Uhrzeit, einer spezifischen Schädigungsklasse zugeordnet. Die Summierung dieser Schäden über den gesamten Zeitraum ergibt die Gesamtschädigungssumme, welche auf der Zonenkarte visualisiert wird. Diese Darstellung ermöglicht es, räumliche Unterschiede im Ausmaß des thermischen Schädigungspotentials klar zu identifizieren. Die Ergebnisse des Projekts zeigen deutlich, dass

Asphaltbeläge in der Zukunft aufgrund erhöhter Temperaturen besonderen thermischen Belastungen ausgesetzt sein werden. Diese Entwicklung hat bedeutende Konsequenzen für den Straßenbau in Bezug auf Konstruktion, Einbauverfahren und die Materialauswahl. Die erwarteten Änderungen in der Gesamtschädigung sind für die Klimaszenarien RCP4.5 und RCP8.5 so dramatisch, dass die derzeit höchsten beobachteten Schädigungswerte in der Zukunft aller Voraussicht nach an allen Standorten in Deutschland übertroffen werden. Dies bedeutet, dass sowohl die Dicke der Materialdecke als auch die Wahl der verwendeten Materialien angepasst werden müssen, um die Langlebigkeit und Funktionalität der Straßenbeläge zu gewährleisten. Die Auswahl hitzebeständigerer Materialien und die Verstärkung der Asphaltdecken könnten notwendige Maßnahmen sein, um den zukünftigen Herausforderungen gerecht zu werden. Die KiST-Karten bieten dabei eine Orientierungshilfe, um Anpassungsmaßnahmen zu priorisieren und umzusetzen.

Die Erstellung der KiST-Karten für Betonoberbauten beruht auf einer Kombination der Ergebnisse aus thermisch-mechanischer Modellierung mit Wetter- und Klimadaten. Bei diesem Prozess werden die Ergebnisse von Punkt-Berechnungen zum mechanischen äquivalenten Temperaturgradienten in der Betondecke in Beziehung zu Klimavariablen wie Temperatur und Sonnenstrahlung gesetzt. Da sich die Sonnenstrahlung in den Klimamodellen kaum oder nur moderat verändert durch zunehmende Perioden mit hoher Sonnenscheindauer, ist auch die Änderung des mechanischen äquivalenten Temperaturgradienten und dessen Häufigkeitsverteilung relativ gering. Hierbei muss jedoch erwähnt werden, dass auch regionale Klimamodelle die Entwicklung der solaren Strahlungsenergie nur unzureichend erfassen. Bereits in der heutigen Zeit nimmt die Sonnenscheindauer in Deutschland insbesondere im Sommerhalbjahr zu, sodass entsprechend höhere Sonnenstrahlungsenergiesummen zu verzeichnen sind. Diese Verteilung, bzw. deren 90. Perzentil, wird auf den KiST-Karten für Beton dargestellt.

Diese Ergebnisse zeigen, dass sich Asphalt- und Betonkonstruktionen hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels deutlich unterscheiden. Während Asphaltbeläge einer erhöhten thermischen Belastung ausgesetzt sind, weisen Betonoberbauten eine relativ geringe Veränderung in Bezug auf die Häufigkeit und Intensität der thermisch-mechanischen Schädigung auf. Dennoch sind aufgrund der bereits beobachteten Betonschäden und der generellen Zunahme der Schädigungsraten auch für Betonoberbauten nennenswerte Anpassungsmaßnahmen erforderlich. Diese Maßnahmen könnten in der Auswahl von Materialien und der Anpassung der Konstruktionsdicken bestehen, um die Langlebigkeit und Funktionalität der Betonkonstruktionen zu gewährleisten. Die KiST-Karten für Beton bieten eine wichtige Orientierungshilfe, um zukünftige Schäden zu minimieren und die Betonstrukturen effektiver an die erwarteten klimatischen Bedingungen anzupassen. Sie ermöglichen eine gezielte Planung und Umsetzung von Bau- und Instandhaltungsarbeiten, die auf die spezifischen Anforderungen und Risiken jeder Region abgestimmt sind.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Frosteindringtiefe durch den Klimawandel insgesamt abnehmen wird, was zu niedrigeren Material- und Bauaufwendungen für den Frostschutz von Straßenoberbauten führen dürfte. Auf der anderen Seite werden sich die thermischen Randbedingungen, insbesondere für Asphalt-, aber auch für Betonoberbauten, verschlechtern. Dies erfordert Anpassungen sowohl in den Konstruktionsmethoden als auch in der Dicke der Konstruktionen und den gewählten Materialparametern. Solche Anpassungen müssen sich auch in den Regelwerken niederschlagen, um den neuen Herausforderungen gerecht zu werden. Unter dem Klimaszenario RCP 2.6 sind jedoch nur wenig signifikanten Änderungen im Vergleich zur Referenzperiode zu erwarten. Jedoch zeigen die Szenarien RCP 4.5 und 8.5 bereits in naher Zukunft relevante Änderungen, die unter RCP 8.5 besonders verstärkt sind. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, künftige Bauprojekte und Infrastrukturmaßnahmen an die erwarteten klimatischen Bedingungen anzupassen. Ebenso wichtig ist das kontinuierliche Klima-Monitoring. Es spielt eine entscheidende Rolle bei der Entscheidungsfindung über Anpassungsprozesse und ermöglicht es, auf Basis der wahrscheinlichsten Entwicklungen der zukünftigen Treibhausgasemissionen und der damit verbundenen klimatischen Veränderungen zu planen. Ein regelmäßiges Monitoring bietet die notwendige Datengrundlage, um auf Veränderungen zeitnah und effektiv reagieren zu können, und ist somit unerlässlich für die nachhaltige Gestaltung und Erhaltung der Infrastruktur. Es wurde nach einer Sensitivitätsanalyse der Nutzungsdauer ein Schwellenwert für die Aktualisierung der KiST-Karten und der FWZ-Karte bestimmt: eine Reduzierung der Nutzungsdauer um 5 Jahren. Dieser Schwellenwert ist wichtig, um sicherzustellen, dass die Karten stets aktuell und repräsentativ für die aktuellen Umweltbedingungen sind.

Abschließend wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf die Regelwerke (ZTV und TL Asphalt/Beton). Diese Diskussionen sind von entscheidender Bedeutung, um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Infrastruktur und die Umwelt zu verstehen und geeignete Maßnahmen zur Anpassung und Minderung zu ergreifen. Es hat sich gezeigt, dass der langfristige Klimawandel im Wesentlichen die Dimensionierung gemäß den RDO Asphalt/Beton und RStO beeinflusst, während kurzfristige Wetterschwankungen die Konstruktions- und Erstprüfungsbedingungen gemäß den ZTV und TL Asphalt/Beton beeinflussen werden.

In zukünftigen Forschungsaktivitäten sollten folgenden Aspekte näher betrachtet werden:

1. Die Schwellenwerte für die Aktualisierung der KiST-Karten in RDO Asphalt (2009) und RDO Beton (2009) müssen weiterhin untersucht werden. Dies ist notwendig, da die Schwellenwerte auf den Ergebnissen der neu entwickelten Sensitivitätsanalyse basieren, deren Funktion noch unausgereift ist und weiterer Überlegungen bedarf.

2. Für eine oben genannte bessere Sensitivitätsanalyse ist ein optimiertes mechanisches Modell erforderlich. Die Sensitivitätsanalyse der Asphaltbauweise stützt sich auf die Annahmen der durchschnittlichen Ermüdungszunahme aus Riwe und Kiehne (2014). Die Allgemeingültigkeit dieser durchschnittlichen Ermüdungszunahme sollte geprüft werden.
3. Die Sensitivitätsanalyse der Betonbauweise basiert auf die Annahme einer kritischen Plattenlänge, die bei der Berechnung der thermischen Belastung in RDO Beton (2009) gemacht wurden. Diese Annahme muss untersucht werden, um die Schwellenwerte zu bestimmen. Alternativ könnte ein FE-Modell entwickelt werden, um die thermische Belastung ohne diese Annahme zu berechnen.
4. Um die Verfahren der Aktualisierung der KiST-Karten der Beton- und Asphaltbauweise zu vereinheitlichen, wird eine Adaption des Implementierungsverfahren der KiST-Karte in den RDO Asphalt an die RDO Beton empfohlen. Derzeit wird der Temperaturgradient in den RDO Beton als Perzentilwert für verschiedenen Grenzzustände angenommen, während der Temperaturverlauf und die Verkehrsbelastung in den RDO Asphalt als Häufigkeitsverteilung dargestellt ist. Eine Häufigkeitsverteilung wie in den RDO Asphalt sollte in Zukunft ebenfalls für die RDO Beton entwickelt werden, um die KiST-Karten der Beton- und Asphaltbauweise zu vereinheitlichen.
5. Im vorliegenden Projekt wurde das mechanische Modell von dem thermischen Modell entkoppelt, um die KiST-Karten konstruktionsunabhängig zu erhalten. In Zukunft könnte die N_{zul} direkt nach der Anwendung des mechanischen Modells berechnet werden, vorausgesetzt das Dimensionierungsverfahren wurde einer Optimierung unterzogen.
6. Die Integration eines Klimamonitorings, welches sowohl aktuelle Klimadaten als auch zukünftige regionale Klimaprojektionen und möglicherweise neue Erkenntnisse zu Klimaprojektionen und realistischen Klimaszenarien umfasst, ist ein wesentlicher Bestandteil der Klimaanpassung für Straßenoberbauten. Es wird empfohlen, dieses Monitoring jährlich durchzuführen, um eine fortlaufende Aktualisierung der KiST-Karten zu gewährleisten.
7. Bei der Erstellung von Schädigungskarten für Straßenbauprojekte sollten die verfügbaren Klimadaten der Zukunft, korrigiert mit aktuellen Referenzdaten, genutzt werden, um die Karten für die gesamte Lebensdauer des Projektes relevant zu machen. Dies bedeutet, dass die Schädigungsraten sich auf einen zukünftigen Zeitraum beziehen sollten, der mit dem Start des Bauprojektes beginnt. Dieser Ansatz ist ein entscheidender Schritt, um eine Klimaanpassung im Straßenbau zu sichern. Relevante Regelwerke müssen entsprechend angepasst werden, sodass

für jedes Jahr, in dem neue Straßenbauprojekte realisiert werden, eine aktualisierte Schädigungskarte als Entscheidungsgrundlage verfügbar ist und in den Regelwerken verankert wird.

Literatur

- Adams, B. M. u. a. (2022). „Manual: Dakota, A Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis: Version 6.16 User’s Manual“. In: S. 347.
- Augter, G. und S. Kayser (13. Sep. 2016). *FE 89.0305/2015: „Erweiterte grafische Darstellung der KiST-Zonen für die RSO“*. Forschungsber. Bundesanstalt für Straßenwesen. 92 S.
- Bamforth, P. B. (2007). *Early Age Thermal Crack Control in Concrete*. Construction Industry Research & Information Association (CIRIA). 113 S. ISBN: 978-0860176602.
- Beckedahl, H. J. u. a. (2020). *FE 07.0276/2014/LRB Asphaltoberbau und extreme Temperaturen, Schlussbericht*.
- Blume, U. und T. Plehm (2009). „Aktualisierung der Frostzonenkarte zur Dimensionierung des frostsicheren Straßenoberbaus“. In: S. 7.
- Böhme, M. und F. Böttcher (2011). „Bodentemperaturen im Klimawandel: Auswertungen der Messreihe der Säkularstation Potsdam“. In: *Klimastatusbericht des Deutschen Wetterdienstes*, S. 85–90.
- Bundesregierung (2022). *Grundsatzbeschluss 2022: zur Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie*. Bundesregierung.
- Chen, J., H. Wang und P. Xie (Juli 2019). „Pavement temperature prediction: Theoretical models and critical affecting factors“. In: *Applied Thermal Engineering* 158, S. 113755. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.113755.
- Davids, W. (2019). *EverFE: Software for the 3D Finite Element Analysis of Jointed Plain Concrete Pavements*. Version 2.26.
- Davids, W. u. a. (2003). „Three-Dimensional Finite Element Analysis of Jointed Plain Concrete Pavement with EverFE2.2“. In: *Transportation Research Record* 1853, S. 92–99. DOI: 10.3141/1853-11.
- Davids, W. G., G. M. Turkiyyah und J. P. Mahoney (Jan. 1998). „EverFE: Rigid Pavement Three-Dimensional Finite Element Analysis Tool“. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1629.1, S. 41–49. DOI: 10.3141/1629-06.
- DIN EN 12697-26 (2016). *Bituminous Mixtures - Test Methods - Part 26: Stiffness*.
- DIN EN 14023 (2013). *bitumen and bituminous binders - specification framework for polymer modified bitumens; german version*.

- DWD (2023). *Klimastatusbericht Deutschland Jahr 2023*. https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/publikationen/ksb_2023.pdf?__blob=publicationFile&v=2. [Online; bezogen 10.04.2024].
- Eierle, B. (1999). „Berechnungsmodelle für rißgefährdete Betonbauteile unter frühem Temperaturzwang“. Diss. TU München.
- Eisenmann, J. (1970). „Bemessung von Zementbetondecken“. In: *Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen* 82. Hrsg. von Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen e.V.
- Federal Aviation Administration (18. Sep. 2017). *FAARFIELD - 3D Finite Element Based Design Procedure*. URL: <https://www.airporttech.tc.faa.gov/Products/Airport-Safety-Papers-Publications/Airport-Safety-Detail/ArtMID/3682/ArticleID/4/FAARFIELD-142> (besucht am 29.01.2020).
- FGSV (2011). *Arbeitspapiere zur Dimensionierung von Verkehrsflächenbefestigungen, Reihe B: Berechnungsmodelle, Teil B 2: Methode der Plattentheorie bei der Dimensionierung*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement. ISBN: 978-3-941790-89-6.
- FGSV AP 65 (2006). *Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn Arbeitsausschuss: Bemessung und Standardisierung der Verkehrsflächenbefestigungen Arbeitskreis: Stoffverhalten Bearbeitergruppe: Asphalt*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement.
- FGSV AP EDS 2 (2023). *Arbeitspapier Eingangsgrößen für die Dimensionierung und Bewertung der strukturellen Substanz Teil 2: Klima*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement. ISBN: 978-3-86446-382-2.
- Foos, S. (2006). „Unbewehrte Betonfahrbahnplatten unter witterungsbedingten Beanspruchungen“. Diss. TH Karlsruhe. 207 S.
- Henning, A. und A. Limberg (2012). „Variation of the subsoil temperature field in Berlin as a result of climate change and urbanization“. In: *Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, Cottbus* 19.1, S. 81–92.
- Hersbach, H. u. a. (2020). „The ERA5 global reanalysis“. In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146.730, S. 1999–2049.
- Hess, R. (1998). „Kalibrierung von Verhaltensmodellen für das Straßenerhaltungsmanagement“. Qualifikationsschr. Universität Hannover.
- Hofko, B. u. a. (März 2017). „Effect of short-term ageing temperature on bitumen properties“. In: *Road Materials and Pavement Design* 18.sup2, S. 108–117. DOI: 10.1080/14680629.2017.1304268.
- Hutschenreuther, J. und T. Wörner (2017). *Asphalt im Straßenbau*. 3. Aufl. Kirschbaum Verlag, Bonn.
- Ibrahim, S. H. u. a. (Dez. 2018). „The Impact of Road Pavement on Urban Heat Island (UHI) Phenomenon“. In: *International Journal of Technology* 9.8, S. 1597. DOI: 10.14716/ijtech.v9i8.2755.

- Ioannides, A. M. (2006). „Concrete pavement analysis: the first eighty years“. In: *International Journal of Pavement Engineering* 7 (4), S. 233–249. DOI: 10.1080/10298430600798481.
- Ioannides, A. M. und L. Khazanovich (März 1998). „Nonlinear Temperature Effects on Multilayered Concrete Pavements“. In: *Journal of Transportation Engineering* 124.2, S. 128–136. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1998)124:2(128).
- IPCC u. a. (2018). *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Hrsg. von T. Waterfield. IPCC.
- Lechner, B. (1996). „Der Temperaturgradient als Bemessungsgröße bei der Dimensionierung von dicken Betondecken“. Diss. TU München.
- El-Maaty, A. E. A., G. M. Hekal und E. M. S. El-Din (2016). „Modeling of Dowel Jointed Rigid Airfield Pavement under Thermal Gradients and Dynamic Loads“. In: *Civil Engineering Journal* 2.2, S. 38–51.
- Mahboub, K. C., Y. Liu und D. L. Allen (2004). „Evaluation of Temperature Responses in Concrete Pavement“. In: *Journal of Transportation Engineering* 130.3, S. 395–401. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:3(395).
- Markus, C. (März 2021). „Erweiterte Analyse der thermischen Zustände in Straßenbefestigungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Einflüsse und stoffspezifischer Materialparameter“. Diss. Dresden: Technische Universität Dresden. DOI: 10.25368/2021.3.
- Marotzke, J. u. a. (2021). „Which temperature trends can we expect for the 21st century“. In: *Hamburg Climate Futures Outlook 2021: Assessing the plausibility of deep decarbonization by 2050*. Cluster of Excellence Climate, Climatic Change, und Society (CLICCS), S. 53–59.
- Masad, E., R. Taha und B. Muhunthan (1996). „Finite-Element Analysis of Temperature Effects on Plain-Jointed Concrete Pavements“. In: *Journal of Transportation Engineering* 122 (5), S. 388–398. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1996)122:5(388).
- Mauder, M., T. Foken und J. Cuxart (2020). „Surface-energy-balance closure over land: a review“. In: *Boundary-Layer Meteorology* 177.2, S. 395–426.
- Miner, M. A. (1945). „Cumulative Fatigue Damage, fatigue; ermüdung; ermüdung“. In: *Journal of Applied Mechanics* 12, S. 159–164.
- Mohamed, A. und W. Hansen (1997). „Effect of nonlinear temperature gradient on curling stress in concrete pavements“. In: *Transportation Research Record*, S. 65–71. DOI: 10.3141/1568-08.
- Oeser, M. u. a. (2012). *Vorlesungsumdruck: Bautechnik von Verkehrsanlagen I (Lecture Notes: Engineering of Traffic Infrastructure I)*.
- Oeser, M. u. a. (2015). *Verbesserung der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit der rechnerische Dimensionierung von Asphaltbefestigungen über ein Finite Elemente Modell*.

- Forschungsprojekt FE 04.0259/2012/NGB im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen.* Forschungsber. RWTH Aachen, TU Dresden.
- Palmgren, A. G. (1924). „Die Lebensdauer von Kugellagern, fatigue; ermuedung; ermüdung“. In: *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure (VDI Zeitschrift)* 68.14, S. 339–341. ISSN: 0341-7255.
- Pane, I., W. Hansen und A. Mohamed (1998). „Three-Dimensional Finite Element Study on Effects of Nonlinear Temperature Gradients in Concrete Pavements“. In: *Transportation Research Record* 1629, S. 58–66. DOI: 10.3141/1629-08.
- Peyerl, M. u. a. (2016). „Stadtverkehrsflächen — Optimierter Beton für den innerstädtischen Bereich“. In: *update* 44.
- Raabe, A., K. Arnold und A. Ziemann (2002). „Horizontal turbulent fluxes of sensible heat and horizontal homogeneity in micrometeorological experiments“. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 19.8, S. 1225–1230.
- Rauthe, M. u. a. (2013). „A Central European precipitation climatology–Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS)“. In: *Meteorologische Zeitschrift* 22.3, S. 235–256.
- Razafimaharo, C. u. a. (2020). „New high-resolution gridded dataset of daily mean, minimum, and maximum temperature and relative humidity for Central Europe (HYRAS)“. In: *Theoretical and Applied Climatology* 142.3, S. 1531–1553.
- RDO Asphalt (2009). *Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdecke (RDO Asphalt)*. Techn. Ber. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- RDO Asphalt 21 (Entwurf) (2021). *Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdecke*. Techn. Ber. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- RDO Beton (2009). *Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen (RDO Beton)*. Techn. Ber. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- RDO Beton Entwurfsfassung (7. Mai 2018). *Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Betondecken (RDO Beton) Entwurfsfassung*. Techn. Ber. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- Reinhardt, N. L. B. (2023). „S 182: Bericht des FE Projekt FE 04.0313 Optimierung der Anwendbarkeit der Probabilistik in der Dimensionierung und Substanzbewertung von Betonstraßen“.
- Ren, D. (2015). „Optimisation of the Crack Pattern in Continuously Reinforced Concrete Pavements“. Diss. Faculty of Civil Engineering und Geosciences, Delft University of Technology. ISBN: 978-94-6186-579-3. DOI: 10.4233/uuid:599e8346-27d7-43e8-a67c-54f46ef03f76.

- Richardson, J. M. und J. M. Armaghani (1987). „Stress Caused by Temperature Gradient in Portland Cement Concrete Pavements“. In: *Transportation Research Record* 1121, S. 7–13.
- Riwe, A. und A. Kiehne (2014). *FE_07_0252_2011_ERB_Schlussbericht_DEU_Papierfassung*. Techn. Ber.
- RStO (2012). *Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen*. Techn. Ber. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV).
- Schnell, W., D. Gross und W. Hauger (1995). *Technische Mechanik 2: Elastostatik*. 5. Aufl. Springer Verlag. ISBN: 3-540-58696-2.
- Service, C. C. C. (2021). *European State of the Climate 2021*. <https://climate.copernicus.eu/esotc/2021>. [Online; bezogen 10.06.2022].
- Shoukry, S. N. u. a. (2007). „Validation of 3DFE Analysis of Rigid Pavement Dynamic Response to Moving Traffic and Nonlinear Temperature Gradient Effects“. In: *International Journal of Geomechanics* 7 (1), S. 16–24. DOI: 10.1061/(ASCE)1532-3641(2007)7:1(16).
- Sun, J. u. a. (2021). „Revisiting the surface energy imbalance“. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 126.11, e2020JD034219.
- Teegavarapu, R. S., T. Meskele und C. S. Pathak (2012). „Geo-spatial grid-based transformations of precipitation estimates using spatial interpolation methods“. In: *Computers & Geosciences* 40, S. 28–39.
- Teller, L. W. und E. C. Sutherland (1935). „The Structural Design of Concrete Pavements“. In: *Public Roads* 16.8.
- TL Asphalt-StB (2007). *TL Asphalt-StB: Technische Lieferbedingungen Für Asphaltmischgut Für Den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen*. Techn. Ber.
- TL Beton-StB (2007). *TL Beton-StB: Technische Lieferbedingungen Für Baustoffe Und Baustoffgemische Für Tragschichten Mit Hydraulischen Bindemitteln Und Fahrbahndecken Aus Beton*. Techn. Ber.
- TL Bitumen-StB (2013). *TL Bitumen-StB 07/13: Technische Lieferbedingungen für Straßenbaubitumen und gebrauchsfertige polymermodifizierte Bitumen*. Techn. Ber. 794. Köln.
- Ulrich, M. (2021). *Klimamodellauswertung Sachsen-Anhalt 1961–2100*.
- Van Vuuren, D. P. u. a. (2011). „The representative concentration pathways: an overview“. In: *Climatic change* 109.1, S. 5–31.
- Villaret, S. u. a. (2019a). *Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton*. Bd. 127. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe S: Straßenbau. Carl Ed. Schünemann, S. 76. ISBN: 978-3-95606-425-8.
- Villaret, S. u. a. (2019b). *KIST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton - Verteilungsfunktion und Extremwerte*. Bundesanstalt für Straßenwesen.

- Wellner, F. und S. Kayser (2007). *Grundlagen zur Erfassung der Temperaturbedingungen für eine analytische Bemessung von Asphaltbefestigungen. Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 04.198/2004/ARB*. TU Dresden. 148 S.
- Westergaard, H. M. (1926). „Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis“. In: *Public Roads* 7.2, S. 25–35. ISSN: 0033-3735.
- (1927). „Analysis of stresses in concrete pavements due to variations of temperature“. In: *Public Roads* 8.3, S. 54–60.
- (1948). „New Formulas for Stress in Concrete Pavements of Airfields“. In: *American Society of Civil Engineers Transactions* 113, S. 425–444.
- Winkler, E. (1867). *Die Lehre von der Elasticität und Festigkeit. Mit besonderer Rücksicht auf ihre Anwendung in der Technik*. H. Dominicus.
- Wunderling, N. u. a. (2022). „Global warming overshoots increase risk of triggering climate tipping points and cascades“. In.
- Zhongming, Z. u. a. (2021). „AR6 climate change 2021: The physical science basis“. In.
- Zotarelli, L. u. a. (2010). „Step by step calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method)“. In: *Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida* 8.
- ZTV Asphalt-StB (2013). *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen Und Richtlinien Für Den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen Aus Asphalt: ZTV Asphalt-StB 07/13 (2013 Ed., Vol. 2007)*. Techn. Ber.
- ZTV Beton-StB (Jan. 2007). *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen Und Richtlinien Für Den Bau von Tragschichten Mit Hydraulischen Bindemitteln Und Fahrbahndecken Aus Beton: ZTV Beton-StB 07/ Forschungsgesellschaft Für Straßen- Und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Betonbauweisen*. Techn. Ber. Köln.

Tabellen

- 3.1. Regionale Klimamodelle des DWD-Kernensembles für das RCP2.6.
- 3.2. Regionale Klimamodelle des DWD-Kernensembles für das RCP4.5.
- 3.3. Regionale Klimamodelle des DWD-Kernensembles für das RCP8.5.

- 5.1. Ergebnisse der Reduzierung der Anzahl der berechneten Stunden im Jahr.
Der Genauigkeitswert ist der Quotient des Perzentils des alten Datensatzes und des 84. Perzentils des neuen Datensatzes.
- 5.2. Vergleich der Berechnungszeit der Lokalworkstation und AWS Instanz.
Variante 1: Referenzberechnung, Variante 2-5: Berechnung der Zeitreihe des MAEG, Variante 6: Berechnung der Stichprobe nach Stochastikprozess.
- 5.3. Vergleich der Effizienz und Kosten zwischen verschiedenen Instanz. Variante 1: Referenzberechnung, Variante 2-5: Berechnung der Zeitreihe des MAEG, Variante 6: Berechnung der Stichprobe nach Stochastikprozess.

- 7.1. Vergleich zwei Punkte aus den Jahren 2001, 2003, 2008 und 2009.
- 7.2. Zusammengefasste Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen.
- 7.3. Vergleich zwischen der Betondeckendicke h_d und der Nutzungsdauer ND.

Abbildungen

- 2.1. Gemessene TFO verschiedener typischer Oberflächen.
- 2.2. Beanspruchung einer Asphaltbefestigung. Quelle: Oeser u. a. (2015).
- 2.3. Aktuelle Temperaturprofile in den RDO Asphalt und FGSV AP EDS 2 (2023).
- 2.4. Nichtlineare Temperaturprofile in Betondecken. Quelle: Teller und Sutherland (1935, Bild 9).
- 2.5. Schematische Darstellung von Temperaturspannungen in Betonplatten mit idealisierter konstanter Nullspannungstemperatur. Quelle: Foos (2006, Abb. 2.9).

- 4.1. Die Ergebnisse des thermischen Modells.
- 4.2. Ablaufplan des mechanischen Modells.
- 4.3. Tafel 1, Zeile 1 der RStO (2012).
- 4.4. Steifigkeits-Temperaturverläufe der Kalibrierasphalte aus den RDO Asphalt (2009).
- 4.5. Betondecke auf STS auf FSS gemäß RStO (2012, Tafel 2, Zeile 3.2).
- 4.6. Die Ermüdungsfunktion der RDO Beton: die Entwicklung von $\gamma_{c, fat}$ mit B_n .

- 5.1. Temperaturtagesgang aus dem in Kapitel 3 beschriebenen Datensatz.
- 5.2. Quelle: Villaret u. a. (2019b, Bild 6.3). Mittlere Tagesgänge der Lufttemperatur, Juli 2017; blau: gemessen über Beton (Fa. Villaret, Autobahnkreuz Vulkaneifel), rot: gemessen über Gras (DWD-Station Büchel), grün: gemessen neben der Autobahn (GMA Kelberg an der A1).
- 5.3. Sonneneinstrahlung aus dem in Kapitel 3 beschriebenen Datensatz.
- 5.4. Natürliche Windgeschwindigkeit aus dem in Kapitel 3 beschriebenen Datensatz.
- 5.5. Superposition der natürlichen und verkehrlichen windgeschwindigkeit.
- 5.6. Der Temperaturverlauf um 12:00 bis Tiefe 3,5 m.
- 5.7. Validierung des berechneten Temperaturverlaufes nach Wellner und Kayser (2007).

- 5.8. Quelle: Villaret u. a. (2019b, Bild 6.6). Mittlere Tagesgänge der Temperatur; blau: Fahrbahnoberfläche, grün: Lufttemperatur an der GMA, rot: Lufttemperatur an der DWD-Station Rostock-Laage, April bis September, 2016-2016.
 - 5.9. Der Verlauf des Temperaturgradient mit verschiedenen Betondeckendicke h_d .
 - 5.10. Parallelisierung auf der Workstation mit 32 Kerne.
 - 5.11. Docker Image stored on <https://hub.docker.com/repository/docker/isacgmbh/klimdim> .
 - 5.12. Beispiel von MAEG-Verteilung aus 2003, Punkt an der Stelle Länge = 6,664 297 141, Breite = 49,600 747 64
 - 5.13. Die Stündliche Entwicklung des MAEG.
 - 5.14. Die MAEG-Verteilung mit dem Datensatz ohne Januar und Dezember für Punkt 1 in 2003.
-
- 6.1. Darstellung der Frosteinwirkungszonen mithilfe des FI30 für die Referenzperiode 1991-2020.
 - 6.2. Darstellung der Frosteinwirkungszonen mit der neuen Skalierung mithilfe des FI30 für die Referenzperiode 1991-2020.
 - 6.3. Darstellung der winterlichen Temperatursumme für Tagesmitteltemperaturen unter dem Gefrierpunkt für die Referenzperiode 1991-2020 und die zukünftigen Zeiträume 2031-2060 sowie 2071-2100 für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5.
 - 6.4. Darstellung der zukünftigen Frosteinwirkungszonen und der relativen Änderungssignale mit der neuen Skalierung mithilfe des FI30 für die Referenzperiode 1991-2020 und die zukünftigen Zeiträume 2031-2060 sowie 2071-2100 für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5.
 - 6.5. Darstellung der Häufigkeiten der zukünftigen Frosteinwirkungszonen mit der neuen Skalierung mithilfe des FI30 für die Referenzperiode 1991-2020 und die zukünftigen Zeiträume 2031-2060 sowie 2071-2100 für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5.
 - 6.6. Darstellung der Häufigkeiten der relativen Änderungssignale der zukünftigen Frosteinwirkungszonen mit der neuen Skalierung mithilfe des FI30 für die Referenzperiode 1991-2020 und die zukünftigen Zeiträume 2031-2060 sowie 2071-2100 für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5.
 - 6.7. KiST-Karte für Asphalt für den Referenzzeitraum 1991-2020 basierend auf KiST-Raten R_{kist} 1991-2020.
 - 6.8. KiST-Karte für Asphalt für den Referenzzeitraum 1991-2020 basierend auf KiST-Raten R_{kist} 1991-2020.

- 6.9. KiST-Karte für Beton für den Referenzzeitraum 1991-2020. Gezeigt ist der 90. Perzentil des MAEG für den Referenzaufbau mit 300 mm Dicke.
- 6.10. KiST-Karte für Beton für den Referenzzeitraum 1991-2020. Gezeigt ist der 90. Perzentil des MAEG für den Referenzaufbau mit 300 mm Dicke.
- 6.11. Zeitlicher Verlauf der Temperaturänderungen der Gebietsmitteltemperatur in Deutschland für unterschiedliche Klimaszenarien. Abweichungen sind relativ zu 1991-2020.
- 6.12. Darstellung der Klimadaten für die Referenzperiode 1991-2020 und die zukünftigen Zeiträume 2031-2060 sowie 2071-2100 für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5.
- 6.13. Darstellung der zukünftigen KiST-Zonen für Asphalt und der relativen Änderungssignale gegenüber der Referenzperiode 1991-2020 für die zukünftigen Zeiträume 2031-2060 sowie 2071-2100 für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5.
- 6.14. Darstellung der Häufigkeiten der KiST-Zonen für Asphalt gegenüber für die Referenzperiode 1991-2020 und die zukünftigen Zeiträume 2031-2060 sowie 2071-2100 für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5.
- 6.15. Darstellung der Häufigkeiten der relativen Änderungssignale der KiST-Zonen für Asphalt für die Referenzperiode 1991-2020 und die zukünftigen Zeiträume 2031-2060 sowie 2071-2100 für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5.
- 6.16. Darstellung der zukünftigen KiST-Zonen und der relativen Änderungssignale für Beton gegenüber der Referenzperiode 1991-2020 für die zukünftigen Zeiträume 2031-2060 sowie 2071-2100 für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5.
- 6.17. Darstellung der Häufigkeiten der KiST-Zonen für Beton für die Referenzperiode 1991-2020 und die zukünftigen Zeiträume 2031-2060 sowie 2071-2100 für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5.
- 6.18. Darstellung der Häufigkeiten der relativen Änderungssignale der KiST-Zonen für Beton gegenüber der Referenzperiode 1991-2020 für die zukünftigen Zeiträume 2031-2060 sowie 2071-2100 für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5.
- 7.1. Klimadaten am 01.02.2003 an Punkt 51,34 ° N, 12,37 ° E, in der Nähe von Leipzig. Hier ist die Sonnenstrahlung (SSR) in W/m² und die Lufttemperatur (T2M) in °C dargestellt.
- 7.2. Sensitivitätsanalyse der Betonbauweise am 01.02.2003 für die Lufttemperatur
- 7.3. Sensitivitätsanalyse des Temperaturgradienten MAEG bei der Betonbauweise am 01.02.2003 für Lufttemperatur und Sonnenstrahlung

- 7.4. Sensitivitätsanalyse der Betonbauweise am 01.02.2003 Tag für Sonnenstrahlung
- 7.5. Vergleich der MAEG der 4 Jahre in Punkt 1.
- 7.6. Vergleich der MAEG der 4 Jahre in Punkt 2.
- 7.7. Sensitivitätsanalyse des MAEG bezogen auf die Lufttemperatur.
- 7.8. Sensitivitätsanalyse der TFO bei der Asphaltbauweise am 01.02.2003 für Lufttemperatur T2M und Sonnenstrahlung SSR.
- 7.9. Sensitivitätsanalyse des MAEG bezogen auf die Sonnenstrahlung.
- 7.10. Kausalitätskette der Nutzungsdauer in Abhängigkeit von der Klimadaten.
- 7.11. Vergleich zwischen der Betondeckendicke und dem MAEG, mit ND = 50 Jahre.
- 7.12. Kausalitätskette der Nutzungsdauer in Abhängigkeit von den Klimadaten.

- 9.1. Übersicht über die Struktur des Projektes
 - C.1. Die Kopplung der thermischen und mechanischen Modelle.
 - C.2. Ablauf der 24+n Algorithmus.
 - C.3. Tagesgang der TFO. Oben: Berechnung von 48 Stunden. Unten: Berechnung von 72 Stunden.
 - C.4. Vertikale Temperaturverläufe
 - C.5. Vergleich der Temperaturverläufen von 3 Tagen
 - C.6. Bestimmung der Anzahl der Gruppen mit Elbow Methode.
 - C.7. Statistische Abhängigkeit zwischen der N_{zul} und der glstfo bei der Asphaltbauweise.
 - C.8. Die zeitliche Verteilung der TFO und N_{zul} bei Asphaltbauweise.
 - C.9. Die räumliche Verteilung der N_{zul} bei Asphaltbauweise.
 - C.10. Die KDE Verteilung der Proben von Asphaltbauweise.
 - C.11. 2D KDE Darstellung der Stichproben bei der Asphaltbauweise.
 - C.12. Die zwei scharf getrennte Gruppen nach N_{zul} .
 - C.13. Die zeitliche Verteilung der TFO und N_{zul} bei Betonbauweise.
 - C.14. Quelle: Villaret u. a. (2019b, Bild 10.25, Seite 79), Zusammenhang zwischen der thermischen Spannung und des Temperaturgradient.
 - C.15. Die räumliche Verteilung der TFO und N_{zul} bei Betonbauweise.
 - C.16. Die KDE Verteilung der Proben von Betonbauweise.

 - E.1. Zusammenhang der 6 Abschnitten in `dakota.in`, aus Adams u. a. (2022, Bild 2.3)
 - E.2. Unabhängige Arbeitsplätze von Dakota

Anhänge


```

17 { type empty; }
18
19
20 top
21
22 {
23     type                codedMixed;
24
25     // Default BC values
26     //      https://cpp.openfoam.org/v8/
27     //      classFoam_1_1mixedFvPatchField.html#
28     //      a14473cf09faa17b20583eca0a6bd6377
29     valueFraction    uniform 0; // 0 means all gradient bc
30     refValue          uniform 0; // not used fixed value
31     refGradient      uniform 0; // patch normal gradient
32
33     name              ramp; // name of generated BC
34
35     // coded BC
36     //      https://cpp.openfoam.org/v8/
37     //      classFoam_1_1codedMixedFvPatchField.html
38
39     code
40     #{
41
42         #include "../simulationConditions"
43
44         // get T_average_top_bc
45         const volScalarField& T_scalar_volume_field = this->db
46             ().objectRegistry::lookupObject<volScalarField> ("T
47             ");
48         const fvMesh& mesh = patch().boundaryMesh().mesh();
49         label my_top_boundary_patch = mesh.boundaryMesh().
50             findPatchID("top");
51         const scalarField& T_top_scalar_field =
52             T_scalar_volume_field.boundaryField()[
53             my_top_boundary_patch];
54         const scalar T_average_top_bc = gAverage(
55             T_top_scalar_field);

```

```

49 Info << "Temperature_average_on_bc:_" <<
      T_average_top_bc << endl;
50
51
52 // calculate natural convection bc
53 const scalar htc_natural_convection =
54     698.24 *1*(0.00144 *pow((T_average_top_bc +
      temperature_air) /2, 0.3) *pow(u_wind, 0.7)
55     + 0.00097 *(T_average_top_bc - temperature_air) );
56
57 // Vehrenkamp model from ChenWang2019
58 const scalar q_natural_convection =
      htc_natural_convection *( temperature_air -
      T_average_top_bc );
59 Info << "heat_flux_natural_convection:_" <<
      q_natural_convection << endl;
60
61
62 // solar radiation
63 const scalar q_radiation_solar_net = (1 -
      albedo_surface) * q_radiation_solar ;
64 Info << "heat_flux_solar_net:_" <<
      q_radiation_solar_net << endl;
65
66
67 // surface radiation
68 const scalar q_radiation_surface = - sigma_boltzmann *
      emissivity_surface *pow(T_average_top_bc, 4);
69 Info << "heat_flux_radiation_surface:_" <<
      q_radiation_surface << endl;
70
71
72 const scalar q_boundary = q_natural_convection
73     + q_radiation_solar_net
74     + q_radiation_atmosphere
75     + q_radiation_surface;
76 this→refGrad() = q_boundary / thermal_conductivity ;
77 // Unit: K/m
78 // positive values leads to rising temperature
79 #};
80

```


Anhang B.

Octave Eingabedaten für das Asphaltmodell

Die Implementierung des mechanischen Modells in Octave erfordert die folgenden Eingabedaten:

1. Materialparameter: `material.json`
2. Verkehrsdaten: `traffic-load.json`
3. Modellaufbau: `construction-asphalt.json`

Quellcode B.1: Materialparameter von Asphalt für die Teststrecke

```
1 {
2   "comment": "all_stifnesses_in_N/mm^2(MPa). If no
   temperature_is_given, temperature_independent_stifness
   is_assumed.",
3   "asphalttragschicht":{
4     "temperature": [
5       -20,
6       -15,
7       -10,
8       -5,
9       0,
10      5,
11      10,
12      15,
13      20,
14      25,
15      30,
16      35,
17      40,
```

```
18         45,
19         50
20     ],
21     "stiffness": [
22         26720,
23         24464,
24         21103,
25         17853,
26         15109,
27         12811,
28         10725,
29         8637,
30         6481,
31         4377,
32         2592,
33         1425,
34         1011,
35         1003,
36         327
37     ],
38     "poissonRatio": 0.35
39 },
40 "asphaltbinderschicht":{
41     "temperature": [
42         -20,
43         -15,
44         -10,
45         -5,
46         0,
47         5,
48         10,
49         15,
50         20,
51         25,
52         30,
53         35,
54         40,
55         45,
56         50
57     ],
58     "stiffness": [
```

```

59         30473,
60         29449,
61         27876,
62         25502,
63         22214,
64         18913,
65         15729,
66         12655,
67         9686,
68         6817,
69         4124,
70         2402,
71         1424,
72         858,
73         525
74     ],
75     "poissonRatio": 0.35
76 },
77 "asphaltdeckschicht": {
78     "temperature": [
79         -20,
80         -15,
81         -10,
82         -5,
83         0,
84         5,
85         10,
86         15,
87         20,
88         25,
89         30,
90         35,
91         40,
92         45,
93         50
94     ],
95     "stiffness" : [
96         26319,
97         24664,
98         22196,
99         19172,

```

```

100         16255,
101         13443,
102         10729,
103         8111,
104         5581,
105         3425,
106         2119,
107         1332,
108         850,
109         550,
110         360
111     ],
112     "poissonRatio": 0.35
113 },
114 "beton": {
115     "stiffness": 39000,
116     "poissonRatio": 0.2
117 },
118 "hydraulischgebundenetragschicht": {
119     "stiffness": 2000,
120     "poissonRatio": 0.25
121 },
122 "schottertragschicht": {
123     "stiffness": 180,
124     "poissonRatio": 0.49
125 },
126 "frostschutzschicht": {
127     "stiffness": 121,
128     "poissonRatio": 0.49
129 },
130 "boden": {
131     "stiffness": 45,
132     "poissonRatio": 0.49
133 }
134 }

```

Quellcode B.2: Verkehrsdaten

```

1 "title": "Lastdaten_Reifenabdruck",
2 "description": "Achlastklasse_5_der_RDO_Aspalt_2009_
   entspricht_10to_Achse,_entspricht_Normradlast_der_RDO_Beton

```

```

    _2009.",
3 "alk5":
4   {
5     "pressure": 0.693915551880664,
6     "radius": 150
7   }

```

Quellcode B.3: Modellaufbau der Testasphaltstraße

```

1 "bk100_650mm_5layers":
2   {
3     "title": "Schichtenaufbau_RStO12_Tafel_1_Zeile_1",
4     "description": "Bauweise_Aspaltragschicht_auf_
5     Frostschutzschicht",
6     "thicknesses": [36, 84, 216, 312, 2000],
7     "materials": ["asphaltdeckschicht", "
8     asphaltbinderschicht", "aspaltragschicht", "
9     frostschutzschicht", "boden"],
    "bond": [0, 0, 1000, 1000],
    "conflateUnboundLayers": true
  }

```

Anhang C.

Kopplung der thermischen und mechanischen Modelle

Nach der Untersuchung der thermischen und mechanischen Modelle in Kapitel 4 wird in diesem Abschnitt die Kopplung dieser Modelle vorgestellt. Es wird gezeigt, dass die Kopplung der Modelle für die bisherige Dimensionierungsmethode, insbesondere für die Methode nach RDO Beton (2009), nicht geeignet ist. Die Kopplung kann erst nach einer Optimierung der bisherigen Methode durchgeführt werden.

Die Umsetzung der Kopplung der thermischen und mechanischen Modelle erfolgt gemäß der Vorhabensbeschreibung wie in der Abbildung C.1 dargestellt.

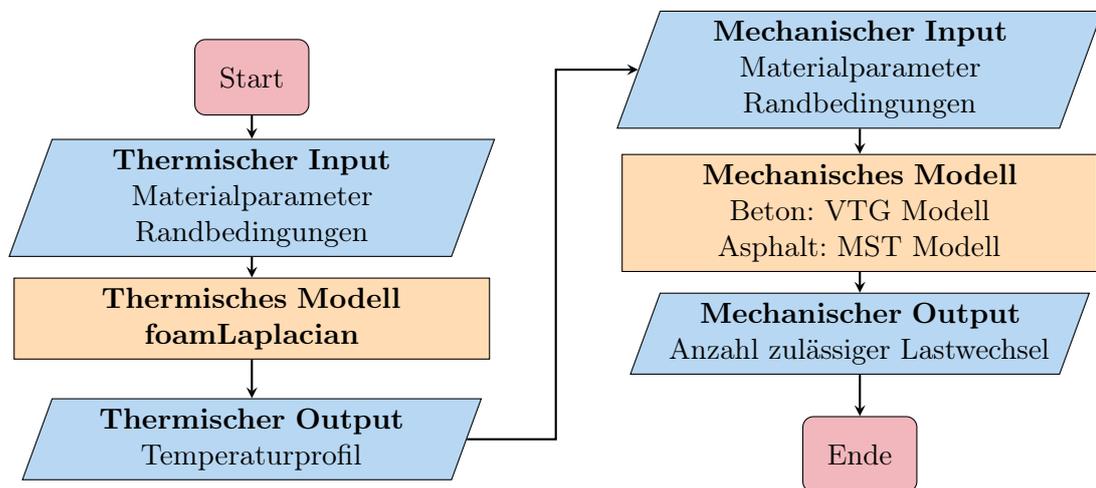


Abbildung C.1.: Die Kopplung der thermischen und mechanischen Modelle.

Die thermischen und mechanischen Modelle wurden bereits in Kapitel 4 erläutert. Die Plausibilität der einzelnen Modelle kann durch die entsprechende Software, die in verschiedenen Projekten entwickelt wurde, gewährleistet werden. Wenn die Parameter

gut eingestellt sind, sollten die Ergebnisse aus numerischen Gründen keine Probleme aufweisen. Neben dem numerischen Problem ist der wichtigste Schritt bei der Kopplung dieser Modelle, die korrekten stündlichen vertikalen Temperaturverläufe zu erhalten und diese Verläufe für die Berechnung der entsprechenden zulässigen Lastwiederholungen zu verwenden. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, den Temperaturverlauf zu ermitteln:

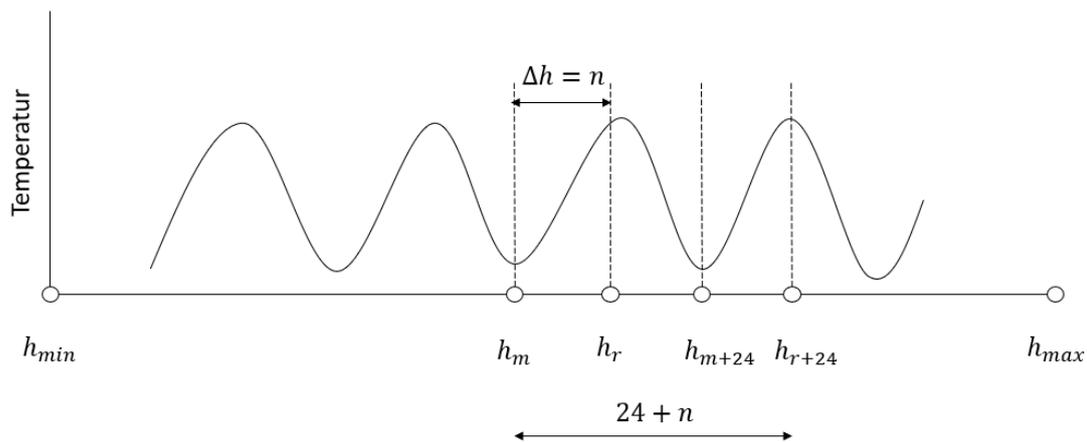
- Anwendung eines analytischen Ausdrucks zur Berechnung des Temperaturfeldes, wie in den RDO Asphalt 09 vorgeschlagen.
- Bestimmung des Temperaturfeldes basierend auf der TFO und der Tageszeit, wie in Wellner und Kayser (2007) beschrieben.
- Durchführung einer stündlichen Berechnung auf Basis eines linearen Temperaturverlaufs, wie in Villaret u. a. (2019b) dargestellt.

Die ersten beiden Methoden sind stark vereinfacht, da sie den lokalen Einfluss der Wetterbedingungen nicht berücksichtigen können. Die dritte Methode nutzt ein EPM zur Berechnung der stündlichen Temperaturverläufe, jedoch kann die Annahme einer linearen Anfangstemperatur zu einer Unterschätzung der TFO führen. Dieses Problem lässt sich mit dem im Folgenden vorgestellten 24+n-Algorithmus beheben.

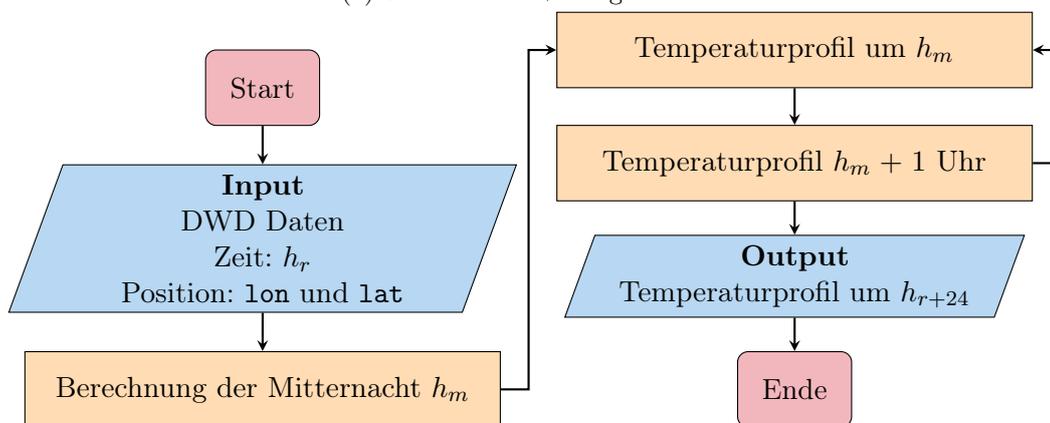
Anfangsbedingung für das thermische Modell

Die Auswahl der Anfangsbedingung für die Simulation ist von entscheidender Bedeutung, da eine ungenaue Wahl zu erheblichen Verzerrungen des Temperaturverlaufs in den nachfolgenden Stunden führen kann. In diesem Abschnitt wird die Bestimmung der Anfangsbedingung auf der Grundlage eines 24+n-Stunden-Algorithmus vorgestellt. Dieser Algorithmus wird in Abbildung C.2a und Abbildung C.2b dargestellt. Für jede beliebige Stunde h_r , die zwischen der minimalen Stunde h_{min} und der maximalen Stunde h_{max} der DWD-Datenbank liegt, wird der stündliche Durchschnittstemperaturverlauf wie folgt berechnet:

1. Ermittlung der entsprechenden Mitternachtsstunde h_m .
2. Berechnung der Differenz $\Delta h = n$ zwischen h_m und h_r .
3. Berechnung des konvergierten Werts bei h_m , wie in Abschnitt 4.1 beschrieben.
4. Einsetzen von h_m als h_i , um den Temperaturverlauf in der nächsten Stunde h_{i+1} zu berechnen.
5. Einsetzen von h_{i+1} als h_i , um die Temperatur in der nächsten Stunde zu berechnen, und Wiederholung dieses Schritts für 24+n Stunden.



(a) Skizze der 24+n Algorithmus



(b) Ablauf der 24+n Algorithmus.

Abbildung C.2.: Ablauf der 24+n Algorithmus.

Es ist zu beachten, dass bei der Berechnung des Temperaturfeldes zum konvergierten Wert um Mitternacht in Schritt 3 nur langfristige Faktoren wie Sonneneinstrahlung, atmosphärische Strahlung und Lufttemperatur in das Modell einbezogen werden. Diese Faktoren können als stabil angesehen werden, um den Einfluss unbekannter Randbedingungen zu vermeiden. Auf der anderen Seite werden kurzfristige Faktoren, wie die natürliche und durch den Verkehr induzierte Windgeschwindigkeit, um Mitternacht ignoriert, da diese Faktoren nicht lange genug anhalten, um einen konvergierten Wert zu erreichen. Die Sonnenstrahlung ist in der Nacht gleich null. Daher ist die Lufttemperatur der einzige Faktor, der den Temperaturverlauf in der Nacht beeinflusst. Für die folgenden Stunden wird jedoch nicht der konvergierte stationäre Zustand als Anfangsbedingung verwendet. Ein Zeitraum von einer Stunde reicht nicht aus, damit

das gesamte System zu einem stationären Zustand konvergieren kann, weshalb die Annahme eines linearen Temperaturverlaufs bei RDO Beton (2009) für die Simulation möglicherweise nicht zuverlässig ist.

Die Anpassung der Einstellungen für die Anfangsbedingungen in OpenFOAM erfolgt in den entsprechenden Eingabedateien, die exemplarisch in Anhang A dargestellt sind. Im dritten Schritt sollte die Steuerdatei, die in Quellcode A.4 definiert ist, an einen ausreichend langen Zeitraum angepasst werden. Die Anfangsbedingung wird in der Datei T von OpenFOAM festgelegt. Ein Beispiel hierfür ist in Quellcode A.3 zu finden. In diesem Beispiel wird die Innentemperatur einheitlich auf einen Wert von 300 K gesetzt. Dies stellt die Anfangsbedingung für die Mitternachtsstunde dar, wenn keine Einflüsse durch Sonneneinstrahlung und Wind berücksichtigt werden und eine lange Zeitspanne für die Konvergenz angenommen wird. Ab der nächsten Stunde wird die Anfangsbedingung durch das endgültige Temperaturfeld der vorherigen Stunde ersetzt, wobei die Temperatur jedes Punktes definiert wird. Dies erfolgt in der Software durch das Kopieren der Endtemperaturdatei T in den Ordner 0 der Anfangsbedingungen.

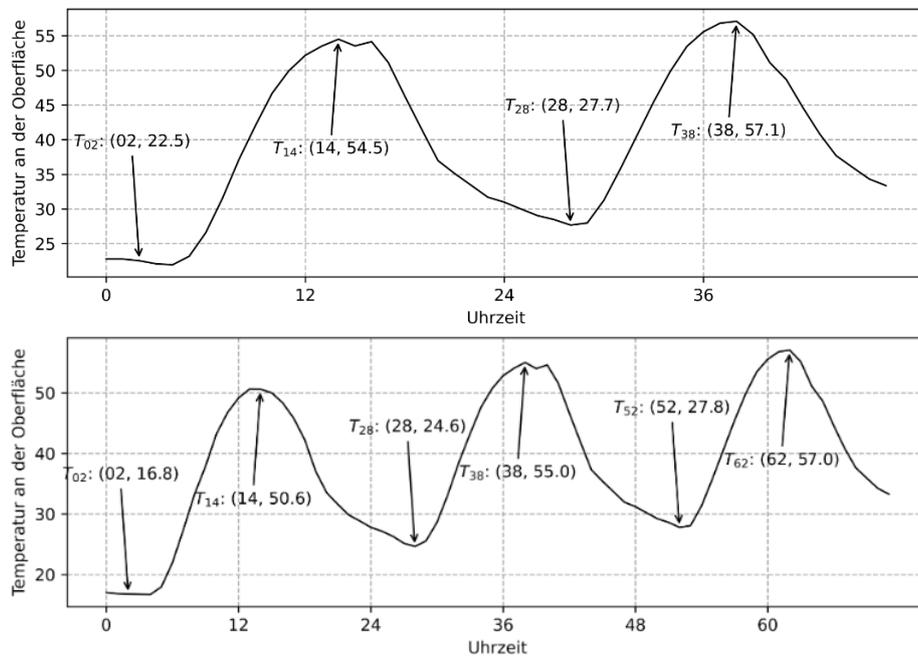


Abbildung C.3.: Tagesgang der TFO. Oben: Berechnung von 48 Stunden. Unten: Berechnung von 72 Stunden.

Die Auswirkungen des 24+n-Stunden-Algorithmus sind in Abbildung C.3 dargestellt. Die Kurve, die die 0. bis 47. Stunden in Abbildung C.3 oben darstellt, wird als 24. bis

71. Stunden in Abbildung C.3 unten neu berechnet. Die qualitative Veränderung dieser beiden Kurven ist ähnlich. Die absoluten Maximum- und Minimumwerte der Kurven unterscheiden sich jedoch. Der Punkt $T_{02} = 22,5^\circ\text{C}$ ist kleiner als der entsprechende Punkt von $T_{28} = 24,6^\circ\text{C}$. Die höhere Temperatur von $24,6^\circ\text{C}$ deutet darauf hin, dass sich die Temperatur nicht wie angenommen zur Stunde 0 auf den stationären Zustand abkühlt. Der Wert von $T_{02} = 22,5^\circ\text{C}$ in Abbildung C.3 oben und $T_{02} = 16,8^\circ\text{C}$ in Abbildung C.3 unten entspricht genau der Lufttemperatur. Nach einem Tag ist der Wert von $T_{28} = 27,7^\circ\text{C}$ in Abbildung C.3 oben und $T_{52} = 27,8^\circ\text{C}$ in Abbildung C.3 unten nahezu identisch. Dies zeigt die Wirksamkeit des 24+n-Stunden-Algorithmus, der den Einfluss der Anfangsbedingung eliminieren kann.

Es ist auch zu beobachten, dass die Oberflächentemperatur in den Mitternachtsstunden des ersten Tages niedriger ist als die Temperatur des zweiten Tages. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass der zweite Tag wärmer ist als der erste Tag.

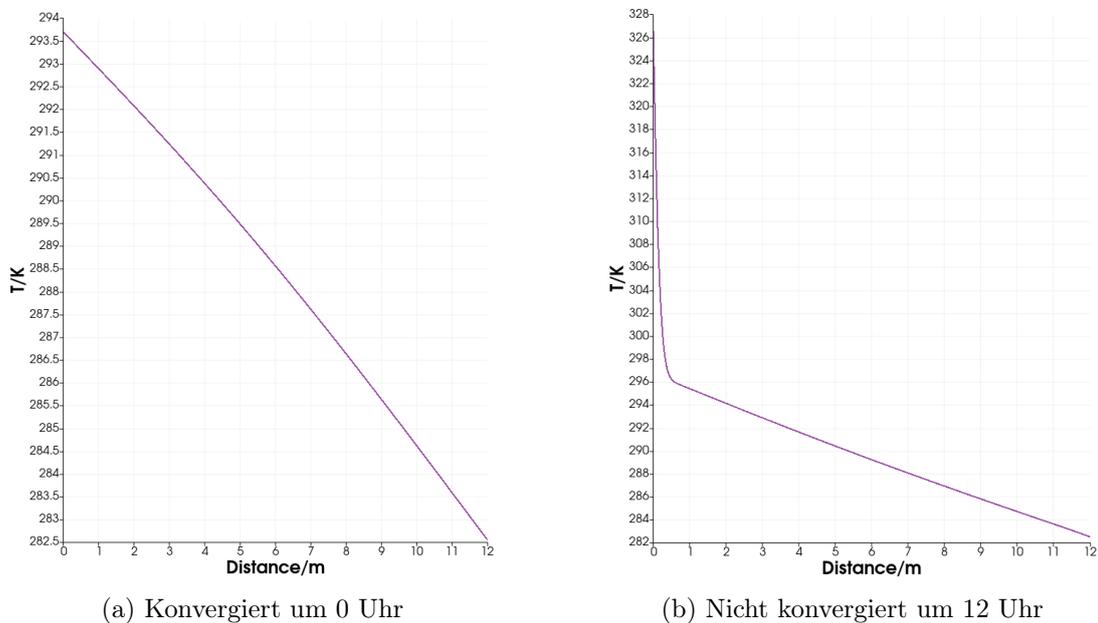


Abbildung C.4.: Vertikale Temperaturverläufe

In Villaret u. a. (2019b) wird eine lineare Interpolation zur Festlegung der Anfangsbedingungen verwendet. Für eine solche Interpolation werden zwei Fixpunkte benötigt. Der eine Punkt ist die Temperatur am Boden des Straßenmodells, der andere Punkt ist die Temperatur an der Straßenoberfläche, die der Lufttemperatur entspricht. Allerdings unterscheidet sich die tatsächliche Temperatur an der Straßenoberfläche von der Luft-

temperatur, da Luft und Straße unterschiedliche Wärmekapazitäten aufweisen. Dies kann zu einer Unterschätzung des Ausgangszustands der Straße führen.

Nicht nur die Oberflächentemperatur, sondern auch die vertikale Temperaturverteilung wird durch die Wahl der Anfangsbedingung und des Simulationszeitraums beeinflusst, insbesondere im oberen Bereich der Straße. In Abbildung C.4a und Abbildung C.4b sind die Temperaturverteilungen für die Mitternachts- und Mittagsstunden dargestellt.

Die Mitternachtsstunde wird über einen langen Zeitraum berechnet, sodass sie zu einem stabilen Zustand ohne plötzliche Änderungen des Temperaturgradienten konvergiert. Im Gegensatz dazu zeigt die Temperaturverteilung zur Mittagszeit eine plötzliche Änderung in einer Tiefe von etwa 0,4 m.

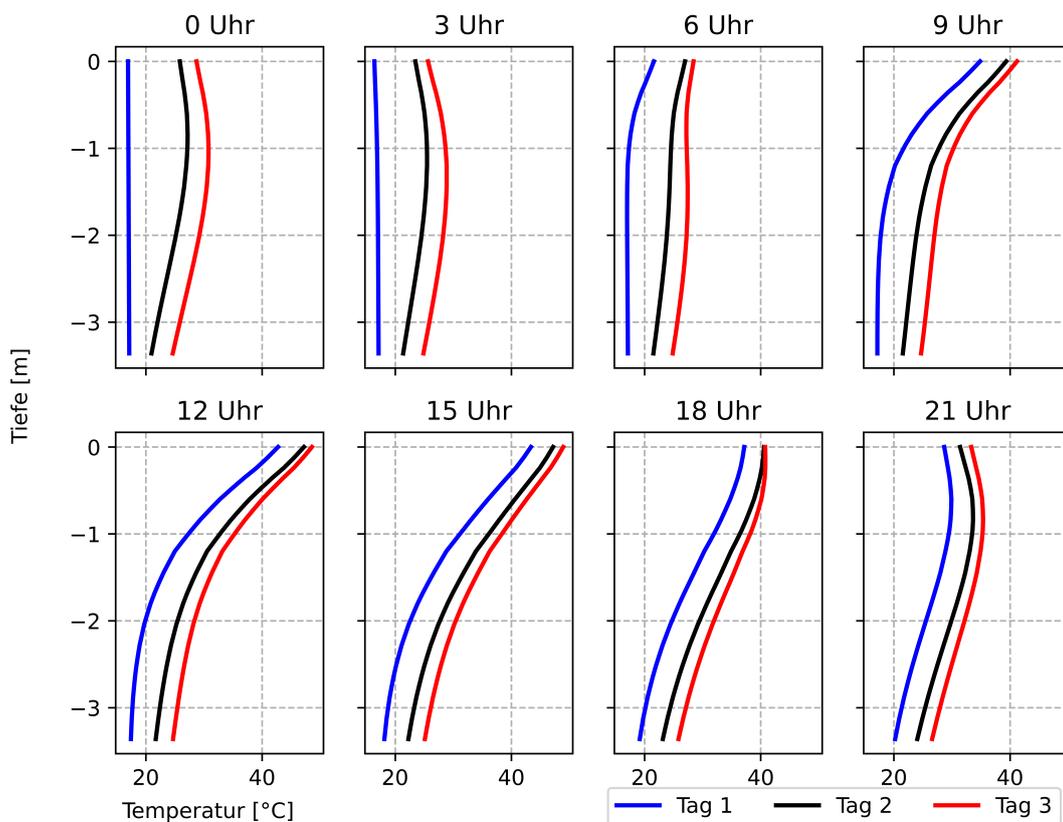


Abbildung C.5.: Vergleich der Temperaturverläufe von 3 Tagen

Der Vergleich der vertikalen Temperaturverteilung an den drei Tagen ist in Abbildung C.5 dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass die Temperaturverteilungen, repräsentiert durch die schwarze und die rote Linie, qualitativ ähnlich sind. Hinsichtlich der

blauen Linien sind die Linien in der 0. und 3. Stunde nahezu linear und werden in der Simulation wahrscheinlich aufgrund der Anfangsbedingungen unterschätzt. Um eine Verzerrung durch die Anfangsbedingung zu vermeiden, ist es ratsam, die Simulation über einen Zeitraum von $24+n$ Stunden durchzuführen. Der Nachteil des $24+n$ -Stunden-Algorithmus liegt im Zeitaufwand. Für jede thermische Berechnung, die eine Stunde umfasst, wird etwa eine Minute benötigt. Für eine Simulation von $24+n$ Stunden, wobei n von 0 bis 24 variiert, werden insgesamt 35 Minuten benötigt.

Kopplung von thermischen und mechanischen Modellen

Nach der Berechnung des thermischen Modells wird die Temperaturverteilung der entsprechenden Stunde gespeichert und steht für die Berechnungen des mechanischen Modells zur Verfügung. Im Asphaltmodell wird diese Temperaturverteilung zur Berechnung der zugehörigen Materialparameter herangezogen, wie in Abschnitt 4.2.2 dargestellt. Im Betonmodell wird die Temperaturverteilung in einen mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten umgewandelt, wie in Gleichung C.1 nach Villaret u. a. (2019b) beschrieben.

$$\delta_T \approx \frac{12 \sum_{i=1}^n T_i(z_i - h/2) \Delta z_i}{h^3} \quad (\text{C.1})$$

Das Ergebnis des mechanischen Modells ist die zulässige Anzahl an wiederholten Verkehrslasten.

Lokale Validierung der Kopplung

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse zweier Dakota-Läufe präsentiert: Einer für eine Asphaltbauweise mit 1000 Proben und der andere für eine Betonbauweise mit 300 Proben. Die resultierende zulässige Anzahl an Lastwiederholungen zeigt eine völlig unterschiedliche Verteilung. Für den Beton trägt eine Erhöhung der Stichprobengröße nicht zu einer besseren Charakterisierung der Verteilung bei, weshalb hier nur 300 Stichproben ausgewählt wurden.

Lokale Validierung mit Asphalt

Die Ausgabedatei von Dakota, `table_out.dat`, wird analysiert. Die 1000 Stichproben umfassen die Eigenschaften `latitude`, `longitude`, `time`, `nzul` (N_{zul}) und `tfo`. Um die

KiST-Karten zu erstellen, muss die Beziehung zwischen den N_{zul} und der gewählten Position zu unterschiedlichen Zeiten ermittelt werden. Daher werden verschiedene statistische Techniken angewendet, um diese Zusammenhänge zu ergründen.

Zunächst werden die Quantile der zulässigen Lastwiederholungen berechnet. $N_{zul}(50\%) = 1,86 \cdot 10^7$ und $N_{zul}(97\%) = 2,47 \cdot 10^8$. Dies gibt einen Überblick über die Größenordnung von N_{zul} . Diese Werte liegen im plausiblen Bereich, wie in Abschnitt 5.2 diskutiert.

Anschließend werden die Stichproben basierend auf diesen fünf Eigenschaften (`latitude`, `longitude`, `time`, `nzul`(N_{zul}) und `tfo`) gruppiert. Die Anzahl der Gruppen wird durch die Within-Cluster Sum of Square (WCSS) bestimmt. WCSS ist ein Maß für die Summe der quadrierten Abstände zwischen jedem Datenpunkt und dem zugehörigen Zentrum seiner Gruppe. Sie wird zur Bewertung der Leistung eines Clustering-Algorithmus verwendet und ist auch als Intra-Cluster-Varianz bekannt. Die WCSS wird verwendet, um die optimale Anzahl von Gruppen in einem Datensatz zu bestimmen, indem die WCSS-Werte gegen die Anzahl der Gruppen aufgetragen werden. Der Punkt, an dem die Abnahme der WCSS beginnt, sich abzuschwächen, ist die optimale Anzahl von Gruppen. Das Ergebnis der WCSS-Analyse ist in Abbildung C.6 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der WCSS nach 5 Gruppen bereits sehr langsam abnimmt, sodass man 5 Gruppen als Anzahl der Gruppen wählen kann.

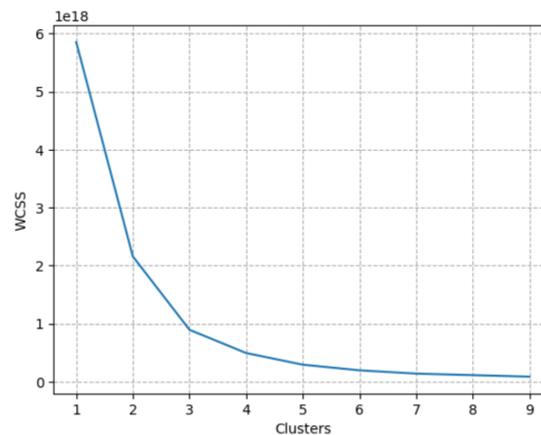


Abbildung C.6.: Bestimmung der Anzahl der Gruppen mit Elbow Methode.

Es ist zu beachten, dass N_{zul} die größte Abweichung aufweist und die Ergebnisse daher hauptsächlich von N_{zul} abhängen. Um die anderen Eigenschaften nicht zu vernachlässigen, könnte N_{zul} normalisiert oder eine Log-Transformation angewendet werden. Für die Zwecke dieser Arbeit wird N_{zul} jedoch zunächst unverändert belassen. Abbildung C.7 zeigt die Beziehung zwischen der Oberflächentemperatur und den zulässigen

Lastwiederholungen. Die Legende der Gruppen hat keine besondere Bedeutung, sie dient lediglich als Indikator für die Gruppen 0 bis 4. Grob gesagt, nimmt N_{zul} ab, wenn TFO zunimmt. Dies liegt daran, dass Asphalt bei höheren Temperaturen weicher ist und daher weniger Lastwiederholungen standhalten kann als bei niedrigeren Temperaturen. Verschiedene TFO können auch den gleichen N_{zul} erzeugen. Der Grund dafür könnte sein, dass der Unterschied in TFO nicht unbedingt einen Unterschied in der vertikalen Temperaturverteilung bedeutet. Die TFO (oder die Temperatur in den oberen 5 cm der Straße) reagiert sehr empfindlich auf Umgebungsbedingungen wie Windgeschwindigkeit bzw. Sonneneinstrahlung. Die Temperatur im unteren Teil der Straße ist stabiler als im oberen Teil. In Abbildung C.7 sind mindestens sechs Regressionskurven zu erkennen. Diese Kurven könnten verschiedenen vertikalen Temperaturverteilungen entsprechen. Bei gleicher Form der Temperaturverteilung (innerhalb derselben Regressionskurve) ist die TFO umso höher, je niedriger die N_{zul} ist.

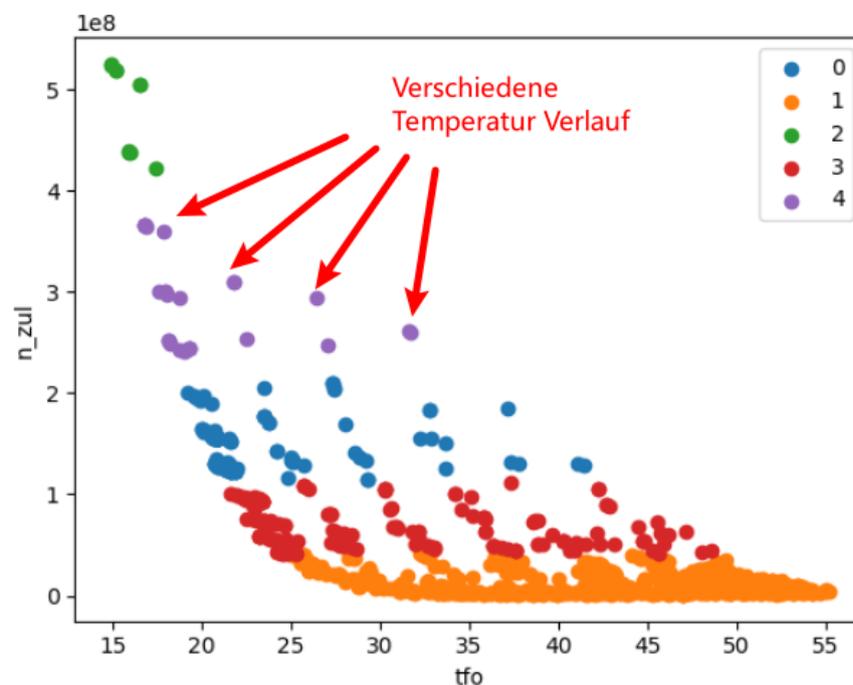
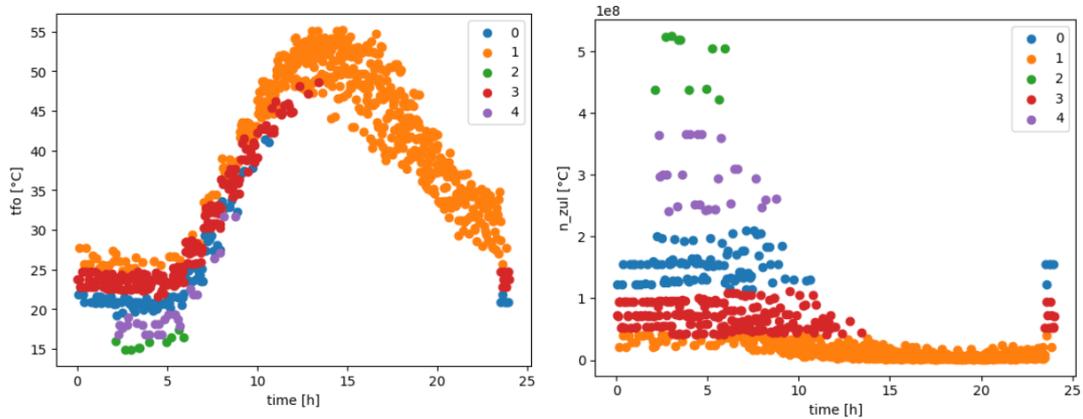


Abbildung C.7.: Statistische Abhängigkeit zwischen der N_{zul} und der g_{lftfo} bei der Asphaltbauweise.

In Abbildung C.8a ist die zeitliche Verteilung des TFO dargestellt. Die niedrigsten Temperaturen treten hauptsächlich in der Nacht auf, während die höchsten Temperaturen tagsüber erreicht werden.

Die zeitliche Verteilung von N_{zul} ist in Abbildung C.8b zu sehen. In der Nacht ist N_{zul}

größer als am Tag. Ein praktischer Ratschlag, der sich aus dieser zeitlichen Verteilung von N_{zul} ableiten lässt, wäre, den Schwerlastverkehr in der Nacht abzuwickeln. Allerdings könnte dies aus Gründen der Fahrersicherheit und des Verkehrsflusses nicht akzeptabel sein.



(a) Die TFO in Abhängigkeit von der Tageszeit. (b) Die N_{zul} in Abhängigkeit von der Tageszeit.

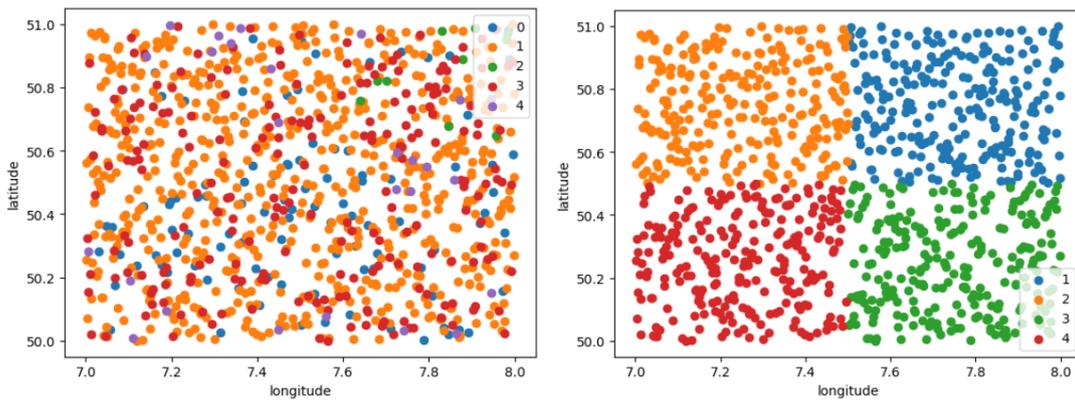
Abbildung C.8.: Die zeitliche Verteilung der TFO und N_{zul} bei Asphaltbauweise.

Abbildung C.9a zeigt die räumliche Verteilung der Proben. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die grünen Punkte in der nordöstlichen Ecke konzentrieren, was auf eine plötzliche Veränderung der Umgebung, wie beispielsweise die Höhe der Landschaft, hindeuten kann. Ein weiteres Merkmal der räumlichen Verteilung ist mit bloßem Auge nicht leicht zu erkennen. Die räumliche Verteilung wird daher mithilfe der Kernel Density Estimation (KDE) weiter untersucht.

Um die räumlichen Verteilung der Stichproben zu bewerten, werden die Stichprobenpunkte entsprechend ihrer Position in vier Gruppen eingeteilt, wie in Abbildung C.9b dargestellt. Jeder dieser kleineren Blöcke wird mit der KDE-Methode analysiert.

Die KDE-Verteilungen von N_{zul} und TFO sind in Abbildung C.10a und Abbildung C.10b dargestellt. Da diese Stichprobenpunkte aus einem sehr kleinen Gebiet stammen, ist kein signifikanter Unterschied in der Verteilung feststellbar. Der auffälligste Unterschied zwischen den verschiedenen Gruppen ist die Verteilung im Bereich mit größerem N_{zul} . Diese tritt nur in der Nacht auf, wenn weniger Verkehr auf der Straße ist.

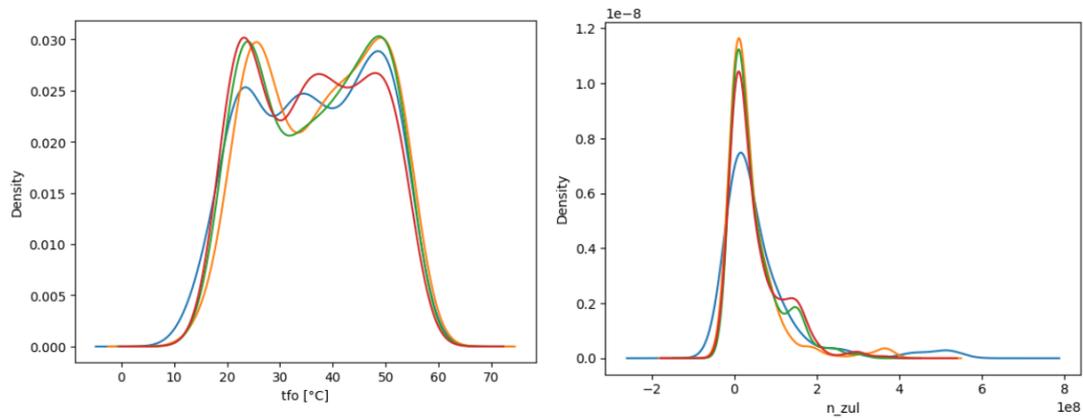
Eine 2-D-KDE-Darstellung ist in Abbildung C.11 abgebildet. Die Dunkelheit der Farbe repräsentiert die Dichte der Verteilung. Der Großteil der Fläche dieser vier Blöcke überlappt. Es ist keine signifikante Trennung erkennbar. Der in Abbildung C.10b dargestellte lange Schweif ist in der Niedrigtemperaturzone auf der linken Seite der



(a) Gruppen nach N_{zul} .

(b) Gruppierung nach der Position.

Abbildung C.9.: Die räumliche Verteilung der N_{zul} bei Asphaltbauweise.



(a) KDE von TFO

(b) KDE von N_{zul}

Abbildung C.10.: Die KDE Verteilung der Proben von Asphaltbauweise.

Abbildung deutlicher zu sehen. Diese Tragfähigkeit bei niedriger Temperatur ist jedoch aus Sicht der Dimensionierung kein kritischer Fall.

Für eine weitergehende Unterteilung der verschiedenen geographischen Gebiete basierend auf den zulässigen Lastwiederholungen ist ein größerer Bereich von DWD-Daten erforderlich.

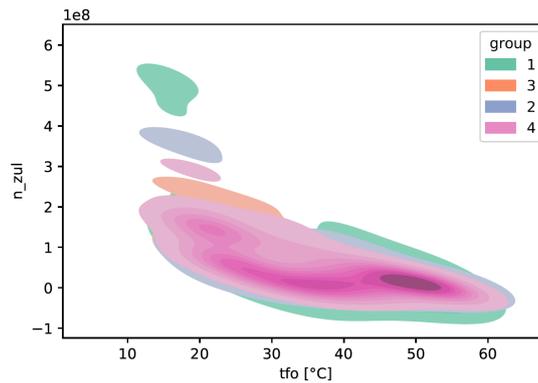


Abbildung C.11.: 2D KDE Darstellung der Stichproben bei der Asphaltbauweise.

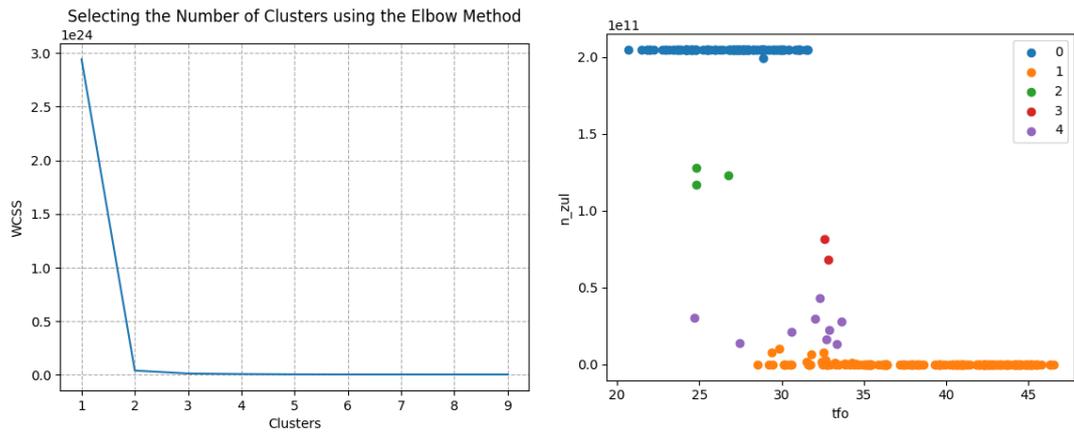
Lokale Validierung mit Beton

Wie bei der Asphaltbauweise werden auch die Ergebnisse für die Betonbauweise in diesem Abschnitt zusammengefasst.

Die WCSS-Analyse in Abbildung C.12a zeigt, dass bereits zwei Gruppen ausreichen, um die Ergebnisse der Betonbauweise zu trennen. Eine weitere Erhöhung der Anzahl der Proben würde also nicht dazu beitragen, die Verteilung besser zu charakterisieren. Die N_{zul} -Verteilung in Abbildung C.12b zeigt eine deutliche Trennung zwischen den beiden Gruppen. Um eine vergleichbare Visualisierung mit der Asphaltbauweise zu ermöglichen, werden hier ebenfalls fünf Gruppen dargestellt.

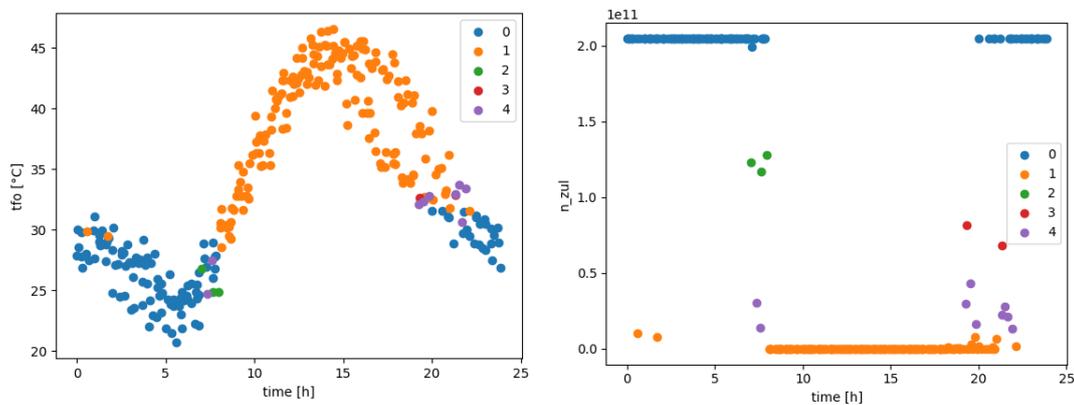
Der Grund für die deutliche Trennung liegt in der Dimensionierungsmethode von RDO Beton (2009). Wie in Abbildung C.14 dargestellt, tritt die Änderung der thermischen Spannung in einem sehr kleinen Bereich auf. Der Temperaturgradient in diesem Bereich kommt nur in der Morgendämmerung oder bei Einbruch der Nacht vor, wie in Abbildung 5.9 gezeigt. In der Nacht sind die Temperaturgradienten meist negativ, was nicht dem kritischen Fall entspricht. Tagsüber ist der Temperaturgradient so groß, dass die Platte deutlich kürzer als die kritische Länge ist und das Eigengewicht keine signifikanten thermischen Spannungen induzieren kann.

Es ist zu beachten, dass das Prinzip der Überlagerung von Verkehrs- und Temperaturbelastungen in der RDO Beton (2009) noch ein offenes Problem darstellt, wie im Projekt FE 04.0313/2017/OGB „Optimierung der Anwendbarkeit der Probabilistik in der Dimensionierung und Substanzbewertung von Betonbauweisen“ aufgezeigt wird. Die Verteilung würde sich also ändern, wenn das Überlagerungsprinzip modifiziert würde. Wenn der Temperaturgradient weiter ansteigt, sollte die resultierende thermische



(a) Bestimmung der Anzahl der Gruppen mit Elbow-Methode bei Betonbauweise. (b) Statistische Abhängigkeit zwischen der N_{zul} und der TFO bei der Betonbauweise.

Abbildung C.12.: Die zwei scharf getrennte Gruppen nach N_{zul} .



(a) Die TFO in Abhängigkeit von der Tageszeit. (b) Die N_{zul} in Abhängigkeit von der Tageszeit.

Abbildung C.13.: Die zeitliche Verteilung der TFO und N_{zul} bei Betonbauweise.

Spannung unter der Verkehrslast größer werden, selbst wenn die kritische Länge nicht erreicht wird.

Für die räumliche Verteilung von N_{zul} wird die KDE-Analyse auch auf die unterteilten Gebiete angewandt, wie in Abbildung C.15 und Abbildung C.16 dargestellt. Die Verteilungen der TFO unterscheiden sich in Hoch- und Tieftemperaturbereiche (Abbildung C.16a). Im Vergleich dazu ist die Verteilung von N_{zul} in diesen vier Teilgebieten sehr ähnlich (Abbildung C.16b).

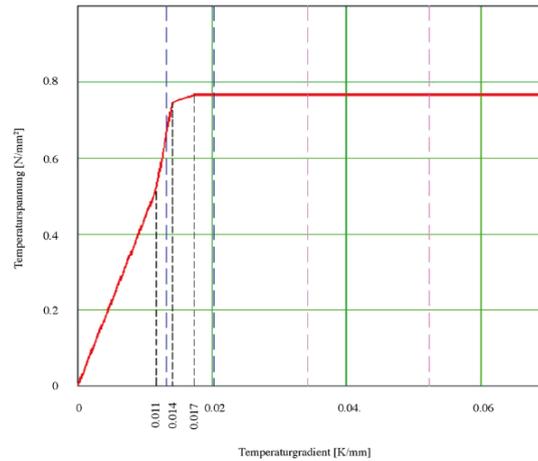


Abbildung C.14.: Quelle: Villaret u. a. (2019b, Bild 10.25, Seite 79), Zusammenhang zwischen der thermischen Spannung und des Temperaturgradient.

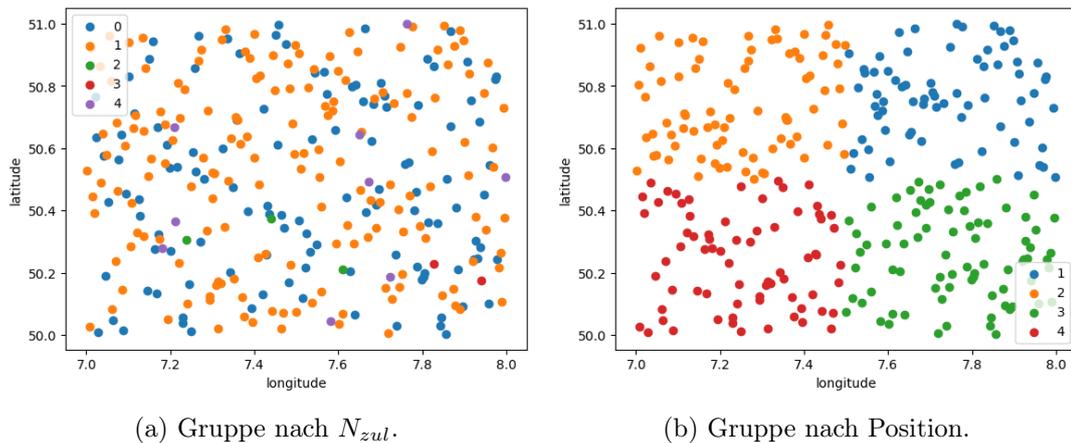


Abbildung C.15.: Die räumliche Verteilung der TFO und N_{zul} bei Betonbauweise.

Das Ziel dieses Projekts besteht darin, den Klimafaktor in der Dimensionierung gemäß RDO Beton (2009) auch durch N_{zul} zu bestimmen. Um dieses Ziel zu erreichen, muss die Dimensionierungsmethode nach RDO Beton (2009) angepasst werden.

Nach der oberen Untersuchung der N_{zul} bei der Betonbauweise wird jedoch nicht empfohlen, N_{zul} direkt in die Dimensionierung der Betonbauweise einzubeziehen, da die Verteilung von N_{zul} nicht zu verschiedenen KiST-Zonen führen kann. Diese lokale Studie, die auf einem kleinen Datensatz basiert, zeigt ebenfalls, dass eine Erhöhung der Anzahl der Stichproben nicht zu einer besseren Charakterisierung der Verteilung

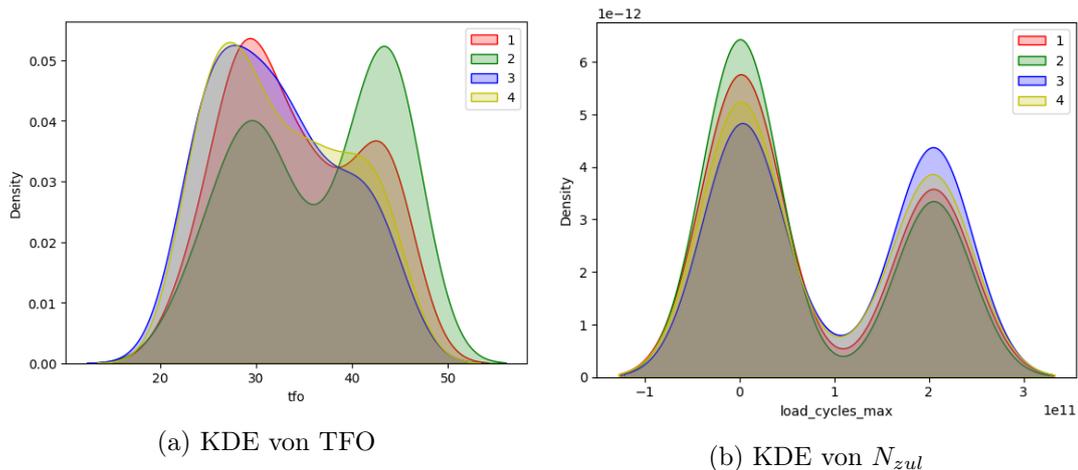


Abbildung C.16.: Die KDE Verteilung der Proben von Betonbauweise.

führt. Daher wird die Erstellung der KiST-Karten für N_{zul} bei der Betonbauweise nicht weiter verfolgt.

Zeitabschätzung für den stochastischen Prozess

In diesem Abschnitt wird die Zeit für den stochastischen Prozess abgeschätzt. Für die Abschätzung sind die Anzahl der Stichproben in den räumlichen und zeitlichen Dimensionen (n_s und n_t) sowie die Berechnungszeit pro Modellstunde (t_0) notwendig. Die gesamte Berechnungszeit für den stochastischen Prozess wird durch die folgende Gleichung berechnet:

$$t = n_t \cdot n_s \cdot t_0. \quad (C.2)$$

Die benötigte Berechnungszeit pro Modellstunde t_0 auf einer lokalen Workstation mit 64 Kernen und 128 GB RAM beträgt etwa 36 Sekunden und 24 Sekunden auf einer AWS EC2-Instanz.

Mit dem in Kapitel 5 eingeführten stochastischen Prozess müssen für jede Stunde zusätzlich $24+n$ Stunden berechnet werden, um die Konvergenzanforderungen des thermischen Modells zu erfüllen. Hierbei variiert n als Stunde des Tages von 0 bis 23. Daher beträgt die durchschnittliche Anzahl von $24+n$ für eine zufällige Stichprobe 36. Gemäß dem Zentralen Grenzwertsatz müssen mindestens 30 Stichproben berechnet werden, um den Durchschnitt einer unbekanntem Verteilung zu bestimmen. Wenn andere Merkmale wie der 84. Perzentil der Verteilung berücksichtigt werden sollen, sind mehr Stichproben erforderlich.

Es wird empfohlen, 300 Stichproben pro Jahr zu nehmen, da nach der Berechnung etwa die Hälfte der Stichproben in der Nacht liegen, wann die Temperatur niedrig und nicht kritisch für das mechanische Verhalten der Deckschicht ist. Daher wird bei der Auswahl von 300 Stichproben im Durchschnitt eine gültige Stichprobe alle zwei Tage berücksichtigt. Daraus ergibt sich $n_t = 300 \cdot 36 = 10800$.

Für die räumliche Stichprobe wurde die Anzahl 128 gewählt. Die längste Ausdehnung Deutschlands von Norden nach Süden beträgt in der Luftlinie 876 km, von Westen nach Osten 640 km. Für eine Karte mit einer Auflösung von 1 km x 1 km sind ca. 560640 Rasterpunkte erforderlich. Dies ist jedoch nicht praktikabel und im Projekt nicht erforderlich, da in einigen Regionen das Klima grundsätzlich gleich ist, bedingt durch gleiche geographische Bedingungen wie Höhe, Einfluss der Flüsse usw. Daher werden zunächst 128 Stichproben für die Datenaufbereitung ausgewählt, also $n_s = 128$. Die Ergebnisse der Stichproben werden später auf die Rasterpunkte extrapoliert. Die Auflösung der Karte kann nach der Diskussion mit dem Auftraggeber auf 5 km x 5 km reduziert werden, da das thermische und mechanische Modell nicht so genau ist, dass es die Unterschiede in einem Bereich von 1 km x 1 km erfassen kann. Die Auflösung kann beim Postprocessing problemlos erhöht werden, wenn die Ergebnisse der Stichproben auf die Rasterpunkte extrapoliert werden.

Mit der Anzahl der Stichproben in den räumlichen und zeitlichen Dimensionen kann die benötigte Berechnungszeit für den stochastischen Prozess geschätzt werden. Für eine lokale serielle Berechnung sind 49 766 400 s erforderlich. Dies entspricht 576 Tagen, was die Projektdauer überschreitet. Deswegen wird dieser stochastische Prozess in Abschnitt 5.4.3 angepasst und dann auf einer AWS-Instanz ausgeführt.

Anhang D.

JavaScript Eingabedaten für das Betonmodell

Die Implementierung des mechanischen Modell für die Betonstraße erfordert die folgenden Eingabedaten:

1. Mechanisch äquivalente Temperaturgradient: `maeg.json`
2. RDO Beton Eingabedaten: `rdo-inpt.json`

Quellcode D.1: Mechanisch äquivalente Temperaturgradient

```
1 {  
2   "maeg": 0.005048171528284548  
3 }
```

Quellcode D.2: Eingabedaten für RDO Beton 09

```
1 {  
2   "Projekt": {  
3     "Name": "Dimensionierung_mit_der_RDO_Beton_09",  
4     "Beschreibung": "Matlab_(RDO_Ausgabe_2009)_und_  
5       JavaScript_(RDO_Ausgabe_2018)",  
6     "Kommentar": "",  
7     "Benutzer": "XXX"  
8   },  
9   "Parameter": {  
10    "Beschreibung": "Parameter_aus_  
11      Dimensionierungsbeispiel_der_RDO_Beton_09_-_Ausgabe_  
12      2018_(vgl._RDO_Beton_2018_ab_S._57_AnhangD)",  
13    "Nachweis": {
```

```

13         "NurEinzelnachweis": false ,
14         "Belastung": "quasidynamisch" ,
15         "ThermischVon": "openfoam" ,
16         "MaegNummer": "" ,
17         "Grenzzustand": "tragfaehigkeit" ,
18         "Fuge": "laengs"
19     } ,
20
21     "Konstruktion": {
22         "Strassenklasse": "bundesautobahn" ,
23         "Strassenbetonklasse": "StC_30/37" ,
24         "Spaltzugfestigkeit": 3.7 ,
25         "VerformungsmodulUnterlage": 150 ,
26         "Plattenbreite": 4000 ,
27         "Plattenlaenge": 5000 ,
28         "Unterlage": "schotterTragSchicht" ,
29         "Querkraftuebertragung": {
30             "Querfuge": "mitDuebel" ,
31             "Laengsfuge": "mitAnker"
32         } ,
33         "AnteilGebrochenerGesteinskoernung": 0.3 ,
34         "Regelquerschnitt": "keiner" ,
35         "AbrueckungLeitlinieVonFuge": "rechts" ,
36         "AbrueckungFahrbahnbegrenzungVonFuge": "links"
37     } ,
38
39     "Verkehr": {
40         "Geschwindigkeit": 120 ,
41         "KonzentrationDesSchwerverkehrs": "normal" ,
42         "Berechnungsmethode": "RStO/RDO" ,
43         "Belastung": {
44             "RStO/RDO": {
45                 "Fahrstreifen": 6 ,
46                 "DTV_SV_Erfassung": "gesamt" ,
47                 "Fahrstreifenbreite": 3750 ,
48                 "MaxLaengsNeigung": 1.5 ,
49                 "Nutzungsdauer": 30 ,
50                 "DTV_SV": 10137 ,
51                 "Achszahlfaktor": "entsprechend-RStO"
52             } ,
53             "DirekteAngabe": {

```

```
54         "B": 104561389.93833925,  
55         "B_n": 158426348.39142308  
56     }  
57 }  
58 }  
59 },  
60  
61 "CodeStatus": {  
62 },  
63  
64 "Log": [  
65 ],  
66  
67 "Ergebnis": {  
68 }  
69 }
```

Anhang E.

Dakota Eingabedaten

Die Implementierung der Dakota erfordert die folgenden Eingabedaten:

1. Code für Durchführen des Modells und Speichern der Ergebnisse: `analysis_driver.sh`
2. Dakota Eingabedaten: `dakota.in`

Quellcode E.1: Befehl für Laufen von Dakota

```
1 dakota -input dakota.in -output dakota.out | tee stdout.  
   out
```

Quellcode E.2: `analysis_driver.sh`

```
1 #!/bin/bash  
2  
3 # $1 and $2 are special variables in bash that contain the 1st  
   and 2nd  
4 # command line arguments to the script, which are the names of  
   the  
5 # Dakota parameters and results files, respectively.  
6  
7 params=$1  
8 results=$2  
9  
10 #-----  
11 # CREATE TEMPORARY WORKING DIRECTORY  
12 #  
13 # This prevents file trampling when running concurrent jobs.  
14 #-----  
15  
16 num=$(echo $1 | awk -F. '{print _$NF}')  
17 topdir='pwd'
```

```

18 workdir=$topdir/workdir.$num
19 mkdir workdir.$num
20
21
22
23
24 ##          Pre-processing Phase
25 ##
26 ##  Generate/configure an input file for your simulation
27 ##  by substituting in parameter values from the Dakota
     paramters file.
28
29 dprepro3 $params simulation_parameters.template $workdir/
   simulation_parameters.i
30 cd $workdir
31
32
33 ##          Execution Phase
34 ##
35 ##  Run your simulation
36
37 python3 ../../../../model/model.py workdir.$num/
   simulation_parameters.i ../../../../
38
39
40
41 ##          Post-processing Phase
42 ##
43 ##  Extract (or calculate) quantities of interest
44 ##  from your simulation's output and write them to a properly
   -formatted
45 ##  Dakota results file.
46
47
48 result_file="model.results.json"
49 result_folder="./output/"
50
51 load_cycles_max=$(cat "$result_folder$result_file" | jq '.["
   load_cycles_max"]')
52 tfo=$(cat "$result_folder$result_file" | jq '.["
   temperature_fahrbahnoberflaeche"]')
```

```

53
54
55 echo "$load_cycles_max_load_cycles_max" > $results
56 echo "$tfo_tfo" >> $results
57 # echo "$load_cycles_min load_cycles_min" >> $results
58
59
60 # for debugging uncomment:
61 # read -p "Press enter to continue"

```

Es gibt insgesamt sechs Abschnitte in der Dakota Eingabedatei `dakota.in`, u. a. „environment“, „method“, „model“, „variables“, „interface“ und „responses“. Der Zusammenhang dieser sechs Abschnitten sind in Abbildung E.1 visualisiert.

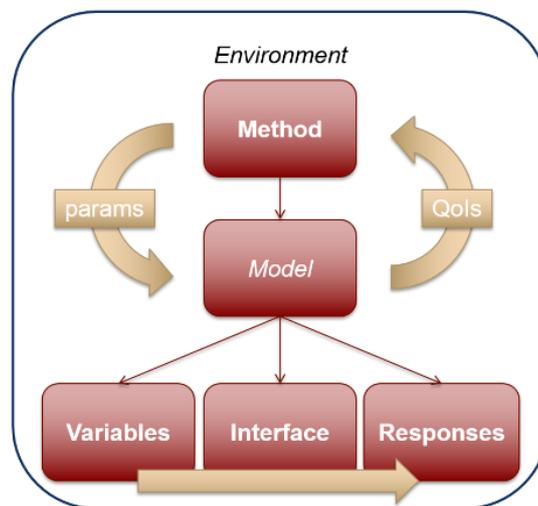


Abbildung E.1.: Zusammenhang der 6 Abschnitten in `dakota.in`, aus Adams u. a. (2022, Bild 2.3)

Im Abschnitt `environment` wird die Ausgabedatei definiert, in welcher die Ausgabedaten wie TFO und N_{zul} geschrieben werden.

Im Abschnitt `method` wird die Monte Carlo Sampling ausgewählt, um eine probabilistische Stichprobe durchzuführen.

Es gibt 2 Varianten der Stichprobemethode, nämlich Latin hypercube sampling (LHS) und `random` (klassische Monte Carlo), welche durch `sample_type` gewählt wird. Im vorliegenden Projekt wird LHS gewählt, da eine geringere Anzahl an Stichproben effizienter ist. Der Schlusswort `seed` definiert die in Dakota implementierte probabilistische

Methode. Für weitere Information der Implementierung der Monte-Carlo Methode siehe Abschnitt 2.3.4 des Dakota Handbuchs. ¹

Die Definition des Modells wird im Abschnitt `model` festgestellt. Im vorliegenden Projekt wird das originale Modell benutzt. Das Modell funktioniert in Dakota wie eine Blackbox. Dakota bietet die Variablen (ausgewählte Wetterdaten) an und das Modell spuckt die Antworten (Temperaturverteilung) aus. Als Endnutzer muss man nur das Interface definieren.

Die Steuerungsparameter für den `method` Abschnitt wird im Abschnitt `variables` festgelegt. Hier werden die geografische Länge (`longitude`), Breite (`latitude`) und die Zeit (`time`) als unabhängige Variablen mit den jeweiligen Grenzen definiert.

Die Steuerungsparameter und die Antworten werden durch die Datei `analysis_driver.sh` im Abschnitt `interface` verbunden. Die Eingabedatei `simulation_parameters` für das Simulationsmodell wird hier vorbereitet, und dann vom Modell eingelesen. Die Ausgabedaten aus den Antworten werden in der im `environment` Abschnitt definierten Ausgabedatei `table_out.dat` eingeschrieben.

Weil die einzelnen Simulationen aus der Stichprobe unabhängig voneinander sind, sind die Berechnungen parallelisierbar. Hier sind 2 Zeilen wichtig. Die Zeile `fork asynchronous evaluation_concurrency = 20` definiert die Methode der Parallelisierung und die Anzahl der Prozessoren. `asynchronous` heißt ungleichzeitig. Das bedeutet, dass die einzelnen Simulationen nicht miteinander kommunizieren müssen. Die eine Simulation muss nicht auf die andere warten. Der Vorteil der `asynchronous` Parallelisierung ist, dass die Ressourcen völlig ausgenutzt werden, wenn diese verfügbar sind. Das führt aber zu einer sogenannten `Race Condition`. Das bedeutet, dass es zu einem Konflikt in der gemeinsam genutzten Datei kommen kann. Es gibt keine Kommunikation zwischen den Simulationen, weshalb die eine Simulation nicht weiß, ob die andere fertig ist. Die temporäre Datei von einer Simulation könnte von einer anderen gelöscht oder geändert werden. Deswegen muss für jede Simulation ein getrennter Arbeitsplatz erstellt werden. Die Zeile `file_tag` erstellt die unabhängigen Arbeitsplätze für jede Simulation mit einer Zahl als Suffix, siehe Abbildung E.2.

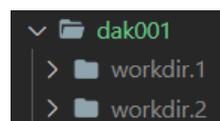


Abbildung E.2.: Unabhängige Arbeitsplätze von Dakota

Quellcode E.3: Die verkürzte Ausgabedaten der Dakota

¹<https://dakota.sandia.gov/content/manuals>

1	time	longitude	latitude	load_cycles_max	tfo
2	1048013	7.153188615	50.87691427	4258557760	24.582
3	1048073	7.737756734	50.01599614	3676814562	43.101
4	...				

Schlussendlich werden `load_cycles_max` und TFO (für Asphaltbauweise) als Antwort des Modells ausgewählt und in `table_out.dat` gespeichert. Die Antwort des Modells kann auch der Temperaturgradient (für Betonbauweise) in der Straßenkonstruktion sein. Es hängt davon ab, welche Antwort der Endnutzer braucht. Die `load_cycles_max` (zulässige Lastwiederholung) ist das Ergebnis des mechanischen Modells und die TFO (Temperatur der Fahrbahnoberfläche) ist das Ergebnis des thermischen Modells. Diese Ausgabedatei wird im Postprocessing-Prozess für die Erstellung der KiST-Karten benutzt.

Quellcode E.4: `dakota.in`

```

1 # Usage:
2 #   executed by makefile
3
4
5 # Dakota Input File:
6 environment
7     tabular_data
8         tabular_data_file = 'table_out.dat'
9
10 method
11     sampling
12         sample_type lhs
13         samples = 200
14         seed = 3845
15
16 model
17     single
18
19 variables
20     uniform_uncertain = 3
21     lower_bounds      1048010 7          50
22     upper_bounds      1048100 8          51
23     descriptors       "time"  "longitude" "latitude"
24
25 interface
26     analysis_driver = 'analysis_driver.sh'
```

```
27     fork asynchronous evaluation_concurrency = 20
28     parameters_file = 'simulation_parameters'
29     file_tag
30
31 responses
32     response_functions = 2
33     descriptors       = 'load_cycles_max' 'tfo'
34     no_gradients
35     no_hessians
```

Anhang F.

Docker Eingabedaten

Die Implementierung der Docker erfordert die folgenden Eingabedaten:

1. Erstellen der Image: `dockerfile`

Quellcode F.1: Befehl für das Laufen des Containers

```
1 build:
2     @echo "update_local_docker_image"
3     docker build --tag klimdim:local-openfoam .
4
5 run-interactive: build
6     docker run \
7         --interactive --tty \
8         --env DISPLAY=${DISPLAY} \
9         --volume /tmp/.X11-unix:/tmp/.X11-unix \
10        --volume ${working_dir}/../klimdim-src \
11        --volume ${working_dir}/../..../data:/data \
12        --workdir /klimdim-src \
13        -e "TERM=xterm-256color" \
14        klimdim:local-openfoam
```

Quellcode F.2: Dockerfile für das Erstellen der Image

```
1 FROM ubuntu:20.04
2
3 ARG DEBIAN_FRONTEND=noninteractive
4
5
6
7 #   install std utils
8 # =====
```

```

9 RUN apt-get update --fix-missing && \
10 apt-get install -y \
11     apt-utils \
12     software-properties-common \
13     sudo \
14     wget \
15     curl \
16     libglu1 \
17     ca-certificates \
18     gnupg \
19     vim \
20     nano \
21     git \
22     make \
23     nodejs \
24     r-base \
25     pip \
26     jq
27
28
29
30
31 # install OpenFOAM 7
32 # =====
33 RUN sh -c "wget -O- https://dl.openfoam.org/gpg.key | apt-key
    _add-"
34 RUN add-apt-repository http://dl.openfoam.org/ubuntu
35 RUN apt-get update
36 RUN apt-get install -y --no-install-recommends openfoam7
37
38 # create separate user with login shell for OpenFOAM
39 RUN useradd --user-group --create-home --shell /bin/bash foam
    ;\
40     echo "foam_ALL=(ALL)_NOPASSWD:ALL" >> /etc/sudoers
41
42 ### Add Path
43 RUN echo "source /opt/openfoam7/etc/bashrc"
    >>
    /home/foam/.bashrc
44
45

```

```

46 |
47 | #   install Paraview
48 | # =====
49 | # install separate paraview for pvpython inside pvbatch
50 |
51 | # download paraview from https://www.paraview.org/download/
52 | ARG PARAVIEW_VERSION=5.7
53 | ARG PARAVIEW_DOWNLOAD=ParaView-5.7.0-MPI-Linux-Python3.7-64
    |   bit
54 | RUN wget --quiet --output-document - \
55 |     "https://www.paraview.org/paraview-downloads/download.php?
    |     submit=Download&version=v${PARAVIEW_VERSION}&type=
    |     binary&os=Linux&downloadFile=${PARAVIEW_DOWNLOAD}.tar.
    |     gz" \
56 | | tar -xz --directory=/opt -f -
57 |
58 |
59 | # make pvpython and pvbatch available in your $PATH
60 | RUN ln --symbolic /opt/${PARAVIEW_DOWNLOAD}/bin/pvbatch /bin
61 | RUN ln --symbolic /opt/${PARAVIEW_DOWNLOAD}/bin/pvpython /bin
62 |
63 |
64 |
65 | #   install Dakota
66 | # =====
67 | RUN apt-get install -y gcc g++ gfortran
68 | RUN apt-get install -y cmake cmake-qt-gui
69 | RUN apt-get install -y libboost-dev libboost-all-dev libblas-
    |   dev liblapack-dev libopenmpi-dev libglu1
70 | RUN apt-get install -y openmpi-bin openmpi-doc xorg-dev
    |   libmotif-dev
71 | RUN apt-get install -y python-dev python-numpy
72 |
73 | WORKDIR /opt/dakota
74 | RUN wget --output-document - --quiet --no-check-certificate
    |   \
75 |     "https://dakota.sandia.gov/sites/default/files/
    |     distributions/public/dakota-6.16.0-public-src-cli.tar.
    |     gz" \
76 | | tar -xz --directory=/opt/dakota -f -
77 | # see at https://dakota.sandia.gov/download.html and change

```

```

    also the compiling path for cmake
78
79
80 ## Compiling
81 WORKDIR /opt/dakota/build
82 RUN sudo cmake -DCMAKE_INSTALL_PREFIX=/opt/dakota/build
      /opt/dakota/dakota-6.16.0-public-src-cli
83
84 # -j NUMBER      ## optional for multiple processor using
85 RUN sudo make -j 4
86 RUN sudo make install
87
88
89 ## Add Path
90 RUN echo '' >>> /home/foam/.bashrc
91 RUN echo '#_dakota_binaries' >>> /home/foam/.bashrc
92 RUN echo "export PATH=\$PATH:/opt/dakota/build/bin:/opt/dakota
      /build/share/dakota/test" >>> /home/foam/.bashrc
93 RUN echo "export LD_LIBRARY_PATH=\$LD_LIBRARY_PATH:/opt/dakota
      /build/bin:/opt/dakota/build/lib" >>> /home/foam/.
      bashrc
94 RUN echo "export PYTHONPATH=\$PYTHONPATH:/opt/dakota/build/
      share/dakota/Python" >>> /home/foam/.
      bashrc
95
96
97
98 # install Octave
99 # =====
100 RUN apt-get install -y octave
101 RUN apt-get install -y liboctave-dev
102
103 RUN mkdir --parents /scripts
104 COPY octave-packages.m /scripts
105 WORKDIR /scripts
106 RUN octave octave-packages.m
107 WORKDIR /
108
109 # install python modules
110 # =====
111 RUN pip install matplotlib

```

```
112 RUN pip install pandas
113 RUN pip install netCDF4
114 RUN pip install Ofpp
115 RUN pip install oct2py
116 RUN pip install scikit-learn
117
118 RUN curl -fsSL https://deb.nodesource.com/setup_current.x |
    sudo -E bash -
119 RUN sudo apt-get install npm -y
120 RUN sudo apt-get install -y nodejs
121
122 #   closing
123 # =====
124
125 USER foam
126
127 WORKDIR /
```

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen Unterreihe „Straßenwesen“

2023

S 199: Identifizierung relevanter Klimaparameter und Bestimmung von Schwellenwerten zu gravitativen Massenbewegungen

Steffen, Brendel

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

S 200: Einfluss der Betonzusammensetzung von Straßenbetonen auf die Spaltzugfestigkeit unter Berücksichtigung einer ausreichenden Dauerhaftigkeit

Schnellenbach-Held, Eßer, Johansen

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

S 201: Textilbewehrter Oberbeton als Basis für eine fugenlose Oberfläche von Betonfahrbahnen

Breitenbücher, Neumann, Curbach, Baumgärtel

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

2024

S 202: Schaffung von Grundlagen für eine einheitliche Erfassung der Maschinenrohdaten im Seitenkraftmessverfahren – Weiterentwicklung der SKM-Griffigkeitsmessung durch Berücksichtigung der gemessenen Vertikalkraft

Jürgen Schmidt, Julius Schmidt, Johannes Schmidt, Müller

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

S 203: Prognose der Wirtschaftlichkeit von Betonfahrbahndecken – Bauweisen RStO/RDO

Beckenbauer, Gebhardt, Riwe, Tschernack, Villaret

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

S 204: Überprüfung der Auswirkungen der Anwendung der Filterregeln für Geokunststoffe des M Geok E

Moormann, Liebl, Schlee

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

S 205: Alternative Verfahren zur Beurteilung Offenporiger Asphaltdeckschichten hinsichtlich Hohlraumgehalt und Verdichtungszustand

Roos, Plachkova-Dzhurova, Schwarzmann

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

S 206: Weiterentwicklung der rechnerischen Dimensionierung von Asphaltstraßen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit, Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit

Neumann, Oeser, Reinhardt, Blasl, Canon Falla, Wellner, Kayser

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

2025

S 207: Optimierung der Kompositbauweise (Durchgehend bewehrte Betondecke mit dünner flexibler Deckschicht)

Freudenstein, Dirnhofer, Eger

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

S 208: Verifizierung der Mischgutkonzeptionierung kaltgebundener bitumen-dominanter Tragschichten und Ableitung von Dimensionierungsgrundsätzen

Radenberg, Staschkiewicz, Vienenkötter, Mollenhauer, Winter

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

S 209: Grundlagen für die Eignungsprüfung von Böden mit organischen Bestandteilen zur Verwendung als Baustoffe im Erdbau

Uday, Huber, Birle, Cudmani

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

S 210: Prüfung und Bewertung der Dauerhaftigkeit „zeitweise fließfähiger und selbstverdichtender Verfüllbaustoffe (ZFSV)“ im Unterbau von Verkehrsflächen

Zeni, Huber, Birle, Cudmani

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

S 211: Literaturstudie zur Nachhaltigkeit im Straßenbau

Carreño, Schmitz, Kemper, Cypra, Holldorb

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

S 212: Einfluss von temporär auftretendem Grundwasser auf die Standsicherheit von Straßeneinschnittsböschungen

Denne, Festag, Gattermann

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

S 213: Einfluss der Pendelbewegung der Fahrzeuge des Schwerverkehrs auf die Beanspruchung und Nutzungsdauer von Straßenbefestigungen

Uhlig, Schlimper, Seeger, Zeißler, Wellner, Blasl, Kathmann, Scharrenbroich, Roggendorf, Haas

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

S 214: Kritikalitätsanalyse für die Bundesverkehrswege als Baustein der Klimawirkungsanalyse

Burg, Franken, Gebhardt, Hewel, Schrempp

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

S 215: Erstellung eines Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung und zur Prognose des Verhaltens von Pflasterbefestigungen

Wellner, Zeißler, Spanier, Blasl

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

S 216: Prüfmethode zur validen Bestimmung von Luftporengehalten an Fahrbahndeckenbetonen

Schnellenbach-Held, Eßer, Johansen

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

S 217: Untersuchung zur Wirksamkeit der Ansprühmittel zwischen Asphaltsschichten und -lagen zur Erzielung eines anforderungsgerechten Schichtenverbundes

Böhm, Middendorf, Kempf, Krause

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

S 218: Zur experimentellen Bestimmung der Wärmedehnzahl von Beton im Straßenbau

Spilker

20,50 €

S 219: Anpassung der Dimensionierung an den Klimawandel

Renken, Lehmkuhl, Neumann, Liu, Ulrich

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

Telefon (04 21) 3 69 03 - 0 · E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de

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

www.schuenemann-verlag.de

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



ISSN 0943-9323
ISBN 978-3-95606-865-2
<https://doi.org/10.60850/bericht-s219>
www.bast.de