

KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Asphalt

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 136

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

KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Asphalt

von

Gisela Augter
Sascha Kayser

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 136

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

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

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

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 89.0305/2015/:
Erweiterte grafische Darstellung der KiST-Zonen für die RSO

Fachbetreuung

Dirk Jansen

Herausgeber

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

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

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

ISSN 0943-9323

ISBN 978-3-95606-468-5

Bergisch Gladbach, Oktober 2019



Kurzfassung – Abstract

KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Asphalt

Für die erweiterte grafische Darstellung der KiST-Zonen ist ein einfaches Verfahren zur Berechnung stündlicher Werte der Fahrbahnoberflächentemperatur entwickelt worden, das mit meteorologischen Beobachtungen der Lufttemperatur, der Globalstrahlung und der Luftfeuchte arbeitet. Die Berechnungsgleichungen wurden anhand der Messwerte von Glättemeldeanlagen ermittelt.

Aus den Fahrbahnoberflächentemperaturen lassen sich sog. KiST-Raten, die äquivalent zu den Schadenssummen sind, ableiten. Diese KiST-Raten, berechnet für 380 Standorte und den Zeitraum 2001 bis 2015, sind auf Gitterpunkte im Abstand von 1 km in W-O und in N-S-Richtung unter Berücksichtigung der Höhenabhängigkeit interpoliert worden. Sie bilden die Grundlage für die flächendeckende Ausweisung von KiST-Zonen in der Bundesrepublik.

KiST-Zonen sind Zonen mit ähnlichen KiST-Raten, die sich untereinander durch die Dicke der Asphalt-schicht unterscheiden, die nötig ist, um dieselbe KiST-Rate (bzw. Schadenssumme) zu erreichen. Daher ist die Einteilung der Bundesrepublik in KiST-Zonen so vorgenommen worden, dass zwischen den Zonen bei Anwendung der Kalibrierasphalte jeweils eine Schichtdickendifferenz von mindestens ± 1 cm auftritt.

Das Ergebnis unterscheidet sich deutlich von der bestehenden Zonen-Karte. Das liegt im Wesentlichen daran, dass die Schadenssummen für die bestehende Karte mit Fahrbahnoberflächentemperaturen aus einem Modell berechnet wurden, das den Austausch der Luft über der Fahrbahn mit der Umgebungsluft in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit bestimmt. Das hier benutzte Verfahren geht hingegen von einem konstanten Austausch durch den fließenden Verkehr aus. Daher ergeben sich vor allem für Süddeutschland, wo es warm und windstill ist, höhere Schadenssummen als KiST-Raten. Aus diesem Grunde sind die Häufigkeitsverteilungen der Temperaturzustände für die KiST-Zonen neu berechnet worden. Auch die Anpassungsfaktoren (Harmonisierung mit den Erfahrungen der RStO) sind neu zu bestimmen.

Map of KiST-Zones for RDO and RSO Asphalt

A simple model has been established to calculate hourly values of road surface temperatures by means of daily values of air temperature, global radiation and air humidity. The results are used to calculate probabilities of temperature related damages in asphalt pavements. They are the basis of the enlarged map of "KiST-Zones": The probabilities of 380 sites in Germany, calculated for a period of 15 years, have been interpolated to an evenly spaced grid (distance: 1 km), considering the orography.

KiST-Zones are having similar probabilities of temperature related damages within and differ from one another in respect to the thickness of the asphalt layer needed to achieve the same probability within Germany. The difference in thickness between zones is about 1 cm when using calibration asphalt.

The enlarged map differs substantially from the existing map, based on road surface temperatures of 54 sites computed by an empirical-physical model. The main difference is due to the manner in which the mixing of air near the pavement is treated: In the empirical-physical model the mixing-rate depends on the horizontal wind-velocity measured at meteorological stations, the simple model assumes the traffic to be responsible for the mixing and does not account for regional differences. Therefore large differences occur primarily in regions having low mean wind speed as in Southern Germany.

Computational dimensioning of road structure is done with the help of frequency distributions of defined temperature conditions within the asphalt layer. These distributions have been newly calculated for KiST-Zones of the enlarged map.

Summary

Map of KiST-Zones for RDO and RSO Asphalt

1 Task

For application of the “RSO Asphalt [FGSV15]” a detailed georeferenced data-base of KiST-Zones is needed.

This data-base consists of gridded values of cumulated damage i.e. accumulated probabilities of temperature related damages in asphalt pavements for a period of 30 years. Calculation of the cumulated damage has to be according to the process established in project FE 04.198/2004/ARB: The cumulated damage is derived from road surface temperatures (TFO) calculated by an empirical-physical model (EPM). Use of the EPM is rather costly. Therefore a simple manner of calculating road surface temperatures has to be developed, allowing calculating TFO for many sites in Germany over a period of 15 years, thus being able to depict topographical and climatological influences on cumulated damage within Germany. The spacing of the grid will be 1 km.

2 Method of investigation

For calculation of cumulated damage, hourly values and daily amplitudes of TFO are needed. These are measured by numerous facilities along highways, set up in order to forecast slipperiness. They are called GMA.

A simple and rather robust method to calculate these values from daily meteorological observations will be worked out, called KiST-Method: By means of forward stepwise regression analysis, using daily values of air temperature, air humidity and global radiation (independent values) and daily amplitudes and means of TFO, computed with the readings of the GMA (dependent values), the correlation of these data will be established, represented by a 3rd order polynomial. The polynomial will be derived from an analysis sample and verified by a validation sample.

The regression result will be sufficient for calculating cumulated damages having a coefficient of determination of at least 85% and a standard error small enough to place 95% of the calculated amplitudes of

TFO within the readings ± 2.5 K and 95% of the calculated daily means of TFO within the readings ± 5 K.

The readings of the GMA are also used to calculate normalized hourly diurnal cycles of the TFO in dependence of the daily amplitude.

With help of the regression equation and the diurnal cycle daily amplitudes and hourly values of the TFO can be computed and used to compute cumulated damages. These cumulated damages, computed at sites of meteorological observations, will be interpolated to an evenly spaced grid, considering the orography. The gridded data form the basis of the enlarged map of KiST-Zones that has to be compared with the existing map.

3 Results

3.1 Regression analysis

The regression equations have been determined with help of the readings of 17 GMA and 49 years of observations (period: 2005 to 2015) in total. The results meet the predetermined quality criteria.

Air temperature is of dominating influence when calculation TFO. That holds for hourly values as well as for daily means. The daily amplitude however is dominated by the daily sum of global radiation.

3.2 Diurnal cycle

The diurnal cycle needed consists of reduced and normalized hourly data: The mean diurnal cycle is calculated, using observed data of the TFO from 10 GMA, representing the thermal conditions within Germany fairly well. Reduction is performed by subtracting the daily mean from each hourly value, normalizing by dividing the reduced data by the amplitude. Thus a diurnal cycle with a mean of 0 and amplitude of 1 is gained. This procedure is carried out for three different ranges of daily amplitudes of TFO, small (amplitude < 6.5 K), medium (amplitude between 6.5 K and 11.4 K) and large (amplitude ≥ 11.5 K):

After calculating the daily mean and the daily amplitude of the TFO using the regression equations, hourly values of the TFO are computed according to the following equation

$$TFO_{(h,t)} = TG_{TFO}(A,h) * AMP_{TFO}(t) + MIT_{TFO}(t)$$

$TFO_{(h,t)}$ road surface temperature on day t for hour h

h hour

t day

$TG_{TFO}(A,h)$ reduced, normalized value of TFO for hour h and amplitude range A

$AMP_{TFO}(t)$ amplitude of TFO on day t

$MIT_{TFO}(t)$ mean value of TFO on day t

The three reduced, normalized diurnal cycles, representing the three different ranges of daily amplitudes, are very similar. Yet there are typical differences due to radiation: On days with large amplitude incoming and outgoing radiation is large as well. On such days warming of the road surface starts earlier than on other days. Later in the day – namely after sunset – the three diurnal cycles align while after midnight, when outgoing radiation determines the cooling, road surface temperatures are lowest.

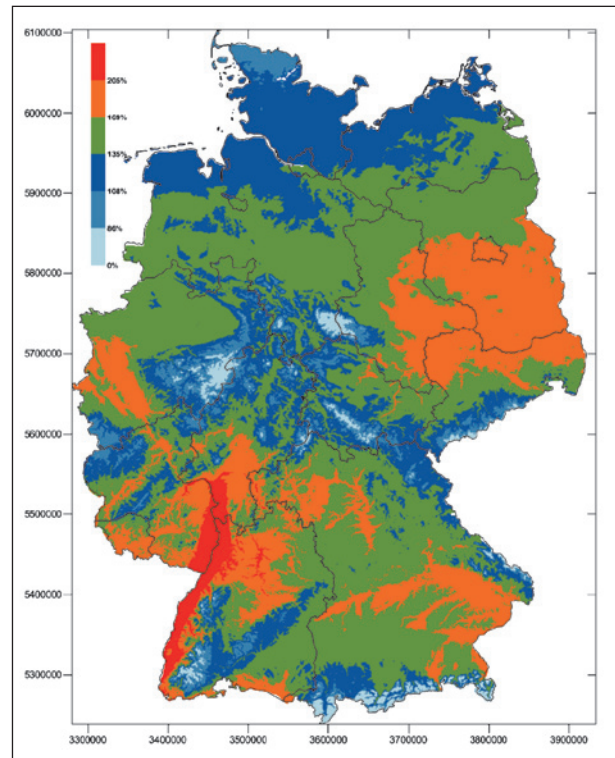


Fig. 1: Proposal for an improved KiST-Zone map based on KiST-rates

3.3 Enlarged map of KiST-Zones

KiST-Zones are having similar cumulated damages within and differ from one another in respect to the thickness of the asphalt layer needed to achieve the same cumulated damage. The division of Germany into KiST-Zones has been taken out in such a way that the difference in thickness between zones is about 1 cm when using calibration asphalt.

The gridding of cumulated damages has been taken out with cumulated damages, calculated by the Kist-Method for the period 2001 to 2015 and 380 sites of meteorological observations.

The map of KiST-Zones thus achieved is shown in figure 1. Cumulated damages are within the range of 30% to 265%. The green depicted zone is the reference zone. Blue depicted zones can do with a thinner layer of asphalt; red depicted zones need a thicker layer (figure 1). This map differs from the existing map, shown in figure 2. Here, cumulated damages have been calculated by use of the EPM and take a range of 200% to 590%.

The main differences are:

1. The levels of cumulated damages differ a lot. This difference is in part due to the global radiation calculated by EPM. Its daily variation differs slightly but systematically from measured data.
2. The isolated zones, depicted in the existing map, do not occur when cumulated damages are calculated with TFO from the KiST-Method.

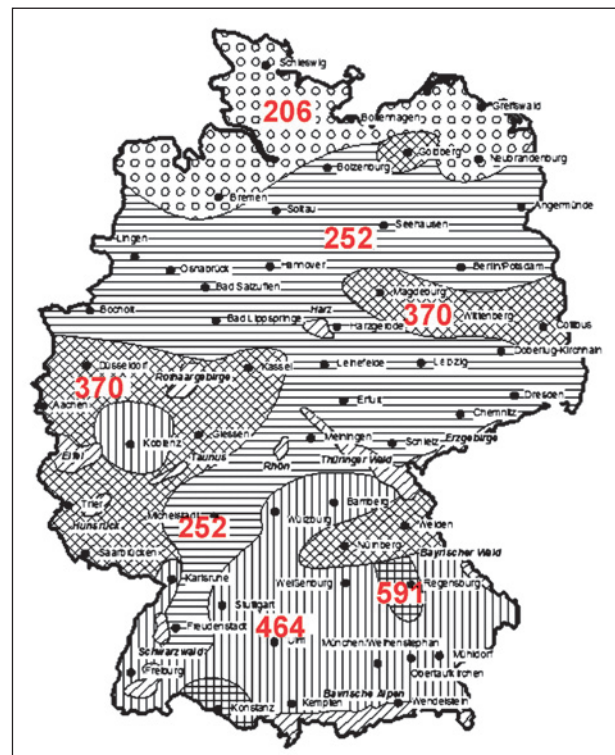


Fig. 2: KiST-Zone map with cumulated damage [%] calculated according to EPM

These zones obviously result from the missing data treatment by the EPM.

- In the existing map, the cumulated damage is largest in Southern Germany. This does not apply to the enlarged map. The EPM calculates TFO assuming there is no traffic and the mixing-rate depends on the horizontal wind-velocity measured at meteorological stations. Thus the influence of wind speed on TFO is large. The KiST-Method assumes the traffic to be responsible for the mixing and does not account for regional differences. Therefore large differences in cumulated damage occur primarily in regions having low mean wind speed as in Southern Germany.

Differences described in point 1 and 2 do not arise when the EPM is operated with complete data, completion being done by the German Weather Service. The difference due to the different handling of the turbulent mixing of air near the pavement however results in different temperatures of road surface even when both methods use the same meteorological input. Therefore the frequency distributions of defined temperature conditions within the asphalt layer, needed for computational dimensioning of road structure, have been newly calculated for KiST-Zones of the enlarged map, using the KiST-Method.

3.4 Sensitivity analysis

The method for calculating cumulated damage is very sensitive to systematic changes in the mean road surface temperature and its diurnal cycle. An analysis of the impact of these changes on cumulated damage did not belong to the tasks of this project. It was nevertheless carried out to help understand how and why large differences in cumulated damage can occur when using different methods to calculate road surface temperatures.

Using the KiST-Method, cumulated damage has been calculated for variations in daily mean, daily amplitude and diurnal cycle of the TFO. The mean change of cumulated damage, calculated in relation to an unvaried input and over all gridded data in Germany, is listed in table 1.

Large changes mainly occur when the daily mean of the TFO is changing or when the diurnal cycle is shifted to the left on the time axis. The combination of these two variations results in about twice of the cumulated damage. Compared to the yearly

Input	percent change
TFO -5%	- 25%
TFO +5%	+ 33%
AMP -10%	± 0%
AMP +10%	± 0%
UTC +1	± 0%
UTC -1	+ 40%
UTC -1 und TFO +5%	+ 80%
TFO -5%	daily mean of road surface temperature • 0.95
TFO +5%	daily mean of road surface temperature • 1.05
AMP -10%	daily amplitude of road surface temperature • 0.90
AMP +10%	daily amplitude of road surface temperature • 1.10
UTC +1	shift of diurnal cycle of road surface temperature to +1 hour
UTC -1	shift of diurnal cycle of road surface temperature to -1 hour

Tab. 1: Percent change of cumulated damage related to normal input

variation in cumulated damage, ranging from -40% to +60% in respect to the mean value of the period 2001 to 2015 this is quite a lot! Thus small but systematic errors in calculating TFO have a bigger influence on cumulated damage than annual weather variations. It has to be concluded that the method of calculating cumulated damage used here is anything but robust.

4 Implications for practice

There are four conclusions to be derived from the results of this project:

- The enlarged map of KiST-Zones is suitable for the application of RSO on project level.
- When dimensioning asphalt attachments in densely built areas, on sunny slopes and in particularly wind-protected warm locations the results of the next-number KiST-Zone have to be applied.
- Since the frequency distributions of defined temperature conditions within the asphalt layer have been newly calculated, the adjustment factors (harmonization with the experiences of RStO) have to be newly calculated too.
- The robustness of the method to calculate cumulated damage should be improved. This can be achieved by substituting the deterministic assignment of road surface temperature and temperature distribution within the structure by a probabilistic one.

Inhalt

Glossar	8	5 Berechnung stündlicher Werte der Fahrbahnoberflächentemperatur . . .	38
1 Einleitung	9	5.1 Vergleich der Fahrbahnoberflächen- temperatur	38
2 Grundlagen zur Berechnung der Schadenssumme	9	5.2 Vergleich von KiST-Raten und Schadenssummen nach GMA	41
2.1 Schadenspotenziale	9	6 KiST-Rate	42
2.2 Dimensionierungsrelevante Temperaturzustände	10	6.1 Genauigkeit	43
3 Klimatologische Betrachtungen	12	6.1.1 Varianz der Schadenspotenziale	43
3.1 Datengrundlage	13	6.1.2 Varianz der Jahressummen	43
3.2 Ergebnisse	14	6.1.3 Varianz der mittleren KiST-Rate	45
3.2.1 Temperatur an der Fahrbahn- oberfläche	14	6.2 Rasterdaten	45
3.2.2 Temperaturzustände	16	7 Vergleich der Schadenssummen nach EPM mit den KiST-Raten	48
3.2.3 Schadenssummen	17	7.1 Vergleich mit den KiST-Zonen	48
4 KiST-Methode	22	7.2 Vergleich mit Schadenssummen nach EPM für den Zeitraum 2001 bis 2015	49
4.1 Grundsätzliche Überlegungen	22	8 Sensitivitätsuntersuchungen	52
4.2 Regressionsrechnungen	22	8.1 Tagesmittel der Fahrbahnober- flächentemperatur	53
4.2.1 Daten der Fahrbahnoberflächen- temperatur	22	8.2 Tagesamplitude der Fahrbahnober- flächentemperatur	53
4.2.2 Meteorologische Daten	22	8.3 Tagesgang der Fahrbahnober- flächentemperatur	53
4.2.3 Auswahl von GMA und ihrer Messwerte	23	9 Vorschlag für KiST-Zonen	56
4.2.4 Regressionsmodell	23	9.1 Berechnung von Häufigkeitsvertei- lungen für KiST-Zonen	57
4.3 Ergebnisse	25	10 Schlussfolgerungen	59
4.3.1 Tagesmittel der Fahrbahnober- flächentemperatur	25	11 Zusammenfassung	60
4.3.2 Tagesamplitude der Fahrbahn- oberflächentemperatur	29	Literatur	63
4.3.3 Rasterdaten	33	Bilder	63
4.4 Mittlerer Tagesgang der Fahr- bahnoberflächentemperatur	35	Tabellen	66
4.4.1 Tagesgang für kleine Amplituden	36	Anhang: Häufigkeitsverteilungen für KiST-Zonen	67
4.4.2 Tagesgang für mittlere Amplituden	36		
4.4.3 Tagesgang für große Amplituden	36		
4.4.4 Reduzierte, normierte Tagesgänge	36		
4.4.5 Vergleich mit Messwerten	37		

Glossar

Empirisch-physikalisches Modell (EPM)

Modell zur Berechnung der Fahrbahnoberflächen-temperatur und des Temperaturverlaufs innerhalb der Asphalttschicht, das mit empirischen Ansätzen die einzelnen Komponenten der Energiebilanz an der Grenzfläche von Fahrbahn und Luft berechnet und die Temperatur als Ergebnis einer ausgeglichenen Bilanz an dieser Grenzfläche bestimmt.

Kalibrierasphalte

Asphaltgemische für die Asphaltdeck-, Asphaltbin-der- und Asphalttragschicht mit definierten Eigenschaften. Die Kalibrierasphalte werden zur Bestimmung der Anpassungsfaktoren für die rechnerische Dimensionierung und die Substanzbewertung von Asphaltstraßenbefestigungen herangezogen.

KiST-Methode

Einfache Methode zur Berechnung stündlicher Werte der Fahrbahnoberflächentemperatur aus Tageswerten der Lufttemperatur, der Globalstrahlung und der Luftfeuchte und mithilfe eines normierten stündlichen Tagesganges der Fahrbahnoberflächentemperatur.

KiST-Rate

Schadenssumme, berechnet anhand von Fahrbahnoberflächentemperaturen, die mit der KiST-Methode bestimmt wurden.

KiST-Zone

Zone mit ähnlichen KiST-Raten innerhalb Deutschlands. KiST-Zonen unterscheiden sich hinsichtlich der Dicke der Asphalttschicht, die nötig ist, um die klimabedingten Unterschiede der thermischen Schädigung der Asphalttschicht auszugleichen.

ncTxx-Klassen

Klassen charakteristischer vertikaler Temperaturverläufe, die sich aus der Uhrzeit und der Tagesamplitude der Fahrbahnoberflächentemperatur ableiten. Jede der 12 ncTxx-Klassen ist hinsichtlich der Fahrbahnoberflächentemperatur in 13 Temperaturklassen mit einer Klassenbreite von 5 K untergliedert (TFO-Klassen).

Schadenspotenzial

Teilschädigung, bezogen auf einen Kalibrierasphalt und eine der 12 x 13 Klassen, die den thermischen Zustand der Asphalttschicht beschreibt.

Schadenssumme

Summe der Schadenspotenziale der insgesamt 156 (12 x 13) Klassen des thermischen Zustands der Asphalttschicht, multipliziert mit der Häufigkeit, mit der diese Klassen auftreten.

1 Einleitung

Im Rahmen des Forschungsprojekts FE 04.198/2004/ARB „Grundlagen zur Erfassung der Temperaturbedingungen für eine analytische Bemessung von Asphaltbefestigungen“ (WELLNER und KAYSER, 2007) ist das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland in sog. KiST-Zonen eingeteilt worden. Es handelt sich um klimainduzierte Straßentemperaturzonenkarten, die in Anlehnung an die Frostzonenkarte [FGSV12] eine Bemessungsgrundlage darstellen, die zum einen so einfach wie möglich handhabbar sein soll, zum andern allerdings möglichst detaillierte Aussagen zu den Temperaturproblemen im Straßenbau liefern sollen (Abschlussbericht zu FE 04.198/2004/ARB, Seite 7).

Die Karte, die in dem Projekt FE 04.198/2004/ARB entstanden ist, beruht auf dem Ergebnis einer Clusteranalyse, bei der Stationen mit ähnlichen thermischen Wirkpotenzialen (Schadenssummen von Asphaltstraßenbefestigungen) zusammengefasst wurden. Die Fahrbahnoberflächentemperaturen, aus denen die Schadenssummen bestimmt werden, wurden anhand meteorologischer Beobachtungen der Jahre 1991 bis 2005 für 54 Stationen mit einem empirisch-physikalischen Modell berechnet.

Es sind 6 verschiedene Zonen entstanden, die mithilfe von Splines gegeneinander abgegrenzt wurden. Klimatologische Aspekte sind in diese Karte nicht eingeflossen. Im Rahmen des Forschungsprojekts FE 89.0305/2015 „Erweiterte grafische Darstellung der KiST-Zonen für die RSO“ soll die KiST-Zonen-Karte so erweitert werden, dass ein Zusammenhang mit der Topografie und der räumlichen Verteilung jener Klimatelemente, die die Fahrbahnoberflächentemperatur im Wesentlichen bestimmen, erkennbar ist. Die Basis der Zoneneinteilung ist dabei von Splines auf Rasterwerte im Abstand von 1 km umzustellen, die meteorologische Datenbasis auf den Zeitraum 2001 bis 2015. Das erfordert eine Neuberechnung von Schadenssummen für mindestens 200 Standorte. Da das o. a. empirisch-physikalische Modell numerisch sehr anspruchsvoll ist, steht es im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nur für exemplarische Berechnungen an wenigen Standorten (~ 10) zur Verfügung.

Die vorliegende Aufgabe besteht also darin, anhand klimatologischer Daten ein Verfahren zu entwickeln, mit dem sich – auf möglichst einfache und robuste Weise – eine Größe berechnen lässt, die äquivalent

zu den in FE 04.198/2004/ARB berechneten Schadenssummen ist und deshalb eine vergleichbare räumliche Verteilung aufweist.

Dieses Verfahren und seine Ergebnisse werden hier beschrieben.

2 Grundlagen zur Berechnung der Schadenssumme

2.1 Schadenspotenziale

Die Belastungen aus Temperatur und Verkehr, die die Asphaltstraßenbefestigung während ihrer Nutzungsdauer zu ertragen hat, wird im Zuge der rechnerischen Dimensionierung neuer bzw. der Berechnung der strukturellen Restsubstanz bestehender Befestigungen mithilfe der Schadenshypothese nach MINER durch lineare Schadensakkumulation bestimmt. Jeder Lastwechsel führt dabei zu einer Teilschädigung in der Asphalttragschicht, die zur Gesamtschädigung (Schadenssumme) kumuliert werden. Die Größe dieser Teilschädigung pro Lastwechsel ist vom Belastungszustand (Temperaturzustand n und Achslast m) abhängig und somit für alle Lastwechsel desselben Belastungszustands identisch.

Die Teilschädigung kann als Quotient von vorhandenen zu zulässigen Lastwechseln betrachtet werden. Die zulässige – von dem Belastungszustand abhängige – Lastwechselzahl ist eine materialabhängige Größe. Sie wird aus der Ermüdungsfunktion der Asphaltsschicht abgeleitet. Die vorhandene Lastwechselzahl hingegen ist das Produkt der Einzelhäufigkeiten der Größen, die den Belastungszustand charakterisieren (Temperaturzustand und Achslast), mit der prognostizierten Gesamtlastwechselzahl:

$$S = \sum_i S_i = \sum_i \frac{N_{\text{vorh},i}}{N_{\text{zul},i}} = \sum_{n,m} \frac{H_{T,n} \cdot H_{V,m} \cdot N}{N_{\text{zul},n,m}} \quad (1)$$

mit

S Schadenssumme in %

s_i Teilschädigung im Belastungszustand i in %

$N_{\text{vorh},i}$ vorhandene Lastwechselzahl im Belastungszustand i

$N_{\text{zul},i}$ zulässige Lastwechselzahl im Belastungszustand i

	ncT1	ncT2	ncT3	ncT4	ncT5	ncT6	ncT7	ncT8	ncT9	ncT10	ncT11	ncT12
-12,5	0,004	0,005	0,006	0,003	0,003	0,003	0,005	0,006	0,003	0,003	0,003	0,004
-7,5	0,006	0,008	0,010	0,004	0,004	0,005	0,007	0,010	0,003	0,003	0,004	0,006
-2,5	0,010	0,014	0,021	0,007	0,005	0,007	0,014	0,020	0,004	0,003	0,005	0,011
2,5	0,019	0,032	0,052	0,012	0,008	0,014	0,031	0,050	0,006	0,004	0,008	0,022
7,5	0,047	0,086	0,146	0,026	0,015	0,032	0,081	0,140	0,010	0,007	0,016	0,055
12,5	0,131	0,255	0,453	0,067	0,035	0,084	0,243	0,434	0,021	0,012	0,037	0,159
17,5	0,407	0,820	1,482	0,194	0,092	0,252	0,782	1,427	0,050	0,026	0,098	0,500
22,5	1,332	2,725	4,926	0,613	0,277	0,811	2,603	4,759	0,139	0,064	0,294	1,652
27,5	4,432	9,023	16,128	2,018	0,888	2,688	8,635	15,622	0,426	0,180	0,943	5,499
32,5	14,516	29,040	50,974	6,668	2,929	8,861	27,848	49,446	1,380	0,557	3,097	17,914
37,5	45,848	89,535	153,678	21,524	9,587	28,348	85,921	149,189	4,534	1,797	10,078	56,028
42,5	137,940	262,029	439,543	66,682	30,408	86,718	251,817	426,820	14,653	5,833	31,765	166,751
47,5	394,245	728,053	1194,20	196,582	92,267	252,064	699,179	1157,32	45,649	18,529	95,647	469,831

Tab. 1: Schadenspotenziale für eine Asphaltbauweise gemäß Tafel 1, Zeile 1, BK 32 der RStO12

$H_{T,n}$	Häufigkeit des Temperaturzustandes n in %
$H_{V,m}$	Häufigkeit der Achslast m in %
N	Gesamtlastwechselzahl
n	Kombination aus ncTxx und Oberflächentemperaturklasse (n = 1 ... 156)
m	Achslast bzw. Achslastklasse (m = 1 ... 22)

Wird bei der Berechnung der Teilschädigung s_i jedes Belastungszustands i die Häufigkeit $H_{T,n}$ des jeweiligen Temperaturzustandes n auf den Wert 1 (100 %) gesetzt, erhält man temperaturhäufigkeitsunabhängige Teilschädigungen (= Schadenspotenziale). In Tabelle 1 sind beispielhaft die Schadenspotenziale einer Asphaltbefestigung (Straßenaufbau gemäß Tafel 1, Zeile 1, BK32 der RStO12) unter Verwendung der Kalibrierasphalte dargestellt.

Untergrenze	Obergrenze	charakteristische Temperatur
$-\infty$	$\leq -10. \text{ }^\circ\text{C}$	-12.5 $^\circ\text{C}$
$> -10. \text{ }^\circ\text{C}$	$\leq -5. \text{ }^\circ\text{C}$	-7.5 $^\circ\text{C}$
$> -5. \text{ }^\circ\text{C}$	$\leq 0. \text{ }^\circ\text{C}$	-2.5 $^\circ\text{C}$
$> 0. \text{ }^\circ\text{C}$	$\leq 5. \text{ }^\circ\text{C}$	2.5 $^\circ\text{C}$
$> 5. \text{ }^\circ\text{C}$	$\leq 10. \text{ }^\circ\text{C}$	7.5 $^\circ\text{C}$
$> 10. \text{ }^\circ\text{C}$	$\leq 15. \text{ }^\circ\text{C}$	12.5 $^\circ\text{C}$
$> 15. \text{ }^\circ\text{C}$	$\leq 20. \text{ }^\circ\text{C}$	17.5 $^\circ\text{C}$
$> 20. \text{ }^\circ\text{C}$	$\leq 25. \text{ }^\circ\text{C}$	22.5 $^\circ\text{C}$
$> 25. \text{ }^\circ\text{C}$	$\leq 30. \text{ }^\circ\text{C}$	27.5 $^\circ\text{C}$
$> 30. \text{ }^\circ\text{C}$	$\leq 35. \text{ }^\circ\text{C}$	32.5 $^\circ\text{C}$
$> 35. \text{ }^\circ\text{C}$	$\leq 40. \text{ }^\circ\text{C}$	37.5 $^\circ\text{C}$
$> 40. \text{ }^\circ\text{C}$	$\leq 45. \text{ }^\circ\text{C}$	42.5 $^\circ\text{C}$
$> 45. \text{ }^\circ\text{C}$	∞	47.5 $^\circ\text{C}$

Tab. 2: Einteilung der Klassen der Fahrbahnoberflächentemperatur

2.2 Dimensionierungsrelevante Temperaturzustände

Das Verformungsverhalten einer Asphaltstraßenbefestigung ist vom Steifigkeitsprofil und somit auch von der vertikalen Temperaturverteilung innerhalb dieser Befestigung abhängig. Die Asphaltsteifigkeit nimmt mit steigender Temperatur ab. Damit steigt gleichzeitig das Schädigungspotenzial des Asphaltes mit zunehmender Temperatur. Es ist aber nicht die Temperatur allein, die Einfluss auf die wärmebedingte Schädigung hat, wichtig ist zudem der vertikale Temperaturverlauf innerhalb dieser Schicht (siehe Schadenspotenziale der Tabelle 1).

Zur Berechnung der Schadenssumme an einem Standort wird der thermische Zustand der Asphalt-schichten hinsichtlich der Form des vertikalen Temperaturverlaufs einerseits und der Temperatur an der Fahrbahnoberfläche andererseits klassifiziert. Die Einteilung der Fahrbahnoberflächentemperatur in 13 Klassen mit einer Klassenbreite von 5 K folgt den Vorgaben von HESS (1998) und ist in Tabelle 2 aufgeführt.

Die vertikale Temperaturverteilung wird durch 12 normierte charakteristische Temperaturverläufe (WELLNER und KAYSER, 2007) beschrieben, die in Bild 1 zu sehen sind.

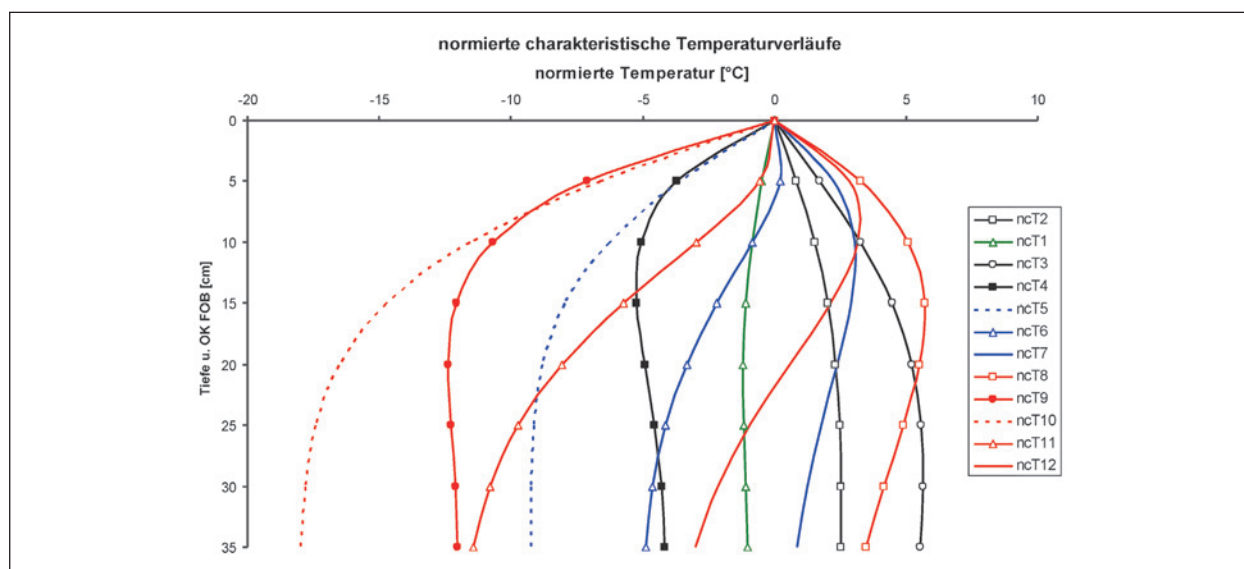


Bild 1: Normierte charakteristische Temperaturverläufe (aus WELLNER und KAYSER, 2007)

Die Berechnung der Schadenssumme erfolgt auf der Basis von Stundenwerten der Temperatur der Asphaltoberfläche. Jede Stunde ist hinsichtlich des thermischen Zustandes der Asphaltsschicht zu klassifizieren. Die Klasse der Fahrbahnoberflächentemperatur (TFO-Klasse) ergibt sich direkt aus dieser Temperatur. Die Klasse des vertikalen Temperaturverlaufs (ncTxx-Klasse) wird nach WELLNER und KAYSER (2007) aus der täglichen Amplitude der Fahrbahnoberflächentemperatur und der Uhrzeit abgeleitet. Der Zusammenhang zwischen der ncTxx-Klasse, der Tagesamplitude und der Uhrzeit wird in Tabelle 3 hergestellt. Die Tagesamplitude wird dabei in drei Klassen eingeteilt:

Klein: Amplitude < 6.5 K,

Mittel: $6.5 \text{ K} \leq \text{Amplitude} < 11.5$ K,

Groß: Amplitude ≥ 11.5 K.

Zur Berechnung der Schadenssumme wird jedem der 156 Temperaturzustände ein Schadenspotenzial zugeordnet (siehe Kapitel 2.1). Dieses Potenzial ist nicht nur vom thermischen Zustand, sondern auch vom Aufbau der Asphaltsschicht und der Verkehrsbelastung abhängig. Das Schadenspotenzial für einen Temperaturzustand beschreibt die Schädigung, die resultiert, wenn die Fahrbahn über 30 Jahre in diesem Temperaturzustand der vorgegebenen Verkehrsbelastung ausgesetzt ist.

In Bild 2 sind exemplarisch Schadenspotenziale für einen Aufbau und eine Verkehrsbelastung zu sehen. Für den hier betrachteten Fall tragen Fahrbahnoberflächentemperaturen bis 10 °C kaum zur

ncTxx	Amplitude	Uhrzeit
ncT01	klein	10 bis 19 UTC
ncT02	klein	20 bis 09 UTC
	mittel	22 bis 01 UTC und 07 bis 08 UTC
ncT03	mittel	02 bis 06 UTC
	groß	02 bis 07 UTC
ncT04	mittel	02 bis 06 UTC
	groß	08 bis 09 UTC
ncT05	mittel	12 bis 15 UTC
ncT06	mittel	16 bis 18 UTC
ncT07	mittel	19 bis 21 UTC
ncT08	groß	21 bis 01 UTC
ncT09	groß	10 bis 11 UTC
ncT10	groß	12 bis 15 UTC
ncT11	groß	16 bis 18 UTC
ncT12	groß	19 bis 20 UTC

Tab. 3: Zusammenhang zwischen ncTxx-Klasse, Amplitude der Fahrbahnoberflächentemperatur und der Uhrzeit (WELLNER und KAYSER, 2007)

Ermüdung der Asphalttragschicht bei. Die Darstellung beginnt daher erst bei der TFO-Klasse mit einer charakteristischen Temperatur von 12.5 °C.

Man kann Bild 2 entnehmen, dass das Schadenspotenzial mit der Temperatur stark ansteigt (der Zusammenhang zwischen dem Schadenspotenzial und der Fahrbahnoberflächentemperatur wird durch ein Polynom 5. Grades beschrieben) und dass die vertikale Temperaturverteilung einen erheblichen

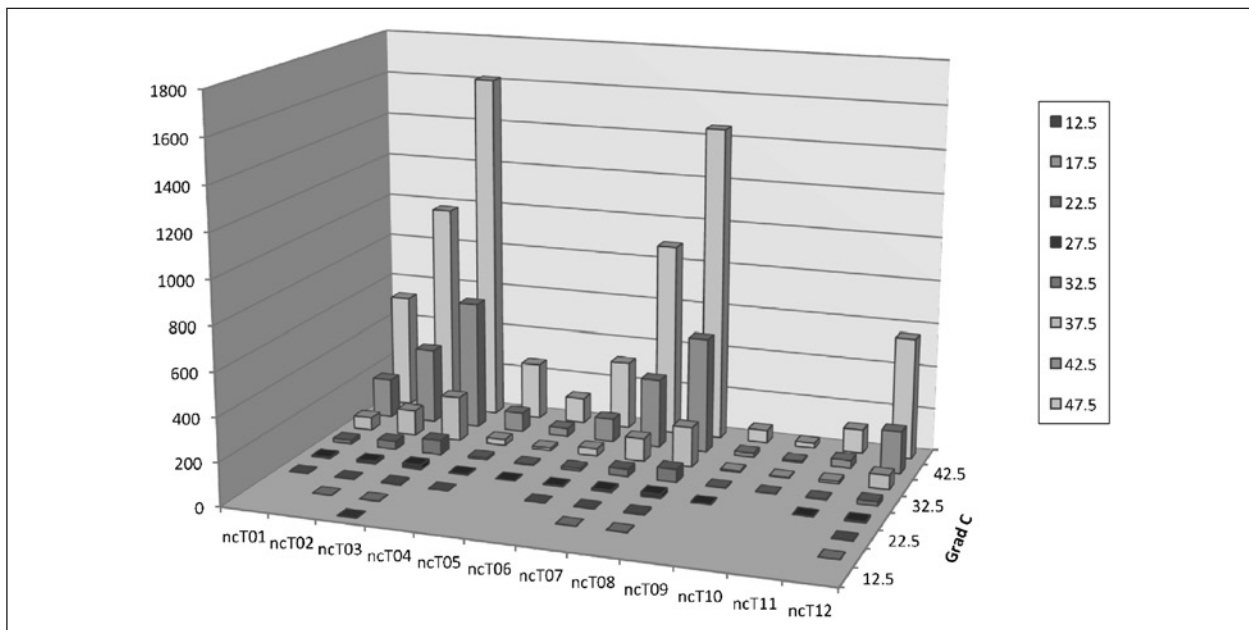


Bild 2: Schadenspotenziale [%] der Temperaturzustände der Asphaltsschichten eines Straßenoberbaus gemäß Tafel 1, Zeile 1 der RStO 12 für die Belastungsklasse BK100

Einfluss hat. Es sind die Klassen mit der hohen Temperatur an der Fahrbahnunterseite, die die größten Schäden verursachen.

Diese Klassen sind den Nachtstunden zugeordnet: Tagsüber heizt die kurzweilige Einstrahlung die Fahrbahnoberfläche auf, im Laufe des Tages wandert diese Wärme in die Tiefe, sodass es in der Zeit zwischen Sonnenunter- und Sonnenaufgang an der Oberfläche der Fahrbahn kälter ist als darunter (siehe Bild 1, ncT2, ncT3, ncT7 und ncT8). Damit hat nicht nur die Einstrahlung tagsüber sondern auch die nächtliche Ausstrahlung einen großen Einfluss auf die Schadenssumme.

Die zustandsbezogene Schädigung errechnet sich, indem die relative Häufigkeit, mit der einer der 156 Zustände am betrachteten Standort und im betrachteten Zeitraum auftritt, mit dem zugehörigen Schadenspotenzial multipliziert wird. Die Summe über alle 156 Schädigungen ist dann die Schadenssumme für den betrachteten Standort. Diese beschreibt die Schädigung unter der Voraussetzung, dass die Temperaturverhältnisse aus dem betrachteten Zeitraum für 30 Jahre gelten.

Für die erweiterte Darstellung der KiST-Zonen müssen Schadenssummen für eine große Anzahl von Standorten neu berechnet werden. Dazu ist im Rahmen dieses Projekts ein einfaches Verfahren zur Ableitung der Fahrbahnoberflächentemperatur aus meteorologischen Tageswerten entwickelt worden, die KiST-Methode. Die Schadenssummen, die mit den

Temperaturen aus der KiST-Methode berechnet werden, werden in diesem Bericht als KiST-Raten bezeichnet. Von Schadenssummen nach EPM wird immer dann gesprochen, wenn die zugehörigen Fahrbahnoberflächentemperaturen mit dem empirisch-physikalischen Modell (WELLNER und KAYSER, 2007) berechnet wurden. Schadenssummen nach GMA sind mit den Fahrbahnoberflächentemperaturen berechnet worden, die die Glättemeldeanlagen messen. Geht aus dem Zusammenhang eindeutig hervor, wie die Schadenssummen entstanden sind, fällt der Zusatz ‚nach EPM‘ oder ‚nach GMA‘ weg.

3 Klimatologische Betrachtungen

Die KiST-Zonen grenzen Gebiete mit unterschiedlich großen Schadenssummen gegeneinander ab, für Standorte innerhalb einer Zone sind die Schadenssummen ähnlich.

Die räumliche und zeitliche Varianz der Schadenssummen wird allein von der Verteilung und dem Tagesgang der Temperaturen an der Fahrbahnoberfläche bestimmt. Infolge der sehr unterschiedlichen Schadenspotenziale der einzelnen Temperaturzustände kann man aber die Schadenssumme nicht direkt aus der Verteilung der Fahrbahnoberflächentemperatur ableiten. Daher ist es auch nicht ohne Weiteres möglich, aus der räumlichen Verteilung

der meteorologischen Größen, die den größten Einfluss auf die Fahrbahnoberflächentemperatur haben, auf die räumliche Verteilung der Schadenssummen zu schließen. Wenn man sich ein Bild von der Klimatologie der Schadenssummen, die nicht nur die räumliche Verteilung, sondern auch den Jahresgang und Zeitreihen der Schadenssummen einschließt, machen will, dann muss man Schadenssummen aus Messwerten der Fahrbahnoberflächentemperatur berechnen und die Ergebnisse entsprechend auswerten.

3.1 Datengrundlage

Grundlage für diese Auswertung sind die Fahrbahnoberflächentemperaturen, die an den Glättmeldeanlagen (GMA), gemessen werden. Diese Messwerte werden seit 2004 im Deutschen Wetter-

dienst (DWD) archiviert und der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Sie sind allerdings äußerst lückenhaft und ungeprüft. Außerdem verteilen sich die Anlagen nicht gleichmäßig über Deutschland. Daten, die sich für die Klimabeschreibung eignen, gibt es nur von wenigen Anlagen (siehe Bild 3): Es sind dies insgesamt 49 GMA, die für mindestens 4 Jahre im Zeitraum 2004 bis 2015 annähernd vollständige Zeitreihen von Stundenwerten haben. Diese Anlagen müssen zudem – damit ihre Messungen untereinander vergleichbar sind – bestimmte Voraussetzungen bezüglich ihrer Lage erfüllen:

- Sie befinden sich nicht auf Brücken.
- Sie liegen nicht im Wald, nicht in einem Einschnitt und nicht an einem Hang.

Im Bild 3 sind die Standorte der GMA zu sehen. Sie sind – nach ihrer Lage und den Schadenssummen

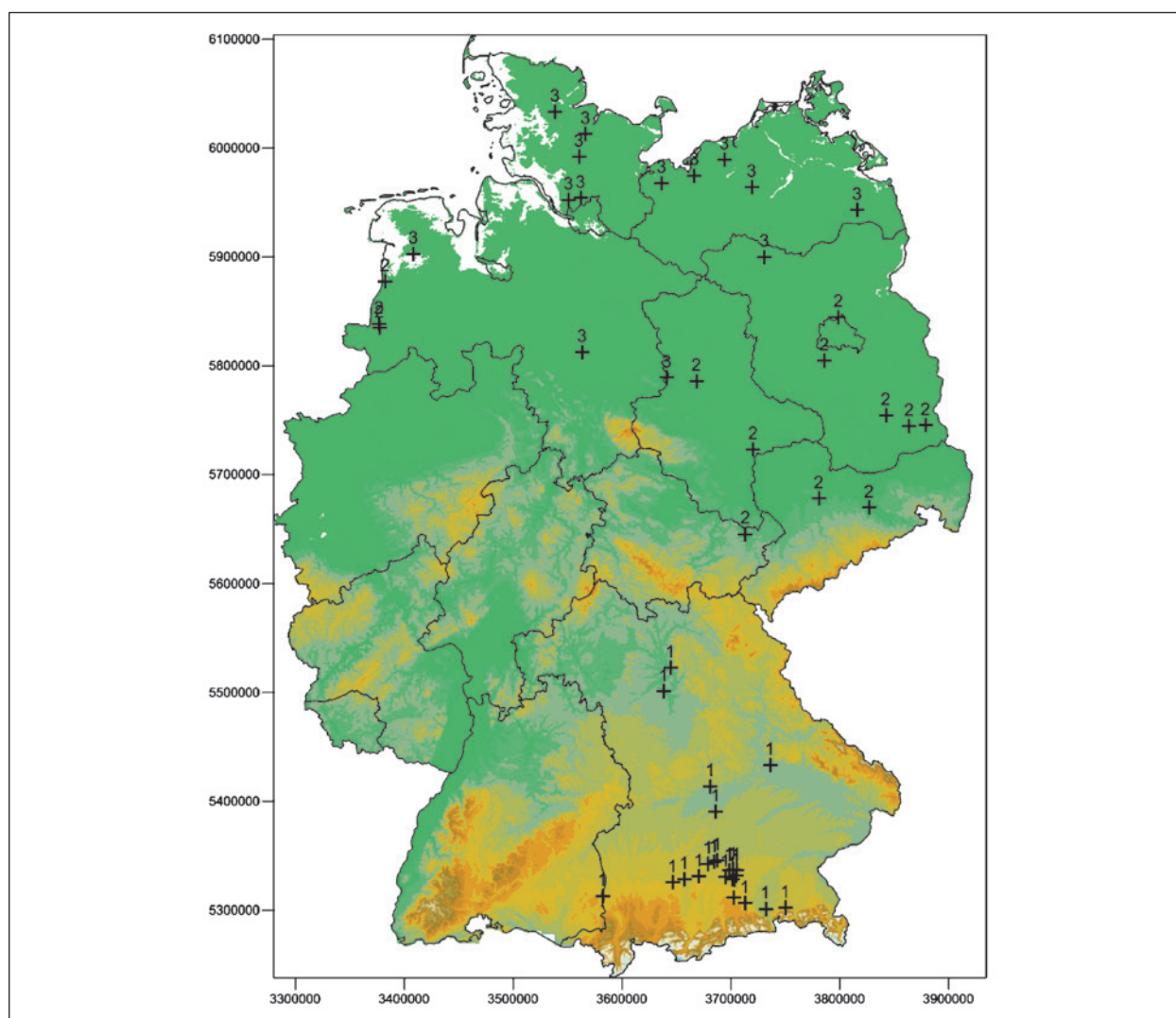


Bild 3: Lage der Glättmeldeanlagen, mit deren Messwerten das Schadenssummenklima beschrieben wird, sowie zugehörige GMA-Zone Unterdruck: Relief

nach GMA – ganz grob in 3 Zonen eingeteilt worden, die im Folgenden GMA-Zonen genannt werden.

Dieses Datenmaterial ist im Grunde für eine klimatologische Betrachtung nicht ausreichend. Es kommt noch hinzu, dass die GMA mit unterschiedlichen Sensoren ausgestattet sein dürften und es somit räumliche Unterschiede geben kann, die nichts mit dem Klima zu tun haben (siehe dazu BADELDT et al., 2006). Diese Sensoren – auch das ist BADELDT et al., 2006, zu entnehmen – messen außerdem nicht direkt die Temperatur der Fahrbahn, sie sind vielmehr in einen Asphaltzylinder eingelassen, der seinerseits in die Fahrbahn eingelassen ist. Der Wärmeübergang zwischen diesem Zylinder und der Asphalt-schicht dürfte sich von den Wärmeströmen innerhalb der Asphalt-schicht unterscheiden und damit ist es gut möglich, dass der Tagesgang der Fahrbahnoberflächentemperatur, der an den GMA gemessen wird, nicht dem entspricht, der wirklich an der Fahrbahnoberfläche auftritt: Die Erwärmung und Abkühlung der Fahrbahnoberfläche erfolgt bei den GMA-Messungen wahrscheinlich schneller als in der Realität. Wenn also trotz dieser Unzulänglichkeiten die Daten für eine Klimabeschreibung benutzt werden, dann aus dem einfachen Grund, dass es keine anderen Daten für eine solche Beschreibung gibt.

Für jede dieser 49 GMA sind jährliche Häufigkeiten der 156 Temperaturzustände berechnet worden. Außerdem wurden tägliche Schadenswerte berechnet:

Sie sind die Summe aller Schadenspotenziale der 24 Temperaturzustände eines Kalendertags. Im Rahmen dieser Berechnung hat außerdem eine – marginale – Qualitätskontrolle stattgefunden: Die in der Fahrbahn eingelassenen Sensoren neigen – insbesondere bei hohen Temperaturen – dazu, denselben Wert über eine längere Zeit zu melden. Diese dead bands sowie Fahrbahnoberflächentemperaturen über 70 °C und unter -25 °C sind eliminiert worden. Zudem sind nur Tage mit lückenlosen Beobachtungen in die Auswertung eingegangen, da man aus einem lückenhaften Tagesgang keine vernünftige Tagesamplitude ableiten kann. Bei der Berechnung erfolgte – en passant – eine Auswertung der Fahrbahnoberflächentemperatur und der Lufttemperatur, die an den GMA auch gemessen wird.

3.2 Ergebnisse

3.2.1 Temperatur an der Fahrbahnoberfläche

Da – wie bereits erwähnt – allein die zeitliche und räumliche Varianz der Temperatur der Fahrbahnoberfläche die zeitliche und räumliche Varianz der Schadenssummen bestimmt und diese Größe somit maßgebend für die Einteilung der Bundesrepublik in KiST-Zonen ist, wird sie an den Anfang der Betrachtungen gestellt. Die Stunden- und Tageswerte der Lufttemperatur und der Temperatur der Fahrbahnoberfläche korrelieren sehr gut. In Bild 4

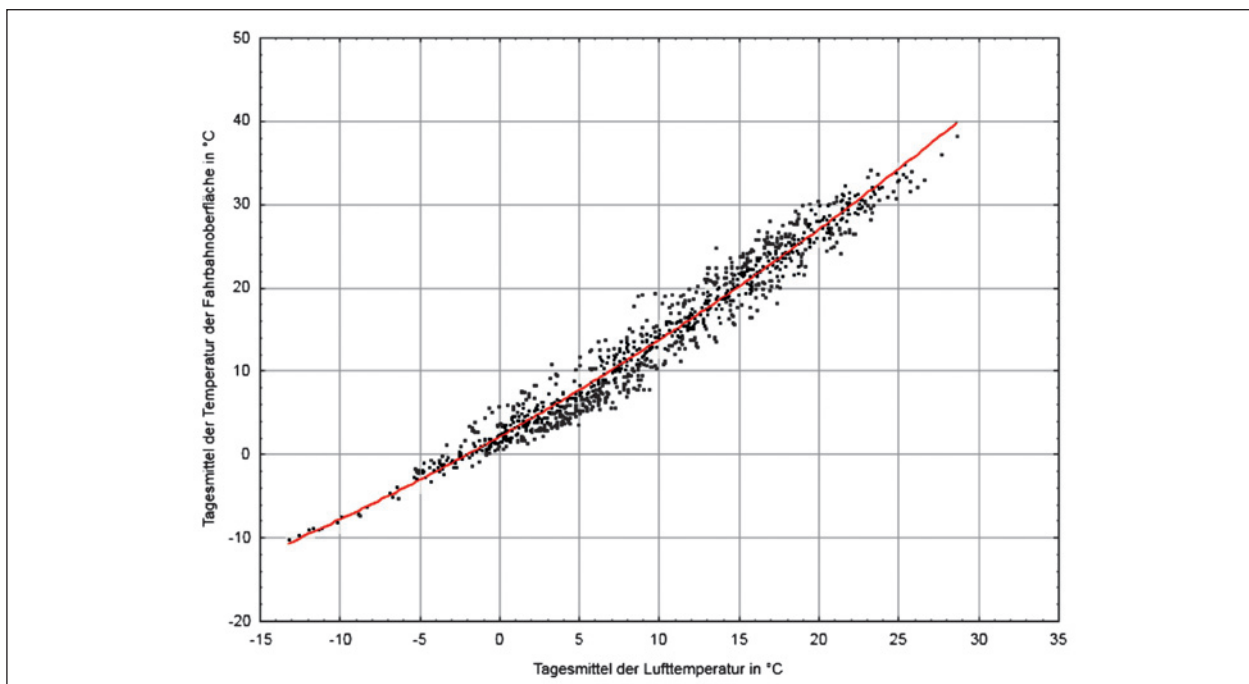


Bild 4: Korrelation der Tagesmittelwerte der Lufttemperatur und der Temperatur der Fahrbahnoberfläche, dargestellt für GMA Hirschaid, Bestimmtheitsmaß: 96 %

ist der Zusammenhang beispielhaft für die GMA Hirschaid dargestellt.

Wegen des engen Zusammenhangs werden im Folgenden die Temperatur der Fahrbahnoberfläche und die Lufttemperatur gemeinsam betrachtet.

Mittlerer Tagesgang

Der mittlere Tagesgang ist jeweils für alle Beobachtungen in einer der drei GMA-Zonen berechnet worden. In den folgenden Bildern ist er zusammen mit dem mittleren Tagesgang der Lufttemperatur zu sehen. Die Zeitangabe auf der Abszisse ist hier – wie auch in allen folgenden Darstellungen – in UTC (koordinierte Weltzeit), denn dies ist die Zeiteinheit, in der alle Daten im DWD vorgehalten werden. Die Umrechnung in die in Deutschland gebräuchliche MEZ ist $MEZ = UTC + 1$ Stunde.

Man kann dem Bild 5 entnehmen, dass der Tagesgang der Fahrbahnoberflächentemperatur wesentlich enger an die Einstrahlung gekoppelt ist als der der Lufttemperatur. Das ist verständlich, denn die kurzweilige Strahlung heizt nur den Asphalt auf, nicht die Luft. Diese wird vielmehr von der langwelligen Ausstrahlung der Erdoberfläche erwärmt, der Anstieg der Lufttemperatur hinkt daher hinter dem der Fahrbahn her. Die Abbildung macht auch deutlich, welche Unterschiede es hinsichtlich der Luft- und der Fahrbahnoberflächentemperatur in den drei GMA-Zonen gibt: In der GMA-Zone 1, die die GMA in Bayern umfasst, sind die Tagesamplituden für die Fahrbahn- und die Lufttemperatur größer als in den GMA-Zonen 2 (Sachsen, Sachsen-Anhalt und Brandenburg) und 3 (Schleswig-Holstein und

Mecklenburg-Vorpommern). In Bayern hat demnach die Ein- und Ausstrahlung einen größeren Einfluss auf die Temperaturen als in den anderen beiden Gebieten. Das erklärt sich mit höherem Sonnenstand und geringerer Exstinktion im Bayerischen Alpenvorland: Die GMA liegen hier in Höhen um 500 m über NN während die GMA in den anderen Zonen meist in Höhen unter 100 m über NN liegen. Zudem führen Fönwetterlagen in Bayern zu sehr trockener und klarer Luft mit entsprechend hoher Ein- und Ausstrahlung.

In der GMA-Zone 2, die das am stärksten kontinental geprägte Klima der drei Zonen aufweist, sind die Tagesamplituden zwar geringer als in Bayern, das Temperaturniveau ist aber – entsprechend der Höhe über NN – höher. Außerdem sind hier die Unterschiede im Tagesgang zwischen der Fahrbahn und der Luft größer als in den anderen beiden GMA-Zonen – das lässt sich nur durch geringeren horizontalen und vertikalen Austausch nachts in der bodennahen Luft erklären und könnte durch stabil geschichtete Luft und/oder geringe Verkehrsdichte hervorgerufen werden.

In der GMA-Zone 3 finden sich die kleinsten Tagesamplituden. Das ist eine Folge des maritimen Klimas, bei dem die Temperaturamplituden im Tages- und Jahresgang gedämpft werden. Die mittlere Fahrbahnoberflächentemperatur ist an den GMA der Zone 3 genauso groß wie in der Zone 1, das Mittel der Lufttemperatur ist etwas höher und nachts sind die Unterschiede zwischen Fahrbahn- und Lufttemperatur geringfügig kleiner als in der GMA-Zone 1.

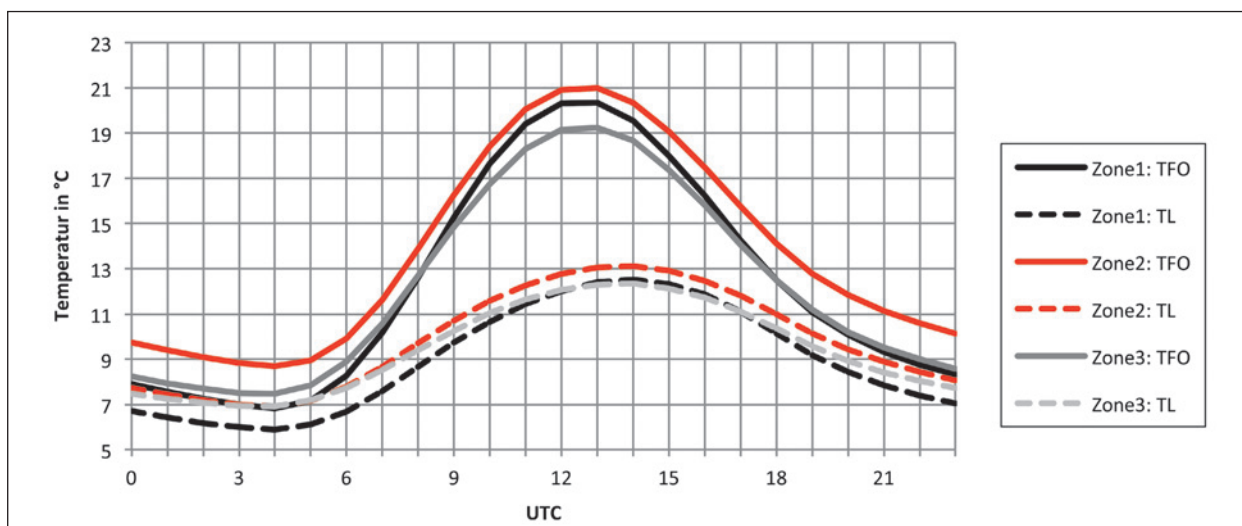


Bild 5: Mittlerer Tagesgang der Fahrbahnoberflächentemperatur und der Lufttemperatur, berechnet für alle Stundenwerte der GMA

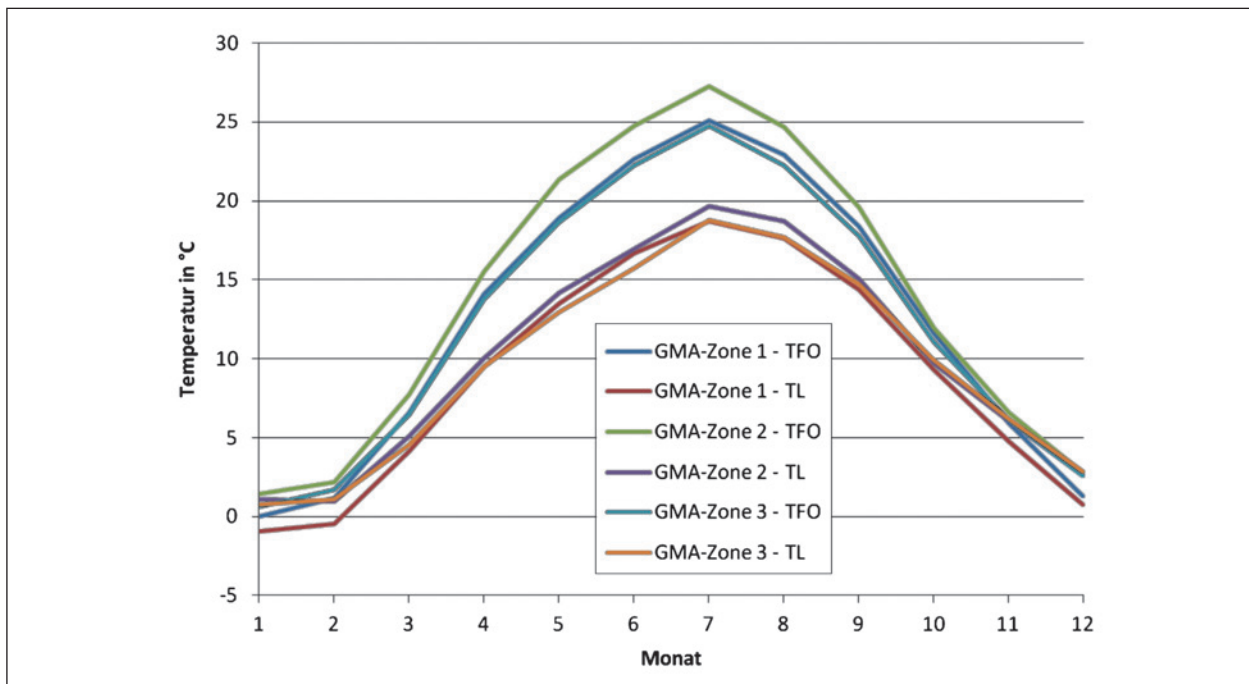


Bild 6: Mittlerer monatlicher Jahresgang der Luft- und der Fahrbahnoberflächentemperatur

Mittlere Jahresgänge

Bild 6 zeigt mittlere monatliche Jahresgänge der Luft- und der Fahrbahnoberflächentemperatur. Auch hier kann man gut erkennen, dass diese beiden Werte hoch korrelieren und dass die Unterschiede in den GMA-Zonen 1 und 3 nur gering sind, während in der wärmeren GMA-Zone 2 die mittlere Asphalttemperatur doch deutlich über den Werten der anderen beiden Zonen liegt. Man darf allerdings nicht vergessen, dass diese Werte alles andere als allgemeingültig sind – es kann sein, dass die hohen Fahrbahnoberflächentemperaturen in der GMA-Zone 2 von einer Station mit irregulären Messungen (falsch kalibrierter Sensor in der Fahrbahn) verursacht werden.

Insgesamt zeigen diese Auswertungen, dass es hinsichtlich der räumlichen Unterschiede der Temperatur an der Fahrbahnoberfläche kaum Unterschiede zu denen der Lufttemperatur gibt.

3.2.2 Temperaturzustände

Die Unterschiede hinsichtlich der mittleren Fahrbahnoberflächentemperaturen finden sich auch bei den Häufigkeiten, mit denen die einzelnen Temperaturklassen in den GMA-Zonen auftreten, wieder (Bild 8).

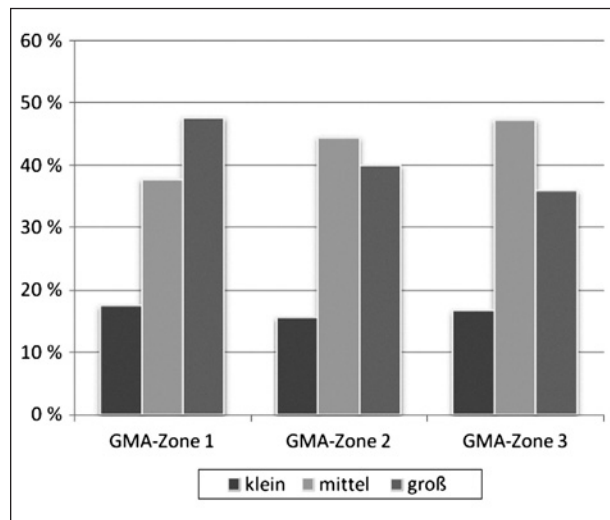


Bild 7: Relative Häufigkeiten der Amplitudenklassen, die die ncTxx-Klassen definieren

Temperaturen im Bereich von 15 °C bis 40 °C werden in der GMA-Zone 2 häufiger gemessen als in den anderen beiden Zonen, Temperaturen ab 35 °C sind in der GMA-Zone 3 am seltensten anzutreffen.

Die Häufigkeit, mit der eine der ncTxx-Klassen, die den vertikalen Temperaturverlauf beschreiben, auftritt, hängt allein von der Häufigkeit der kleinen, mittleren und großen Tagesamplituden der Fahrbahnoberflächentemperatur ab. Diese sind im Bild 7 dargestellt. In der GMA-Zone 1, in der die Strahlung einen größeren Einfluss auf die Fahrbahnober-

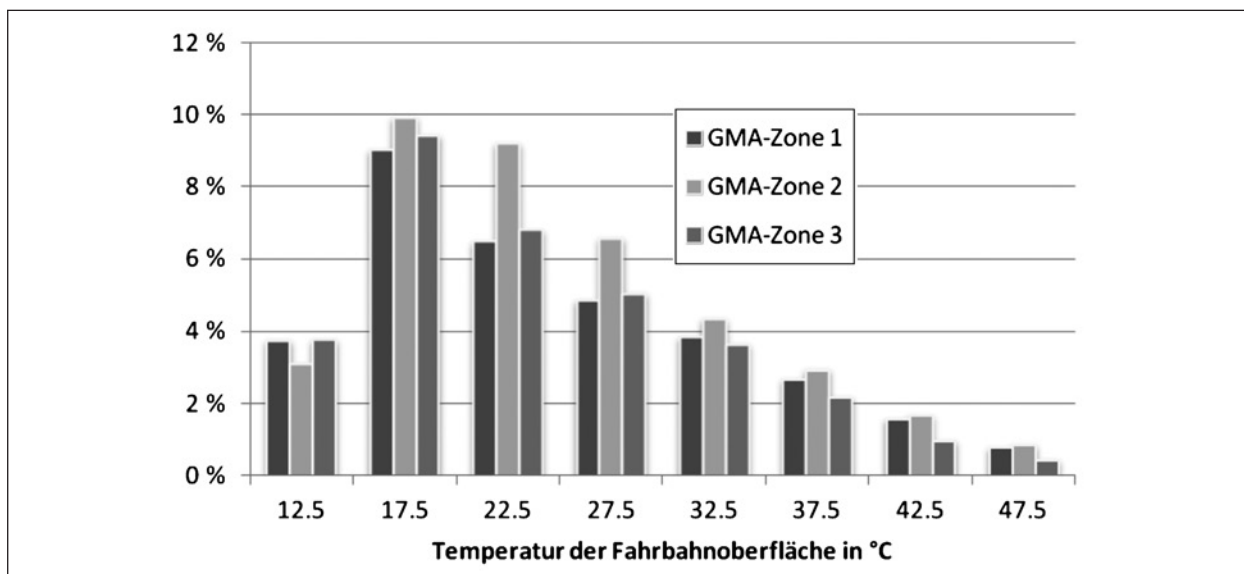


Bild 8: Relative Häufigkeiten der Temperaturklassen, dargestellt über der charakteristischen Temperatur der Klassen

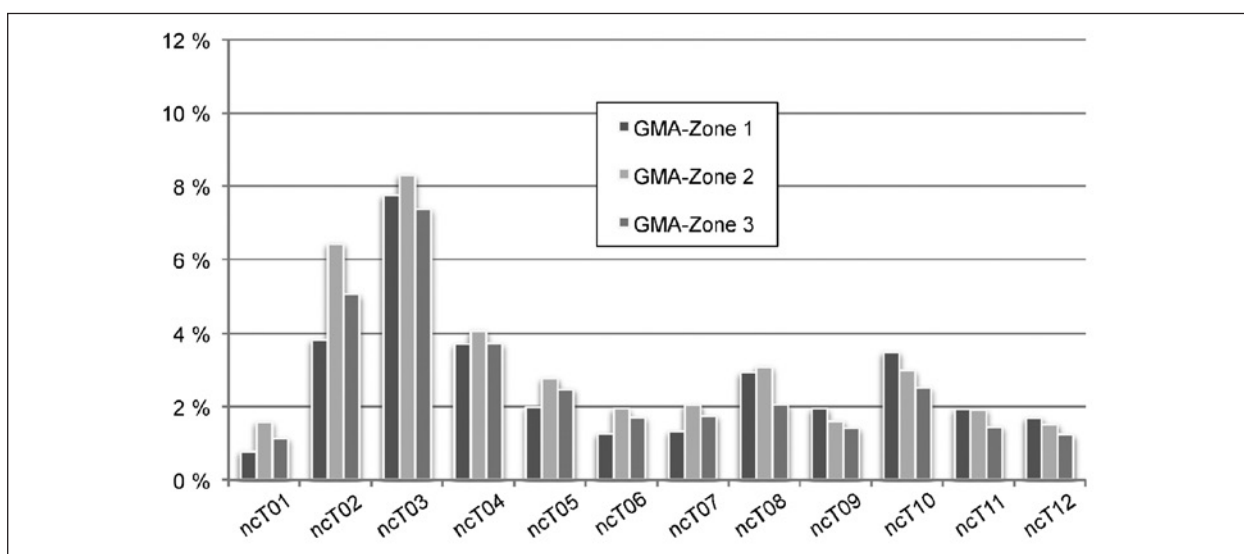


Bild 9: Relative Häufigkeiten der ncTxx-Klassen in den drei GMA-Zonen

flächentemperatur hat als in den anderen Zonen, sind die großen Amplituden (≥ 11.5 K) am häufigsten anzutreffen, in den anderen beiden Zonen sind die mittleren Amplituden (zwischen 6.5 und 11.5 K) häufiger.

Die Unterschiede hinsichtlich der Häufigkeiten der Temperaturzustände (Bild 9) fallen bei den ncTxx-Klassen insgesamt geringer aus als bei den Temperaturklassen. Damit ist davon auszugehen, dass Unterschiede bei den Schadenssummen von den Fahrbahnoberflächentemperaturen und nicht von der vertikalen Temperaturverteilung dominiert werden.

3.2.3 Schadenssummen

Mittlerer Jahresgang der Schädigung

Der mittlere Jahresgang ist aus den oben beschriebenen täglichen Schadenswerten berechnet worden. Da die Daten für die Stationen immer unterschiedliche Jahre des Zeitraums 2004 bis 2015 umfassen und es auch keine vollständigen Jahre gibt, vermittelt dieser Jahresgang lediglich ein Bild davon, welchen Anteil die einzelnen Monate an der Schadenssumme haben:

Die Ermüdungsschäden stammen fast vollständig aus den Monaten April bis September (siehe Bild 10). Dabei gibt es zwischen den 3 GMA-Zonen keinen Unterschied im Jahresgang.

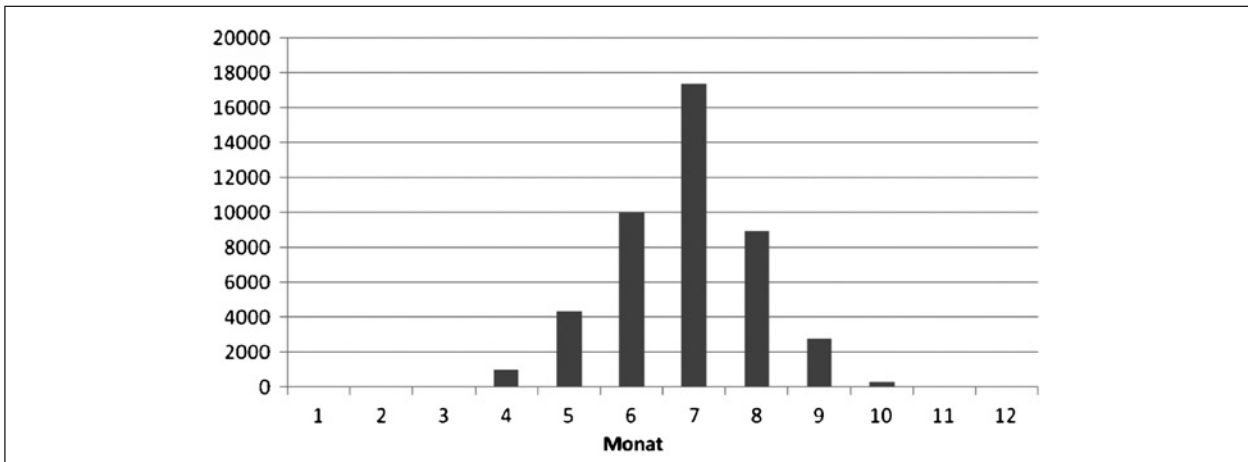


Bild 10: Verteilung der Tagesschäden auf die Monate, berechnet für alle 49 GMA

Zeitreihe

Das Datenmaterial der GMA reicht für die Darstellung einer Zeitreihe nicht aus – wenn man die Daten eines Jahres über alle GMA mittelt, erhält man trotzdem in den einzelnen Jahren sehr unterschiedlich viele Werte und Vergleichbarkeit hinsichtlich der jährlichen Schadenssummen gibt es wegen der sehr unterschiedlichen Potenziale nur, wenn alle GMA vollständige Stundenwerte haben.

Zustandsbezogene Schädigungen

In Bild 11 sind die Verteilungen der Einzelschäden auf die Klassen der Temperaturzustände zu sehen: In der GMA-Zone 1, die die Anlagen in Bayern umfasst, entfallen 2/3 der Gesamtschadenssumme auf die Klassen ncT3, ncT4, ncT9 und ncT10 und damit auf die Zeit von 2 bis 15 UTC.

Betrachtet man die Häufigkeiten der einzelnen Klassen (also die Werte, die mit den Schadenspotenzialen multipliziert wurden, Bild 12), dann ergibt sich ein anderes Bild: Den größten Anteil haben die Klassen ncT2 und ncT3, allerdings treten hier kaum Fahrbahnoberflächentemperaturen von mehr als 25 °C auf (das ist die Obergrenze der Klasse mit der charakteristischen Temperatur 22.5 °C), während die Klassen ncT9 und ncT10 nur vergleichsweise geringe Anteile haben, aber hier die Fahrbahnoberflächentemperaturen häufig größer als 25 °C sind: Diese Klassen umfassen die Zeit von 11 bis 16 MEZ an Tagen, an denen die Amplitude > = 11.5 K ist. Die großen Amplituden treten vorwiegend im Sommerhalbjahr auf, wenn Ein- und Ausstrahlung hoch sind. Insgesamt wird somit in Bayern die Schädigung der Asphalttragschicht von den Strahlungsverhältnissen dominiert.

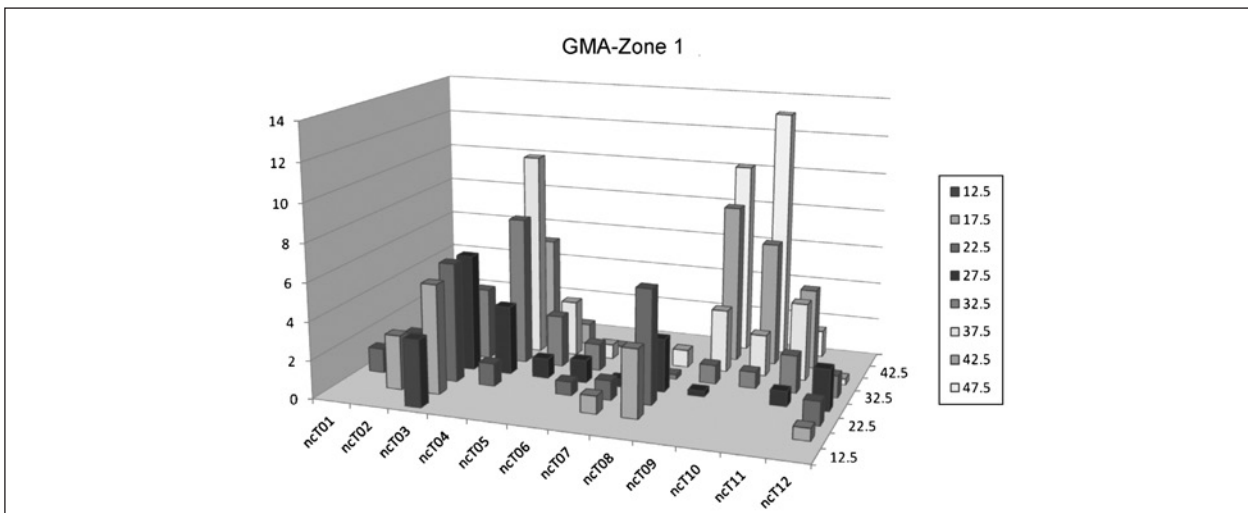


Bild 11: Einzelschäden für die Temperaturzustände, GMA-Zone 1 (Bayern), Schadenssumme: 157 %

Für die GMA-Zone 2, die hauptsächlich Anlagen in Sachsen-Anhalt, Sachsen und Brandenburg umfasst, wird eine höhere Schadenssumme berechnet als für die GMA in Bayern (siehe Bild 13). Hier verteilt sich die Gesamtsumme etwas gleichmäßiger auf die einzelnen ncTxx-Klassen als in der Zone 1. Das ist eine Folge der durchweg höheren Temperaturen in dieser GMA-Zone: Hier sind sowohl die Temperaturen der Fahrbahnoberfläche als auch die der Luft im Mittel höher als in der GMA-Zone 1.

Vergleicht man die Häufigkeiten, mit denen die einzelnen Temperaturzustände in den beiden GMA-Zonen auftreten (Bild 12 und Bild 14), dann gibt es keine auffälligen Unterschiede. In beiden GMA-Zonen kommen 50 % der Schadenssumme aus den Klassen ncT03, ncT08, ncT10 und ncT11.

Die dritte GMA-Zone, die in Bild 15 und 16 betrachtet wird, umfasst vorwiegend GMA aus Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern. Hier ist zu erwarten, dass sich der Einfluss von Nord- und Ostsee bemerkbar macht.

Die Schadenssumme für diese Region ist mit 130 % kleiner als in den beiden anderen Zonen. Grund dafür sind vor allem die geringeren Anteile von Stunden mit sehr hohen Temperaturen an der Fahrbahnoberfläche. Die Einzelschäden verteilen sich damit in dieser GMA-Zone auch gleichmäßiger über die ncTxx-Klassen als in den anderen beiden Zonen und die Diskrepanz zwischen Einzelschaden und Häufigkeit ist hier nicht so ausgeprägt. Der ausgleichende Einfluss, den die Wasserflächen mit ihrer hohen Wärmekapazität auf die Lufttemperaturen an der Küste und ihrem Hinterland haben, ist

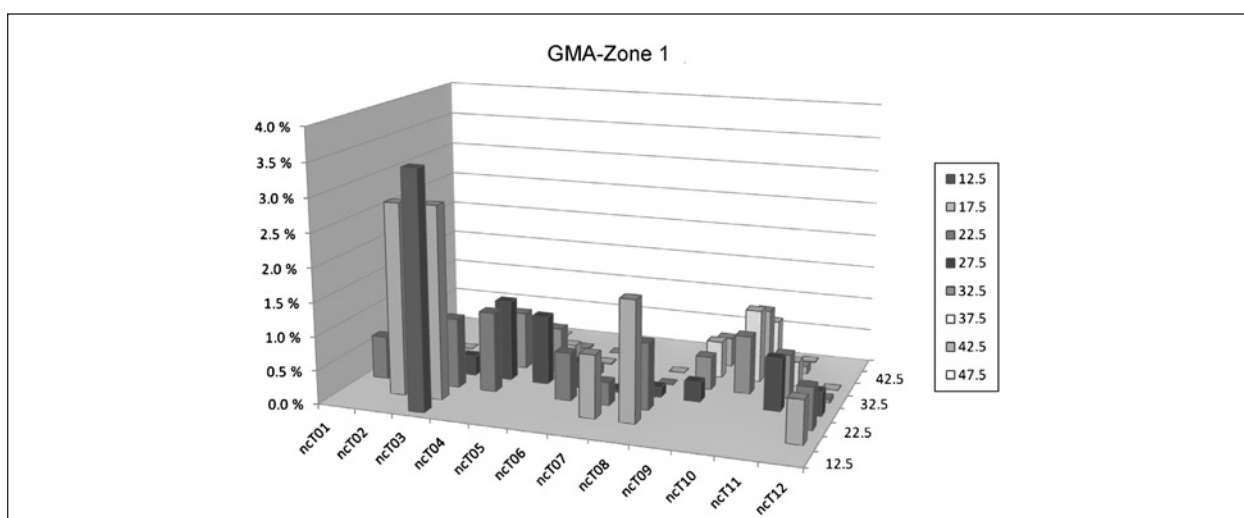


Bild 12: Relative Häufigkeiten der einzelnen Temperaturzustände, berechnet für alle GMA-Stationen in Bayern

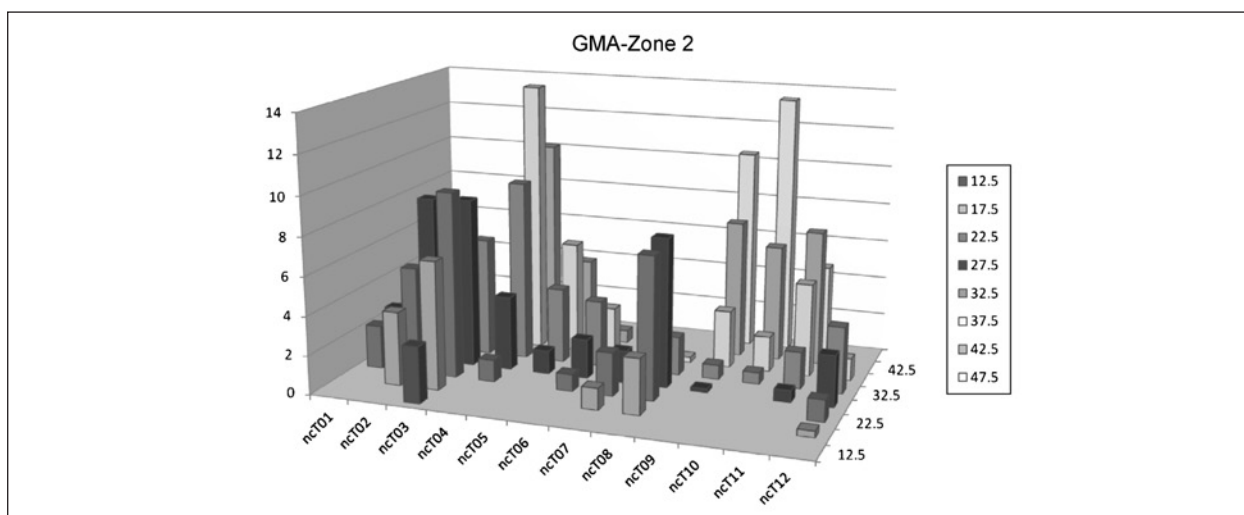


Bild 13: Einzelschäden für die Temperaturzustände, GMA-Zone 2, Schadenssumme: 224 %

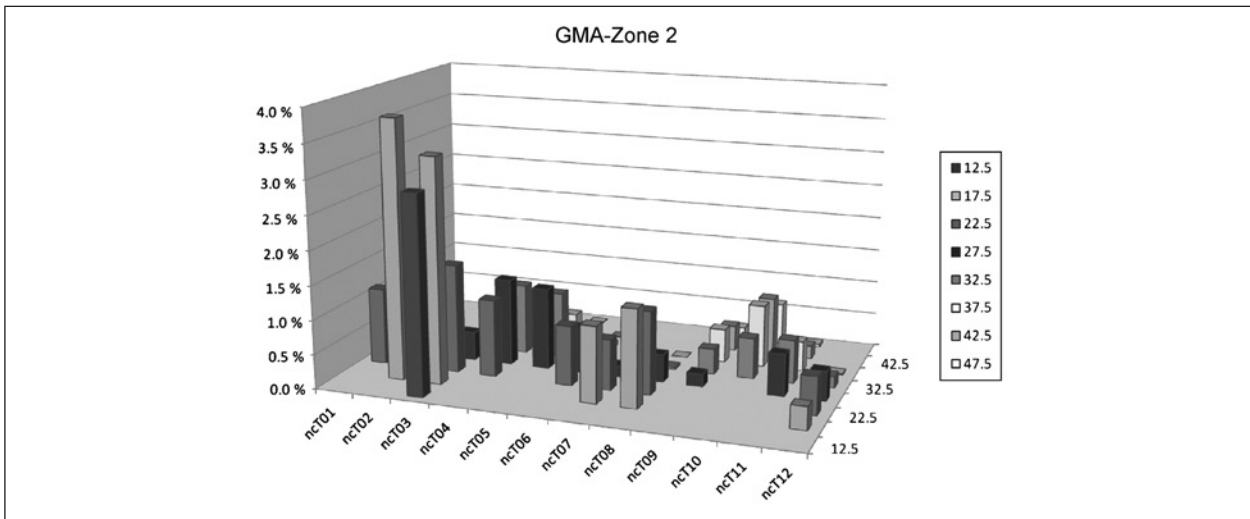


Bild 14: Relative Häufigkeiten der einzelnen Temperaturzustände, berechnet für alle GMA-Stationen in der GMA-Zone 2

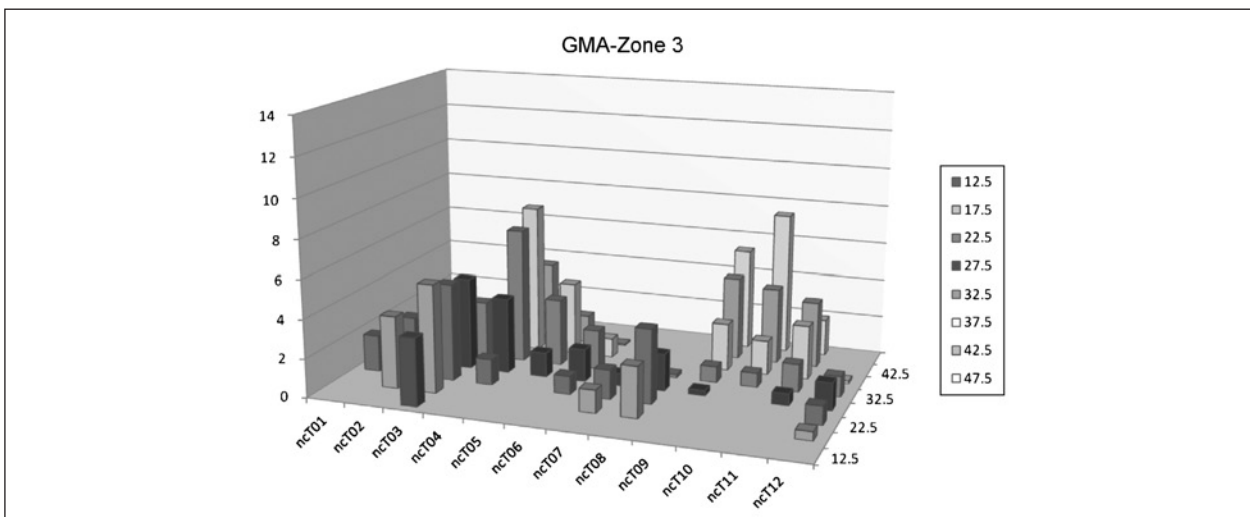


Bild 15: Einzelschäden für die Temperaturzustände, GMA-Zone 3, Schadenssumme: 130 %

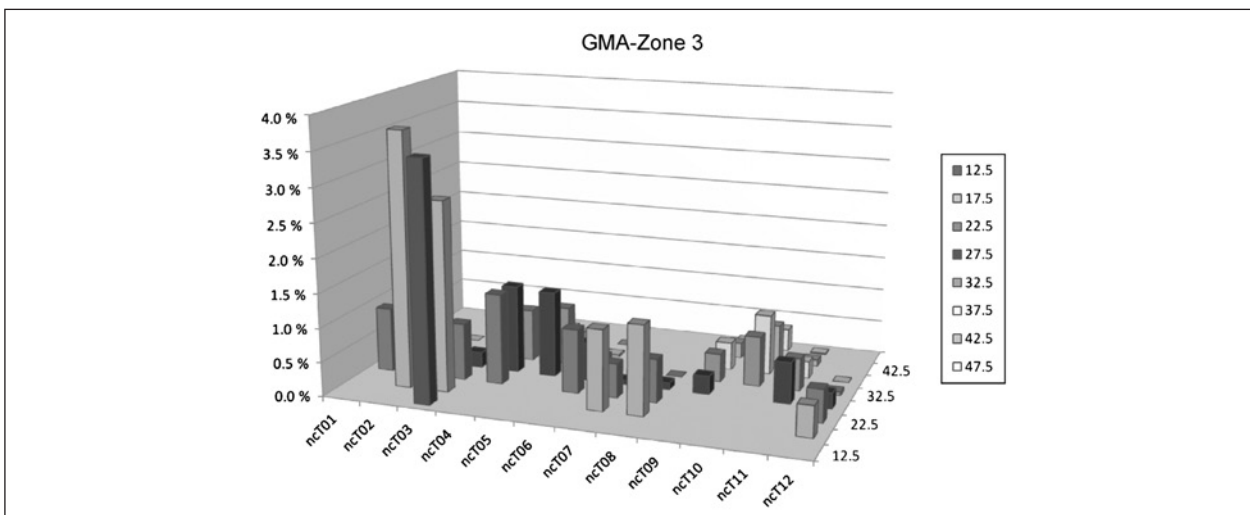


Bild 16: Relative Häufigkeiten der einzelnen Temperaturzustände, berechnet für alle GMA-Stationen in der GMA-Zone 3

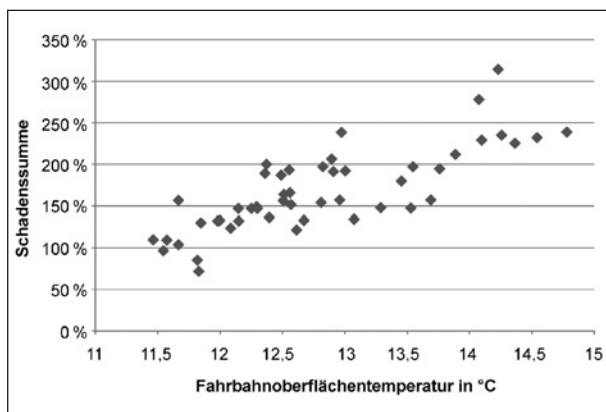


Bild 17: Zusammenhang zwischen der mittleren Fahrbahnoberflächentemperatur und der Schadenssumme für die GMA in Bild 18

also auch bei den Temperaturen der Fahrbahnoberfläche zu bemerken.

Die Schadenssummen, die sich für die drei GMA-Zonen errechnen, zeigen, dass man wohl davon ausgehen kann: Je höher die mittlere Fahrbahnoberflächentemperatur an einem Standort, desto größer auch die Schadenssumme. Dieser Zusammenhang gilt nicht nur für die drei GMA-Zonen, sondern auch für die Ergebnisse der einzelnen 49 GMA, aus deren Messwerten die Schadenssummen berechnet wurden, wie in Bild 17 zu sehen ist. Trotzdem wird man wegen der unterschiedlichen Schadenspotenziale für die einzelnen Zustände kaum eine einfache Regressionsgleichung für diesen Zusammenhang finden.

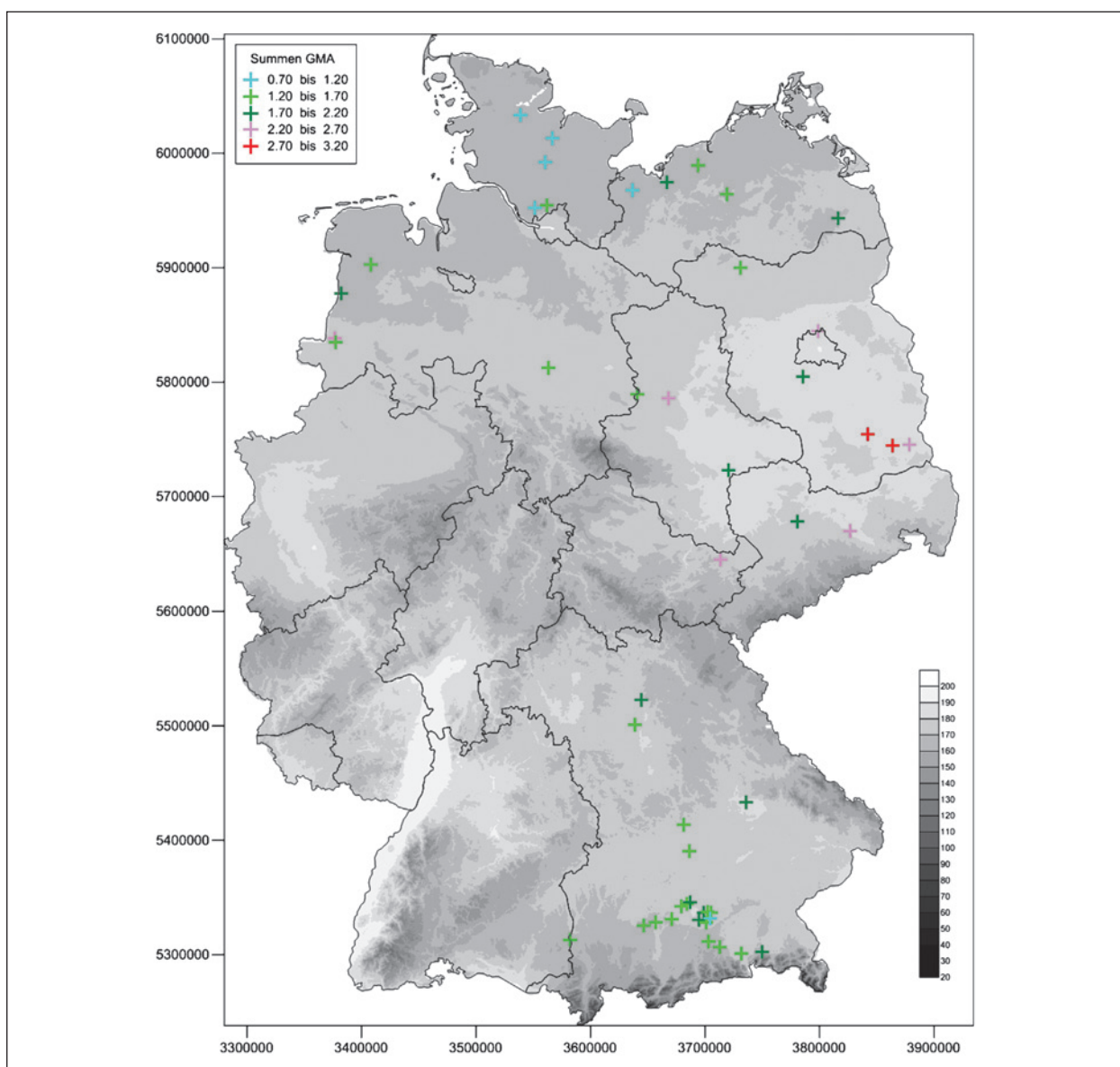


Bild 18: Mittlere Lufttemperatur der Monate Juni, Juli und August, berechnet für den Zeitraum 1981 bis 2010 (Quelle: Climate Data Center des DWD) sowie klassierte Schadenssummen der GMA, berechnet für unterschiedliche Jahre aus dem Zeitraum 2004 bis 2015

Insgesamt ergeben diese Auswertungen – die wegen der prekären Datenlage keinerlei quantitative Aussagen zulassen – doch eine generelle räumliche Verteilung (Bild 18), wie man sie von der Verteilung der Lufttemperaturen innerhalb Deutschlands kennt.

4 KiST-Methode

4.1 Grundsätzliche Überlegungen

Die Berechnung von Stundenwerten der Fahrbahnoberflächentemperatur mit dem empirisch-physikalischen Modell (EPM), das WELLNER und KAYSER (2007) beschreiben und das für die Berechnung der Schadenssummen nach EPM, die den KiST-Zonen zugrunde liegen, herangezogen wurde, ist sehr aufwendig. Da der Berechnungszeitraum aktualisiert werden soll, um den infolge der Klimaerwärmung steigenden Lufttemperaturen sowie dem weiter ausgebauten Messnetz meteorologischer Stationen Rechnung zu tragen, ist die erweiterte grafische Darstellung der KiST-Zonen auf der Grundlage von Modellrechnungen nicht möglich. Mit dem EPM werden aber Vergleichsrechnungen für den alten (1991 bis 2005) und den neuen Berechnungszeitraum (2001 bis 2015) durchgeführt.

Als Ersatz für die Modellrechnungen wird versucht, für die Berechnung der Temperatur der Fahrbahnoberfläche eine wesentlich einfachere Methode mithilfe von Regressionsrechnungen zu finden. Diese Methode wird im Folgenden KiST-Methode genannt. Schadenssummen, die mit den Ergebnissen der KiST-Methode berechnet werden, sind in diesem Text KiST-Raten, um sie deutlich von anders berechneten Schadenssummen zu unterscheiden.

4.2 Regressionsrechnungen

Die klimatologischen Betrachtungen aus Kapitel 3 haben gezeigt, dass es einen engen Zusammenhang zwischen der Temperatur der Luft und der der Fahrbahn geben muss. Sie haben aber auch gezeigt, dass die Temperatur der Fahrbahn sehr eng an die Ein- und Ausstrahlung gekoppelt ist. Als unabhängige Variable werden bei der Regressionsrechnung daher die Lufttemperatur, die Globalstrahlung und ein Maß für den in der Luft enthaltenen Wasserdampf benutzt.

Schadenssummen werden auf der Grundlage von Stundenwerten der Fahrbahnoberflächentemperatur ermittelt. Es erscheint trotzdem wenig sinnvoll, Regressionsgleichungen auf der Grundlage von Stundenwerten zu errechnen – vor allem, weil sowohl die Fahrbahnoberflächentemperaturen als auch die meteorologischen Beobachtungswerte aufeinanderfolgender Stunden nicht die Voraussetzung unabhängiger Variablen erfüllen.

Die Regressionsrechnungen werden deshalb auf der Grundlage von Tageswerten durchgeführt: Es werden Gleichungen zur Berechnung des Tagesmittels und der Tagesamplitude der Fahrbahnoberflächentemperatur gesucht. Aus diesen beiden Größen werden dann Stundenwerte der Fahrbahnoberflächentemperatur abgeleitet, indem für jeden Tag derselbe – reduzierte und normierte – Tagesgang benutzt wird, der allerdings von der Tagesamplitude der TFO abhängt. Näheres dazu wird im Kapitel 4.4 beschrieben.

Die Häufigkeiten der 156 Temperaturzustände werden dann aus diesen Stundenwerten gebildet.

4.2.1 Daten der Fahrbahnoberflächentemperatur

Im Prinzip kann man die Ergebnisse der Modellrechnungen, mit denen die Fahrbahnoberflächentemperatur im Rahmen des FE 04.198/2004/ARB ermittelt wurden, für die Regressionsrechnungen heranziehen. Sie korrelieren sehr hoch mit den Messwerten von Glättemeldeanlagen (WELLNER und KAYSER, 2007, S. 99). Allerdings gibt es keinen Nachweis dafür, dass dieser Zusammenhang auch für die Schadenssummen gilt und die vorangegangenen Betrachtungen haben gezeigt, dass das fraglich ist. Es ist daher besser, die Messwerte der Glättemeldeanlagen zu benutzen. Diese haben allerdings den Nachteil, dass sie sehr lückenhaft und ungeprüft sind. Vor Beginn der Regressionsrechnung muss daher eine sorgfältige Auswahl der Daten stattfinden. Eine Datenprüfung kann wegen des großen Datenumfangs nur im Rahmen der Auswahl der Daten bei der Ausgabe aus der Datenbank erfolgen.

4.2.2 Meteorologische Daten

Da die Temperaturen der Fahrbahn und die der Luft eng gekoppelt sind, müssen diese beiden Werte möglichst am selben Standort gemessen werden.

Deshalb werden die Messdaten von dem Automaten, der zu jeder GMA gehört, benutzt. Leider gilt für diese Werte dasselbe wie für die Fahrbahnoberflächentemperaturen: Sie sind lückenhaft und ungeprüft. Allerdings eröffnen die gleichzeitigen Messungen an der Fahrbahn und in der Luft einige Prüfmöglichkeiten, die auch genutzt werden (z. B. sollte das Tagesmaximum der Fahrbahntemperatur nicht kleiner als das der Luft sein, und die Taupunkttemperatur eines Termins darf auch nicht kleiner als die Lufttemperatur sein).

Strahlungswerte werden an den GMA nicht gemessen. Eine Regressionsrechnung ohne Einbeziehung der Globalstrahlung macht aber keinen Sinn. Die Tagessummen der Globalstrahlung kommen daher von meteorologischen Stationen in der Nähe der GMA. Da die Globalstrahlung eine der Größen ist, die von den Verhältnissen an der Erdoberfläche (mit Ausnahme von lokalen Verschattungen) nicht beeinflusst wird, sind die Messungen an einem Standort in der Regel für einen größeren Umkreis (bis ~ 50 km in ebenem Gelände) repräsentativ. Aus diesem Grund wird die Globalstrahlung auch an nur wenigen Stationen des DWD gemessen. Ihre Tagessumme lässt sich aber gut anhand der Sonnenscheindauer, die an fast allen DWD-Stationen gemessen wird, abschätzen.

4.2.3 Auswahl von GMA und ihrer Messwerte

In der Datenbank des DWD liegen die Beobachtungen von GMA ab 2004 vor. In einem ersten Schritt wurden alle Stationen ermittelt, die im Zeitraum 2004 bis 2015 wenigstens die Hälfte der möglichen stündlichen Messwerte aufweisen. Das sind 102 Stationen. Die Werte der Fahrbahnoberflächentemperatur, die zur vollen Stunde gemessen wurden, sind dann für jede GMA mit den entsprechenden Werten der Lufttemperatur, die an den GMA in 4 m über Grund gemessen wird, linear korreliert worden. Ein erster Blick auf die dabei berechneten Bestimmtheitsmaße, die typischerweise im Bereich von 87 % bis 95 % liegen, machte – trotz der vielen Werte, die dieser Berechnung zugrunde lagen – schnell deutlich, dass es GMA geben muss, deren Messwerte nicht in Ordnung sein können. Die Korrelation wurde daher auf der Ebene jährlicher Beobachtungen wiederholt. Dabei zeigte sich, dass es an vielen Stationen einzelne Jahre gibt, in denen einer der Sensoren (der für die Lufttemperatur oder – öfter – der für die Temperatur der Fahrbahnoberfläche) offenbar für längere Zeit defekt war. Es wur-

de daher für jedes Jahr entschieden, ob die Daten für die Regressionsrechnung zu gebrauchen sind oder nicht. Dabei sind dann auch Standorte betrachtet worden, die bei der ersten Stationsauswahl wegen zu weniger Werte nicht berücksichtigt wurden, die aber im Zeitraum 2004 bis 2015 einzelne, annähernd vollständige Beobachtungsjahre aufweisen. So kam das zustande, was im Folgenden als GMA-Stationsjahr bezeichnet wird.

Für die Auswertung standen schließlich 100 GMA mit insgesamt 350 Stationsjahren zur Verfügung. Für eine Regressionsrechnung auf der Basis täglicher Werte ist das zu viel. Es wurden daher aus diesen 100 Stationen 16 ausgewählt, die einigermaßen gleichmäßig über Deutschland verteilt sind und in der Nähe eine DWD-Station haben, an der die Globalstrahlung gemessen wird. Sie haben insgesamt 47 Stationsjahre (auch diese wurden so ausgewählt, dass es gleichzeitig Messwerte der Globalstrahlung gibt), von denen 25 für die Regressionsanalyse und 22 für die Kreuzvalidierung der Regressionsergebnisse benutzt wurden.

Die Regressionsergebnisse sind schließlich auf alle 100 Stationen angewandt worden, damit auch beurteilt werden konnte, ob es systematische räumliche Unterschiede hinsichtlich der Güte des Regressionsergebnisses gibt. In Bild 19 sind alle 100 GMA auf einer Deutschlandkarte dargestellt. Hier kann man auch sehen, welche der Standorte für die Regressionsrechnung benutzt wurden.

4.2.4 Regressionsmodell

Es sind Regressionsgleichungen zur Berechnung der Tagesmitteltemperatur (TFO_M) und der Tagesamplitude (TFO_A) der Fahrbahnoberfläche aufgestellt worden. Die unabhängigen Variablen sind

- das Tagesmittel der Lufttemperatur (T_{LM}) in °C,
- die Tagesamplitude der Lufttemperatur (TL_A) in K,
- die Tagesamplitude des Spreads (SP_A) in K: Der Spread ist die Differenz aus Lufttemperatur und Taupunkt und der Taupunkt ist die Temperatur, auf die die Luft abkühlen müsste, damit der in ihr enthaltene Wasserdampf kondensiert. Damit ist der Spread umso größer, je trockener die Luft ist und eine große Tagesamplitude auch typisch für einen Tag mit trockener Luft,
- die Tagessumme der Globalstrahlung (GS) in $(J/cm^2)/100$.

Es ist immer versucht worden, ein Polynom 3. Grades zu finden. Um aber nur die unabhängigen Variablen zu nutzen, die auch substantiell zur Erklärung der Varianz beitragen, wurde eine schrittweise Regression durchgeführt: Bei dieser Methode werden die möglichen unabhängigen Variablen schrittweise dem Modell hinzugefügt und verbleiben nur dann in der Regressionsgleichung, wenn die Irr-

tumswahrscheinlichkeit für die Nullhypothese, dass sich der Standardfehler durch Einbeziehung der Variablen verringert hat, $\leq 1\%$ ist.

Als Maße für die Güte der Anpassung sind das Bestimmtheitsmaß und der Standardfehler der Residuen herangezogen worden. Beide Größen wurden für die Analysestichprobe und die Validierungsstich-

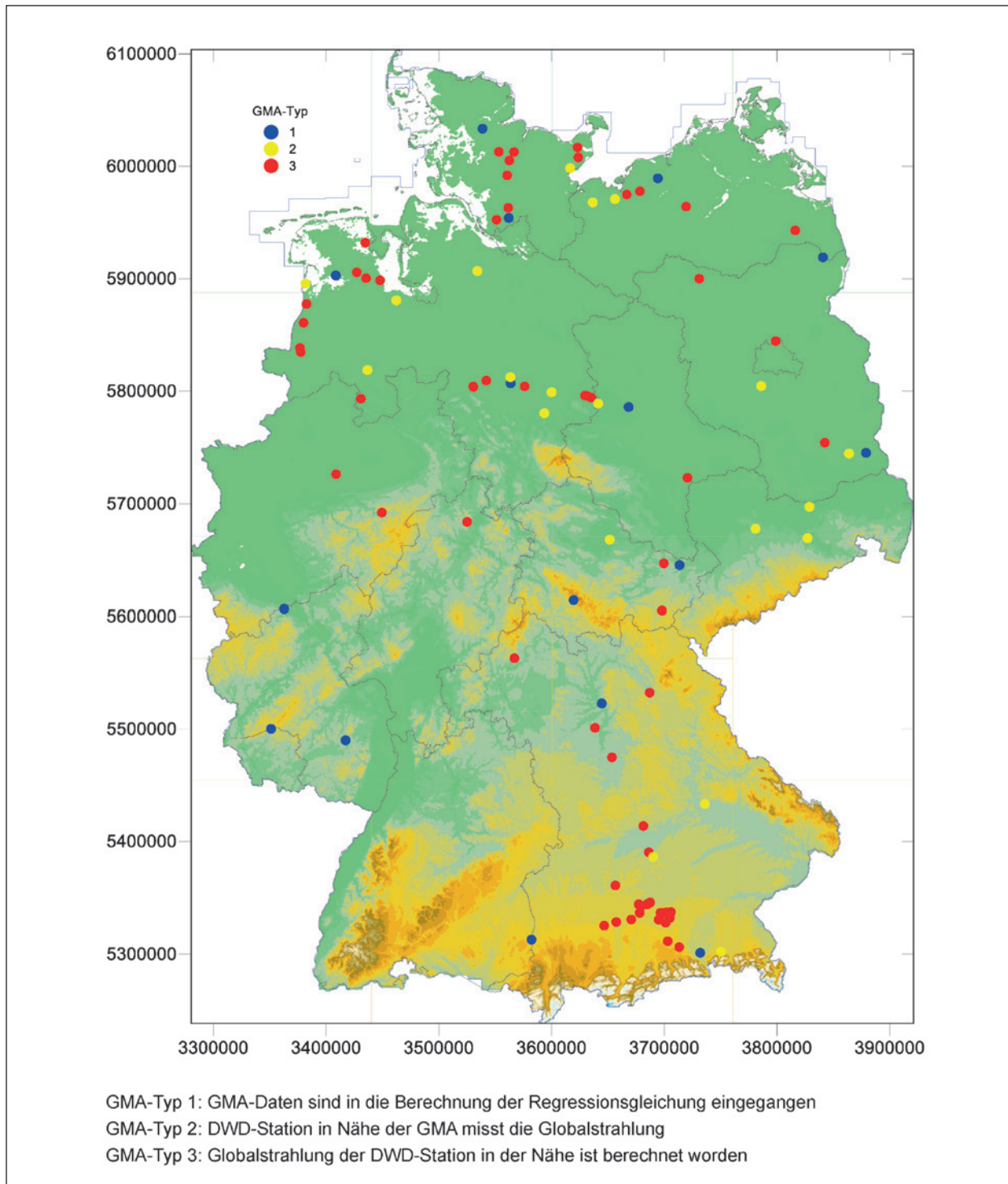


Bild 19: Lage und Typisierung der GMA, deren Daten für die Regressionsrechnung und Validierung benutzt wurden

probe berechnet. Außerdem ist das Ergebnis anhand des Korrelogramms von berechneten und gemessenen Werten beurteilt worden.

Ein Regressionsergebnis wird als hinreichend gut für den vorliegenden Zweck angesehen, wenn das Bestimmtheitsmaß größer als 85 % ist und der Standardfehler so klein, dass 95 % aller berechneten Amplituden im Bereich Messwert ± 2.5 K liegen und 95 % aller Tagesmittel der TFO im Bereich Messwert ± 5 K. Die unterschiedlichen Genauigkeiten berücksichtigen, dass das Tagesmittel der TFO einen wesentlich größeren Bereich einnimmt als die Amplitude und daher für das Tagesmittel die Varianz auch viel größer ist als für die Amplitude. Damit darf der Standardfehler – Normalverteilung der Residuen vorausgesetzt – für die Amplitude nicht größer als 1.28 K sein, für das Tagesmittel nicht größer als 2.55 K.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Tagesmittel der Fahrbahnoberflächentemperatur

Die Ergebnisse der Regressionsrechnung sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Von den 9 möglichen

unabhängigen Variablen sind nur 6 in das Modell eingegangen: Der Einfluss der Luftfeuchtigkeit ist hier offenbar so klein, dass er das Regressionsergebnis nicht verbessert.

In den letzten beiden Zeilen der Tabelle 4 ist die lineare Gleichung aufgeführt, die sich errechnet, wenn man die berechneten und die gemessenen Werte der Lufttemperatur linear korreliert. Die Parameter dieser Gleichung geben Auskunft darüber, wie treu die Regressionsgleichung insgesamt ist, denn bei der Aufstellung der Gleichung wird immer der Mittelwert der abhängigen Variablen richtig abgebildet, für die Enden der Verteilung (d. h. die sehr kleinen und großen Werte) muss das nicht gelten. Diese Gleichung hätte idealerweise einen Koeffizienten von 1 und eine Konstante von 0. Ist der Koeffizient kleiner als 1, dann wird die abhängige Variable – in diesem Fall das Tagesmittel der Fahrbahnoberflächentemperatur – für Werte unterhalb des Mittelwertes über- und für Werte oberhalb des Mittelwertes unterschätzt, und zwar umso mehr, je weiter diese Werte vom Mittelwert und je weiter der Koeffizient von 1 entfernt sind. Für Koeffizienten > 1 gilt dementsprechend, dass kleine Werte der abhängigen Variablen unter- und große Werte überschätzt werden. In den Abbildungen, die die Korrelation von berechneten und gemessenen

Variable	Einheit	Koeffizient	Konstante
TL_M	°C	0.949342	0.129109
TL_M^2	°C	0.009023	
TL_M^3	°C	-0.000240	
GS	(J/cm ²)/100	0.239354	
GS ²	(J/cm ²)/100	0.008814	
GS ³	(J/cm ²)/100	-0.000226	
BMASS, ANALYSE		0.978	
BMASS, VALIDIERUNG		0.973	
STE, ANALYSE		1.48	
STE, VALIDIERUNG		1.67	
ZDF, ANALYSE		8166	
ZDF, VALIDIERUNG		7168	
TFO _M -VERGLEICH, ANALYSE		0.9778	0.2886
TFO _M -VERGLEICH, VALIDIERUNG		0.9807	0.5698
TL_M	Tagesmitteltemperatur in °C		
GS	Tagessumme der Globalstrahlung in (J/cm ²)/100		
BMASS	Bestimmtheitsmass		
STE	Standardfehler		
ZDF	Zahl der Fälle		

Tab. 4: Ergebnisse der Regressionsrechnung für das Tagesmittel

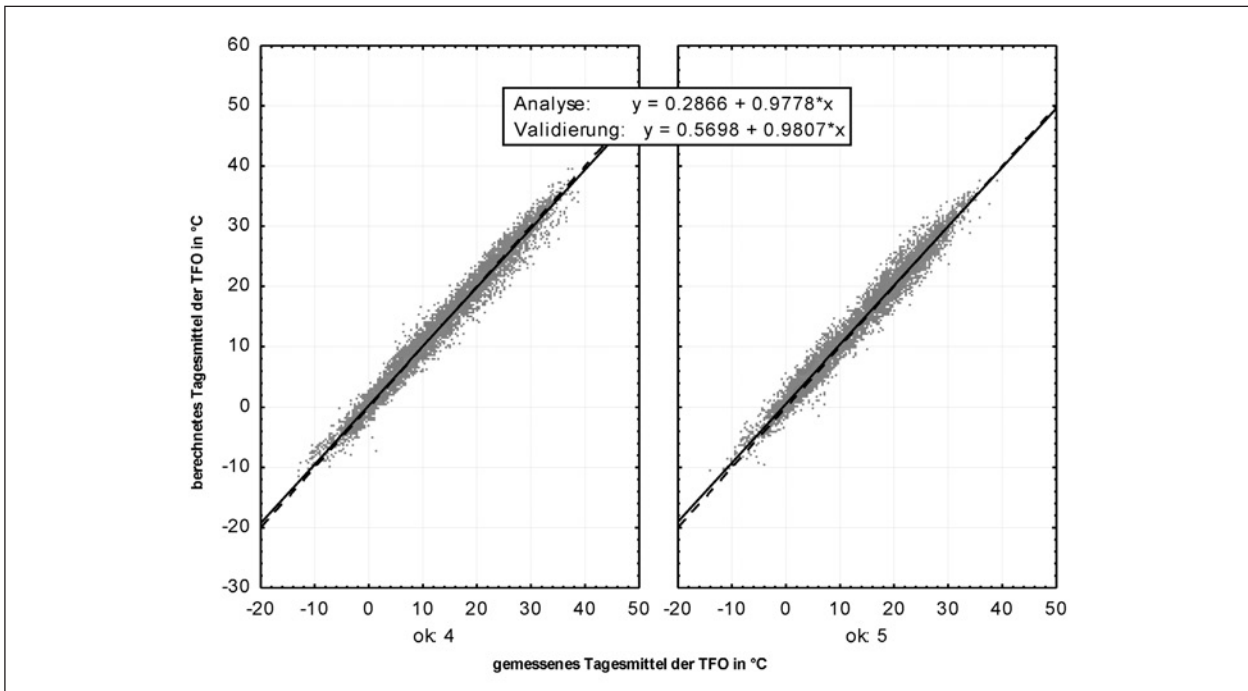


Bild 20: Korrelation gemessener und berechneter Werte des Tagesmittels der Fahrbahnoberflächentemperatur (TFO), links: Analyse (ok = 4), rechts: Validierung (ok = 5)

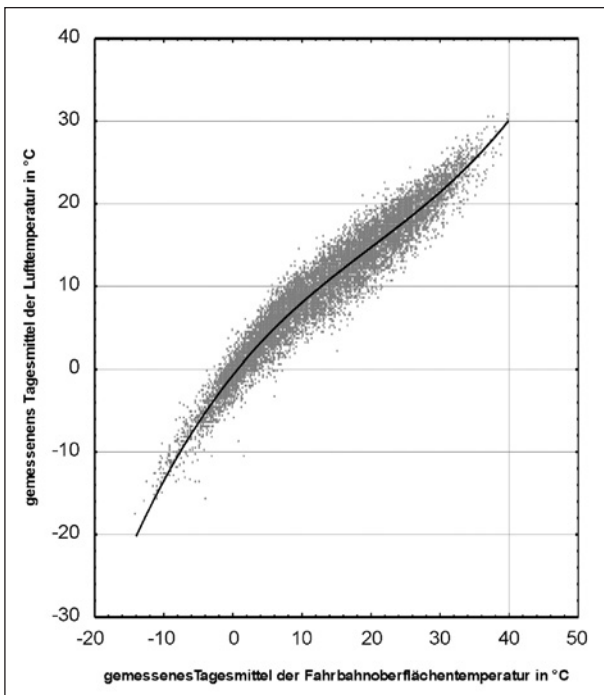


Bild 21: Korrelation der Tagesmittel von Fahrbahnoberflächentemperatur und Lufttemperatur und Anpassung durch ein Polynom 3. Grades, Analyse- und Validierungsdaten

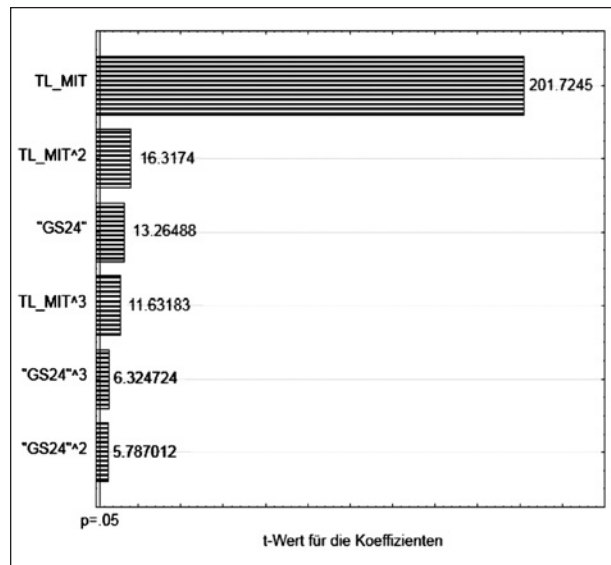


Bild 22: Einfluss der einzelnen unabhängigen Variablen auf das Regressionsergebnis für das Tagesmittel der Fahrbahnoberflächentemperatur (Pareto-Chart)

Werten zeigen, sind immer zwei Geraden eingetragen: Die durchgezogene stellt das Ergebnis der linearen Korrelation dar, die gestrichelte ist die Gerade $Y = X$.

Das Ergebnis der Regression ist für das Tagesmittel der Fahrbahnoberflächentemperatur sehr gut, die Kriterien für ein hinreichend gutes Ergebnis werden sowohl bei der Analyse als auch bei der Validierung deutlich übertroffen. Bild 21 und Bild 22 zeigen, dass – wie im Rahmen der klimatologischen Betrachtungen schon für eine einzelne GMA gezeigt (siehe Bild 4) – die Lufttemperatur den dominieren-

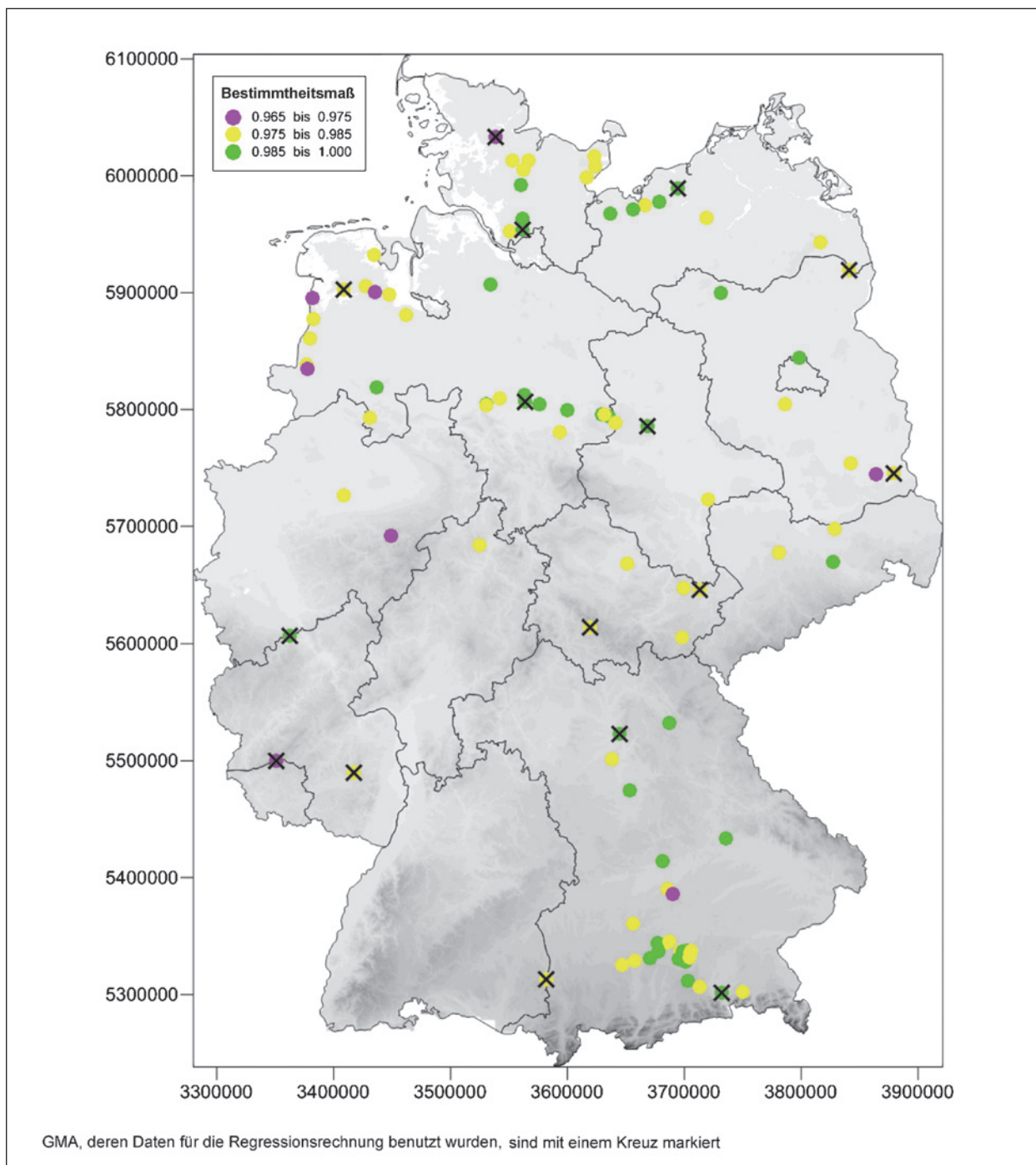


Bild 23: Bestimmtheitsmaße für den Zusammenhang von gemessener und berechneter Tagesmitteltemperatur der Fahrbahnoberfläche, Unterdruck: Relief

den Einfluss auf die Fahrbahnoberflächentemperatur hat, wenn man das Tagesmittel betrachtet.

Die Symbole in Bild 23 bis Bild 25 zeigen, wie gut die Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Tagesmittelwerten für die einzelnen Standorte der GMA ist. Das Ergebnis ist für die meisten GMA besser als für die Analyse- und Vali-

dierungsstichprobe und es gibt keinen Standort mit inakzeptablen Werten. Trotzdem ist nicht zu übersehen, dass die GMA im Nordwesten Niedersachsens und im Südosten Brandenburgs auffällig kleine Regressionskoeffizienten aufweisen – hier wird die Tagesmitteltemperatur bei warmen Wetterlagen also unterschätzt und das dürfte dann auch für die KiST-Rate gelten.

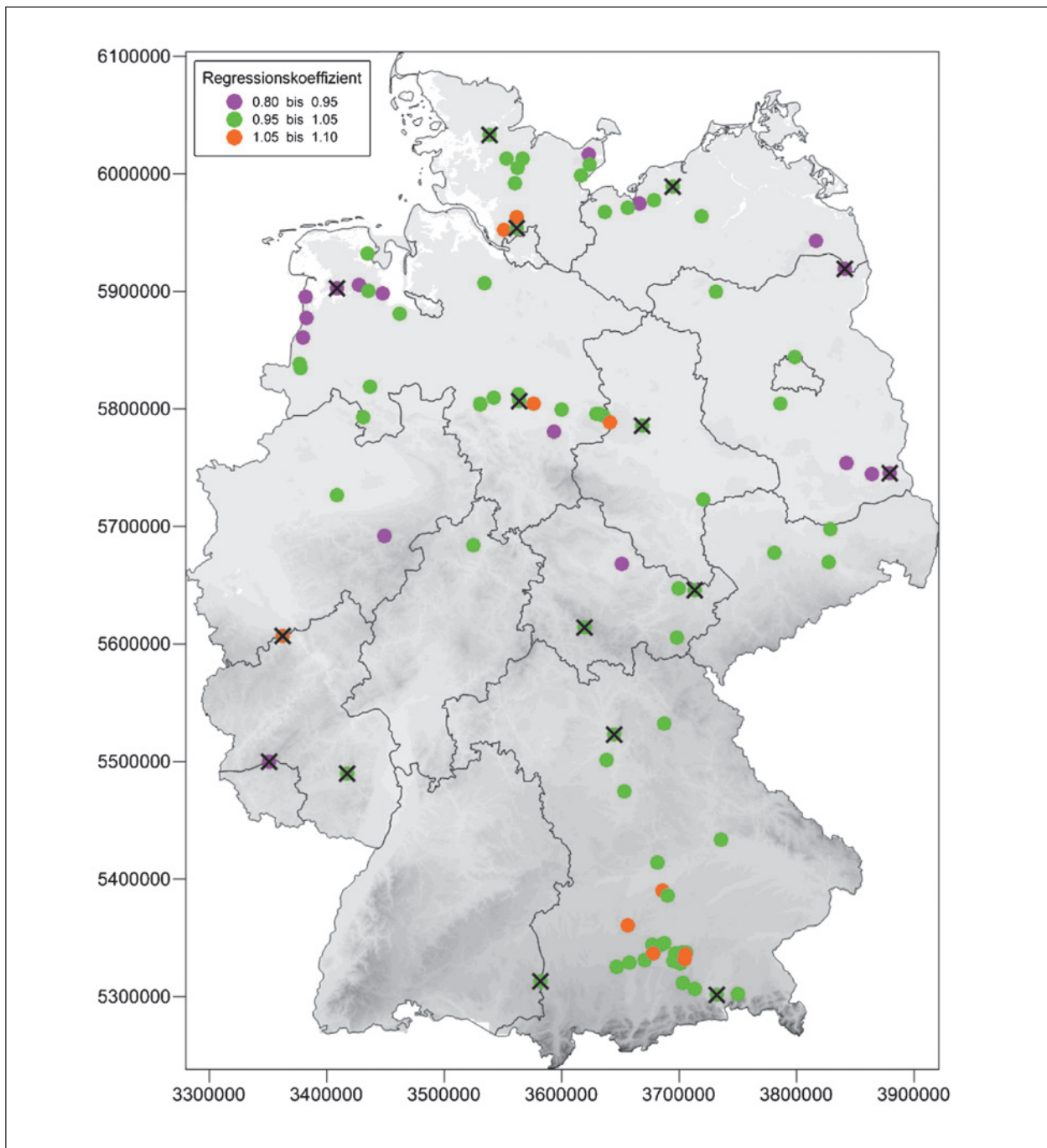


Bild 24: Regressionskoeffizienten der linearen Regression von berechneten und gemessenen Tagesmittelwerten der Fahr-
bahnoberflächentemperatur, Unterdruck: Relief

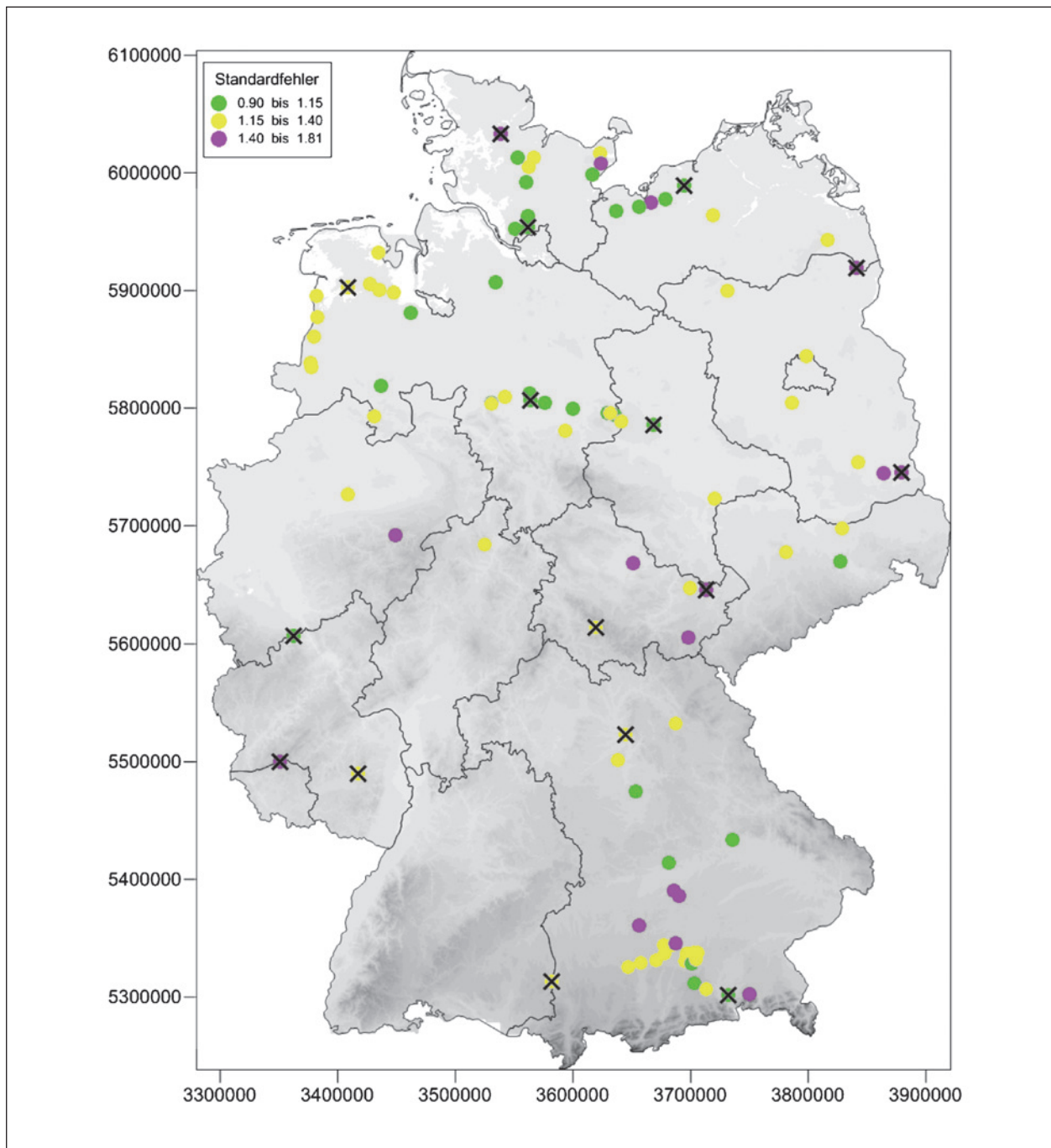


Bild 25: Standardfehler der linearen Regression von berechneten und gemessenen Tagesmittelwerten der Fahrbahnoberflächentemperatur, Unterdruck: Relief

4.3.2 Tagesamplitude der Fahrbahnoberflächentemperatur

Die Ergebnisse der Regressionsrechnung sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Die Gleichung zur Berechnung der Tagesamplitude der TFO ist quadratisch – die kubischen Terme sind hier nicht in das Modell eingegangen. Außerdem gibt es hier keine Konstante.

Die Bestimmtheitsmaße für die Berechnung der Amplitude der Fahrbahnoberflächentemperatur aus den Amplituden von Lufttemperatur und Spread sowie der Tagessumme der Globalstrahlung sind zwar auch recht hoch, der Zusammenhang ist hier aber nicht so eng wie bei dem Tagesmittel der Temperatur. Außerdem hat die resultierende Regressionsgleichung für die Analysestichprobe mit 0.917 einen recht kleinen Koeffizienten – damit kommt es bei

hohen Amplituden zu einer Unterschätzung, die allerdings für die Validierungsstichprobe doch geringer ausfällt (Koeffizient = 0.976).

Bild 26 erweckt – im Vergleich zum Bild 20 – den Eindruck eines deutlich weniger engen Zusammenhangs zwischen gemessenen und berechneten

Variable	Einheit	Koeffizient	Konstante
TL _A	K	0.839561	
TL _A ²	K	-0.033541	
SP _A	K	0.293122	
SP _A ²	K	-0.007168	
GS	(J/cm ²)/100	0.511602	
GS ²	(J/cm ²)/100	-0.006340	
BMASS, ANALYSE		0.918	
BMASS, VALIDIERUNG		0.921	
STE, ANALYSE		1.28	
STE, VALIDIERUNG		1.22	
ZDF, ANALYSE		8166	
ZDF, VALIDIERUNG		7168	
TFO _M -VERGLEICH, ANALYSE		0.9173	0.6676
TFO _M -VERGLEICH, VALIDIERUNG		0.9759	0.5376

TL _A	Tagesamplitude der Lufttemperatur in Kelvin
SP _A	Tagesamplitude des Spreads in Kelvin
GS	Tagessumme der Globalstrahlung in (J/cm ²)/100
BMASS	Bestimmtheitsmass
STE	Standardfehler
ZDF	Zahl der Fälle

Tab. 5: Ergebnisse der Regressionsrechnung für die Tagesamplitude

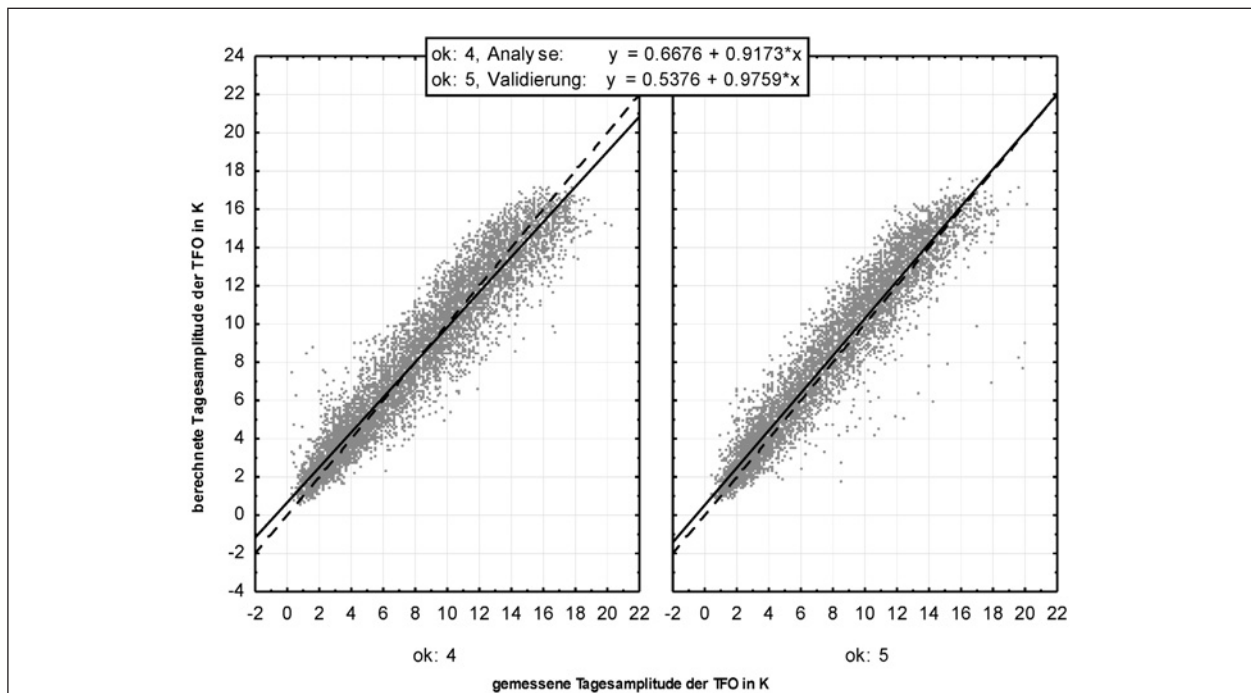


Bild 26: Korrelation gemessener und berechneter Werte der Tagesamplitude der Fahrbahnoberflächentemperatur, links: Analyse (ok = 4), rechts: Validierung (ok = 5)

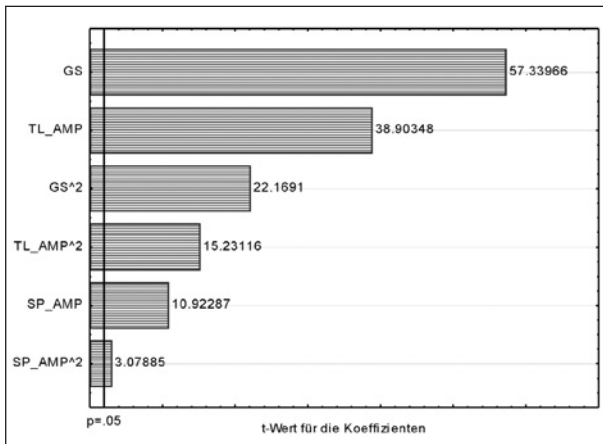


Bild 27: Einfluss der einzelnen unabhängigen Variablen auf das Regressionsergebnis für die Tagesamplitude der Fahr-
bahnoberflächentemperatur (Pareto-Chart)

Werten. Das täuscht allerdings etwas, weil die Tagesamplituden nur im Bereich von 0 K bis 20 K schwanken, während die Tagesmittel einen wesentlich größeren Bereich einnehmen, er reicht von -10 °C bis 40 °C.

Bei der Tagesamplitude gibt es keine beherrschende unabhängige Variable (Bild 27), aber es überrascht nicht, dass hier die Globalstrahlung einen größeren Anteil der Varianz erklärt als die Lufttemperatur – auch das war anhand der mittleren Tagesgänge der Fahrbahnoberflächentemperatur und des Jahrgangs der Amplitude bereits zu erkennen (siehe Kapitel 3.2.1). Dieses Ergebnis deckt sich außerdem mit dem Ergebnis der Sensibilitätsrechnungen, die KAYSER (2009) mit seinem physi-

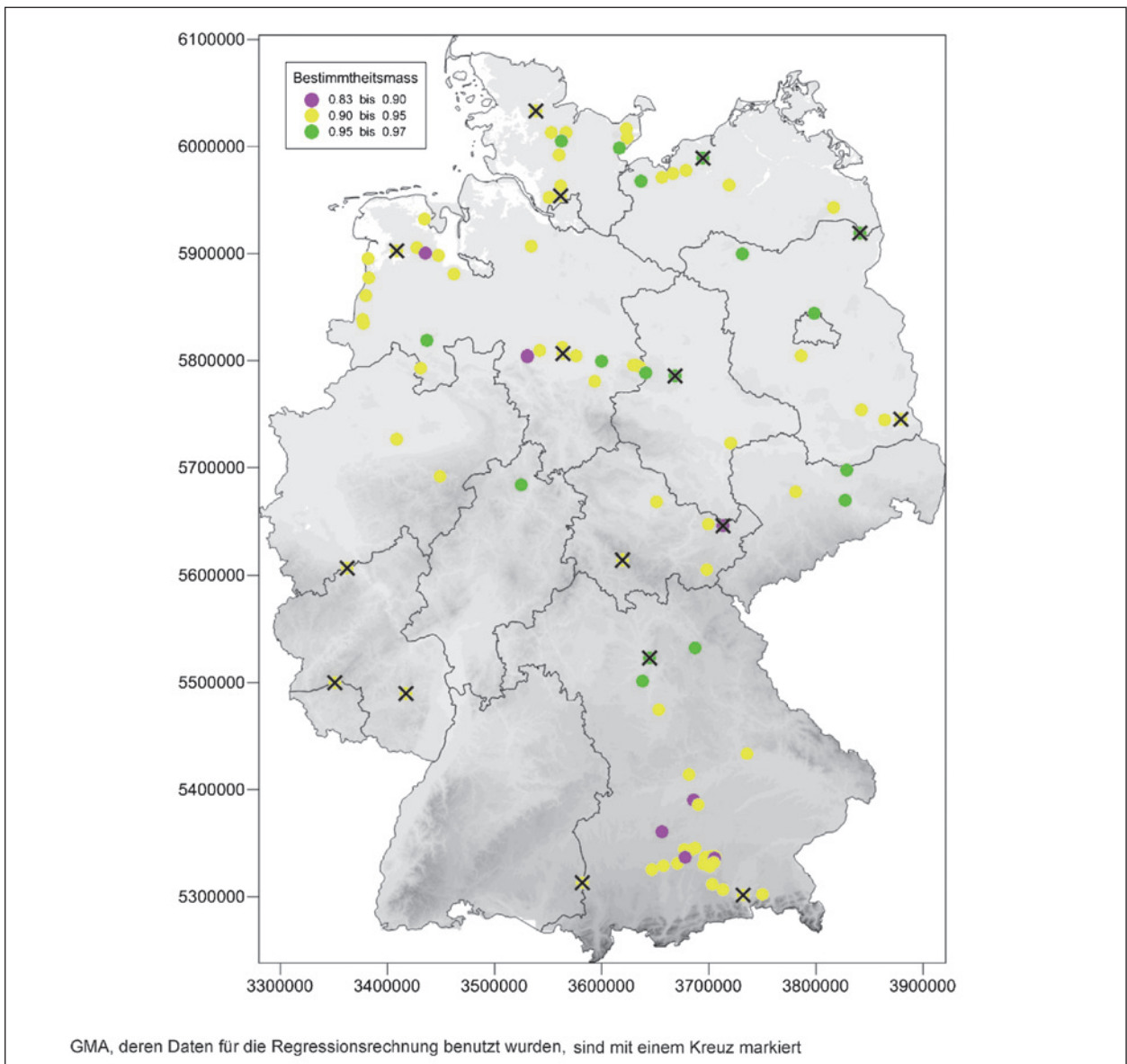


Bild 28: Bestimmtheitsmaße für den Zusammenhang von gemessener und berechneter Tagesamplitude der TFO, Unterdruck:
Relief

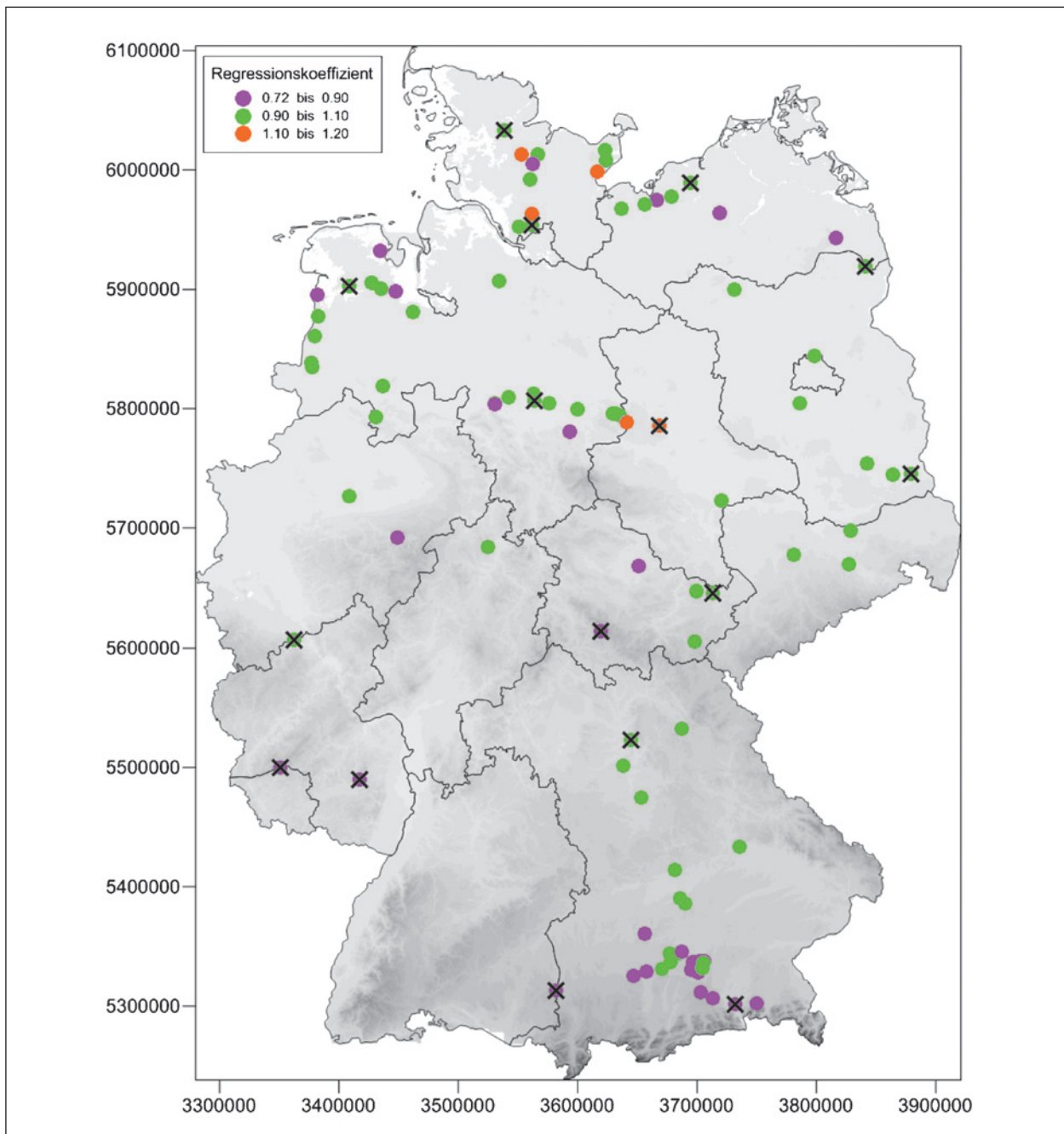


Bild 29: Regressionskoeffizienten der linearen Regression von berechneten und gemessenen Tagesamplituden der Fahrbahnoberflächentemperatur, Unterdruck: Relief

kalisch-empirischen Modell zur Untersuchung des Einflusses, den die einzelnen Klimaelemente auf die Stundenwerte der Fahrbahnoberflächentemperatur haben, durchgeführt hat.

Die Güte des Regressionsergebnisses für die einzelnen GMA ist in Bild 28 bis Bild 30 dargestellt: Die Ergebnisse sind hinsichtlich der Bestimmtheitsmaße und der Regressionskoeffizienten nicht so gut, wie für die Tagesmitteltemperatur. Es gibt aber nur eine GMA, für die das Bestimmtheitsmaß klei-

ner als 0.85 ist und das ist Langenbruck in Bayern – diese GMA hat nur ein Stationsjahr und einen direkten Nachbarn mit einem Bestimmtheitsmaß > 0.90 , es handelt sich daher wohl um ein Zufallsergebnis. Bei den Regressionskoeffizienten fällt die große Zahl von GMA mit Koeffizienten, die kleiner als 0.90 sind, auf. Sie treten im Alpenvorland gehäuft auf, hier wird die Amplitude bei Strahlungswetter durch die Berechnung also wohl unterschätzt werden. Das Ausmaß, das diese Regressionsergebnisse auf die KiST-Raten haben, lässt sich aber

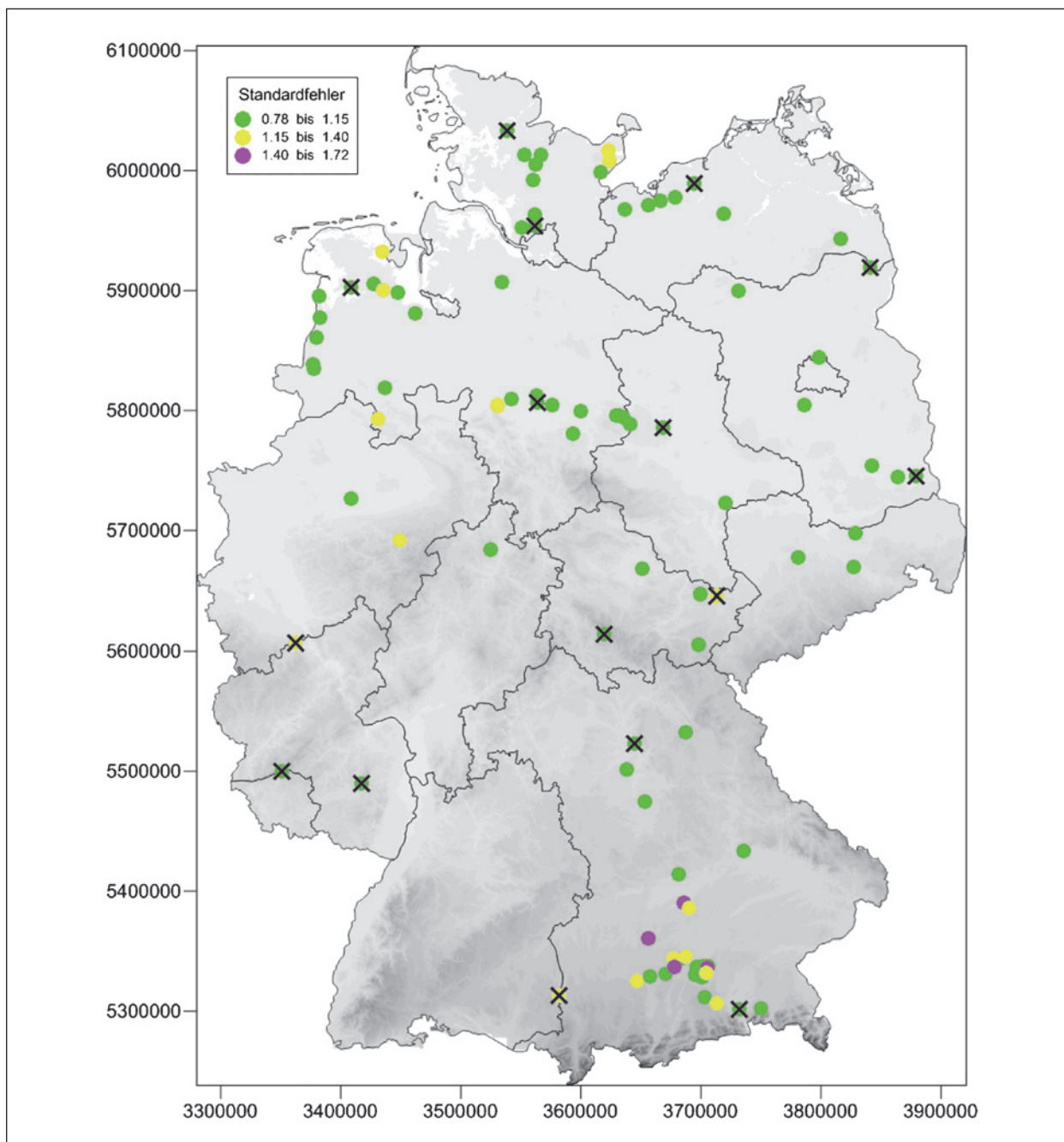


Bild 30: Standardfehler der linearen Regression von berechneten und gemessenen Tagesamplituden der Fahrbohnoberflächentemperatur, Unterdruck: Relief

nur schwer abschätzen. Da außerdem die Amplituden der Lufttemperatur und der TFO anhand der täglichen Extremwerte bestimmt wurden, bei der Berechnung der KiST-Raten aber Amplituden aus Stundenwerten benutzt werden, ist eine Unterschätzung der Amplitude bei der Berechnung der KiST-Raten eher unwahrscheinlich.

4.3.3 Rasterdaten

Da die Ergebnisse der Regressionsrechnung so gut sind, dass man mit den Regressionsgleichungen mit Sicherheit ein zutreffendes Bild der Verteilung der Fahrbohnoberflächentemperatur und ihrer Tagesamplitude innerhalb Deutschlands berechnen kann, sollen nachfolgend einige Karten gezeigt werden.

Es sind immer Werte aus der Verteilung der täglichen Mittelwerte und Amplituden berechnet wor-

den, und zwar für die beiden Zeiträume 1991 bis 2005 und 2001 bis 2015. Dabei wurden nur die Monate April bis September betrachtet, da die Auswertungen der GMA-Daten für die Klimabetrachtung gezeigt haben, dass die Temperaturen des Winterhalbjahres kaum zur Schadenssumme beitragen.

Da es außerdem die hohen Temperaturen und die großen Amplituden sind, die die Schadenssumme maßgeblich bestimmen, sind nicht die Mittelwerte dargestellt, sondern das 75%-Perzentil der Verteilung, 75 % aller Tageswerte sind also niedriger als der dargestellte Wert.

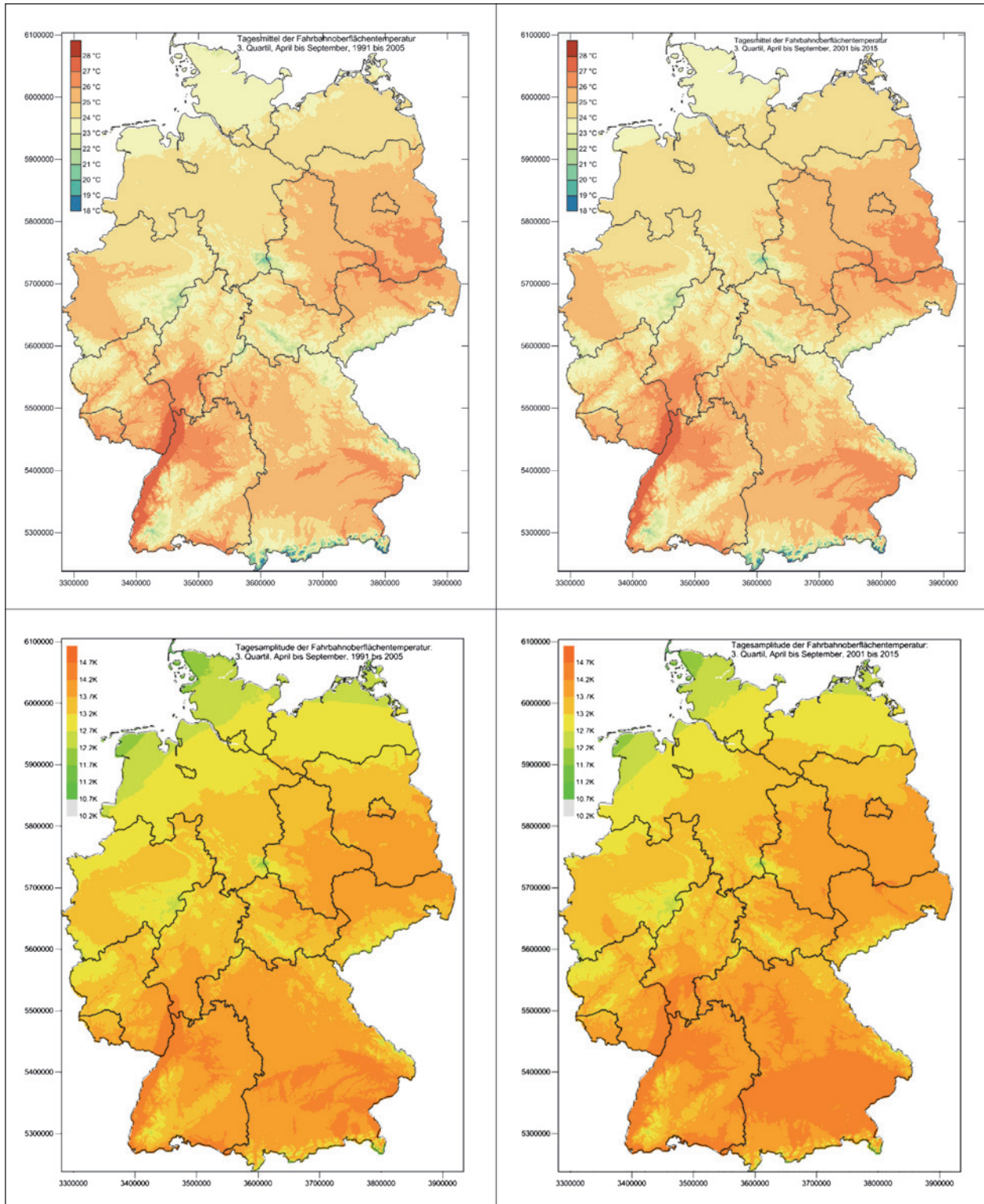


Bild 31: 75%-Perzentil der Verteilung der Tagesmitteltemperatur (oben) und der Tagesamplitude (unten) der Fahrbahnoberflächentemperatur, berechnet für die Monate April bis September und die Jahre 1991 bis 2005 (links) und 2001 bis 2015 (rechts)

Sowohl die Darstellung für die Amplitude als auch die für das Tagesmittel zeigen, dass es im Zeitraum 2001 bis 2015 wärmer war als in den Jahren 1991 bis 2005. Es ist erstaunlich, wie sehr sich die Verschiebung um 10 Jahre bemerkbar macht! Vergleicht man diese Karten mit der bestehenden für die KiST-Zonen, dann erkennt man, dass eher die Verteilung der Amplituden die KiST-Zonen abbildet als die des Tagesmittels. Das ist insofern merkwürdig, als die Varianz der Schadenssummen, die für die 49 GMA in den 3 GMA-Zonen berechnet wurden, zu 64 % durch die Varianz der Fahrbahnmitteltemperatur erklärt wird, während die Varianz der mittleren Tagesamplitude keinen signifikanten Anteil an der Erklärung der Varianz hat.

4.4 Mittlerer Tagesgang der Fahrbahnoberflächentemperatur

Zur Berechnung der KiST-Rate für einen Standort reichen Tagesmitteltemperatur und Tagesamplitude nicht aus, man benötigt vielmehr stündliche Werte der Fahrbahnoberflächentemperatur. Hier wird die vereinfachende Annahme getroffen, dass man mit hinreichender Genauigkeit täglich einen mittleren Tagesgang benutzen kann. Diese Annahme ist insofern gerechtfertigt, als auch die Einteilung der vertikalen Temperaturverläufe in Stundenklassen (die sog. nCTxx-Klassen) für einen mittleren Tagesgang gilt, und zwar für einen Tagesgang, wie er von den GMA gemessen wird, denn deren Messwerte wurden zur Klassifizierung der vertikalen Temperaturverläufe benutzt (WELLNER und KAYSER, 2007, S. 28 ff.).

Der benötigte Tagesgang ist ein sog. reduzierter, normierter Tagesgang: Es wird – in Abhängigkeit von der Amplitude – anhand der Fahrbahnoberflächentemperaturen von 10 GMA-Standorten ein mittlerer Tagesgang berechnet. Von jedem Stundenwert dieses Tagesgangs wird die mittlere Fahrbahnoberflächentemperatur dieses Tagesgangs subtrahiert und das Ergebnis durch die Amplitude dieses Tagesgangs geteilt. So erhält man einen Tagesgang mit dem Mittelwert null und der Amplitude eins. Man kann dann für jeden Tag, von dem man die mittlere Fahrbahnoberflächentemperatur und ihre Amplitude mittels der Regressionsgleichungen aus Kapitel 4.3.1 und Kapitel 4.3.2 berechnet hat, stündliche Werte der Fahrbahnoberflächentemperatur nach folgender Gleichung ermitteln:

$$TFO(h, t) = TG_{TFO}(A, h) * AMP_{TFO}(t) + MIT_{TFO}(t) \quad (2)$$

TFO (h,t)	Fahrbahnoberflächentemperatur am Tag t zur Stunde h
h	Stunde
t	Tag
TG _{TFO} (A,h)	Wert des reduzierten, normierten Tagesgangs für die Amplitude A zur Stunde h
AMP _{TFO} (t)	Amplitude der Fahrbahnoberflächentemperatur am Tag t
MIT _{TFO} (t)	Mittlere Fahrbahnoberflächentemperatur am Tag t

Die reduzierten, normierten Tagesgänge wurden mit Daten der in Tabelle 6 aufgeführten GMA und Stationsjahre errechnet.

Die Auswahl dieser GMA erfolgte unter zwei Gesichtspunkten:

1. Sie decken den Bereich der Bundesrepublik einigermaßen gut ab.
2. Jede der GMA hat jeweils für ein warmes und ein kaltes Jahr nahezu vollständige Daten. Es wurde auch versucht, GMA zu finden, die Daten aus denselben Jahren haben.

Die Tagesamplituden wurden gemäß der Vorschrift zur Ermittlung der Temperaturzustände in

- kleine: Tagesamplitude < 6.5 K,
- mittlere: 6.5 K ≤ Tagesamplitude < 11.5 K,
- große: Tagesamplitude ≥ 11.5 K

eingeteilt.

ID	Stationsname	Jahre
6488	Eching Tunnel GMA	2006 2010
6525	Inntal Dreieck GMA	2008
6572	Schmölln PD GMA	2010 2012
6595	Hänchen GMA	2010 2011
6617	Hoofer Berg GMA	2011 2012
6675	Filsum GMA	2007 2012
6693	Lathen GMA	2007 2012
6738	Braunschweig-Hafen GMA	2007 2012
7097	Kaditz GMA	2012 2015
7213	Quellental GMA	2006 2010 2015
7280	Soemmerda GMA	2011 2012 2015

Tab. 6: GMA und Stationsjahre zur Berechnung der reduzierten, normierten Tagesgänge

4.4.1 Tagesgang für kleine Amplituden

Tagesamplituden der Fahrbahnoberflächentemperatur, die kleiner als 6.5 K sind, machen die Mehrzahl der Tage aus, für die in Tabelle 6 aufgeführten

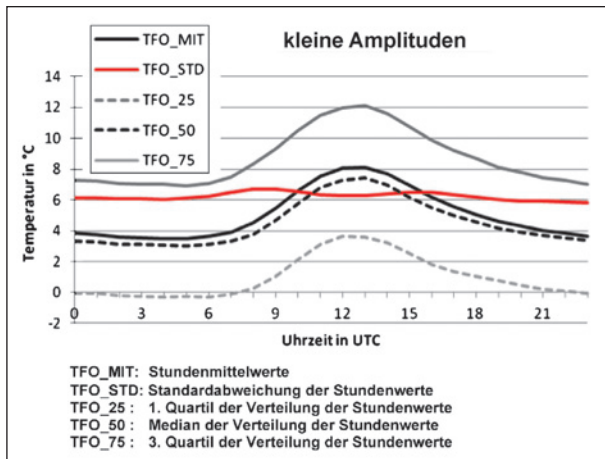


Bild 32: Verschiedene Tagesgänge der Fahrbahnoberflächentemperatur, berechnet mit den in Tabelle 6 angegebenen Standorten und Jahren und für Tage mit Amplitude < 6.5 K

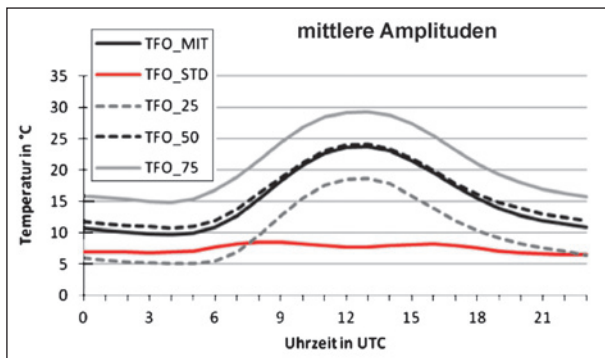


Bild 33: Verschiedene Tagesgänge der Fahrbahnoberflächentemperatur, berechnet mit den in Tabelle 6 angegebenen Standorten und Jahren und für Tage mit $6.5 \text{ K} \leq \text{Amplitude} < 11.5 \text{ K}$

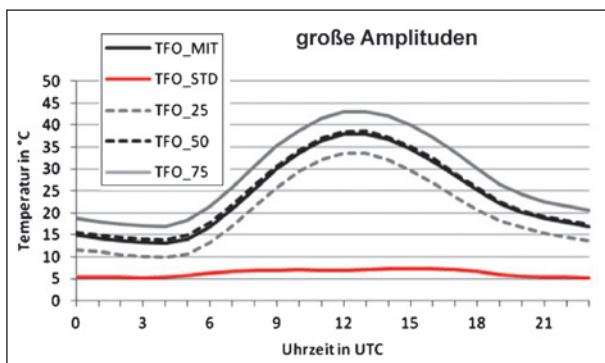


Bild 34: Verschiedene Tagesgänge der Fahrbahnoberflächentemperatur, berechnet mit den in Tabelle 6 angegebenen Standorten und Jahren und für Tage mit Amplitude $\geq 11.5 \text{ K}$

Stationsjahre sind es 45 %. Bild 32 zeigt den mittleren Tagesgang für alle Stationen zusammen mit der Standardabweichung sowie dem 1., 2. (Median) und 3. Quartil der Verteilung.

Kleine Amplituden sind typisch für bedeckte, windige Tage. Die Fahrbahnoberflächentemperatur ist demzufolge auch nicht allzu hoch, sie liegt im Mittel zwischen 4 und 8 °C. Die Standardabweichung ist den ganzen Tag über ziemlich konstant bei 6 K und die Quartile der Verteilung haben denselben Tagesgang wie der Mittelwert. Man kann also davon ausgehen, dass die einzelnen Stundenwerte normalverteilt sind, allerdings mit einer erheblichen Varianz.

4.4.2 Tagesgang für mittlere Amplituden

Mittlere Amplituden kommen in etwa an einem Drittel aller Tage vor. Der Tagesgang hat hier im Prinzip denselben Verlauf wie der für die kleinen Amplituden, seine Varianz ist allerdings geringer, weil die Standardabweichung der Stundenwerte nicht größer ist als die für die kleinen Amplituden. Auch an Tagen mit mittleren Amplituden sind die einzelnen Stundenwerte normalverteilt (siehe Bild 33).

4.4.3 Tagesgang für große Amplituden

Die Skalierung der Ordinate ist in Bild 32 bis Bild 34 nicht gleich und deshalb fällt es nicht auf, dass nicht nur die Standardabweichungen für die drei Amplituden gleich groß sind, sondern auch die Abstände zwischen dem Mittelwert und dem 1. und 3. Quartil. Damit haben die Tage mit großen Amplituden, d. h. mit großer Ein- und Ausstrahlung, die kleinste Varianz bei den Verteilungen der einzelnen Stundenwerte (siehe Bild 34). Für diese Fälle macht man daher mit der Verwendung eines reduzierten, normierten Tagesgangs den kleinsten Fehler gegenüber den tatsächlichen Tagesgängen.

4.4.4 Reduzierte, normierte Tagesgänge

Die reduzierten, normierten Tagesgänge sind in Bild 35 zu sehen. Sie sind für die drei Amplitudenklassen sehr ähnlich. Dennoch erkennt man typische, strahlungsbedingte Unterschiede: An Tagen mit großer Amplitude, d. h. auch großer Ein- und Ausstrahlung, beginnt die Erwärmung der Fahrbahnoberfläche früher als an den anderen Tagen. In

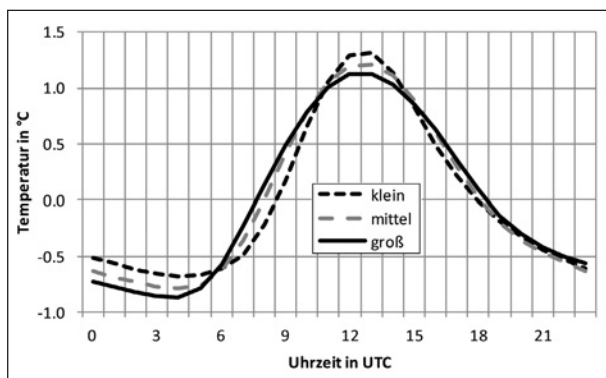


Bild 35: Reduzierte, normierte Tagesgänge für 3 Amplitudenklassen

der 2. Tageshälfte – insbesondere nach Sonnenuntergang – gleichen sich die drei Tagesgänge fast vollständig an, um dann in der 2. Nachthälfte, wenn die Ausstrahlungsbedingungen den Temperaturverlauf bestimmen, wieder auseinanderzudriften: Jetzt kühlt die Fahrbahnoberfläche an Tagen mit großen Amplituden stärker ab.

4.4.5 Vergleich mit Messwerten

Nachfolgend sind einige Tagesgänge der Fahrbahnoberflächentemperatur dargestellt, die zum einen an der GMA Rosenhof bei Regensburg gemessen und zum anderen mit den meteorologischen Daten der DWD-Station Regensburg berechnet wurden, und zwar sowohl mit dem empirisch-physikalischen Modell, auf dessen Ergebnissen die bestehenden KiST-Zonen beruhen, als auch mit der KiST-Methode.

Für kleine Amplituden sind zwei Tagesgänge dargestellt: Am 1. Februar hat Strahlungswetter geherrscht und der idealisierte Verlauf, der bei der KiST-Methode benutzt wird, entspricht dem gemessenen Verlauf recht gut. Der Verlauf, der mit dem Modell berechnet wird, ist in den Morgenstunden gegenüber dem gemessenen Verlauf um einige Stunden verzögert, die Abkühlung erfolgt schneller als bei der Messung (Bild 36).

Am 6. Mai wird der Verlauf der Fahrbahnoberflächentemperatur nicht von der Strahlung bestimmt. Der Tagesgang, der mit der KiST-Methode berechnet wird, weicht an solchen Tagen deutlich von dem tatsächlichen Verlauf ab. Das Modell hingegen ist in der Lage, den Verlauf einigermaßen zutreffend abzubilden. Bei der Festlegung der Schadenspotenziale der ncTxx-Klassen wird allerdings der mittlere

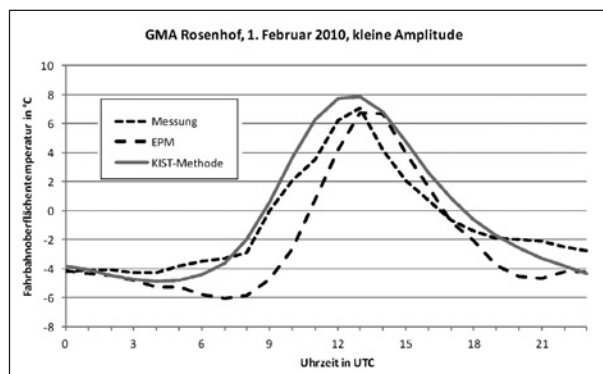


Bild 36: Vergleich gemessener und berechneter Stundenwerte der Fahrbahnoberflächentemperatur für Strahlungswetter und eine Tagesamplitude < 6.5 K

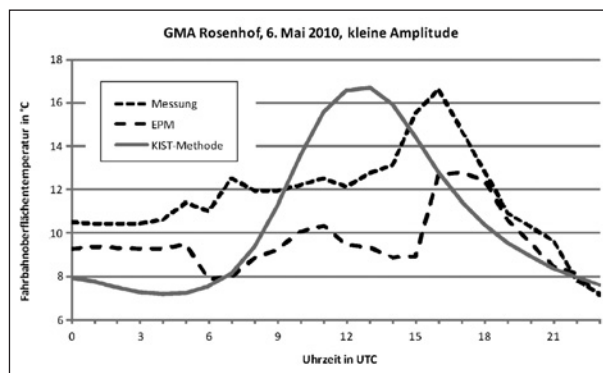


Bild 37: Vergleich gemessener und berechneter Stundenwerte der Fahrbahnoberflächentemperatur für windiges, bedecktes Wetter und eine Tagesamplitude < 6.5 K

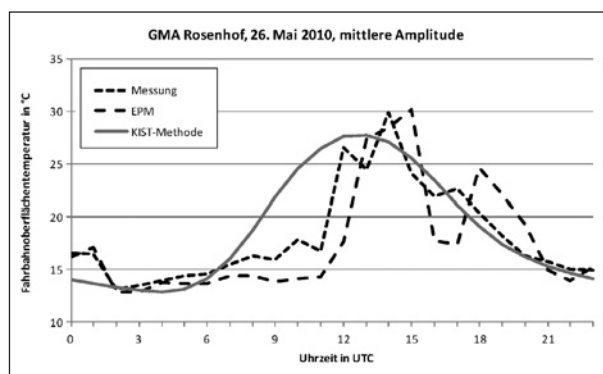


Bild 38: Vergleich gemessener und berechneter Stundenwerte der Fahrbahnoberflächentemperatur für eine Tagesamplitude zwischen 6.5 K und 11.4 K

Verlauf, den auch die KiST-Methode benutzt, unterstellt (Bild 37).

Auch für die Darstellung des Tagesgangs bei mittlerer Amplitude wurde ein Tag gewählt, an dem nicht das typische Strahlungswetter geherrscht hat (Bild 38). Hier zeigt sich wieder die Überlegenheit des Modells gegenüber der KiST-Methode, wenn die Unterschiede auch nicht allzu groß sind.

Am 19. April schließlich wird der Tagesgang der Fahrbahnoberflächentemperatur den ganzen Tag von der Ein- und Ausstrahlung gesteuert und dieses Verhalten wird mit beiden Berechnungsmethoden gleich gut abgebildet (Bild 39).

Insgesamt zeigen diese Beispiele, dass die KiST-Methode den täglichen Verlauf der Fahrbahnoberflächentemperatur so abbildet, wie er an der GMA gemessen wird, wenn dieser von der Ein- und Ausstrahlung gesteuert wird. Das EPM hingegen berechnet in diesen Situationen die Aufheizung der Fahrbahnoberfläche gegenüber den Messwerten verzögert. Seine Ergebnisse sind aber an Tagen, an denen kein typisches Strahlungswetter herrscht, deutlich realistischer als die der KiST-Methode.

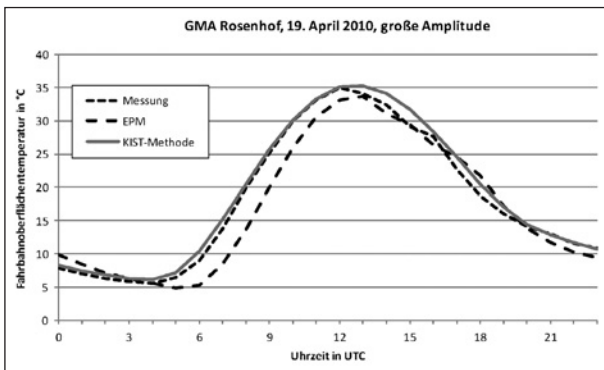


Bild 39: Vergleich gemessener und berechneter Stundenwerte der Fahrbahnoberflächentemperatur für eine Amplitude > 11.5 K

5 Berechnung stündlicher Werte der Fahrbahnoberflächentemperatur

Nachdem die Regressionsgleichungen zur Berechnung von Tagesmittel und Tagesamplitude sowie die reduzierten, normierten Tagesgänge der Fahrbahnoberflächentemperatur anhand der Messungen von GMA ermittelt wurden, können jetzt stündliche Werte der Fahrbahnoberflächentemperatur berechnet werden. Das soll im Folgenden für 10 der GMA, in deren Nachbarschaft sich Stationen des DWD befinden, geschehen.

Die Werte in Tabelle 7 geben einen Überblick über die Ergebnisse des Vergleichs von gemessenen und berechneten TFO.

5.1 Vergleich der Fahrbahnoberflächentemperatur

Die berechneten und die gemessenen Stundenwerte korrelieren sehr gut. Auch die Häufigkeitsverteilungen der Temperaturzustände sind sehr ähnlich. Das ist für zwei der Stationspaare auch in den Bildern 40 bis 45 zu sehen.

GMA	DWD	ZdF	ΔTFO_{MIT}	r^2
Rosenhof	Regensburg	8.731	1.00 K	0.955
Memmingen-West	Kempten	25.235	0.20 K	0.984
Hänchen	Cottbus	43.071	0.69 K	0.944
Sergener Teiche	Cottbus	34.031	-0.25 K	0.940
Morsleben	Magdeburg	50.688	-1.35 K	0.930
Braunschweig-H.	Braunschweig	25.923	0.28 K	0.952
Bunde	Emden	17.321	0.08 K	0.909
Holm Moor	HH-Fuhlsbüttel	33.458	-0.78 K	0.963
Moelenberg	Boltenhagen	25.519	-1.11 K	0.945
Brekendorfer Moor	Schleswig	32.360	-0.57 K	0.950

GMA Glättemeldeanlage
DWD Messstation des Deutschen Wetterdienstes
ZdF Zahl der verglichenen Stunden
 ΔTFO_{MIT} Differenz des Mittelwertes der TFO: GMA – DWD
 r^2 Bestimmtheitsmaß der linearen Korrelation gemessener und berechneter Stundenwerte

Tab. 7: Vergleich der Mittelwerte aus gemessenen und berechneten Stundenwerten der Fahrbahnoberflächentemperatur

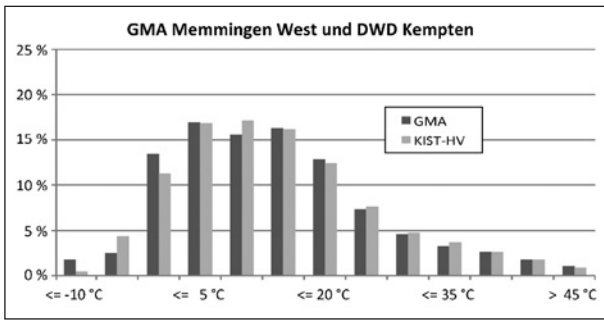


Bild 42: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der 13 Klassen der Fahrbahnoberflächentemperatur, Stationspaar Memmingen-West und Kempten

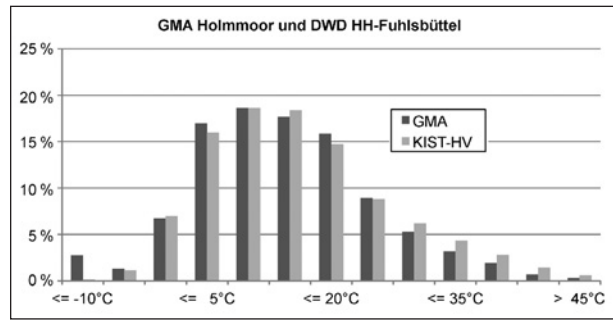


Bild 45: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der 13 Klassen der Fahrbahnoberflächentemperatur, Stationspaar Holm Moor und Hamburg-Fuhlsbüttel

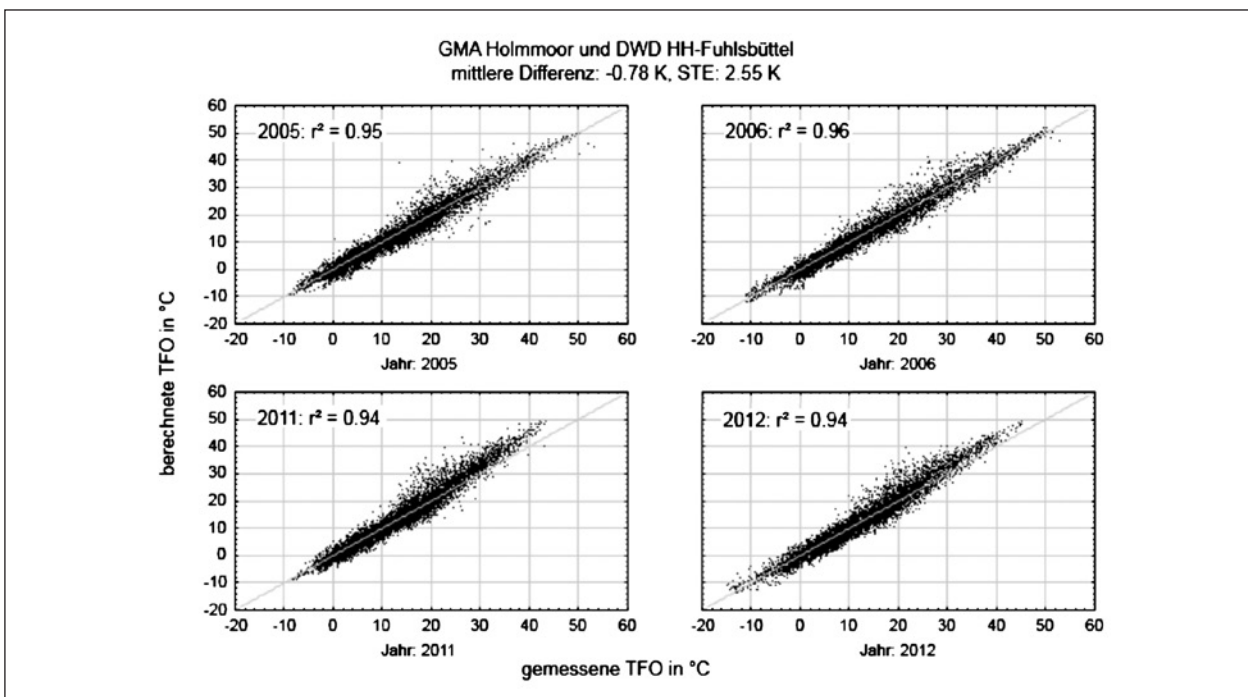


Bild 43: Jährlicher Vergleich der gemessenen und berechneten Stundenwerte der Fahrbahnoberflächentemperatur (TFO) für das Stationspaar Holm Moor und Hamburg-Fuhlsbüttel

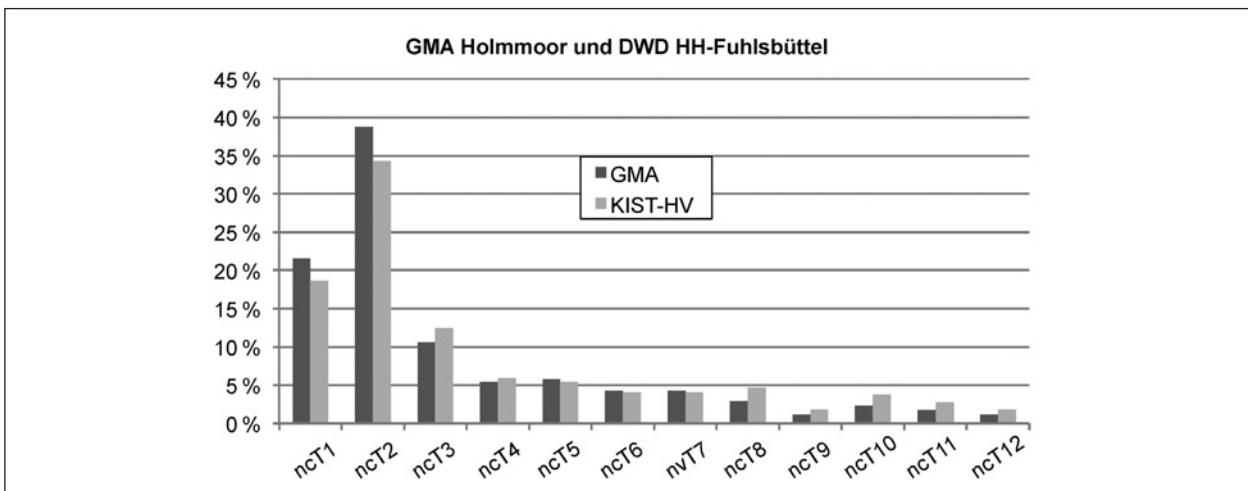


Bild 44: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der 12 Klassen von Vertikalprofilen der Temperatur der Asphalttragschicht, Stationspaar Holm Moor und Hamburg-Fuhlsbüttel

5.2 Vergleich von KiST-Raten und Schadenssummen nach GMA

Es gibt nur wenige GMA, die eine DWD-Station in unmittelbarer Nachbarschaft haben. Ein Vergleich der Schadenssummen, die sich aus den Messwerten dieser Standorte und den meteorologischen Beobachtungen der benachbarten DWD-Station ergeben, hätte daher nur sehr begrenzte Aussagekraft. Wenn man einen solchen Vergleich für mehr Standorte durchführen will, dann muss man allerdings für die Berechnung von Tagesamplitude und Tagesmittel der Fahrhahnoberflächentemperatur wieder auf die Lufttemperaturen, die an den GMA gemessen werden, zurückgreifen. Es lag daher nahe, für die 49 GMA, deren Daten für die Klimabeschreibung genutzt wurden, KiST-Raten mit der TFO aus der KiST-Methode zu berechnen und diese mit den Schadenssummen der GMA zu vergleichen, die sich anhand den Messwerte der Fahrhahnoberflächentemperatur ergeben. In Bild 46 sind die Ergebnisse korreliert worden.

Bild 46 zeigt, dass es zum einen keinen systematischen Fehler bei der Berechnung der KiST-Rate gibt und dass zum anderen die Mehrzahl aller Differenzen der beiden Werte im Bereich von ± 25 Prozentpunkten liegt – und dieser Bereich muss angesichts der großen Unterschiede bei den Schadenspotenzialen für die einzelnen Temperaturzustände

mit Sicherheit toleriert werden. Trotzdem ist die Korrelation der beiden Werte alles andere als gut.

Betrachtet man die großen Differenzen im räumlichen Zusammenhang, zeigt sich keine Systematik (Bild 47): Die Standorte, an denen die KiST-Raten im Vergleich zu den Schadenssummen nach GMA stark überschätzt werden, liegen zwar alle im Alpenvorland bzw. etwas nördlich davon, sie haben aber auch alle benachbarte GMA, für die die Ergebnisse akzeptabel sind. Die Standorte mit der großen Unterschätzung sind alle in der Nordhälfte Deutschlands, aber auch hier gibt es fast immer benachbarte GMA mit besserer Übereinstimmung. Eine Ausnahme bilden allerdings die drei GMA bei Cottbus: Hier beträgt die KiST-Rate immer weniger als 50 % der Schadenssumme nach GMA und es gibt keine benachbarte GMA, bei der das nicht der Fall ist. Eine Ursache für dieses Ergebnis ließ sich nicht finden – es sei denn, die KiST-Methode unterschätzt die Fahrhahnoberflächentemperatur und damit die KiST-Rate dort, wo die Verkehrsdichte gering ist und daher – insbesondere nachts – die Fahrhahnoberflächentemperatur im Vergleich zur Lufttemperatur wärmer ist als an Standorten mit mehr Verkehr, der die fahrbahnahe Luft verdrängt und damit für Abkühlung sorgt.

Insgesamt ist festzuhalten, dass das Ergebnis der KiST-Methode keine erkennbaren systematischen

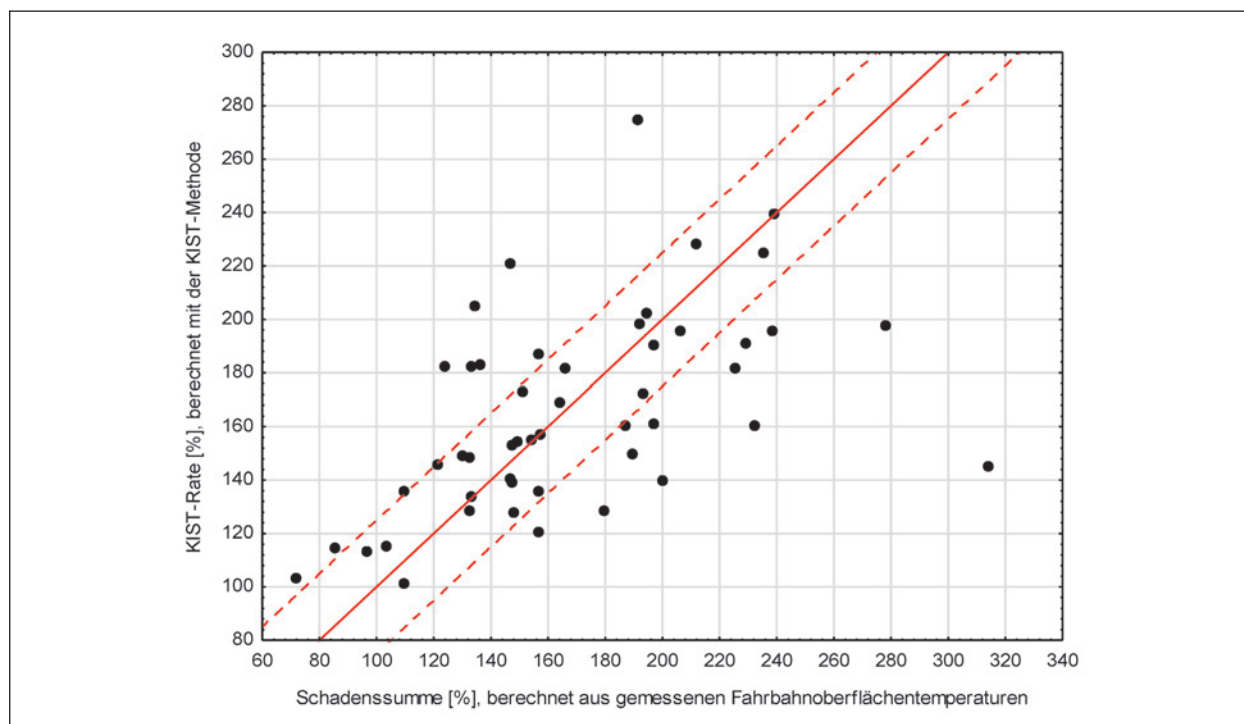


Bild 46: Vergleich von KiST-Rate und Schadenssumme für 49 GMA

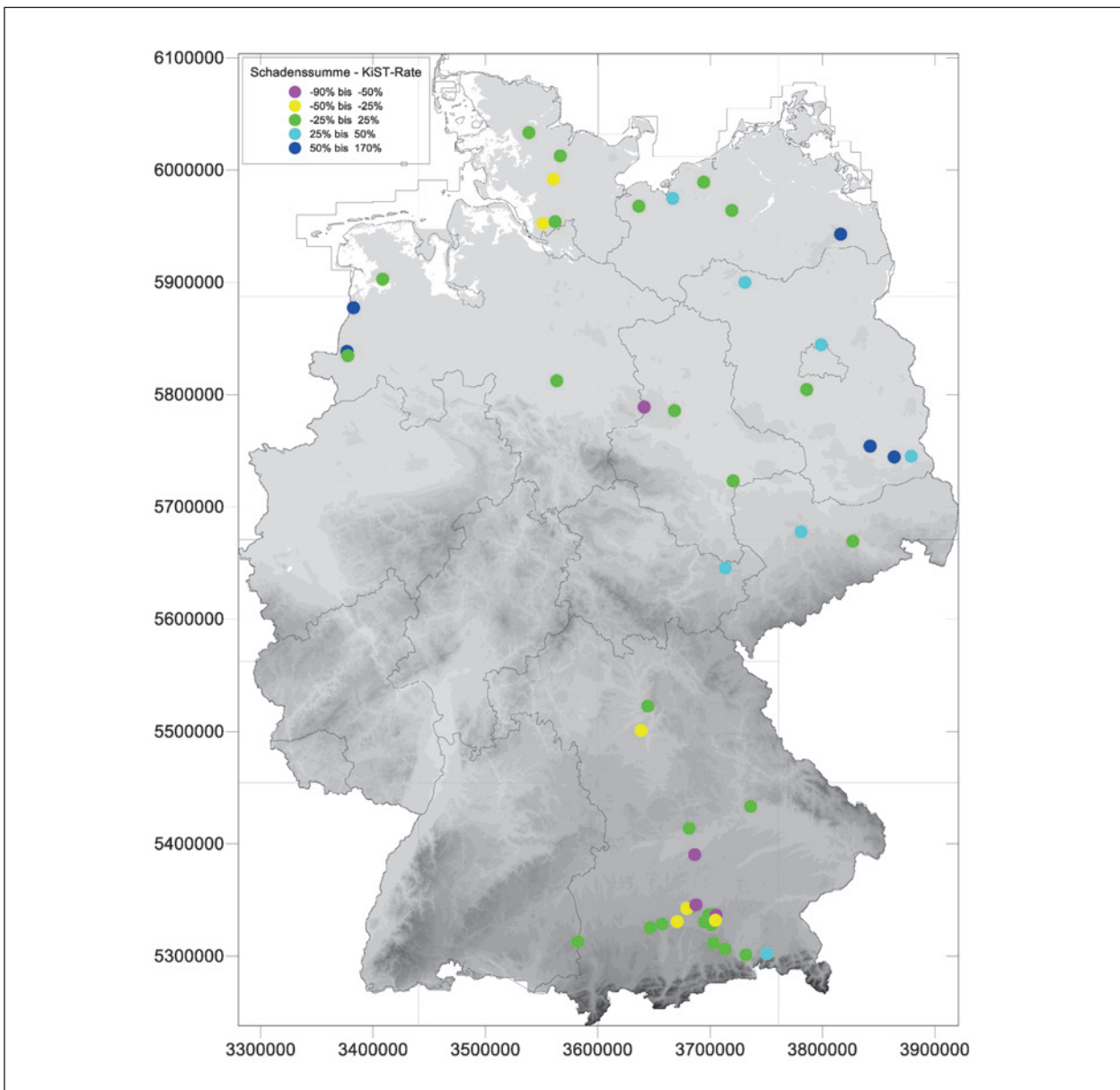


Bild 47: Klassierte Differenzen der Schadenssummen, berechnet für 49 GMA mit der KiST-Methode und aus den gemessenen Fahrbahnoberflächentemperaturen, Unterdruck: Relief

Fehler aufweist. Mit den Differenzen zu Schadenssummen, die aus gemessenen Fahrbahnoberflächentemperaturen errechnet werden, wird man leben müssen, wenn man eine engmaschige Berechnung dieser Werte auf der Grundlage des Stationsnetzes des DWD wünscht.

6 KiST-Rate

Die KiST-Rate ist eine Schadenssumme, die anhand von Fahrbahnoberflächentemperaturen, die mit der KiST-Methode bestimmt wurden, berechnet wird.

Mit der oben beschriebenen KiST-Methode und folgenden meteorologischen Beobachtungswerten:

- Tagesmittel der Lufttemperatur,
- Tagesmaximum der Lufttemperatur,
- Tagesminimum der Lufttemperatur,
- Tagesamplitude des Spreads und
- Tagessumme der Globalstrahlung,

lassen sich jetzt KiST-Raten für die Standorte von Stationen des DWD berechnen.

Für diese Berechnung wird das Datenarchiv benutzt, das im Deutschen Wetterdienst von der

Agrarmeteorologie gepflegt wird. Diese Daten werden routinemäßig als Input für agrarmeteorologische Modelle zur Berechnung des Bestands- und Bodenklimas eingesetzt. Sie sind daher sowohl geprüft als auch vollständig. Es gibt in diesem Archiv für die Zeit vom 1.1.2001 bis zum 31.12.2015 vollständige Daten von 380 Standorten. An allen Standorten werden die Lufttemperatur und die Luftfeuchte gemessen. Die Globalstrahlung hingegen wird an den meisten Stationen aus den Messungen der Sonnenscheindauer abgeleitet. In Bild 51 sind die Standorte der 380 Stationen zu sehen. Für jeden Standort kann der Anteil der gemessenen Globalstrahlungswerte abgelesen werden. 320 dieser 380 Standorte haben zudem vollständige Daten für die Jahre 1991 bis 2005 – das ist der Zeitraum, für den die Schadenssummen nach EPM im FE 04.198/2004/ARB berechnet wurden.

6.1 Genauigkeit

Wenn man Rasterdaten darstellen will, dann hängt es von der Klassenbreite ab, wie detailliert diese Darstellung ausfällt. Man muss die Klassenbreite so wählen, dass sich die Unterschiede in der räumlichen Verteilung, die diese Darstellung zeigt, auch statistisch absichern lassen. Außerdem ist es wichtig, zu wissen, wie stark der dargestellte Wert von dem Zeitraum, für den er berechnet wurde, abhängt.

6.1.1 Varianz der Schadenspotenziale

Die KiST-Raten und die Schadenssummen werden auf der Grundlage der in Bild 2 dargestellten Schadenspotenziale berechnet. Die Potenziale werden jeweils für den charakteristischen Temperaturverlauf einer ncTxx-Klasse berechnet. Diese Klasse ist durch die Tagesamplitude der Fahrbahnoberflächentemperatur und einen Zeitbereich, der zwischen 2 und 10 Stunden umfasst, definiert. Innerhalb des Definitionsbereichs einer ncTxx-Klasse tritt aber nicht nur der charakteristische vertikale Temperaturverlauf auf, sondern eine ganze Schar bzw. Verteilung ähnlicher, aber unterschiedlicher Temperaturverläufe mit unterschiedlichen Schadenspotenzialen. Aus dieser Verteilung, die allerdings nicht bekannt ist, könnte die Varianz der Schadenspotenziale berechnet werden. Da die Schadenspotenziale im Tagesverlauf zum Teil sehr große Sprünge aufweisen (siehe Tabelle 1), ist anzunehmen, dass ihre Varianz für die einzelnen ncTxx-Klassen unter-

schiedlich und zum Teil erheblich ist. Zur Abschätzung der Genauigkeit berechneter Schadenssummen sollte also die Varianz der Schadenspotenziale ermittelt und ihre Auswirkung auf die Berechnung der Schadenssumme untersucht werden. Hier kann diese Ungenauigkeit nicht berücksichtigt werden.

6.1.2 Varianz der Jahressummen

Die Varianz der Verteilung der jährlichen Schadenssummen ist umso größer, je größer die mittlere jährliche Summe. Wenn man die Wurzel aus der Varianz – die Standardabweichung – mit dem Mittelwert normiert, erhält man den Variationskoeffizient. Dieser beträgt für die jährlichen KiST-Raten der DWD-Stationen etwa 22 %. Unter der Voraussetzung, dass die Jahressummen normalverteilt sind, sind dann die mittleren Summen mit der u. a. Irrtumswahrscheinlichkeit unterschiedlich, wenn man die in Tabelle 8 angegebenen Klassenbreiten einhält. Diese sollten also mit zunehmender KiST-Rate breiter werden.

Bild 48 zeigt für ausgewählte Stationen die mittleren KiST-Raten der Jahre 2001 bis 2015 mit ihrem Standardfehler und dem Konfidenzbereich für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %. Man kann sehen, dass sich die mittleren KiST-Raten von Cottbus und Düsseldorf, von Leinefelde und Memmingen oder von Regensburg und Würzburg bei dieser Irrtumswahrscheinlichkeit nicht signifikant unterscheiden. Wenn man diesen Vergleich mit dem Jahresmittel der Fahrbahnoberflächentemperatur anstellt (Bild 49), dann sieht man, dass sich

KiST-Rate	Irrtumswahrscheinlichkeit			
	20 %	10 %	5 %	1 %
25	4	5	6	7
50	7	9	11	15
75	11	14	17	22
100	15	19	22	29
125	18	23	28	37
150	22	28	33	44
175	25	33	39	51
200	29	37	45	59
225	33	42	50	66
250	36	47	56	73

Tab. 8: Klassenbreite für die Darstellung von Rasterwerten der KiST-Rate für die Jahre 2001 bis 2015, alle Angaben in %

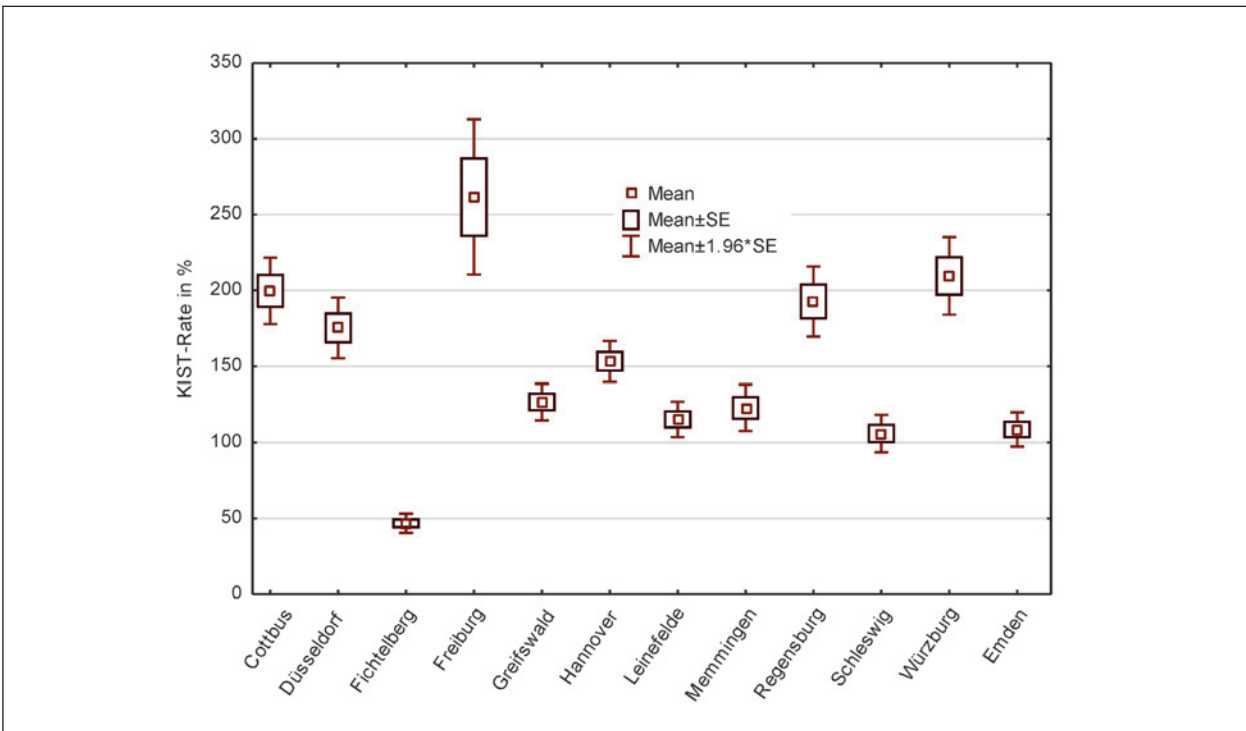


Bild 48: Mittelwert (Mean), Standardfehler (SE) und Konfidenzbereich (Mean ± 1.96 * SE) der KiST-Raten für ausgewählte Standorte und den Zeitraum 2001 bis 2015

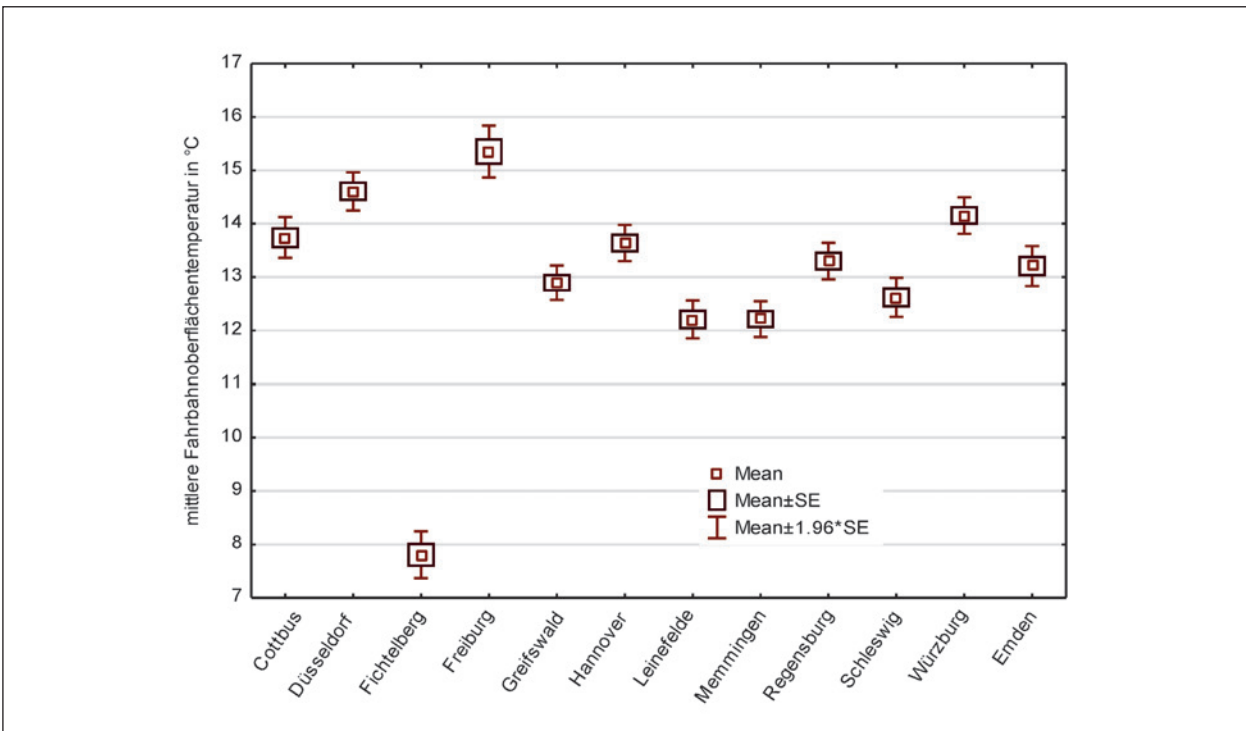


Bild 49: Wie Bild 48, aber für das Jahresmittel der Fahrbahnoberflächentemperatur

die Fahrbahnoberflächentemperaturen im Jahresmittel für Stationen in Bayern und an der Küste nicht signifikant unterscheiden, die KiST-Raten aber schon. Hier zeigt sich, dass das stärker konti-

ental geprägte Klima in Bayern mit ausgeprägterem Tagesgang der Temperatur größere KiST-Raten zur Folge hat als das eher ausgeglichene Klima an der Küste.

6.1.3 Varianz der mittleren KiST-Rate

Die Planungsgröße, die für die RSO benötigt wird, ist nicht die Schadenssumme eines Einzeljahres sondern der Mittelwert über einen längeren Zeitraum. Die Unsicherheit, die diesem Schätzwert anhaftet, kann also nicht anhand der Verteilung der Jahressummen berechnet werden. Wenn man wissen möchte, wie groß der zufällige Fehler dieses langjährigen Mittelwertes ist, dann muss man ein Resampling-Verfahren benutzen, das anhand zufälliger Auswahl aus den Jahreswerten 15-jährige Mittelwerte erzeugt: Mit der delete-1-Jackknife-Methode, bei der 15 14-jährige Mittelwerte berechnet werden und der Bootstrap-Methode, bei der zufällige Stichproben von 15 Werten mit Zurücklegen erzeugt werden, sind zu diesem Zweck Mittelwerte berechnet und für diese dann ein Konfidenzbereich bestimmt worden. Bei beiden Methoden verringert sich der Variationskoeffizient gegenüber der Verteilung der KiST-Rate für die Einzeljahre um den Faktor 10 und es ergibt sich dementsprechend ein Konfidenzbereich, der ca. 1/10 der Werte beträgt, die in Tabelle 8 aufgeführt sind. Diese Konfidenzbereiche sind dann allerdings viel kleiner als die Unsicherheit, die dem gesamten Verfahren zur Bestimmung der Schadenssumme anhaftet und auch kleiner als die Differenz der Mittelwerte der Zeiträume 1991 bis 2005 und 2001 bis 2015. Sie fallen somit bei dieser Betrachtung überhaupt nicht ins Gewicht. Zur Veranschaulichung dieses Sachverhalts sind im Bild 50 die jährlichen Schadenssummen sowie die Werte, die mit der delete-1-Jackknife-Methode berechnet werden, zu sehen.

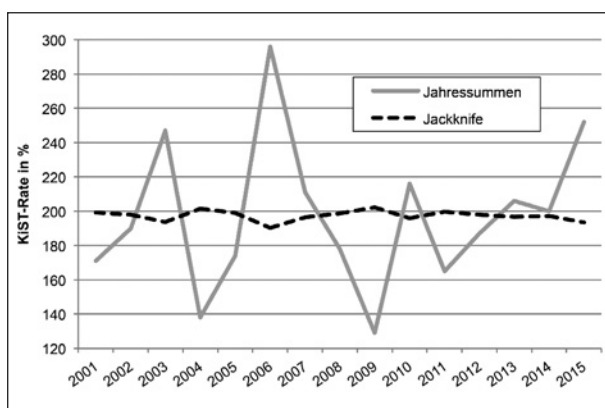


Bild 50: Zeitreihe der jährlichen Schadenssummen im Vergleich zu simulierten 15-jährigen Mittelwerten

6.2 Rasterdaten

Die Umrechnung der KiST-Raten für die Standorte in Rasterdaten mit einer Gitterweite von 1 km erfolgt mit dem im DWD, Abteilung Agrarmeteorologie, üblichen Verfahren: Es wird – getrennt für 6 x 5 kreisförmige Regionen – der Zusammenhang zwischen dem Stationswert (der KiST-Rate), der geografischen Lage und der Höhe über NN ermittelt und dann für jeden Gitterpunkt ein Wert errechnet, der sich aus den Regressionsgleichungen für den Kreis, in dem sich der Gitterpunkt befindet, sowie den Gleichungen für die angrenzenden Kreise ergibt. Dabei werden die Ergebnisse mit den Abständen der Kreismittelpunkte zu dem Gitterpunkt gewichtet.

Infolge der starken Abhängigkeit der Schadenssumme von der Fahrbahnoberflächentemperatur und damit von der Lufttemperatur nimmt die KiST-Rate mit der Höhe über NN schnell ab. Für die Abhängigkeit von der Höhe wird bei der Berechnung der Rasterwerte daher ein Polynom 2. Grades benutzt.

Die Ergebnisse der Berechnung sind in Bild 52 zu sehen: Die KiST-Raten, die für die Belastungsstufe Z1-BK100 berechnet wurden, schwanken innerhalb Deutschlands zwischen 40 % und 240 %, das über alle Rasterwerte berechnete Mittel liegt bei 148 %. In ebenem Gelände kommen Raten unter 100 % nicht vor. Generell ist eine Zunahme von Nord nach Süd zu erkennen, besonders hohe Raten werden für die Tallagen in der Südhälfte Deutschlands – vor allem für das Rheintal – und den Osten Brandenburgs und Sachsens berechnet.

Die für 2001 bis 2015 berechneten KiST-Raten passen gut zu den Schadenssummen, die anhand der Messwerte der GMA berechnet wurden (siehe Bild 17). Man kann daher davon ausgehen, dass die KiST-Methode realistische Ergebnisse liefert.

Im Zeitraum 2001 bis 2015 ist gegenüber dem Zeitraum 1991 bis 2005 eine deutliche Zunahme der KiST-Rate zu erkennen. In Bild 53 sind die KiST-Raten für die beiden Zeiträume und die 320 DWD-Stationen, die für beide Zeiträume vollständige Daten haben, korreliert worden. Die Regressionsgerade zeigt, dass die KiST-Rate für die Jahre 1991 bis 2005 im Mittel 95 % der Rate der Jahre 2001 bis 2015 beträgt. Das Verhältnis der mittleren Lufttemperaturen, berechnet über alle Standorte, beträgt für die beiden Zeiträume 0.97: Damit steigt die

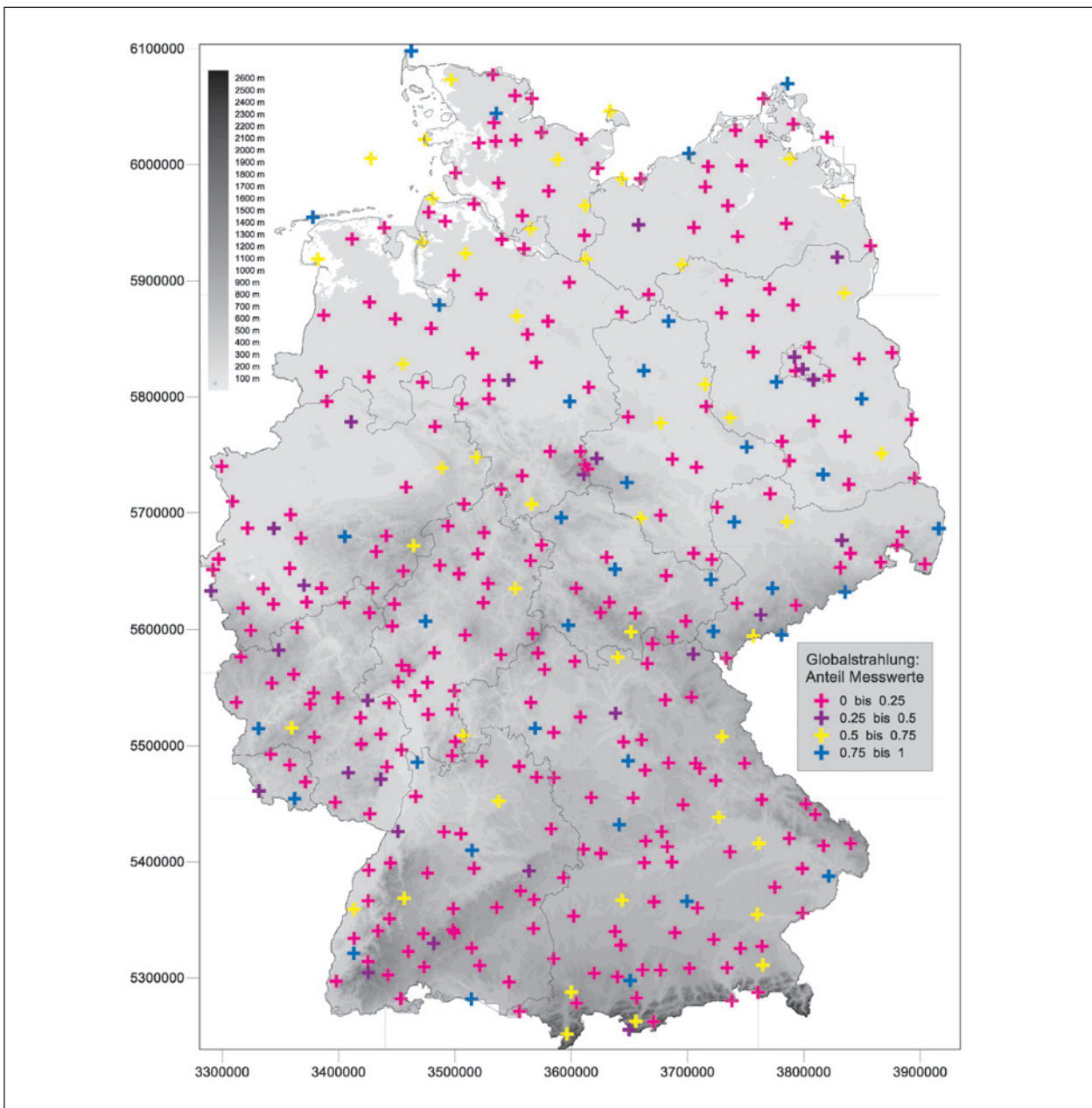


Bild 51: DWD-Stationen zur Berechnung der KiST-Rate für den Zeitraum 2001 bis 2015 mit Angaben zur Messung der Globalstrahlung, Unterdruck: Relief

KiST-Rate schneller als die Lufttemperatur. Das ist angesichts der rasanten Zunahme des Schadenspotenzials mit der Fahrhahnoberflächentemperatur auch zu erwarten. Dieser Vergleich macht deutlich, dass sich die Klimaerwärmung, die sich ja fortsetzen wird (siehe Bild 59), so sehr auf die Schadenssummen auswirkt, dass man mit einem 15-jährigen Mittel, das ja immer mit Daten aus der Vergangenheit berechnet werden muss, in Zukunft – und für die Zukunft wird geplant – nicht unbedingt rechnen kann.

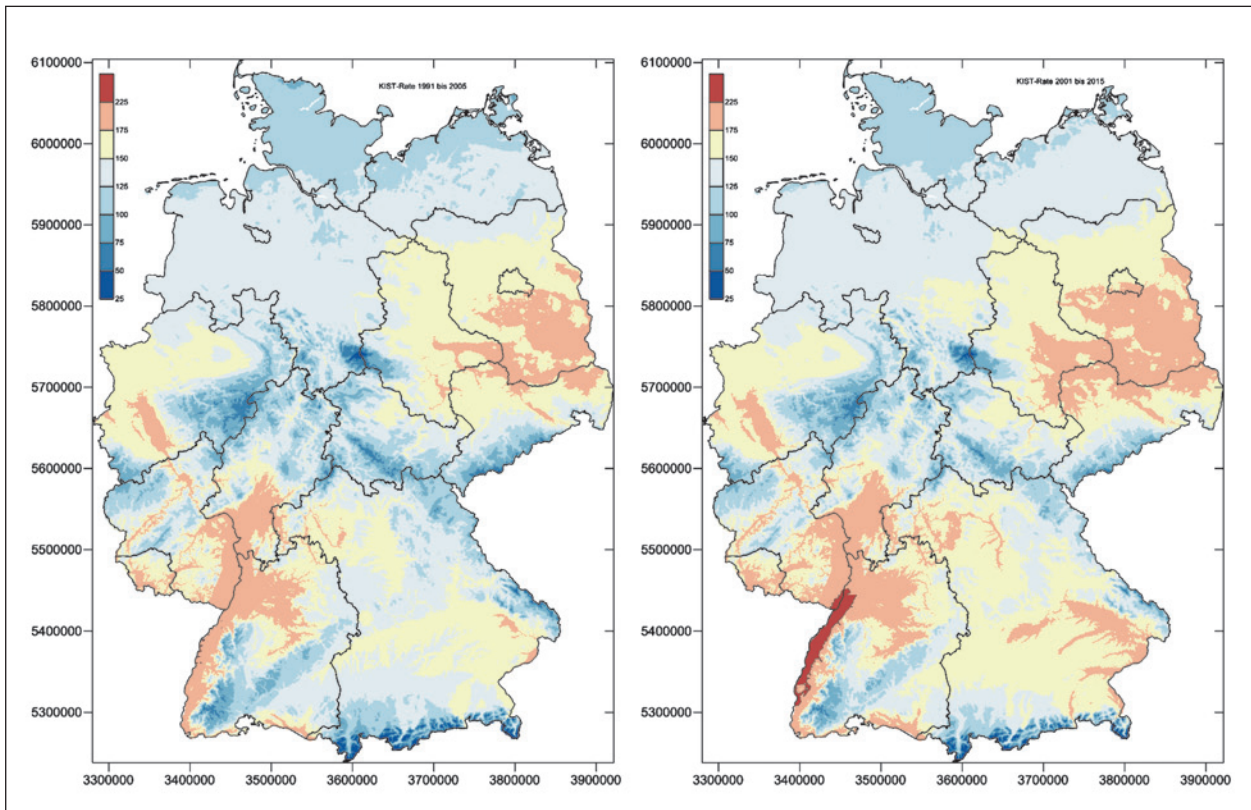


Bild 52: KiST-Raten, berechnet mit den Daten der Jahre 1991 bis 2005 (links) und 2001 bis 2015 (rechts)

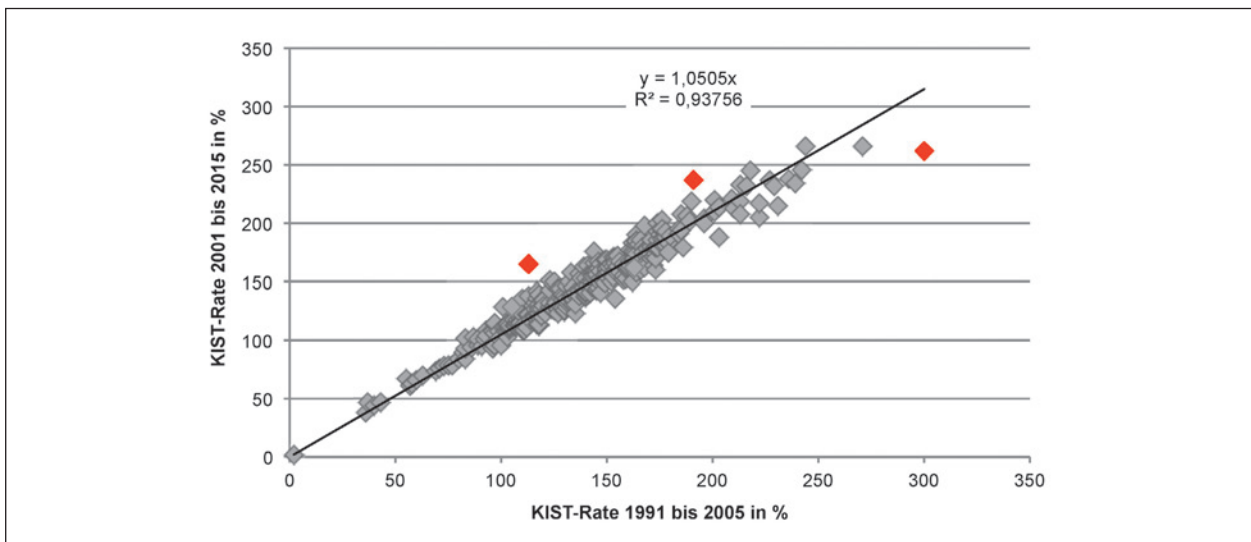


Bild 53: Vergleich der KiST-Raten für die Zeiträume 1991 bis 2005 und 2001 bis 2015 – rot markiert: Stationen sind im Zeitraum 1991 bis 2005 verlegt worden

7 Vergleich der Schadenssummen nach EPM mit den KiST-Raten

7.1 Vergleich mit den KiST-Zonen

Vergleicht man die räumliche Verteilung der KiST-Rate mit den KiST-Zonen aus FE 04.198/2004/ARB, dann muss man berücksichtigen, dass die Schadenssummen nach EPM, die in FE 04.198/2004/ARB zu den Zonen angegeben werden, normiert worden sind. Das ist für die KiST-Raten nicht der Fall.

Für die KiST-Zonen wurden daher Schadenssummen nach EPM mit den hier benutzten Schadenspotenzialen neu berechnet und die Werte in die Zonen-Karte eingetragen (siehe Bild 54).

Es gibt leider kaum eine Übereinstimmung zwischen den beiden Karten. Ähnlich ist lediglich die generelle Zunahme von Nord nach Süd. Ansonsten passen weder die räumliche Differenzierung noch die Größenordnungen von KiST-Rate und Schadenssumme nach EPM zusammen. Die Werte, die für die KiST-Zonen berechnet wurden, sind wesentlich höher, die Differenz zu der KiST-Rate nimmt von Nord nach Süd zu. Entsprechende Fahrhahnoberflächentemperaturen sind an den GMA allenfalls in dem sehr strahlungsreichen Jahr 2003 gemessen worden.

Die Unterschiede der beiden Methoden beruhen zum Teil darauf, dass mit unterschiedlichen meteorologischen Daten gearbeitet wurde: Das EPM ist seinerzeit mit Daten vom DWD betrieben worden, die lückenhaft und nicht korrigiert waren, während die Ergebnisse der KiST-Methode auf Daten beruhen, die im DWD für die agrarmeteorologische Modellierung genutzt werden: Sie sind geprüft, korrigiert und ergänzt. Wenn das EPM mit diesem Datenmaterial betrieben wird, ergeben sich deutlich niedrigere Schadenssummen und große räumliche Unterschiede wie z. B. für Regensburg und benachbarte Stationen (hier: Würzburg) verschwinden: Für 9 der 54 Stationen sind die Schadenssummen des Zeitraums 1991 bis 2005 nachgerechnet worden, beide Ergebnisse sind in Tabelle 9 zu sehen.

Die systematisch höheren Summen, die mit den ursprünglichen Daten berechnet wurden, sind wohl auf die Unterschiede bei der Parametrisierung der Globalstrahlung zurückzuführen: Im DWD geschieht das anhand der Sonnenscheindauer,



Bild 54: KiST-Zonen mit neu berechneten Schadenssummen [%] nach EPM für die Belastungsstufe Z1-BK100

Station	Schadenssumme nach EPM in %	
	Input alt	Input neu
Cottbus	396	335
Düsseldorf	347	226
Freiburg	544	432
Greifswald	225	161
Hannover	266	194
Leinefelde	272	208
Regensburg	539	383
Schleswig	178	122
Würzburg	434	335

Tab. 9: Schadenssummen 1991 bis 2005, berechnet mit dem EPM und unterschiedlichen DWD-Daten

das EPM berechnet die Globalstrahlung nach KASTEN (1983) aus der Sonnenhöhe und dem Bedeckungsgrad unter Annahme eines Trübungs-faktors. Dadurch entstehen kleine Differenzen im Tagesgang (siehe Bild 55), die sich in der Summe zwar aufheben und auch die berechneten Werte der Fahrhahnoberflächentemperatur kaum verän-

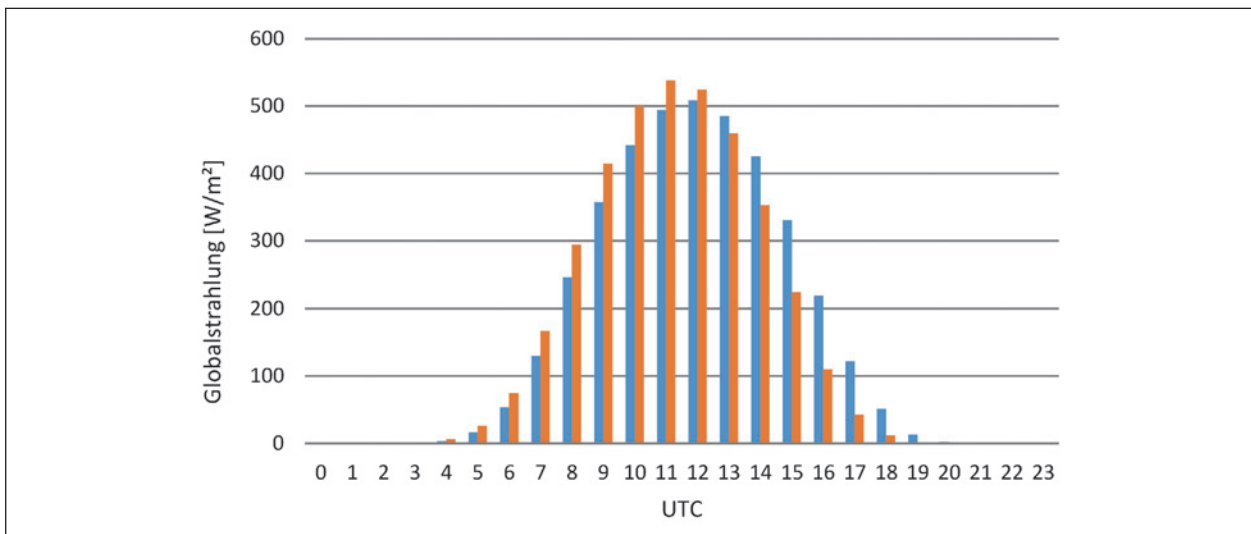


Bild 55: Mittlerer Tagesgang der berechneten (orange) und gemessenen Globalstrahlung (blau) bei ganztägig wolkenfreiem Himmel für Regensburg (1991 – 2005)

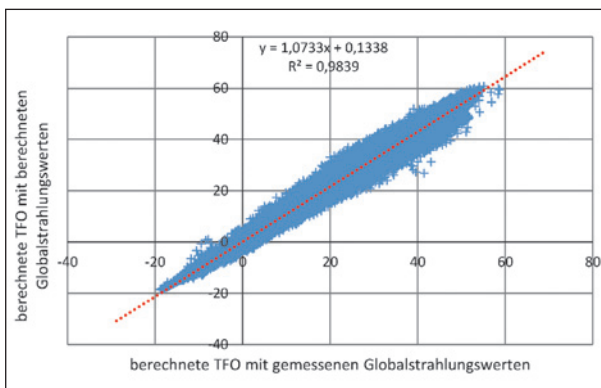


Bild 56: Gegenüberstellung der mit dem EPM berechneten stündlichen TFO unter Verwendung berechneter und gemessener Globalstrahlungsdaten für Regensburg (1991 – 2005)

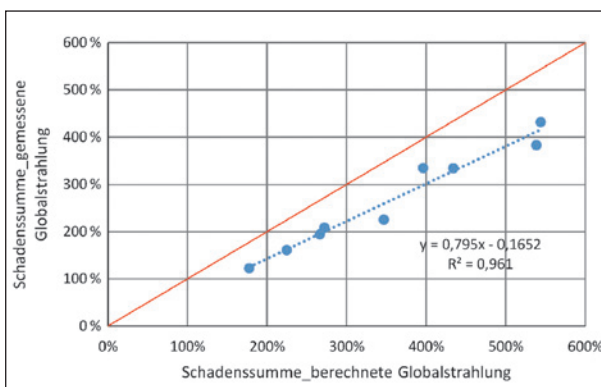


Bild 57: Gegenüberstellung der Schadenssummen nach EPM bei Nutzung von gemessenen und berechneten Globalstrahlungsdaten im empirisch-physikalischen Modell (1991 – 2005)

dern (Bild 56), aber zu systematisch höheren Werten der Schadenssumme nach EPM führen (Bild 57, siehe dazu auch Kapitel 8).

7.2 Vergleich mit Schadenssummen nach EPM für den Zeitraum 2001 bis 2015

Da die erweiterte grafische Darstellung der KiST-Zonen für die RSO auf den Daten des Zeitraums 2001 bis 2015 beruhen soll, sind auch mit dem empirisch-physikalischen Modell Schadenssummen für diesen Zeitraum berechnet worden – und zwar für Stationen, für die zumeist auch schon Ergebnisse aus dem Zeitraum 1991 bis 2005 vorliegen, damit auch ein Vergleich mit den Ergebnissen aus diesem Zeitraum möglich ist. Alle Berechnungen sind mit den geprüften, korrigierten und ergänzten Daten aus dem DWD durchgeführt worden.

Wie man den Daten in Tabelle 10 entnehmen kann, sind die Schadenssummen nach EPM und die KiST-Raten im Zeitraum 2001 bis 2015 gegenüber dem Zeitraum 1991 bis 2005 nahezu gleich geblieben oder leicht angestiegen. Die Ursache für den leichten Anstieg liegt in der Klimaerwärmung – die Lufttemperatur ist in diesen Jahren deutlich angestiegen (siehe Bild 59) und diese Entwicklung spiegeln beide Werte wieder. Dennoch sind auch für den Zeitraum 2001 bis 2015 die Schadenssummen nach EPM an der Hälfte der Standorte deutlich größer als die KiST-Raten (siehe Bild 58). Es handelt sich hier vorwiegend um Standorte im Süden Deutschlands: Freiburg, Memmingen, Regensburg und Würzburg. Die in Bild 58 dargestellte Regressionsgerade für die KiST-Raten dieser 12 Stationen, bei denen es sich um eine Untermenge der in Bild 53 dargestellten Stationen handelt, zeigt, dass die Auswahl der Standorte nicht unbedingt repräsenta-

ID	Station	91 bis 05	01 bis 15	91 bis 05	01 bis 15
		Schadenssumme nach EPM in %		KiST-Rate in %	
880	Cottbus	335	350	196	200
1078	Düsseldorf	226	224	179	175
5839	Emden	134	140	111	109
1358	Fichtelberg	32	39	36	47
1443	Freiburg	432	420	300	262
1757	Greifswald	161	165	116	127
2014	Hannover	194	209	147	153
2925	Leinefelde	208	193	108	115
3244	Memmingen	277	252	127	123
4104	Regensburg	383	330	178	193
4466	Schleswig	122	136	97	106
5705	Würzburg	335	314	201	210

Tab. 10: Schadenssummen nach EPM und KiST-Raten ausgewählter Stationen für die Zeiträume 1991 bis 2005 und 2001 bis 2015

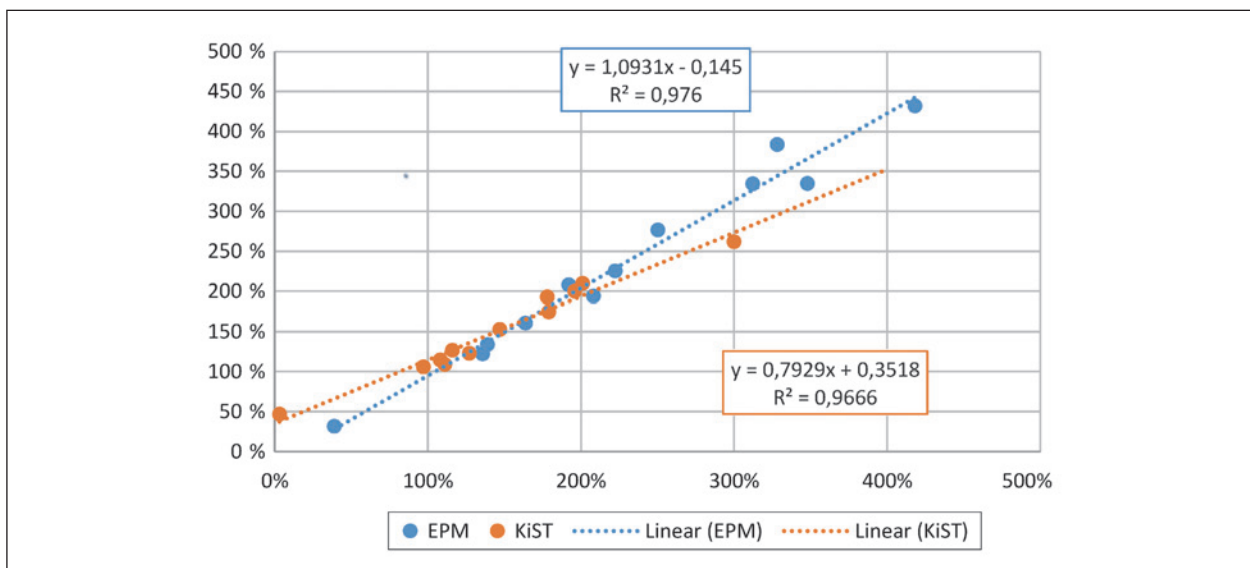


Bild 58: Korrelation von Schadenssummen nach EPM (Blau) und KiST-Raten (Orange), jeweils für die Zeiträume 2001 bis 2015 (Abszisse) und 1991 bis 2005 (Ordinate)

tiv für die Verhältnisse in der Bundesrepublik ist, denn sie unterscheidet sich deutlich von der Geraden, die für die 350 Standorte berechnet wird.

Die Schadenssummen nach EPM und KiST-Raten sowie die zugehörige Regressionsgleichung sind in Bild 60 dargestellt: Die KiST-Rate beträgt ca. 63 % der Schadenssumme und das Bestimmtheitsmaß ist angesichts der wenigen Vergleichswerte mit 85 % recht hoch. Berechnet man die Regressionsgleichung mit Achsenabschnitt, erhöht sich das Bestimmtheitsmaß auf 90 %.

Die Unterschiede hinsichtlich der mittleren Fahrbahnoberflächentemperatur, die von dem Modell einerseits und mit der KiST-Methode andererseits berechnet werden, sind hingegen nur gering (Bild 61), wenn man das Jahresmittel betrachtet. Betrachtet man das 3. Quartil der Verteilung für das Sommerhalbjahr, dann ist die Fahrbahnoberflächentemperatur, die mit dem Modell von KAYSER berechnet wird, stets höher als die der KiST-Methode. Es dürfte zum Teil an diesem Unterschied liegen, dass die Schadenssummen größer sind als die KiST-Raten.

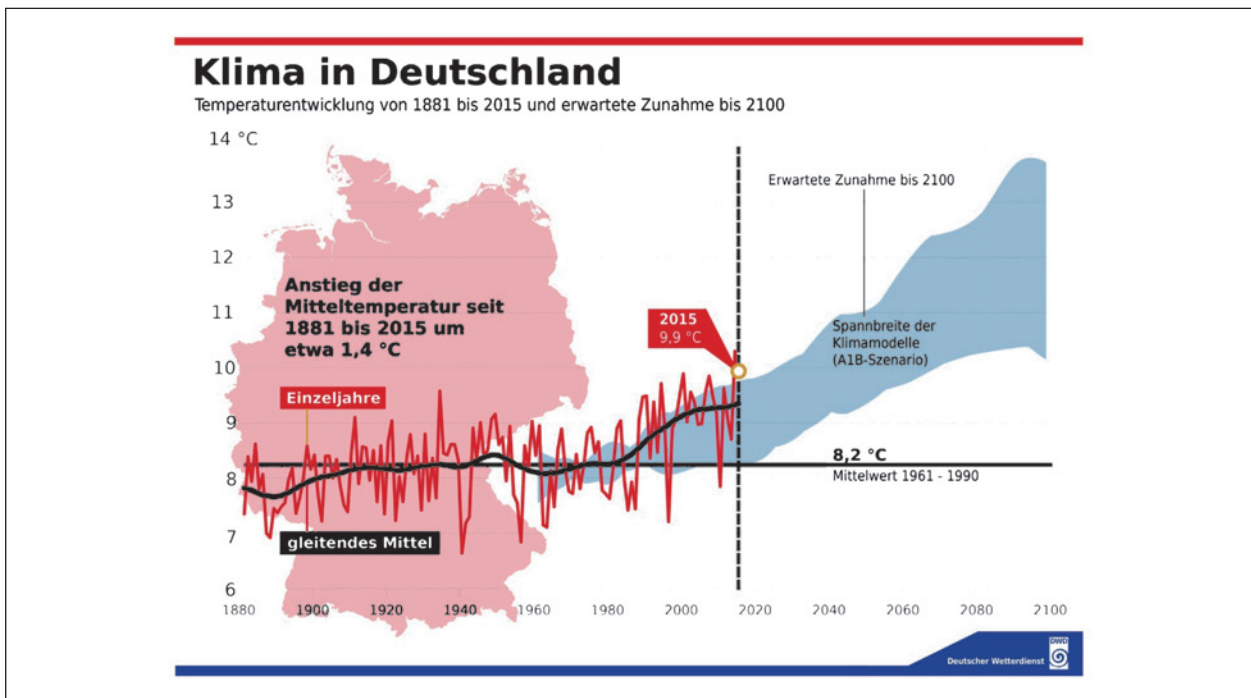


Bild 59: Entwicklung der Lufttemperatur in Deutschland, Quelle: Pressekonferenz des DWD im März 2016

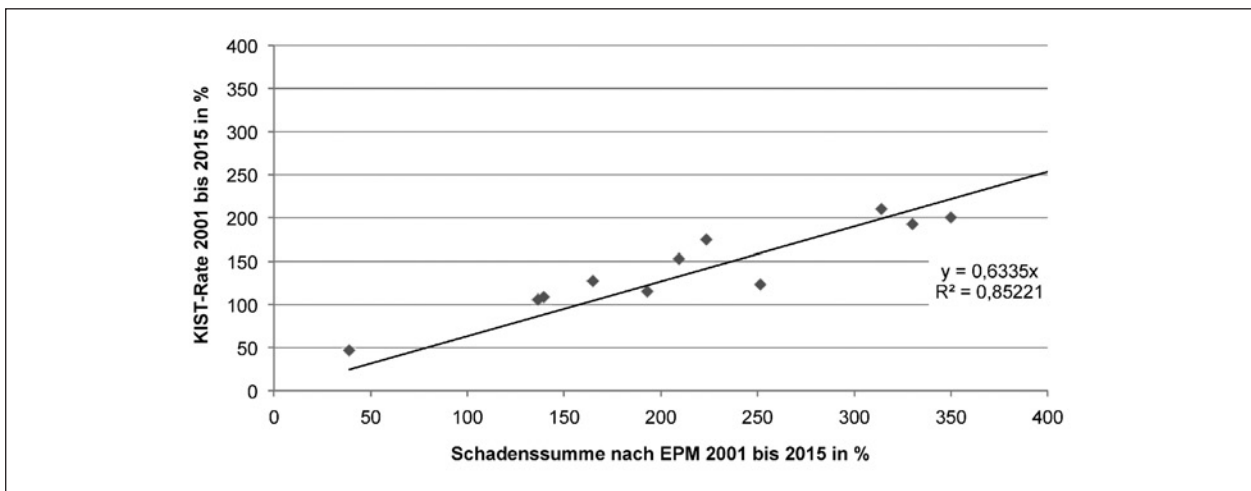


Bild 60: Korrelation der Schadenssummen nach EPM und KiST-Raten, berechnet für den Zeitraum 2001 bis 2015

Ein weiterer Grund dafür, dass sich die Differenz zwischen Schadenssumme nach EPM und KiST-Rate mit steigenden Werten immer mehr vergrößert, besteht wahrscheinlich darin, dass das EPM den Einfluss des Verkehrs nicht berücksichtigt, während die KiST-Methode an Messwerte angepasst wurde, die im fließenden Verkehr erhoben wurden. Im EPM wird bei der Parametrisierung der Strömungsverhältnisse über der Fahrbahn von einer Windgeschwindigkeit ausgegangen, die 58 % des vom DWD gemessenen Wertes beträgt, während bei der KiST-Methode davon ausgegangen wird, dass der fließende Verkehr für einen regen

Austausch der Luft über der Fahrbahn mit der Umgebungsluft sorgt. Räumliche Unterschiede hinsichtlich der Verkehrsdichte gibt es bei der KiST-Methode nicht, während die Intensität des bodennahen Austauschs im EPM mit der Windstärke zunimmt und damit innerhalb Deutschlands nicht gleichverteilt ist: Für windstarke Standorte wie den Küstenbereich oder Bergkuppen ist der Austausch, den das EPM berechnet, wesentlich größer als für windschwache Standorte im Inland und besonders in Tälern.

So erklärt sich, dass der Unterschied zwischen der Schadenssumme nach EPM und der KiST-Rate an

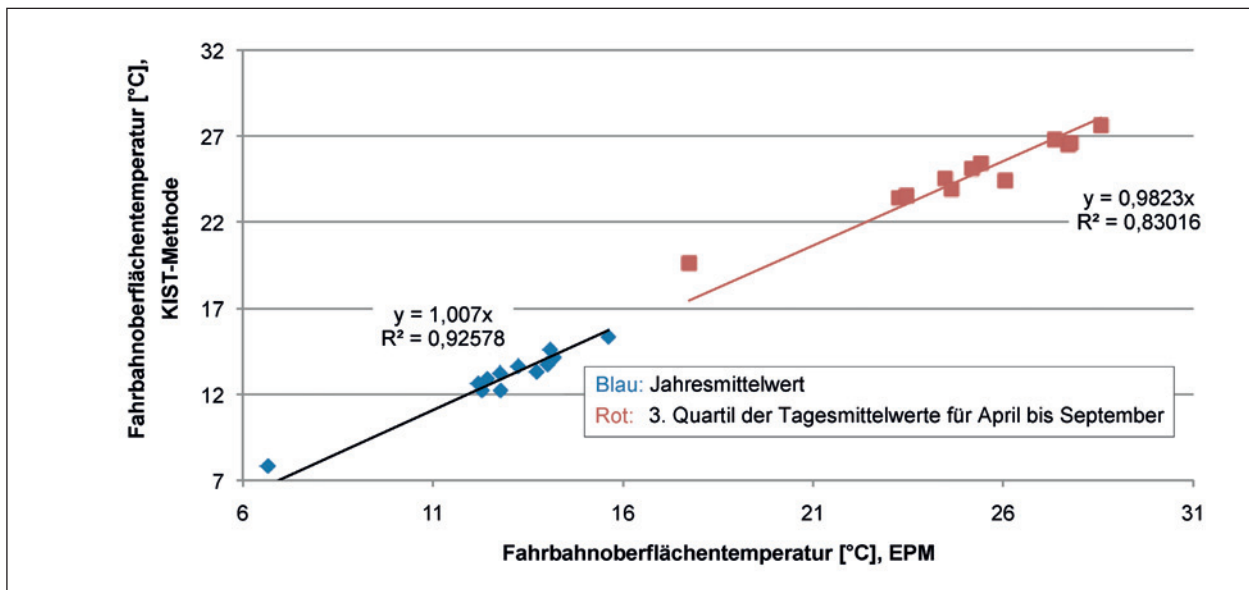


Bild 61: Korrelation der mittleren Fahrbahnoberflächentemperatur, berechnet für den Zeitraum 2001 bis 2015

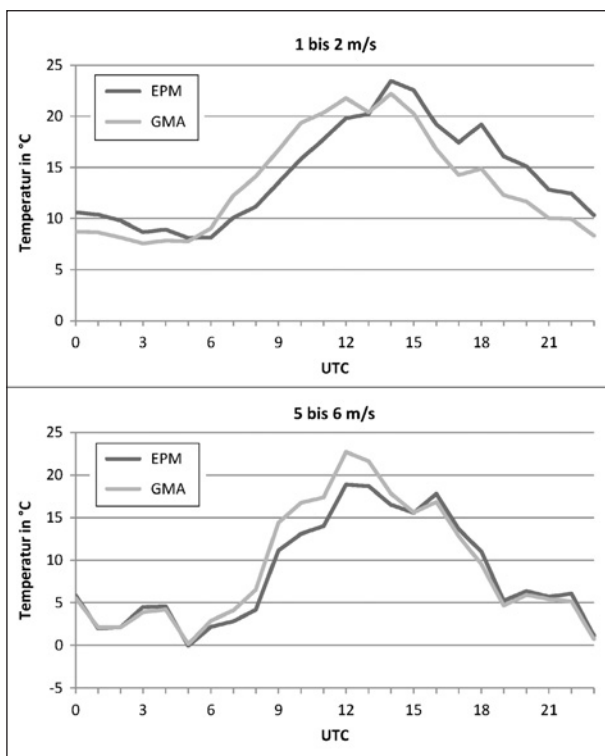


Bild 62: Unterschiede im Tagesgang der Fahrbahnoberflächentemperatur, berechnet für unterschiedliche Windgeschwindigkeitsbereiche, Daten von DWD Regensburg und GMA Rosenhof, 2010

den Standorten Fichtelberg, Schleswig, Emden und Greifswald viel kleiner ist als für Freiburg, Cottbus oder Regensburg. Dabei resultieren die Unterschiede nicht aus Unterschieden der mittleren Fahrbahnoberflächentemperatur sondern aus Unterschieden im Tagesgang, die in Bild 62 beispielhaft anhand der Daten der GMA Rosenhof und der Mo-

dellergenergebnisse für die DWD-Station Regensburg dargestellt sind. Hier wurde die Fahrbahnoberflächentemperatur über Stunden, in denen die Windgeschwindigkeit im angegebenen Bereich lag, gemittelt. Dadurch ist der sehr unregelmäßige Tagesgang entstanden.

So erklärt sich auch, dass die KiST-Zonen aus FE 04.198/2004/ARB (Bild 54) eine gewisse Ähnlichkeit mit der räumlichen Verteilung der mittleren Windstärke haben.

8 Sensitivitätsuntersuchungen

Das Schadenspotenzial ändert sich sprunghaft bei den Temperaturzuständen der Asphaltsschicht, die sich hinsichtlich ihres Vertikalprofils unterscheiden und es steigt sehr schnell mit steigender Temperatur des Asphalts. Kleine Änderungen bei der Größe, die die Berechnung der Schadenssumme bestimmt – der Fahrbahnoberflächentemperatur – können daher große Änderungen der Schadenssumme hervorrufen. Dasselbe gilt für die KiST-Rate. Aus diesem Grund soll jetzt untersucht werden, wie sich die räumliche Verteilung der KiST-Rate ändert, wenn der Input etwas verändert wird.

Der Input besteht in folgenden Größen:

- dem Tagesmittel der Fahrbahnoberflächentemperatur,
- der Tagesamplitude der Fahrbahnoberflächentemperatur und

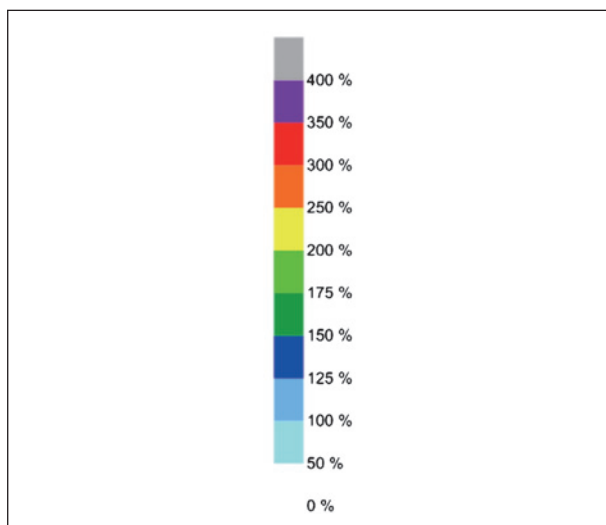


Bild 63: Maßstab der KiST-Rate für die Karten in den Bildern 64, 65 und 67

- dem reduzierten, normierten Tagesgang der Fahrbahnoberflächentemperatur.

Diese drei Eingangsgrößen werden im Folgenden jede für sich leicht verändert und das Ergebnis anhand der räumlichen Verteilung beschrieben. In die Karten mit der räumlichen Verteilung werden dabei auch immer die Ergebnisse des empirisch-physikalischen Modells, die sich ja deutlich von der KiST-Rate unterscheiden, eingetragen, damit man eventuell klären kann, was für diese Unterschiede verantwortlich ist.

Die Karten mit den räumlichen Verteilungen sollen lediglich einen Eindruck von der Veränderung vermitteln, mehr ist bei der gewählten Größe nicht zu erkennen. Damit man sich aber in etwa eine Vorstellung von der Größenordnung machen kann, wird in Bild 63 der Maßstab für die KiST-Raten, der für alle Karten derselbe ist, größer abgebildet.

8.1 Tagesmittel der Fahrbahnoberflächentemperatur

Das Tagesmittel wird verändert, indem es mit einem Faktor multipliziert wird. Es werden die Faktoren 0.95, 0.99, 1.01 und 1.05 benutzt, die das Tagesmittel im Bereich von $\pm 5\%$ variieren. Der Einfluss, den die Anhebung der Fahrbahnoberflächentemperatur auf die KiST-Rate hat, ist im Bild 64 zu sehen: Die KiST-Rate nimmt in weiten Teilen der Bundesrepublik deutlich zu, und zwar umso mehr, je höher die Fahrbahnoberflächentemperatur ist, dabei ist der Anstieg aber proportional zur Oberflächentempera-

tur. Für eine systematisch falsche Einschätzung der mittleren Fahrbahnoberflächentemperatur ist die KiST-Methode durchaus anfällig, das wirkt sich aber – wie zu sehen ist – nicht auf die räumliche Verteilung der KiST-Rate aus.

Die Schadenssummen nach EPM sind im maßgeblichen Temperaturbereich um etwa 2 % größer als die, die mit der KiST-Methode bestimmt werden. Bei der Darstellung unten rechts sind diese Schadenssummen in Bayern immer noch höher als die KiST-Raten, für alle anderen Standorte fallen die Werte jetzt in dieselbe Klasse wie die KiST-Rate.

8.2 Tagesamplitude der Fahrbahnoberflächentemperatur

Die Tagesamplitude wird bei der Sensitivitätsbetrachtung zum einen um 10 % verringert und zum anderen um 10 % vergrößert. Diese Veränderung wirkt sich auf die Einteilung in die ncTxx-Klassen und in die Klassen der Oberflächentemperatur aus.

Eine Veränderung der Amplitude in dieser Größenordnung führt gegenüber dem Normalfall nur zu unerheblichen Veränderungen der KiST-Rate, die sich in Norddeutschland bei einer Verringerung etwas vergrößert und bei einer Zunahme etwas verkleinert. In Süddeutschland ist der Effekt umgekehrt. Auch dies ist eine systematische Änderung, die durch das Ergebnis der Regressionsrechnung, auf der die KiST-Methode beruht, hervorgerufen werden kann.

8.3 Tagesgang der Fahrbahnoberflächentemperatur

Der Tagesgang ist jeweils um eine Stunde in die Vergangenheit (auf der Zeitachse nach links, UTC-1) und um eine Stunde in die Zukunft (UTC+1) verschoben worden. Die veränderten Tagesgänge sind – zusammen mit dem normalen Tagesgang – im Bild 66 dargestellt.

Die Wirkung dieser einstündigen Verschiebungen ist sehr unterschiedlich (Bild 68): Eine Verschiebung um eine Stunde nach links führt zu einer Erhöhung der KiST-Rate, die in etwa so groß ausfällt wie die Erhöhung des Tagesmittels der Fahrbahnoberflächentemperatur um 5 %, während eine Verschiebung nach rechts nur marginale Veränderungen gegenüber dem Normalfall verursacht.

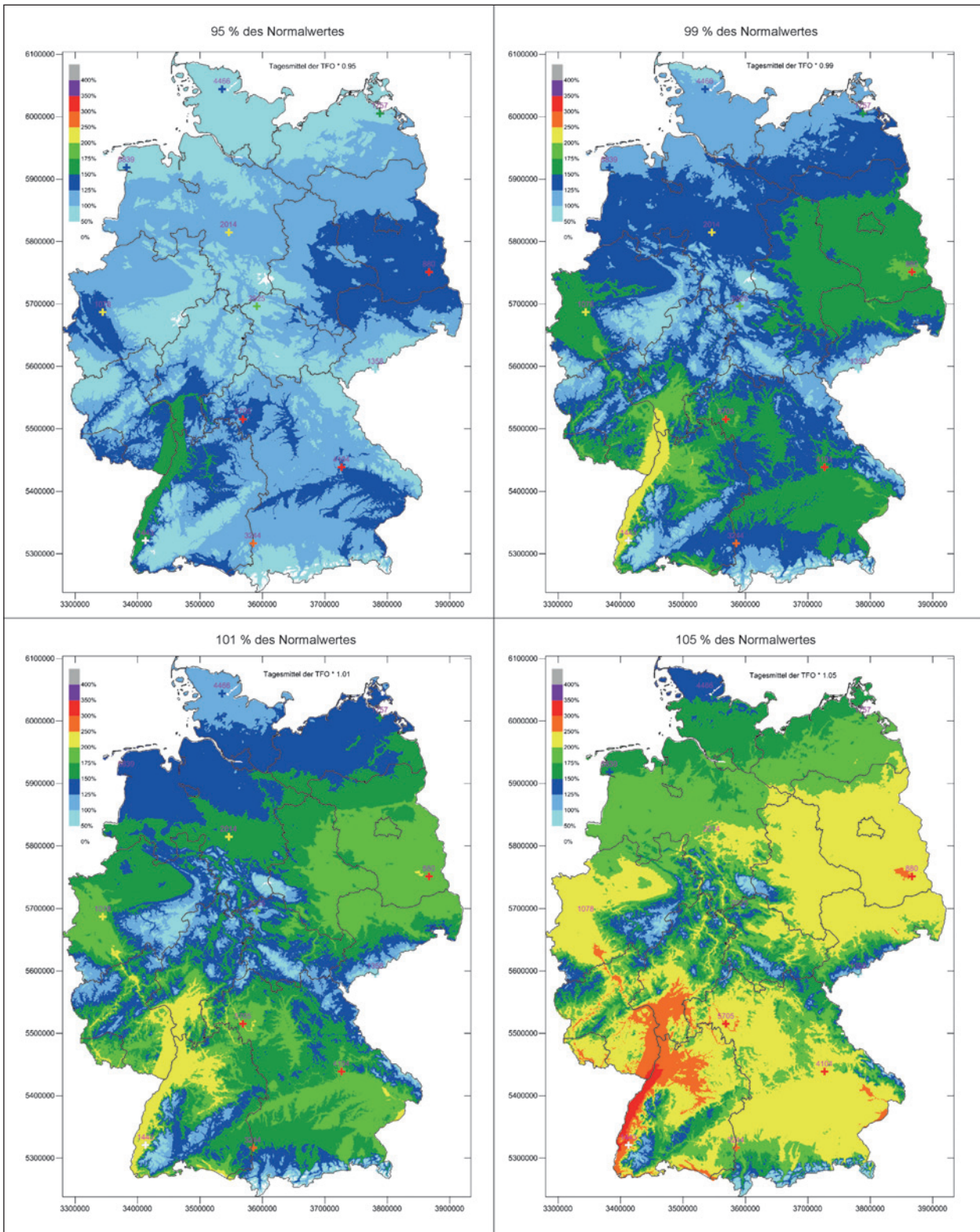


Bild 64: KIST-Raten, berechnet für veränderte Tagesmittelwerte der Fahrbahnoberflächentemperatur

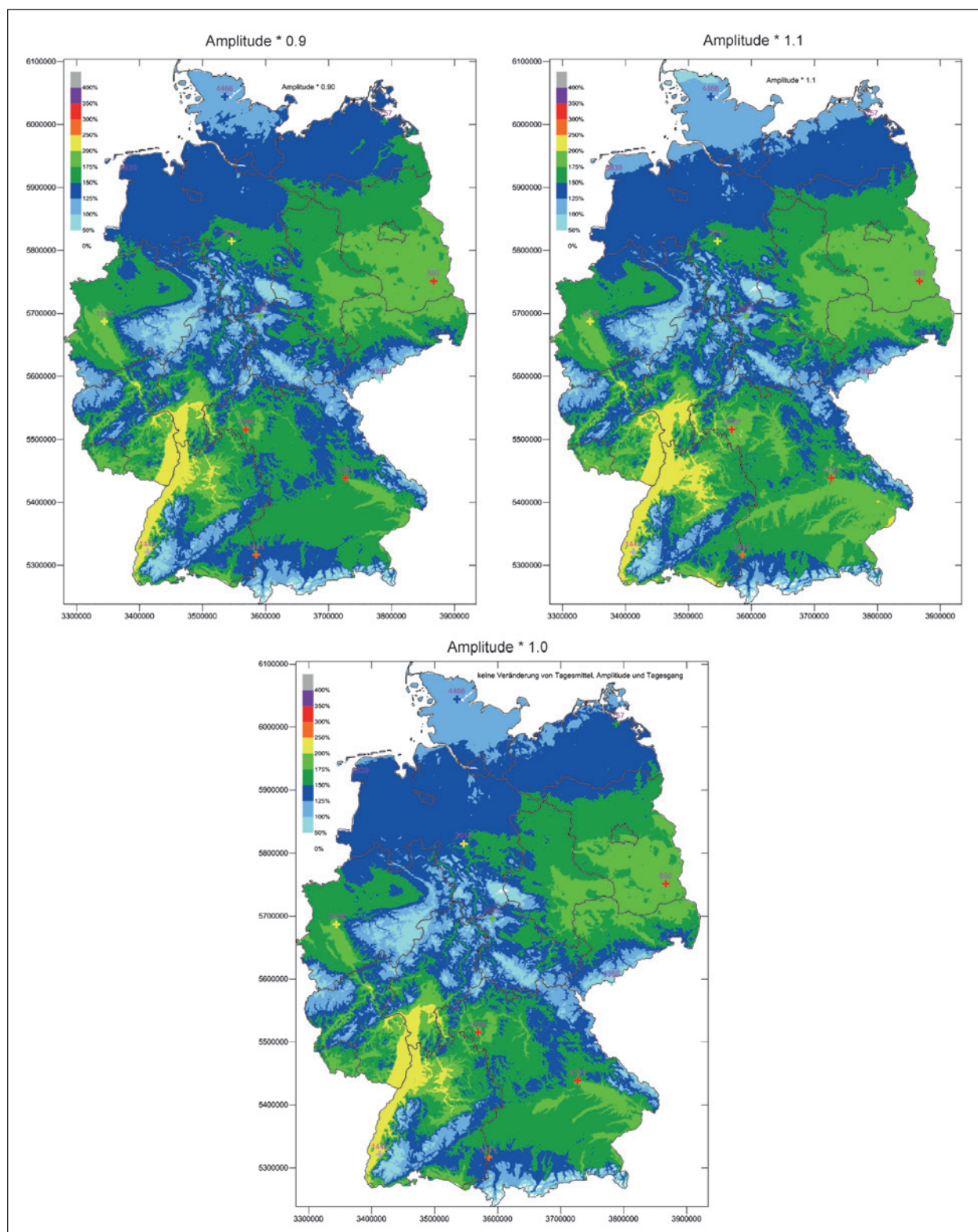


Bild 65: KiST-Raten, berechnet für veränderte Amplituden der Fahrbahnoberflächentemperatur

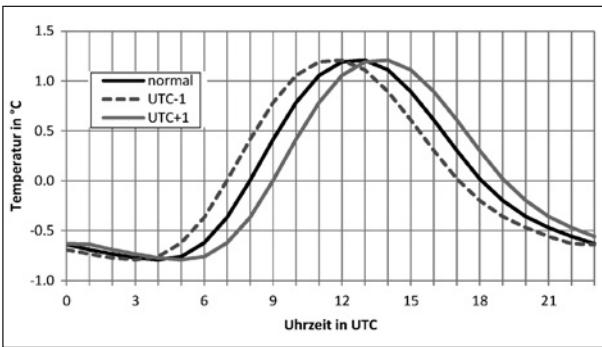


Bild 66: Modifizierung der Tagesgänge für die Sensitivitätsanalyse

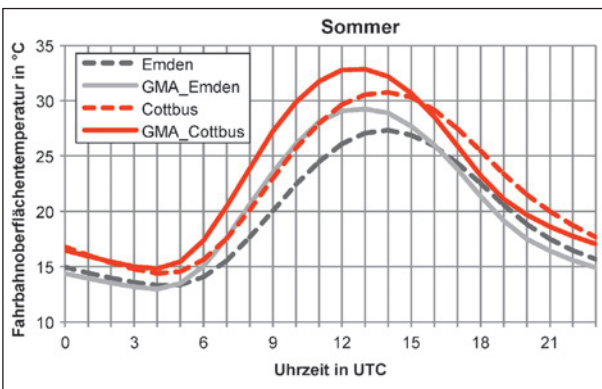


Bild 67: Beispielhafte Darstellung der Verschiebung des Tagesgangs, gestrichelt: Ergebnisse des EPM, durchgezogen: Messwerte an der nächstgelegenen GMA

Die KiST-Methode bedient sich des mittleren Tagesgangs, der auch zur Festlegung der ncTxx-Klassen geführt hat, Verschiebungen dieser Art kommen also per se nicht vor.

Das EPM erzeugt einen Tagesgang der Oberflächentemperatur, der an allen Standorten nach rechts gegenüber dem der GMA verschoben ist (siehe Bild 67). Diese Verschiebung hat gemäß den Ergebnissen dieser Analyse also kaum einen Einfluss auf die Schadenssumme nach EPM.

9 Vorschlag für KiST-Zonen

KiST-Zonen sind Zonen mit ähnlichen KiST-Raten, die sich untereinander durch die Dicke der Asphalt-schicht unterscheiden, die nötig ist, um dieselbe KiST-Rate (die in diesem Fall mit der Schadenssumme gleichgesetzt wird) zu erreichen. Daher ist die Einteilung der Bundesrepublik in KiST-Zonen so vorgenommen worden, dass zwischen den Zonen bei Anwendung der Kalibrierasphalte jeweils eine Schichtdickendifferenz von mindestens ± 1 cm auftritt.

Das Ergebnis dieser Einteilung ist in Bild 69 zu sehen: Die Zone 4 (Grün) ist die Bezugszone, für

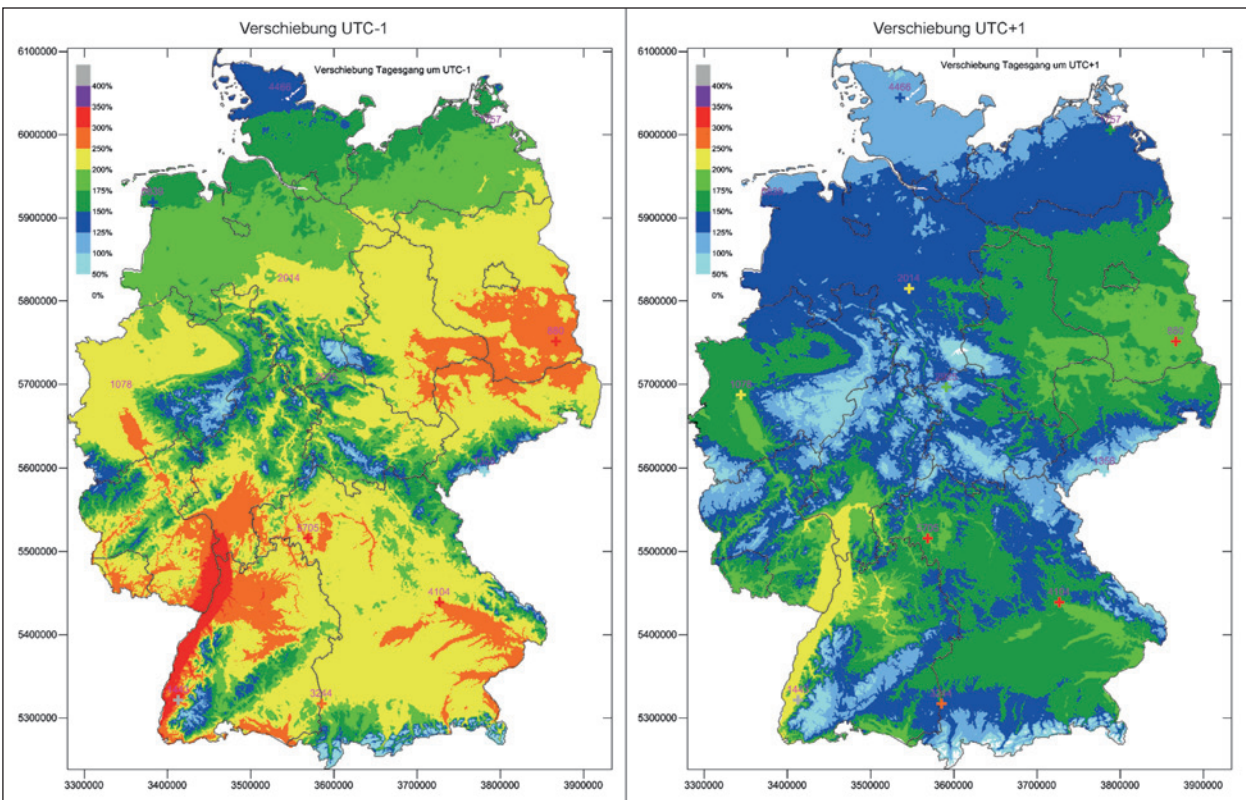


Bild 68: KiST-Raten, berechnet für verschobene Tagesgänge der Fahrbahnoberflächentemperatur

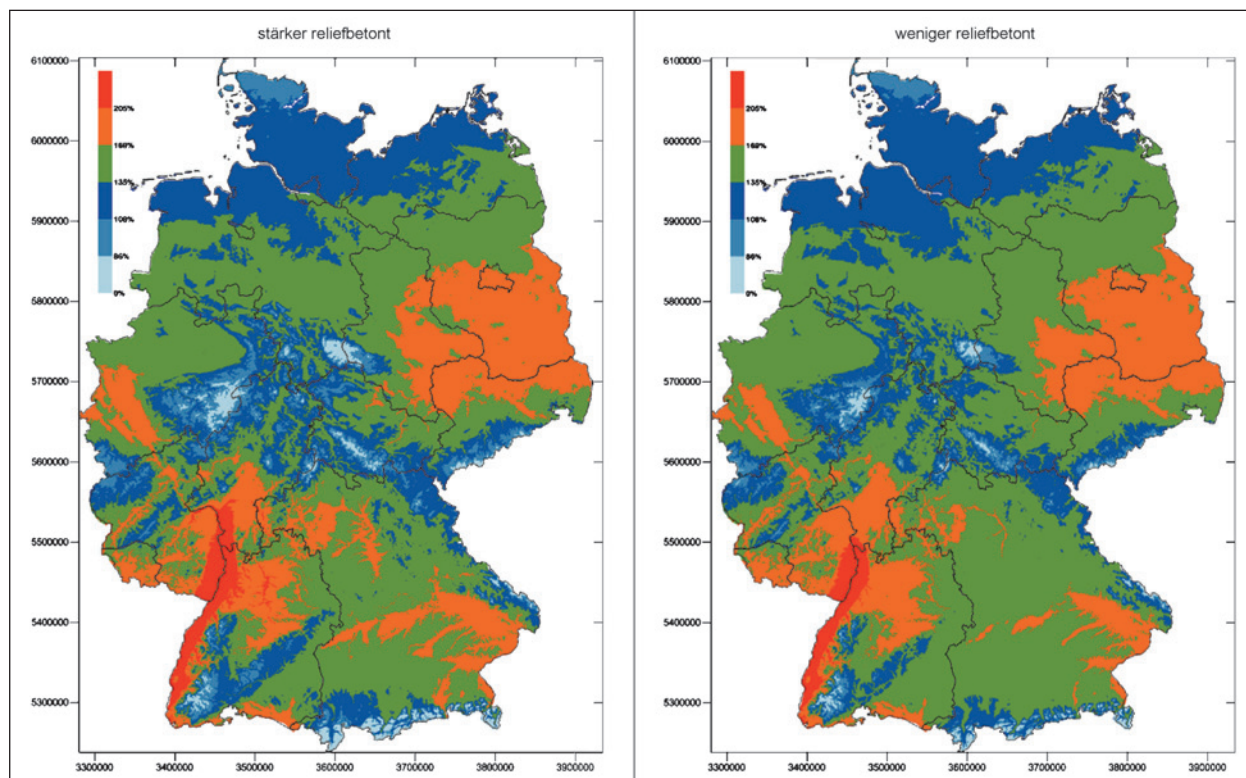


Bild 69: Zwei Vorschläge für die Einteilung Deutschlands in 6 KiST-Zonen auf der Grundlage der KiST-Raten, berechnet für die Belastungsstufe Z1-BK100

die Zone 5 (Orange) wäre bei Nutzung der Kalibrierasphalte ein Zuschlag von ca. 1 cm nötig, für die Zone 6 (Rot) sind es ca. 2 cm. Für die Zonen 1, 2 und 3 gelten dann jeweils Abschläge von 3, 2 und 1 cm.

Es gibt zwei Vorschläge (siehe Bild 69), die sich dadurch unterscheiden, dass die Rasterdaten leicht unterschiedlich berechnet wurden: Die Einteilung, die links dargestellt ist, beruht auf Rasterdaten, bei denen die Abhängigkeit von der Höhe durch ein Polynom 2. Grades beschrieben wird (so sind die Rasterdaten aller bisher gezeigten Karten berechnet worden), bei der rechten Darstellung wurde für die Abhängigkeit von der Höhe eine einfache lineare Gleichung benutzt. Dabei ist die Übereinstimmung zwischen den KiST-Raten der einzelnen Stationsstandorte und den zugehörigen Rasterwerten für die Berechnung mit dem Polynom geringfügig besser, diese Darstellung liefert auch ein realistischeres Bild von der Verteilung. Die Darstellung mit der einfachen Höhenabhängigkeit hingegen ist weniger detailliert und daher für den praktischen Gebrauch ggf. besser geeignet. Die Entscheidung für eine der beiden Darstellungen ist grundsätzlich außerhalb des Projektes im Hinblick auf die mit der Einteilung verbundene Anwendung zu treffen. Von Seiten der

Forschungsnehmer wird die linke Karte bevorzugt, weil sie die räumlichen Unterschiede realistischer abbildet.

9.1 Berechnung von Häufigkeitsverteilungen für KiST-Zonen

Für die Anwendung der Verfahrensweisen zur rechnerischen Dimensionierung neuer bzw. zur rechnerischen Substanzprognose bestehender Asphaltstraßenbefestigungen sind Auftretenshäufigkeiten der relevanten Temperaturzustände notwendig. Aus diesem Grund muss jeder KiST-Zone eine individuelle Häufigkeitsverteilung zugeordnet werden. Die diesen Verteilungen zu Grunde liegenden Fahr- bahnoberflächentemperaturen können hierbei entweder mithilfe des EPM oder des im Rahmen dieses Projektes entwickelten Regressionsansatzes berechnet werden.

Die Ergebnisse beider Varianten, insbesondere die sich daraus ergebenden KiST-Raten und Schadenssummen nach EPM, korrelieren zwar gut (Bild 60), weisen aber dennoch unterschiedliche räumliche Verteilungen auf, weil das EPM den konvektiven Wärmestrom in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit bestimmt, während das Regressions-

modell unterstellt, dass dieser Wärmestrom vom fließenden Verkehr, der die bodennahe Luft verdrängt, gesteuert wird. Die Windgeschwindigkeit ist in Deutschland nicht gleichverteilt, für die Verkehrsdichte hingegen wird Gleichverteilung angenommen. Aus diesem Grunde wurde entschieden, die Häufigkeiten der relevanten Temperaturzustände für die KiST-Zonen mit den Fahrbahnoberflächentemperaturen der KiST-Methode zu berechnen.

Die Häufigkeitsverteilung einer KiST-Zone wird anhand der Fahrbahnoberflächentemperaturen, die für die meteorologischen Stationen innerhalb dieser Zone berechnet wurden, bestimmt. Dazu muss für jede der 380 Stationen die Zonenzugehörigkeit festgestellt werden und es sind jene Stationen auszusondern, die – wegen untypischer Lage – nicht in die Zone passen, in die ihr Standort fällt. Das Ergebnis dieser Zuordnung ist in Bild 70 dargestellt: Es sind insgesamt 50 der 380 Statio-

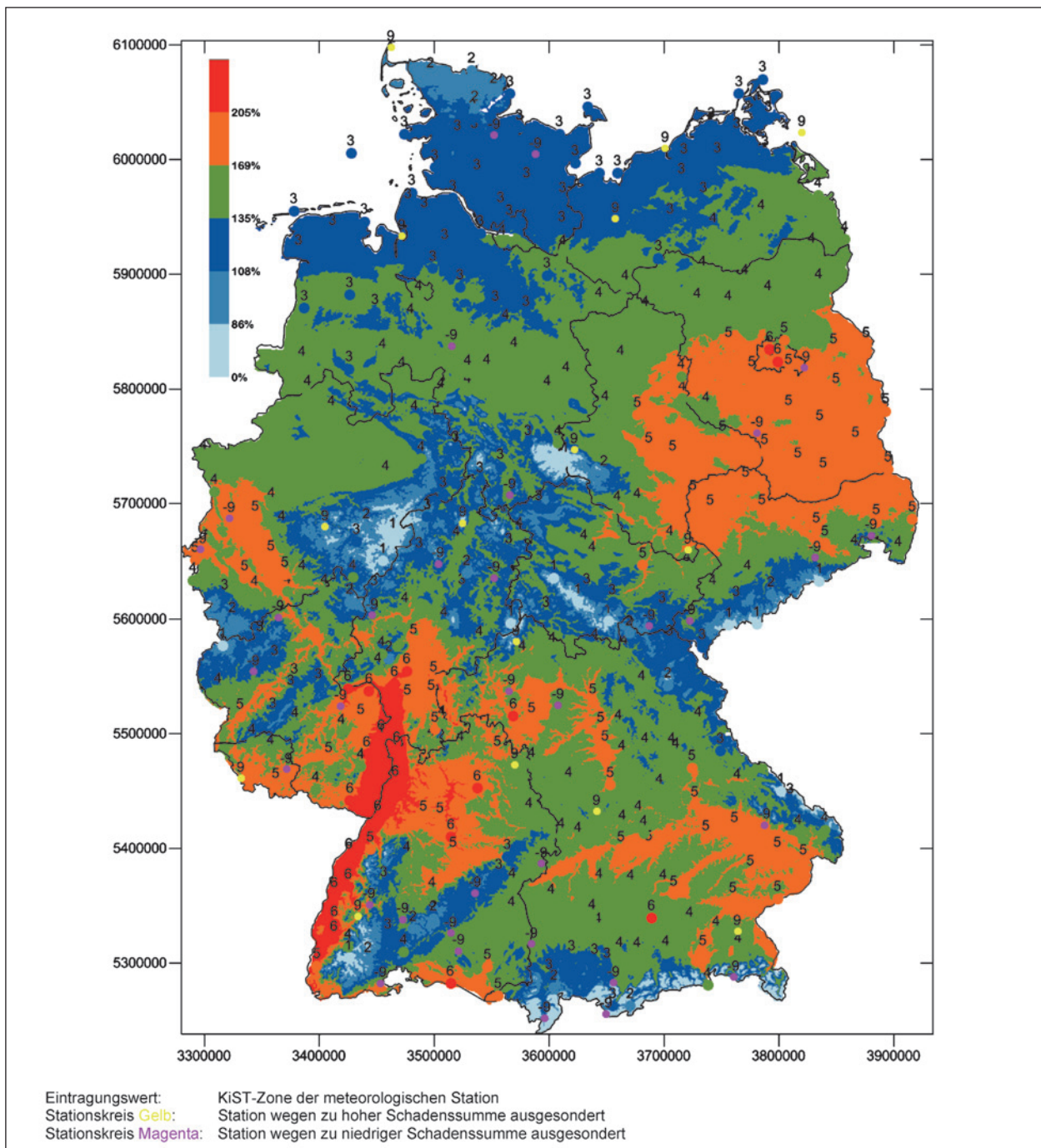


Bild 70: Zuordnung der meteorologischen Stationen zu den KiST-Zonen

nen ausgesondert worden. Für diese Stationen weicht die KiST-Rate, die sich aus der Stationsverteilung errechnet, um mehr als ± 5 Prozentpunkte von der Ober- oder Untergrenze der KiST-Rate der Zone, in die der Stationsstandort fällt, ab. Die 5-Prozentpunkte-Regel ist dabei auch bei der Zuordnung einer Station zu einer Zone angewandt worden: Wenn der Rasterwert des Stationsstandortes um ± 5 Prozentpunkte von der Ober- oder Untergrenze einer benachbarten Zone abweicht, ist die Station ggf. einer benachbarten Zone zugeordnet worden.

Es sind u. a. Stationen in dicht bebautem Gebiet oder aber in sonnigen Hanglagen, die wegen zu hoher KiST-Raten nicht in die zugehörige Zone passen, weil bei der Regionalisierung darauf geachtet wird, dass die mittleren Verhältnisse korrekt abgebildet werden. Das kann dann zu Lasten der Extremwerte gehen. Deshalb sind bei der Berechnung der Häufigkeitsverteilung für die Zone 6 alle Stationen mit KiST-Raten oberhalb von 205 % berücksichtigt worden.

Die Häufigkeitsverteilungen für die Zonen repräsentieren die 75%- und 90%-Werte der Summenhäufigkeitsverteilung der KiST-Raten, berechnet für alle meteorologischen Stationen innerhalb einer Zone. Die sich daraus ergebenden KiST-Raten sind in Tabelle 11 aufgeführt.

Bei der rechnerischen Dimensionierung von Asphaltstraßenbefestigungen ist für dicht bebaute Gebiete, sonnige Hanglagen und besonders geschützte Lagen grundsätzlich die Häufigkeitsverteilung der nächsthöheren Zone anzusetzen. Das gilt z. B. für Straßen innerhalb des Stadtgebiets von Berlin oder München sowie im Rheingau.

Die Häufigkeitsverteilungen der Temperaturzustände für die 6 Zonen sind im Anhang aufgeführt.

10 Schlussfolgerungen

Die KiST-Methode liefert KiST-Raten in einer Größenordnung, die mit den Schadenssummen aus dem Messwerten der Glättemeldeanlagen in etwa übereinstimmt. Gleichzeitig korrelieren die KiST-Raten gut mit den Schadenssummen, die aus den Ergebnissen des EPM resultieren – vorausgesetzt, das Modell benutzt die vollständigen Beobachtungswerte des DWD als Input, für die im Rahmen von FE 04.198/2004/ARB berechneten Schadenssummen gilt das nicht.

Trotz der guten Korrelation gibt es einen grundsätzlichen Unterschied zwischen EPM und KiST-Methode: Das EPM liefert Fahrbahnoberflächentemperaturen, die von der Windgeschwindigkeit abhängig sind – und das gilt dann auch für die Schadenssummen nach EPM. Für die KiST-Methode gilt das nicht. Deshalb liefert die KiST-Methode eine andere räumliche Verteilung der Schadenssummen als das EPM. Die Häufigkeitsverteilungen der Temperaturzustände, die zu den KiST-Zonen gehören, sind daher anhand der Ergebnisse der KiST-Methode und nicht der des EPM zu berechnen.

Die Methode zur Berechnung der Schadenssumme arbeitet mit klassierten Schadenspotenzialen, die sich von Klasse zu Klasse stark unterscheiden. Das führt dazu, dass kleine, systematische Änderungen des Inputs – der Fahrbahnoberflächentemperatur – zu großen Änderungen beim Output – der Schadenssumme – führen können. Eine Sensitivitätsbetrachtung auf der Grundlage Fahrbahnoberflächentemperaturen aus der KiST-Methode hat gezeigt, dass das vor allem für eine Veränderung des Temperaturniveaus der Asphaltsschicht und für eine Verschiebung des Tagesgangs gilt. Deshalb sollte die Robustheit des Systems zur Berechnung der Schadenssummen durch Einbeziehung eines

Zone	Stationen	KiST-Rate in %			
		Untergrenze	Obergrenze	75 %	90 %
1	15	0	86	77	79
2	18	87	108	104	108
3	88	109	135	129	134
4	119	136	169	162	165
5	69	170	205	189	200
6	21	206	∞	237	246

Tab. 11: Anzahl der Stationen pro Zone, Ober- und Untergrenze der KiST-Rate für die Zuordnung eines Rasterwertes sowie eines Stationswertes der KiST-Rate zu einer Zone und KiST-Raten, für die Häufigkeitsverteilungen der relevanten Temperaturzustände berechnet werden

probabilistischen statt wie bisher deterministischen Zuordnungsprinzips der Fahrbahnoberflächentemperaturklassen zu den Klassen der vertikalen Temperaturverteilung (ncTxx-Klassen) verbessert werden.

Andere systematische Veränderungen des Inputs wie

- eine Veränderung der Häufigkeitsverteilung der Fahrbahnoberflächentemperatur bei Beibehaltung des Mittelwertes,
- eine Verschiebung der relativen Häufigkeiten der drei Amplitudenklassen,
- eine Veränderung der mittleren Fahrbahnoberflächentemperatur in Abhängigkeit von der Amplitudenklasse

sowie der Einfluss, den die Varianz der Schadenspotenziale hat (siehe Kapitel 6.1.1), konnten hier nicht untersucht werden. Das sollte ggf. nachgeholt werden, denn es ist sicherlich sinnvoll, Anforderungen an den Input zur Berechnung von Schadenssummen zu formulieren, um eine gewisse Konsistenz der Ergebnisse zu gewährleisten.

Die KiST-Methode könnte sicherlich verbessert werden – dazu benötigt man aber bessere Werte der Fahrbahnoberflächentemperatur, als sie von den GMA geliefert werden: Die vorliegenden Messwerte sind sehr lückenhaft und ungeprüft. Es kommt hinzu, dass die Sensoren der GMA, die in die Fahrbahn eingebaut werden, „...bei allen Anlagen zusammen mit anderen Sensoren (Gefriertemperatur, Fahrbahnfeuchte) in mehr oder weniger großen Materialblöcken eingesetzt [sind], deren Materialien nicht denen der Fahrbahnkonstruktion entsprechen... In den Sensorblöcken entstehen aber andere Energieströme im unmittelbaren Bereich des Sensors für die Fahrbahnoberflächentemperatur, die nicht den Energieströmen der eigentlichen Fahrbahnkonstruktion entsprechen.“ (BADELDT et al., 2006, S. 12/13). Dadurch entstehen Differenzen zwischen den gemessenen und den tatsächlichen Fahrbahnoberflächentemperaturen sowie auch Differenzen zwischen den Messwerten der einzelnen GMA, die vor allem strahlungsabhängig sind, denn „Die intensive Globalstrahlung ist der Wärmestrom, der das thermische Gleichgewicht zwischen einem Sensor und der Fahrbahnoberfläche im größten Umfang stört.“ (BADELDT et al., 2006, S. 32).

Als Input wären daher Ergebnisse eines empirisch-physikalischen Modells, das mit meteorologischen Beobachtungen arbeitet, ideal:

- Die grundsätzliche Defizite der Messmethodik fallen weg – bei dem Vergleich der mittleren Tagesgänge der Fahrbahnoberflächentemperatur (Bild 68) sieht man deutlich, dass sich die Wärmekapazitäten der Sensoren von denen, die im EPM verankert sind, unterscheiden müssen und man kann davon ausgehen, dass das Modell einen Tagesgang liefert, der dem der Fahrbahnoberfläche eher entspricht.
- Die Fahrbahnoberflächentemperaturwerte wären lückenlos.
- Es gäbe hinsichtlich der Wahl der Standorte und der Zeitreihen keine Einschränkungen.
- Die Fahrbahnoberflächentemperaturen und die meteorologischen Beobachtungen würden vom selben Standort stammen.
- Es muss keine Übertragung der Temperaturmessungen von 4 m über Grund am Rande einer Autobahn auf die Messwerte an einer DWD-Station in 2 m über Grund über einer Grasfläche vorgenommen werden. Jetzt ist einfach angenommen worden, dass es hinsichtlich der Temperaturmesswerte keine Unterschiede gibt.

Der Nachteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass man Modellfehler auf die KiST-Methode überträgt – das EPM sollte, wenn man es zu diesem Zweck einsetzen wollte, hinsichtlich des konvektiven Wärmeaustauschs (Berücksichtigung der Verdrängung der bodennahen Luft durch den Verkehr) modifiziert werden.

11 Zusammenfassung

Die Schadenssumme ist ein Maß zur Quantifizierung der Ermüdung der Asphaltstraßenbefestigung, deren Verformungsverhalten von der Temperatur abhängig ist. Eine Methode zur Berücksichtigung der Temperaturbedingungen bei der rechnerischen Dimensionierung von Asphaltstraßenbefestigungen ist im Forschungsprojekt FE 04.198/2004/ARB entwickelt worden. Diese Methode arbeitet mit stündlichen Werten sowie täglichen Amplituden der Fahrbahnoberflächentemperatur.

Eine Regressionsanalyse mit Messwerten der Fahrbahnoberflächentemperatur (abhängige Variable) und der Lufttemperatur, der Globalstrahlung und der Luftfeuchte (unabhängige Variablen) zeigte, dass sich Tagesmittelwerte und Tagesamplituden der Fahrbahnoberflächentemperatur sehr gut anhand täglicher Werte der unabhängigen Variablen berechnen lassen. Die Tagesmitteltemperatur hat dabei den größten Einfluss auf das Tagesmittel der Fahrbahnoberflächentemperatur, die Tagessumme der Globalstrahlung den größten Einfluss auf die Tagesamplitude. Berechnet man Schadenssummen aus gemessenen Fahrbahnoberflächentemperaturen, dann stellt man fest, dass vor allem die Temperaturen der Monate Juni bis August Beiträge zur Gesamtsumme liefern und dass die Schadenssummen mit der mittleren Fahrbahnoberflächentemperatur stetig ansteigen. Daraus lässt sich schließen, dass es eine Übereinstimmung der räumlichen Verteilung der Schadenssummen und der mittleren Lufttemperatur der Sommermonate geben muss.

KiST-Zonen sind Gebiete mit ähnlichen Schadenssummen. Für ihre Ausweisung benötigt man Fahrbahnoberflächentemperaturen für viele Standorte über einen 15-jährigen Zeitraum. Messwerte gibt es hierfür nicht, Modellrechnungen wären zu aufwendig. Deshalb ist eine einfache und robuste Methode zur Ermittlung von Stundenwerten und Tagesamplituden der Fahrbahnoberflächentemperatur erarbeitet worden: die KiST-Methode. Sie benutzt die oben erwähnten Regressionsgleichungen und die Beobachtungen meteorologischer Stationen des Deutschen Wetterdienstes zur Berechnung des Tagesmittelwertes und der Tagesamplitude der Fahrbahnoberflächentemperatur. Stündliche Werte der Temperatur werden dann aus diese beiden Größen abgeleitet, indem täglich ein reduzierter und normierter Tagesgang (d. h. ein Tagesgang mit Mittelwert = 0 und Amplitude = 1) unterstellt wird. Es gibt für die drei Amplitudenklassen, die zur Bestimmung der vertikalen Temperaturverteilung innerhalb der Asphalttragschicht benötigt werden, drei dieser Tagesgänge.

Schadenssummen, die mit den Stundenwerten der KiST-Methode berechnet werden, werden hier als KiST-Raten bezeichnet, um sie von den Schadenssummen nach EPM, die mit Fahrbahnoberflächentemperaturen aus dem empirisch-physikalischen Modell (EPM) berechnet werden, zu unterscheiden.

Die räumliche Verteilung der KiST-Raten wurde aus den Raten für die Standorte von 380 (Zeitraum: 2001 bis 2015) bzw. 320 (Zeitraum: 1991 bis 2005) DWD-Stationen abgeleitet, indem die Stationsergebnisse unter Berücksichtigung ihrer Höhenabhängigkeit auf ein regelmäßiges Gitter mit einem Abstand von 1 km in N-S- und W-O-Richtung interpoliert wurden. Sie hat – wie zu erwarten war – große Ähnlichkeit mit der Verteilung der mittleren Lufttemperatur der Monate Juni, Juli und August.

Eine Ähnlichkeit mit den KiST-Zonen, die auf den Schadenssummen nach EPM aus dem Forschungsprojekt FE 04.198/2004/ARB beruhen und die sich von der Verteilung der Lufttemperatur deutlich unterscheiden, gibt es nicht. Die dort berechneten Schadenssummen nach EPM sind wesentlich höher als die KiST-Raten. Die Unterschiede verstärken sich von Nord nach Süd. Die Ursachen für diese großen Abweichungen liegen vornehmlich im Daten-Input der meteorologischen Daten. Die für das vorliegende Forschungsprojekt verwendeten Daten sind auf einem höheren Niveau qualitätsgesichert. Auch die Parametrisierung der Globalstrahlung, die damals nicht als Messwert vorlag, führt im Tagesgang zu kleineren Differenzen, die zu systematisch höheren Werten der Schadenssumme nach EPM führen. Deshalb wurde die Modellrechnung aus FE 04.198/2004/ARB für 12 Standorte mit den nun zur Verfügung stehenden hochwertigeren Daten durchgeführt. Im Ergebnis verringern sich die von Nord nach Süd zunehmenden Differenzen von Schadenssumme nach EPM und KiST-Rate und die beiden Werte korrelieren sehr gut. Die Differenzen zwischen Schadenssumme nach EPM und KiST-Rate steigen allerdings mit steigender Schadenssumme. Das liegt daran, dass im Modell nach FE 04.198/2004/ARB eine unbefahrene Fahrbahn unterstellt und deshalb die Verdrängung der bodennahen Luft durch den Verkehr nicht berücksichtigt wird, sondern der Austausch zwischen der warmen Luft über der Fahrbahn und der kälteren Luft in ihrer Umgebung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit berechnet wird. Das führt zu einer Zunahme der Schadenssumme nach EPM mit abnehmender Windgeschwindigkeit und dazu, dass die räumliche Verteilung von KiST-Raten und Schadenssummen nach EPM dort, wo die Windgeschwindigkeit gering ist, differieren.

Mithilfe der KiST-Methode ist eine kleine Sensitivitätsanalyse durchgeführt worden, die zeigt, wie

empfindlich die Methode zur Berechnung von Schadenssummen auf Änderungen der mittleren Fahrbahnoberflächentemperatur und ihres täglichen Verlaufs reagiert. Dazu sind das Tagesmittel, die Tagesamplitude und der Tagesgang der Fahrbahnoberflächentemperatur verändert worden. Die Analyse hat im Flächenmittel über alle Gitterpunkte und im Vergleich zum Normalfall die in Tabelle 12 genannten Änderungen der KiST-Rate ergeben.

An der räumlichen Verteilung der KiST-Raten ändern die Absenkung oder Anhebung des Temperaturniveaus sowie die Verschiebung des Tagesgangs nichts. Die systematische Änderung der Amplitude hingegen führt dazu, dass sich bei kleineren Amplituden der Anstieg der KiST-Rate von Nord nach Süd verringert, bei größeren Amplituden vergrößert er sich. Diese Veränderung ist im Rahmen der hier betrachteten Änderung der Amplitude nur geringfügig.

Große Änderungen der KiST-Rate – und damit auch der Schadenssumme – treten vor allem dann auf, wenn sich das Temperaturniveau der Fahrbahnoberfläche ändert oder der Tagesgang auf der Zeitachse nach links verschoben wird. Werden diese beiden Änderungen so kombiniert, wie in der letzten Zeile der Tabelle 12 dargestellt – und das sind Abweichungen, die bei einer Modellrechnung der Fahrbahnoberflächentemperatur im Vergleich zu Mess-

werten kaum auffallen dürften – kann sich die Schadenssumme fast verdoppeln! Zum Vergleich: Die jährlichen KiST-Raten, die für den Zeitraum 2001 bis 2015 berechnet werden, bewegen sich im Bereich von -40 % bis +60 % bezogen auf das Mittel dieses Zeitraums. Damit können kleine, aber systematische Fehler bei der Berechnung der Fahrbahnoberflächentemperatur die Schadenssumme so stark beeinflussen wie die jährlichen Witterungsschwankungen. Die Methode zur Berechnung der Schadenssumme ist also nicht sehr robust. Es sollten Anforderungen für den Input zur Berechnung einer Schadenssumme formuliert werden, damit eine gewisse Konsistenz der Ergebnisse gewährleistet ist.

Für die Darstellung von KiST-Zonen anhand der KiST-Raten sind diese so in Klassen eingeteilt worden, dass sich die Zonen hinsichtlich der Dicke der Asphaltenschicht, die – bei Anwendung der Kalibrierasphalte – nötig ist, um dieselbe Schadenssumme zu erreichen, um ca. 1 cm unterscheiden. So sind 6 Zonen entstanden. Für diese Zonen sind Häufigkeitsverteilungen der Temperaturzustände berechnet worden. Die Temperatur der Fahrbahnoberfläche ist dabei mit der KiST-Methode bestimmt worden.

Innerhalb dieser Zonen gibt es Lagen mit lokal besonderen klimatischen Verhältnissen, die mit ingenieurtechnischem Verstand vor Ort zu beurteilen sind. Hier wird als pragmatisches Vorgehen vorgeschlagen, dass bei der rechnerischen Dimensionierung von Asphaltstraßenbefestigungen für dicht bebaute Gebiete, sonnige Hanglagen und besonders geschützte Lagen grundsätzlich die Häufigkeitsverteilung der nächsthöheren Zone anzusetzen ist.

Input	Proz. Veränderung
TFO -5 %	- 25 %
TFO +5 %	+ 33 %
AMP -10 %	-
AMP +10 %	-
UTC + 1	-
UTC - 1	+ 40 %
UTC-1 und TFO +5 %	+ 80 %
TFO -5 %: Tagesmittel der Fahrbahnoberflächentemperatur • 0.95	
TFO +5 %: Tagesmittel der Fahrbahnoberflächentemperatur • 1.05	
AMP -10 %: Tagesamplitude der Fahrbahnoberflächentemperatur • 0.90	
AMP +10 %: Tagesamplitude der Fahrbahnoberflächentemperatur • 1.10	
UTC +1: Verschiebung des Tagesgangs der Fahrbahnoberflächentemperatur um +1 Stunde	
UTC -1: Verschiebung des Tagesgangs der Fahrbahnoberflächentemperatur um -1 Stunde	

Tab. 12: Prozentuale Veränderung der KiST-Rate gegenüber unverändertem Input

Literatur

- BADEL, H.; BREITENSTEIN, J.; FLEISCH, J.; HÄUSLER, G.; SCHEURL, S.; WENDL, A.: Prüfung von Sensoren für Glättemeldeanlagen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V 146, 2006, 128 Seiten
- HESS, R.: Kalibrierung von Verhaltensmodellen für das Straßenerhaltungsmanagement. Diplomarbeit, Universität Hannover, Fachgebiet Konstruktiver Straßenbau, 1998
- KASTEN, F.: Parametrisierung der Globalstrahlung durch Bedeckungsgrad und Trübungsfaktor. Annalen der Meteorologie, Neue Folge 20, 1983, 49 – 50
- KAYSER, S.: Grundlagen zur Erfassung klimatischer Einflüsse bei Dimensionierungsrechnungen von Asphaltbefestigungen. Schriftenreihe der Professur für Straßenbau, Heft 16, Dresden 2009
- WELLNER, F.; KAYSER, S.: Grundlagen zur Erfassung der Temperaturbedingungen für eine analytische Bemessung von Asphaltbefestigungen. Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 04.198/2004/ARB, Dresden, 2007, 148 S.

Bilder

- Bild 1: Normierte charakteristische Temperaturverläufe (aus WELLNER und KAYSER, 2007)
- Bild 2: Schadenspotenziale [%] der Temperaturzustände der Asphalt-schichten eines Straßenoberbaus gemäß Tafel 1, Zeile 1 der RStO 12 für die Belastungsklasse BK100
- Bild 3: Lage der Glättemeldeanlagen, mit deren Messwerten das Schadenssummenklima beschrieben wird, sowie zugehörige GMA-Zone Unterdruck: Relief
- Bild 4: Korrelation der Tagesmittelwerte der Lufttemperatur und der Temperatur der Fahrbahnoberfläche, dargestellt für GMA Hirschaid, Bestimmtheitsmaß: 96 %
- Bild 5: Mittlerer Tagesgang der Fahrbahnoberflächentemperatur und der Lufttemperatur, berechnet für alle Stundenwerte der GMA
- Bild 6: Mittlerer monatlicher Jahresgang der Luft- und der Fahrbahnoberflächentemperatur
- Bild 7: Relative Häufigkeiten der Amplitudenklassen, die die ncTxx-Klassen definieren
- Bild 8: Relative Häufigkeiten der Temperaturklassen, dargestellt über der charakteristischen Temperatur der Klassen
- Bild 9: Relative Häufigkeiten der ncTxx-Klassen in den drei GMA-Zonen
- Bild 10: Verteilung der Tagesschäden auf die Monate, berechnet für alle 49 GMA
- Bild 11: Einzelschäden für die Temperaturzustände, GMA-Zone 1 (Bayern), Schadenssumme: 157 %
- Bild 12: Relative Häufigkeiten der einzelnen Temperaturzustände, berechnet für alle GMA-Stationen in Bayern
- Bild 13: Einzelschäden für die Temperaturzustände, GMA-Zone 2, Schadenssumme: 224 %

- Bild 14: Relative Häufigkeiten der einzelnen Temperaturzustände, berechnet für alle GMA-Stationen in der GMA-Zone 2
- Bild 15: Einzelschäden für die Temperaturzustände, GMA-Zone 3, Schadenssumme: 130 %
- Bild 16: Relative Häufigkeiten der einzelnen Temperaturzustände, berechnet für alle GMA-Stationen in der GMA-Zone 3
- Bild 17: Zusammenhang zwischen der mittleren Fahrbahnoberflächentemperatur und der Schadenssumme für die GMA in Bild 18
- Bild 18: Mittlere Lufttemperatur der Monate Juni, Juli und August, berechnet für den Zeitraum 1981 bis 2010 (Quelle: Climate Data Center des DWD) sowie klassierte Schadenssummen der GMA, berechnet für unterschiedliche Jahre aus dem Zeitraum 2004 bis 2015
- Bild 19: Lage und Typisierung der GMA, deren Daten für die Regressionsrechnung und Validierung benutzt wurden
- Bild 20: Korrelation gemessener und berechneter Werte des Tagesmittels der Fahrbahnoberflächentemperatur (TFO), links: Analyse (ok = 4), rechts: Validierung (ok = 5)
- Bild 21: Korrelation der Tagesmittel von Fahrbahnoberflächentemperatur und Lufttemperatur und Anpassung durch ein Polynom 3. Grades, Analyse- und Validierungsdaten
- Bild 22: Einfluss der einzelnen unabhängigen Variablen auf das Regressionsergebnis für das Tagesmittel der Fahrbahnoberflächentemperatur (Pareto-Chart)
- Bild 23: Bestimmtheitsmaße für den Zusammenhang von gemessener und berechneter Tagesmitteltemperatur der Fahrbahnoberfläche, Unterdruck: Relief
- Bild 24: Regressionskoeffizienten der linearen Regression von berechneten und gemessenen Tagesmittelwerten der Fahrbahnoberflächentemperatur, Unterdruck: Relief
- Bild 25: Standardfehler der linearen Regression von berechneten und gemessenen Tagesmittelwerten der Fahrbahnoberflächentemperatur, Unterdruck: Relief
- Bild 26: Korrelation gemessener und berechneter Werte der Tagesamplitude der Fahrbahnoberflächentemperatur, links: Analyse (ok=4), rechts: Validierung (ok=5)
- Bild 27: Einfluss der einzelnen unabhängigen Variablen auf das Regressionsergebnis für die Tagesamplitude der Fahrbahnoberflächentemperatur (Pareto-Chart)
- Bild 28: Bestimmtheitsmaße für den Zusammenhang von gemessener und berechneter Tagesamplitude der TFO, Unterdruck: Relief
- Bild 29: Regressionskoeffizienten der linearen Regression von berechneten und gemessenen Tagesamplituden der Fahrbahnoberflächentemperatur, Unterdruck: Relief
- Bild 30: Standardfehler der linearen Regression von berechneten und gemessenen Tagesamplituden der Fahrbahnoberflächentemperatur, Unterdruck: Relief
- Bild 31: 75%-Perzentil der Verteilung der Tagesmitteltemperatur (oben) und der Tagesamplitude (unten) der Fahrbahnoberflächentemperatur, berechnet für die Monate April bis September und die Jahre 1991 bis 2005 (links) und 2001 bis 2015 (rechts)
- Bild 32: Verschiedene Tagesgänge der Fahrbahnoberflächentemperatur, berechnet mit den in Tabelle 6 angegebenen Standorten und Jahren und für Tage mit Amplitude < 6.5 K
- Bild 33: Verschiedene Tagesgänge der Fahrbahnoberflächentemperatur, berechnet mit den in Tabelle 6 angegebenen Standorten und Jahren und für Tage mit $6.5 \text{ K} \leq \text{Amplitude} < 11.5 \text{ K}$
- Bild 34: Verschiedene Tagesgänge der Fahrbahnoberflächentemperatur, berechnet mit den in Tabelle 6 angegebenen Standorten und Jahren und für Tage mit Amplitude $\geq 11.5 \text{ K}$

- Bild 35: Reduzierte, normierte Tagesgänge für 3 Amplitudenklassen
- Bild 36: Vergleich gemessener und berechneter Stundenwerte der Fahrbahnoberflächentemperatur für Strahlungswetter und eine Tagesamplitude < 6.5 K
- Bild 37: Vergleich gemessener und berechneter Stundenwerte der Fahrbahnoberflächentemperatur für windiges, bedecktes Wetter und eine Tagesamplitude < 6.5 K
- Bild 38: Vergleich gemessener und berechneter Stundenwerte der Fahrbahnoberflächentemperatur für eine Tagesamplitude zwischen 6.5 K und 11.4 K
- Bild 39: Vergleich gemessener und berechneter Stundenwerte der Fahrbahnoberflächentemperatur für eine Amplitude > 11.5 K
- Bild 40: Jährlicher Vergleich der gemessenen und berechneten Stundenwerte der Fahrbahnoberflächentemperatur (TFO) für das Stationspaar Memmingen-West und Kempten
- Bild 41: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der 12 Klassen von Vertikalprofilen der Temperatur der Asphalttragschicht, Stationspaar Memmingen-West und Kempten
- Bild 42: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der 13 Klassen der Fahrbahnoberflächentemperatur, Stationspaar Memmingen-West und Kempten
- Bild 43: Jährlicher Vergleich der gemessenen und berechneten Stundenwerte der Fahrbahnoberflächentemperatur (TFO) für das Stationspaar Holm Moor und Hamburg-Fuhlsbüttel
- Bild 44: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der 12 Klassen von Vertikalprofilen der Temperatur der Asphalttragschicht, Stationspaar Holm Moor und Hamburg-Fuhlsbüttel
- Bild 45: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der 13 Klassen der Fahrbahnoberflächentemperatur, Stationspaar Holm Moor und Hamburg-Fuhlsbüttel
- Bild 46: Vergleich von KiST-Rate und Schadenssumme für 49 GMA
- Bild 47: Klassierte Differenzen der Schadenssummen, berechnet für 49 GMA mit der KiST-Methode und aus den gemessenen Fahrbahnoberflächentemperaturen, Unterdruck: Relief
- Bild 48: Mittelwert (Mean), Standardfehler (SE) und Konfidenzbereich ($\text{Mean} \pm 1.96 * \text{SE}$) der KiST-Raten für ausgewählte Standorte und den Zeitraum 2001 bis 2015
- Bild 49: Wie Bild 48, aber für das Jahresmittel der Fahrbahnoberflächentemperatur
- Bild 50: Zeitreihe der jährlichen Schadenssummen im Vergleich zu simulierten 15-jährigen Mittelwerten
- Bild 51: DWD-Stationen zur Berechnung der KiST-Rate für den Zeitraum 2001 bis 2015 mit Angaben zur Messung der Globalstrahlung, Unterdruck: Relief
- Bild 52: KiST-Raten, berechnet mit den Daten der Jahre 1991 bis 2005 (oben) und 2001 bis 2015 (unten)
- Bild 53: Vergleich der KiST-Raten für die Zeiträume 1991 bis 2005 und 2001 bis 2015 – rot markiert: Stationen sind im Zeitraum 1991 bis 2015 verlegt worden
- Bild 54: KiST-Zonen mit neu berechneten Schadenssummen [%] nach EPM für die Belastungsstufe Z1 BK100
- Bild 55: Mittlerer Tagesgang der berechneten (orange) und gemessenen Globalstrahlung (blau) bei ganztägig wolkenfreiem Himmel für Regensburg (1991 – 2005)
- Bild 56: Gegenüberstellung der mit dem EPM berechneten stündlichen TFO unter Verwendung berechneter und gemessener Globalstrahlungsdaten für Regensburg (1991 – 2005)
- Bild 57: Gegenüberstellung der Schadenssummen nach EPM bei Nutzung von gemessenen und berechneten Globalstrahlungsdaten im empirisch-physikalischen Modell (1991 – 2005)
- Bild 58: Korrelation von Schadenssummen nach EPM (blau) und KiST-Raten (orange), jeweils für die Zeiträume 2001 bis 2015 (Abszisse) und 1991 bis 2005 (Ordinate)

- Bild 59: Entwicklung der Lufttemperatur in Deutschland, Quelle: Pressekonferenz des DWD im März 2016
- Bild 60: Korrelation der Schadenssummen nach EPM und KiST-Raten, berechnet für den Zeitraum 2001 bis 2015
- Bild 61: Korrelation der mittleren Fahrbahnoberflächentemperatur, berechnet für den Zeitraum 2001 bis 2015
- Bild 62: Unterschiede im Tagesgang der Fahrbahnoberflächentemperatur, berechnet für unterschiedliche Windgeschwindigkeitsbereiche, Daten von DWD Regensburg und GMA Rosenhof, 2010
- Bild 63: Maßstab der KiST-Rate für alle folgenden Karten
- Bild 64: KiST-Raten, berechnet für veränderte Tagesmittelwerte der Fahrbahnoberflächentemperatur
- Bild 65: KiST-Raten, berechnet für veränderte Amplituden der Fahrbahnoberflächentemperatur
- Bild 66: Modifizierung der Tagesgänge für die Sensitivitätsanalyse
- Bild 67: Beispielhafte Darstellung der Verschiebung des Tagesgangs, gestrichelt: Ergebnisse des EPM, durchgezogen: Messwerte an der nächstgelegenen GMA
- Bild 68: KiST-Raten, berechnet für verschobene Tagesgänge der Fahrbahnoberflächentemperatur
- Bild 69: Zwei Vorschläge für die Einteilung Deutschlands in 6 KiST-Zonen auf der Grundlage der KiST-Raten, berechnet für die Belastungsstufe Z1 BK100
- Bild 70: Zuordnung der meteorologischen Stationen zu den KiST-Zonen

Tabellen

- Tab. 1: Schadenspotenziale für eine Asphaltbauweise gemäß Tafel 1, Zeile 1, BK 32 der RStO12
- Tab. 2: Einteilung der Klassen der Fahrbahnoberflächentemperatur
- Tab. 3: Zusammenhang zwischen ncTxx-Klasse, Amplitude der Fahrbahnoberflächentemperatur und der Uhrzeit (WELLNER und KAYSER, 2007)
- Tab. 4: Ergebnisse der Regressionsrechnung für das Tagesmittel
- Tab. 5: Ergebnisse der Regressionsrechnung für die Tagesamplitude
- Tab. 6: GMA und Stationsjahre zur Berechnung der reduzierten, normierten Tagesgänge
- Tab. 7: Vergleich der Mittelwerte aus gemessenen und berechneten Stundenwerten der Fahrbahnoberflächentemperatur
- Tab. 8: Klassenbreite für die Darstellung von Rasterwerten der KiST-Rate für die Jahre 2001 bis 2015, alle Angaben in %
- Tab. 9: Schadenssummen 1991 bis 2005, berechnet mit dem EPM und unterschiedlichen DWD-Daten
- Tab. 10: Schadenssummen nach EPM- und KiST-Raten ausgewählter Stationen für die Zeiträume 1991 bis 2005 und 2001 bis 2015
- Tab. 11: Anzahl der Stationen pro Zone, Ober- und Untergrenze der KiST-Rate für die Zuordnung eines Rasterwertes sowie eines Stationswertes der KiST-Rate zu einer Zone und KiST-Raten, für die Häufigkeitsverteilungen der relevanten Temperaturzustände berechnet werden
- Tab. 12: Prozentuale Veränderung der KiST-Rate gegenüber unverändertem Input

Anhang: Häufigkeitsverteilungen für KiST-Zonen

Zone 1

Zone	Schadenssumme 77 %, das entspricht 75 % der Summenhäufigkeitsverteilung													
	1	ncT01	ncT02	ncT03	ncT04	ncT05	ncT06	ncT07	ncT08	ncT09	ncT10	ncT11	ncT12	gesamt
TFO in °C														
-12.5	0.00020	0.00330	0.00060	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00010	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00420
-7.5	0.00670	0.03780	0.00360	0.00000	0.00000	0.00000	0.00010	0.00100	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.04920
-2.5	0.03950	0.10140	0.00850	0.00030	0.00000	0.00010	0.00100	0.00240	0.00050	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.15370
2.5	0.06900	0.09640	0.01680	0.00130	0.00080	0.00080	0.00240	0.00550	0.00230	0.00000	0.00000	0.00000	0.00020	0.19470
7.5	0.04340	0.07120	0.03020	0.00320	0.00250	0.00480	0.00950	0.00950	0.00560	0.00000	0.00000	0.00020	0.00090	0.17150
12.5	0.02800	0.04320	0.03100	0.00630	0.00510	0.00870	0.01230	0.01230	0.01190	0.00000	0.00000	0.00090	0.00220	0.14960
17.5	0.01540	0.01240	0.01610	0.01120	0.00910	0.01110	0.00720	0.00720	0.01320	0.00030	0.00040	0.00240	0.00480	0.10360
22.5	0.00420	0.00190	0.00500	0.01390	0.01360	0.00800	0.00110	0.00110	0.00560	0.00110	0.00150	0.00530	0.00530	0.06650
27.5	0.00030	0.00010	0.00100	0.01190	0.01260	0.00270	0.00000	0.00000	0.00070	0.00260	0.00390	0.00710	0.00220	0.04510
32.5	0.00000	0.00000	0.00010	0.00560	0.00680	0.00040	0.00000	0.00000	0.00000	0.00460	0.00770	0.00550	0.00020	0.03090
37.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00130	0.00150	0.00000	0.00000	0.00000	0.00460	0.01010	0.00210	0.00000	0.01960
42.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00010	0.00010	0.00000	0.00000	0.00000	0.00220	0.00620	0.00030	0.00000	0.00890
47.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00040	0.00200	0.00000	0.00000	0.00240
gesamt	0.20670	0.36770	0.11290	0.05510	0.05220	0.03920	0.03910	0.03980	0.01580	0.03180	0.02380	0.01580	0.01580	0.99990

Zone	Schadenssumme 79 %, das entspricht 90 % der Summenhäufigkeitsverteilung													
	1	ncT01	ncT02	ncT03	ncT04	ncT05	ncT06	ncT07	ncT08	ncT09	ncT10	ncT11	ncT12	gesamt
TFO in °C														
-12.5	0.00010	0.00160	0.00045	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00005	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00220
-7.5	0.00345	0.02525	0.00235	0.00000	0.00000	0.00000	0.00010	0.00055	0.00005	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.03175
-2.5	0.02790	0.08785	0.00770	0.00020	0.00005	0.00055	0.00055	0.00200	0.00050	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.12675
2.5	0.06485	0.10510	0.01700	0.00095	0.00050	0.00195	0.00195	0.00525	0.00215	0.00000	0.00000	0.00000	0.00020	0.19795
7.5	0.05055	0.07645	0.03340	0.00275	0.00185	0.00470	0.00960	0.00960	0.00655	0.00000	0.00000	0.00020	0.00080	0.18685
12.5	0.03070	0.04630	0.03435	0.00615	0.00475	0.00875	0.01400	0.01400	0.01320	0.00005	0.00005	0.00085	0.00270	0.16185
17.5	0.01600	0.01345	0.01635	0.01165	0.00910	0.01240	0.00765	0.00765	0.01355	0.00030	0.00040	0.00275	0.00540	0.10900
22.5	0.00440	0.00185	0.00490	0.01560	0.01455	0.00860	0.00110	0.00110	0.00555	0.00110	0.00140	0.00585	0.00535	0.07025
27.5	0.00035	0.00010	0.00105	0.01260	0.01390	0.00275	0.00000	0.00000	0.00065	0.00305	0.00455	0.00775	0.00215	0.04890
32.5	0.00000	0.00000	0.00010	0.00585	0.00715	0.00030	0.00000	0.00000	0.00000	0.00500	0.00870	0.00555	0.00020	0.03285
37.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00125	0.00160	0.00000	0.00000	0.00000	0.00470	0.01055	0.00200	0.00000	0.02010
42.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00010	0.00005	0.00000	0.00000	0.00000	0.00220	0.00625	0.00035	0.00000	0.00895
47.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00045	0.00195	0.00000	0.00000	0.00240
gesamt	0.19830	0.35795	0.11765	0.05710	0.05350	0.04010	0.04020	0.04220	0.01685	0.03385	0.02530	0.01680	0.01680	0.99980

Zone 2

Zone	TFO in °C	Schadenssumme 104 %, das entspricht 75 % der Summenhäufigkeitsverteilung													
		2	ncT01	ncT02	ncT03	ncT04	ncT05	ncT06	ncT07	ncT08	ncT09	ncT10	ncT11	ncT12	gesamt
	-12.5	0.00005	0.00265	0.00120	0.00000	0.00000	0.00000	0.00020	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00410
	-7.5	0.00375	0.02900	0.00370	0.00005	0.00000	0.00020	0.00110	0.00010	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.03790
	-2.5	0.02530	0.08385	0.01050	0.00040	0.00015	0.00110	0.00320	0.00060	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00005	0.12515
	2.5	0.05590	0.09250	0.01995	0.00160	0.00100	0.00310	0.00665	0.00290	0.00000	0.00000	0.00000	0.00005	0.00025	0.18390
	7.5	0.04300	0.06145	0.03355	0.00400	0.00310	0.00605	0.00985	0.00770	0.00000	0.00000	0.00020	0.00120	0.017010	
	12.5	0.02585	0.03995	0.03610	0.00740	0.00650	0.00915	0.01275	0.01530	0.00010	0.00005	0.00110	0.00300	0.015725	
	17.5	0.01300	0.01305	0.02005	0.01190	0.00995	0.01145	0.00735	0.01695	0.00040	0.00045	0.00315	0.00620	0.11390	
	22.5	0.00415	0.00195	0.00625	0.01540	0.01390	0.00815	0.00120	0.00755	0.00140	0.00200	0.00675	0.00675	0.07545	
	27.5	0.00035	0.00010	0.00155	0.01330	0.01300	0.00285	0.00000	0.00095	0.00330	0.00500	0.00895	0.00305	0.05240	
	32.5	0.00000	0.00000	0.00010	0.00705	0.00715	0.00035	0.00000	0.00000	0.00565	0.00960	0.00730	0.00035	0.03755	
	37.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00195	0.00170	0.00000	0.00000	0.00000	0.00580	0.01235	0.00305	0.00000	0.02485	
	42.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00020	0.00005	0.00000	0.00000	0.00000	0.00330	0.00850	0.00060	0.00000	0.01265	
	47.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00090	0.00370	0.00000	0.00000	0.00460	
gesamt		0.17135	0.32450	0.13295	0.06325	0.05650	0.04240	0.04230	0.05205	0.02085	0.04165	0.03115	0.02085	0.99980	

Zone	TFO in °C	Schadenssumme 108 %, das entspricht 90 % der Summenhäufigkeitsverteilung													
		2	ncT01	ncT02	ncT03	ncT04	ncT05	ncT06	ncT07	ncT08	ncT09	ncT10	ncT11	ncT12	gesamt
	-12.5	0.00000	0.00115	0.00065	0.00000	0.00000	0.00000	0.00010	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00190	
	-7.5	0.00245	0.02330	0.00320	0.00000	0.00000	0.00015	0.00080	0.00005	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.02995	
	-2.5	0.02265	0.07800	0.00895	0.00035	0.00010	0.00080	0.00275	0.00040	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.11400	
	2.5	0.05485	0.09715	0.01725	0.00125	0.00075	0.00260	0.00595	0.00190	0.00000	0.00000	0.00000	0.00020	0.18190	
	7.5	0.04835	0.07300	0.03140	0.00355	0.00250	0.00555	0.00945	0.00585	0.00000	0.00000	0.00020	0.00080	0.18065	
	12.5	0.03100	0.04950	0.03540	0.00655	0.00585	0.00885	0.01355	0.01210	0.00005	0.00005	0.00075	0.00230	0.16595	
	17.5	0.01665	0.01660	0.02095	0.01140	0.00975	0.01190	0.00915	0.01485	0.00030	0.00035	0.00245	0.00485	0.11920	
	22.5	0.00515	0.00295	0.00665	0.01500	0.01365	0.00950	0.00215	0.00785	0.00100	0.00135	0.00540	0.00600	0.07665	
	27.5	0.00045	0.00030	0.00175	0.01360	0.01435	0.00385	0.00000	0.00130	0.00270	0.00400	0.00765	0.00305	0.05300	
	32.5	0.00000	0.00000	0.00020	0.00760	0.00845	0.00075	0.00000	0.00000	0.00455	0.00795	0.00665	0.00045	0.03660	
	37.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00220	0.00290	0.00000	0.00000	0.00000	0.00540	0.01060	0.00295	0.00000	0.02405	
	42.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00020	0.00015	0.00000	0.00000	0.00000	0.00300	0.00810	0.00060	0.00000	0.01205	
	47.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00075	0.00315	0.00000	0.00000	0.00390	
gesamt		0.18155	0.34195	0.12640	0.06170	0.05845	0.04395	0.04390	0.04430	0.01775	0.03555	0.02665	0.01765	0.99980	

Zone 3

Zone	TFO in °C	Schadenssumme 129 %, das entspricht 75 % der Summenhäufigkeitsverteilung													gesamt		
		3	ncT01	ncT02	ncT03	ncT04	ncT05	ncT06	ncT07	ncT08	ncT09	ncT10	ncT11	ncT12			
	-12.5	0.00000	0.00150	0.00140	0.00000	0.00000	0.00000	0.00015	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00305
	-7.5	0.00145	0.01935	0.00425	0.00005	0.00000	0.00025	0.00135	0.00010	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.02680
	-2.5	0.01685	0.06875	0.01070	0.00055	0.00015	0.00135	0.00315	0.00070	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00005	0.10225
	2.5	0.04605	0.08970	0.01900	0.00175	0.00125	0.00305	0.00650	0.00310	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00025	0.17070	
	7.5	0.04480	0.06625	0.03095	0.00400	0.00340	0.00595	0.00915	0.00745	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00025	0.00125	0.17345	
	12.5	0.02915	0.04565	0.03965	0.00740	0.00615	0.00860	0.01245	0.01500	0.00005	0.00005	0.00005	0.00120	0.00290	0.16825		
	17.5	0.01520	0.01635	0.02405	0.01135	0.01015	0.01110	0.00905	0.01870	0.00045	0.00060	0.00295	0.00595	0.12590			
	22.5	0.00535	0.00270	0.00755	0.01535	0.01260	0.00925	0.00165	0.00960	0.00135	0.00195	0.00650	0.00750	0.08135			
	27.5	0.00065	0.00020	0.00205	0.01445	0.01390	0.00350	0.00005	0.00120	0.00310	0.00460	0.00390	0.05700				
	32.5	0.00000	0.00000	0.00020	0.00835	0.00830	0.00050	0.00000	0.00005	0.00560	0.00950	0.00050	0.04125				
	37.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00250	0.00205	0.00000	0.00000	0.00000	0.00635	0.01270	0.00395	0.02755				
	42.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00030	0.00015	0.00000	0.00000	0.00000	0.00415	0.01035	0.00085	0.01580				
	47.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00125	0.00500	0.00005	0.00630				
gesamt		0.15950	0.31045	0.13980	0.06605	0.05810	0.04355	0.04350	0.05590	0.02230	0.04475	0.03345	0.02230	0.99965			

Zone	TFO in °C	Schadenssumme 134 %, das entspricht 90 % der Summenhäufigkeitsverteilung													gesamt	
		3	ncT01	ncT02	ncT03	ncT04	ncT05	ncT06	ncT07	ncT08	ncT09	ncT10	ncT11	ncT12		
	-12.5	0.00000	0.00057	0.00030	0.00000	0.00000	0.00000	0.00003	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00090
	-7.5	0.00107	0.01210	0.00150	0.00000	0.00000	0.00010	0.00037	0.00007	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.01520
	-2.5	0.01403	0.05510	0.00520	0.00013	0.00003	0.00037	0.00137	0.00023	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.07647
	2.5	0.04360	0.09487	0.01207	0.00067	0.00037	0.00140	0.00357	0.00120	0.00000	0.00000	0.00000	0.00010	0.15783		
	7.5	0.05917	0.09177	0.02437	0.00193	0.00130	0.00343	0.00747	0.00407	0.00000	0.00000	0.00010	0.00050	0.19410		
	12.5	0.04130	0.06113	0.03723	0.00453	0.00337	0.00667	0.01143	0.01010	0.00000	0.00007	0.00050	0.17793			
	17.5	0.02220	0.03407	0.02900	0.00853	0.00723	0.01043	0.01323	0.01410	0.00017	0.00017	0.00160	0.14483			
	22.5	0.01033	0.00713	0.00760	0.01397	0.01110	0.01203	0.00530	0.00850	0.00060	0.00083	0.00423	0.08737			
	27.5	0.00227	0.00090	0.00177	0.01563	0.01540	0.00693	0.00027	0.00140	0.00197	0.00273	0.00710	0.05963			
	32.5	0.00003	0.00000	0.00013	0.01017	0.01263	0.00163	0.00000	0.00000	0.00403	0.00643	0.00650	0.04210			
	37.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00300	0.00543	0.00007	0.00000	0.00000	0.00520	0.01017	0.00303	0.02690			
	42.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00033	0.00050	0.00000	0.00000	0.00000	0.00300	0.00787	0.00070	0.01240			
	47.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00090	0.00347	0.00003	0.00440			
gesamt		0.19400	0.35763	0.11917	0.05890	0.05737	0.04307	0.04303	0.03967	0.01587	0.03173	0.02380	0.01583	1.00007		

Zone 4

Zone	TFO in °C	Schadenssumme 162 %, das entspricht 75 % der Summenhäufigkeitsverteilung													gesamt		
		ncT01	ncT02	ncT03	ncT04	ncT05	ncT06	ncT07	ncT08	ncT09	ncT10	ncT11	ncT12				
	-12.5	0.00004	0.00142	0.00048	0.00000	0.00000	0.00000	0.00008	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00202
	-7.5	0.00114	0.01040	0.00184	0.00000	0.00000	0.00008	0.00044	0.00004	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.01394
	-2.5	0.01158	0.05144	0.00620	0.00020	0.00008	0.00046	0.00170	0.00036	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.07202
	2.5	0.04104	0.09480	0.01432	0.00076	0.00044	0.00166	0.00412	0.00192	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00014	0.00000	0.15920
	7.5	0.05282	0.08260	0.02524	0.00228	0.00162	0.00388	0.00740	0.00572	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00016	0.00076	0.00000	0.18248
	12.5	0.03956	0.05540	0.04066	0.00510	0.00386	0.00676	0.01100	0.01328	0.00002	0.00002	0.00002	0.00002	0.00074	0.00226	0.00000	0.17866
	17.5	0.02090	0.02648	0.02888	0.00894	0.00750	0.00990	0.01126	0.01880	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00218	0.00518	0.00000	0.14050
	22.5	0.00904	0.00496	0.00956	0.01394	0.01090	0.01040	0.00340	0.01128	0.00090	0.00090	0.00090	0.00090	0.00542	0.00756	0.00000	0.08856
	27.5	0.00174	0.00048	0.00266	0.01552	0.01376	0.00526	0.00014	0.00208	0.00246	0.00246	0.00246	0.00246	0.00908	0.00460	0.00000	0.06142
	32.5	0.00002	0.00000	0.00032	0.01026	0.01040	0.00106	0.00000	0.00004	0.00506	0.00506	0.00506	0.00506	0.00870	0.00084	0.00000	0.04470
	37.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00344	0.00382	0.00002	0.00000	0.00000	0.00658	0.00658	0.00658	0.00658	0.00450	0.00000	0.00000	0.03098
	42.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00052	0.00034	0.00000	0.00000	0.00000	0.00436	0.00436	0.00436	0.00436	0.00128	0.00000	0.00000	0.01738
	47.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00176	0.00176	0.00176	0.00176	0.00008	0.00000	0.00000	0.00804
gesamt		0.17788	0.32798	0.13016	0.06096	0.05272	0.03948	0.03954	0.05352	0.02138	0.04280	0.03214	0.02134	0.03345	0.02225	0.09990	0.99990

Zone	TFO in °C	Schadenssumme 165 %, das entspricht 90 % der Summenhäufigkeitsverteilung													gesamt		
		ncT01	ncT02	ncT03	ncT04	ncT05	ncT06	ncT07	ncT08	ncT09	ncT10	ncT11	ncT12				
	-12.5	0.00000	0.00123	0.00060	0.00000	0.00000	0.00000	0.00008	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00190
	-7.5	0.00100	0.01148	0.00200	0.00000	0.00000	0.00008	0.00058	0.00003	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.01515
	-2.5	0.01175	0.05175	0.00713	0.00023	0.00005	0.00053	0.00183	0.00035	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.07360
	2.5	0.03925	0.09143	0.01553	0.00083	0.00055	0.00180	0.00470	0.00230	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00013	0.00088	0.00000	0.15650
	7.5	0.05108	0.07943	0.02590	0.00253	0.00170	0.00438	0.00755	0.00620	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00013	0.00088	0.00000	0.17975
	12.5	0.03738	0.05420	0.04123	0.00553	0.00445	0.00693	0.01113	0.01375	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00080	0.00245	0.00000	0.17783
	17.5	0.02018	0.02498	0.02948	0.00923	0.00780	0.01010	0.01120	0.01950	0.00025	0.00028	0.00248	0.00248	0.00560	0.00530	0.00000	0.14075
	22.5	0.00843	0.00465	0.00945	0.01428	0.01095	0.01050	0.00318	0.01165	0.00110	0.00143	0.00560	0.00560	0.00785	0.00785	0.00000	0.08905
	27.5	0.00145	0.00048	0.00263	0.01578	0.01420	0.00498	0.00010	0.00198	0.00253	0.00388	0.00920	0.00920	0.00483	0.00483	0.00000	0.06200
	32.5	0.00005	0.00000	0.00030	0.01013	0.01028	0.00095	0.00000	0.00005	0.00505	0.00810	0.00910	0.00910	0.00083	0.00083	0.00000	0.04483
	37.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00350	0.00345	0.00000	0.00000	0.00000	0.00680	0.01263	0.00468	0.00468	0.00000	0.00000	0.00000	0.03105
	42.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00055	0.00028	0.00000	0.00000	0.00000	0.00458	0.01143	0.00138	0.00138	0.00000	0.00000	0.00000	0.01820
	47.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00193	0.00688	0.00010	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00890
gesamt		0.17055	0.31960	0.13423	0.06255	0.05370	0.04023	0.04033	0.05580	0.02223	0.04460	0.03345	0.02225	0.03345	0.02225	0.09950	0.99950

Zone 5

Zone	Schadenssumme 189 %, das entspricht 75 % der Summenhäufigkeitsverteilung													
	5	ncT01	ncT02	ncT03	ncT04	ncT05	ncT06	ncT07	ncT08	ncT09	ncT10	ncT11	ncT12	gesamt
TFO in °C														
-12.5	0.00005	0.00158	0.00068	0.00000	0.00000	0.00000	0.00010	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00240
-7.5	0.00100	0.01003	0.00203	0.00000	0.00000	0.00013	0.00055	0.00008	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.01380
-2.5	0.01058	0.04995	0.00720	0.00028	0.00008	0.00055	0.00190	0.00055	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00003	0.07110
2.5	0.03813	0.09133	0.01555	0.00085	0.00058	0.00178	0.00455	0.00240	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00023	0.15538
7.5	0.04995	0.07535	0.02573	0.00245	0.00160	0.00428	0.00743	0.00678	0.00000	0.00000	0.00000	0.00023	0.00095	0.17473
12.5	0.03643	0.04833	0.04033	0.00553	0.00420	0.00685	0.00985	0.01508	0.00008	0.00000	0.00010	0.00085	0.00265	0.17025
17.5	0.01898	0.02495	0.03218	0.00915	0.00795	0.00900	0.00983	0.02193	0.00028	0.00035	0.00263	0.00578	0.00578	0.14298
22.5	0.00825	0.00503	0.01095	0.01328	0.01023	0.00920	0.00353	0.01335	0.00115	0.00138	0.00605	0.00875	0.00875	0.09113
27.5	0.00183	0.00050	0.00323	0.01553	0.01213	0.00493	0.00013	0.00243	0.00265	0.00415	0.01023	0.00555	0.00555	0.06325
32.5	0.00008	0.00000	0.00043	0.01098	0.00945	0.00110	0.00000	0.00005	0.00568	0.00870	0.01020	0.00108	0.00108	0.04773
37.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00415	0.00390	0.00003	0.00000	0.00000	0.00738	0.01408	0.00558	0.00000	0.00000	0.03510
42.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00068	0.00030	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.01305	0.00160	0.00000	0.00000	0.02113
47.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00235	0.00828	0.00018	0.00000	0.00000	0.01080
gesamt	0.16525	0.30703	0.13828	0.06285	0.05040	0.03783	0.03785	0.06263	0.02505	0.05008	0.03753	0.02500	0.02500	0.99975

Zone	Schadenssumme 200 %, das entspricht 90 % der Summenhäufigkeitsverteilung													
	5	ncT01	ncT02	ncT03	ncT04	ncT05	ncT06	ncT07	ncT08	ncT09	ncT10	ncT11	ncT12	gesamt
TFO in °C														
-12.5	0.00007	0.00187	0.00070	0.00000	0.00000	0.00000	0.00010	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00273
-7.5	0.00143	0.01183	0.00207	0.00000	0.00000	0.00013	0.00050	0.00007	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.01603
-2.5	0.01297	0.05510	0.00723	0.00027	0.00010	0.00050	0.00193	0.00053	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00003	0.07867
2.5	0.04243	0.09380	0.01460	0.00083	0.00053	0.00177	0.00453	0.00207	0.00000	0.00000	0.00000	0.00003	0.00023	0.16083
7.5	0.05067	0.07287	0.02490	0.00253	0.00163	0.00420	0.00717	0.00623	0.00000	0.00000	0.00000	0.00023	0.00080	0.17123
12.5	0.03467	0.04593	0.03910	0.00530	0.00423	0.00663	0.00983	0.01410	0.00007	0.00007	0.00073	0.00243	0.00547	0.16310
17.5	0.01717	0.02377	0.03207	0.00870	0.00773	0.00880	0.00987	0.02117	0.00027	0.00040	0.00243	0.00547	0.00547	0.13783
22.5	0.00723	0.00517	0.01190	0.01300	0.00963	0.00930	0.00353	0.01410	0.00093	0.00127	0.00570	0.00850	0.00850	0.09027
27.5	0.00150	0.00057	0.00340	0.01523	0.01223	0.00507	0.00020	0.00300	0.00267	0.00383	0.00983	0.00570	0.00570	0.06323
32.5	0.00003	0.00000	0.00053	0.01113	0.00980	0.00117	0.00000	0.00010	0.00527	0.00853	0.01007	0.00133	0.00133	0.04797
37.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00437	0.00400	0.00007	0.00000	0.00000	0.00720	0.01340	0.00577	0.00003	0.00003	0.03483
42.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00083	0.00047	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.01273	0.00187	0.00000	0.00000	0.02133
47.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00003	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00263	0.00893	0.00020	0.00000	0.00000	0.01180
gesamt	0.16817	0.31090	0.13650	0.06223	0.05037	0.03763	0.03767	0.06137	0.02447	0.04917	0.03687	0.02453	0.02453	0.99987

Zone 6

Zone	TFO in °C	Schadenssumme 237 %, das entspricht 75 % der Summenhäufigkeitsverteilung													gesamt		
		6	ncT01	ncT02	ncT03	ncT04	ncT05	ncT06	ncT07	ncT08	ncT09	ncT10	ncT11	ncT12			
	-12.5	0.00000	0.00035	0.00040	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00075
	-7.5	0.00040	0.00730	0.00230	0.00000	0.00000	0.00005	0.00055	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.01060
	-2.5	0.00720	0.04375	0.00770	0.00015	0.00055	0.00225	0.00500	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.06195
	2.5	0.03190	0.08425	0.01605	0.00105	0.00220	0.00500	0.00235	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00010	0.14350
	7.5	0.04490	0.07465	0.02570	0.00290	0.00470	0.00830	0.00615	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00010	0.00095	0.00000	0.17050	
	12.5	0.03560	0.04950	0.03995	0.00595	0.00755	0.00995	0.01360	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00085	0.00235	0.00000	0.17010	
	17.5	0.01990	0.02635	0.03500	0.00950	0.00870	0.01060	0.02185	0.00025	0.00025	0.00025	0.00235	0.00515	0.00000	0.14925		
	22.5	0.00885	0.00560	0.01405	0.01345	0.01115	0.00390	0.01655	0.00100	0.00145	0.00145	0.00550	0.00865	0.00000	0.09985		
	27.5	0.00180	0.00065	0.00430	0.01540	0.01230	0.00535	0.00025	0.00410	0.00245	0.00375	0.00970	0.00695	0.00000	0.06700		
	32.5	0.00010	0.00000	0.00070	0.01190	0.01015	0.00125	0.00000	0.00015	0.00510	0.00775	0.01085	0.00175	0.00000	0.04970		
	37.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00530	0.00405	0.00005	0.00000	0.00000	0.00725	0.01310	0.00700	0.00005	0.00000	0.03680		
	42.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00110	0.00050	0.00000	0.00000	0.00000	0.00655	0.01430	0.00240	0.00000	0.00000	0.02485		
	47.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00005	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00345	0.01145	0.00030	0.00000	0.00000	0.01525		
gesamt		0.15065	0.29240	0.14615	0.06675	0.05440	0.04075	0.04080	0.06510	0.02605	0.05205	0.03905	0.02595	0.03905	0.02595	1.00010	

Zone	TFO in °C	Schadenssumme 246 %, das entspricht 90 % der Summenhäufigkeitsverteilung													gesamt	
		6	ncT01	ncT02	ncT03	ncT04	ncT05	ncT06	ncT07	ncT08	ncT09	ncT10	ncT11	ncT12		
	-12.5	0.00000	0.00080	0.00050	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00130
	-7.5	0.00030	0.00600	0.00160	0.00000	0.00000	0.00010	0.00040	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00840
	-2.5	0.00620	0.04290	0.00700	0.00010	0.00040	0.00190	0.00440	0.00030	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.05880
	2.5	0.03230	0.08500	0.01500	0.00070	0.00030	0.00180	0.00440	0.00230	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00010	0.14190
	7.5	0.04900	0.07810	0.02480	0.00240	0.00170	0.00420	0.00730	0.00640	0.00000	0.00000	0.00010	0.00090	0.00000	0.17490	
	12.5	0.03860	0.04790	0.03830	0.00520	0.00400	0.00670	0.00940	0.01460	0.00000	0.00000	0.00080	0.00240	0.00000	0.16790	
	17.5	0.01980	0.02630	0.03680	0.00890	0.00820	0.00870	0.00950	0.02230	0.00030	0.00020	0.00240	0.00560	0.00000	0.14900	
	22.5	0.00820	0.00620	0.01470	0.01280	0.00970	0.00900	0.00440	0.01740	0.00100	0.00140	0.00570	0.00900	0.00000	0.09950	
	27.5	0.00200	0.00070	0.00440	0.01530	0.01200	0.00540	0.00030	0.00410	0.00240	0.00370	0.01020	0.00700	0.00000	0.06750	
	32.5	0.00010	0.00000	0.00070	0.01200	0.00930	0.00140	0.00000	0.00010	0.00560	0.00830	0.01130	0.00180	0.00000	0.05060	
	37.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00570	0.00450	0.00010	0.00000	0.00000	0.00740	0.01400	0.00720	0.00000	0.00000	0.03890	
	42.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00130	0.00050	0.00000	0.00000	0.00000	0.00660	0.01420	0.00250	0.00000	0.00000	0.02510	
	47.5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00380	0.01240	0.00030	0.00000	0.00000	0.01650	
gesamt		0.15650	0.29390	0.14380	0.06440	0.05020	0.03780	0.03760	0.06750	0.02710	0.05420	0.04050	0.02680	0.04050	0.02680	1.00030

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2016

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

Weise, Schrang € 19,50

S 94: Beanspruchung und Entfernbarkeit temporärer Fahrbahnmarkierung

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

S 95: Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel

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

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

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

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

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

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

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

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

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

S 100: Probekörperherstellung für performance-basierte Asphaltprüfungen

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

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

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

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

Kellermann-Kinner, Bürger, Marks € 16,50

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

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

S 104: Nachhaltige und effiziente Sanierung von Schlaglöchern

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

2017

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

Lypp, Birle, Heyer, Vogt € 20,50

S 106: Zusammenhang zwischen Bitumenchemie und straßenbautechnischen Eigenschaften

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

S 107: Baustoffe für standfeste Bankette

Koukoulidou, Birle, Heyer € 15,50

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

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

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

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

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

Lin, Linnemann, Vollpracht € 16,50

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

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

S 112: Nachweis der flächendeckenden Verdichtungskontrolle von Asphalt

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

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

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

S 114: Studie zum Anwendungspotenzial von werksgemischtem Kaltbauweisen – Asphalt

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

2018

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

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

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

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

S 117: Bauzeitenverkürzung durch optimierten Asphalteinbau

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

- S 118: Untersuchung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Asphaltbinderkonzepte**
Renken, Wistuba
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 119: Grundfragen des straßenrechtlichen Nutzungsregimes – Straßenrecht im Zeichen des Klimawandels**
Durner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 120: Temperaturuntersuchungen am und im Mobile Load Simulator MLS30 – Analyse des Temperatureinflusses während eines Dauerversuchs für weitere Versuchsprogramme**
Wacker, Scherkenbach, Jansen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 121: Repräsentative Ermittlung der performance-relevanten Asphalteeigenschaften als Grundlage neuer Vertragsbedingungen**
Roos, Plachkova-Dzhurova, Grafmüller, Milch, Hase, Schindler Schröter, Zumsande, Wörner, Kazakova, Patzak
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 122: Ermittlung neuer Zuordnungswerte zur Einteilung bindiger Böden in Fest- und Lockergesteine**
Möller, Bundschuh, Birlé, Heyer € 18,50
- S 123: Bindemitteldesign für Asphaltstraßen – Definition eines chemisch-rheologischen Anforderungsprofils**
Stephan, Weigel € 19,00
- S 124: Dauerhafte Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung aktueller ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte**
Müller, Schulte-Schrepping, Benra, Ludwig, Breitenbücher
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 125: Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie**
Radenberg, Manke, Steeb, Jänicke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 126: Bau und Messungen an einer Versuchsstrecke mit optimierter Kiestragschicht unter der Betondecke**
Freudenstein, Neudert
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 131: Einfluss viskositätsverändernder Zusätze auf den Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe**
Radenberg, Gehrke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 132: Temperierte Straße – Untersuchungen zur Realisierung eines Demonstrators auf dem duraBAST**
Oeser, Carreño, Renken, Kemper, Kneer, Höfler, Al-Sibai, Hess, Gouya, zu Dohna, Steins € 15,50
- S 133: Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw – Stufe 2: Nacherhebung**
Wolf, Uhlig
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 134: Temperatureinfluss auf die Sichtbarkeit von Substanzmerkmalen (Oberfläche)**
Skakuj, Balck, Beckedahl, Schrödter, Koppers, Ramadan
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 135: Eignung von Boden-Bindemittel-Gemischen als Baustoff für den Hinterfüllbereich von Bauwerken**
Botor, Tost € 15,50
- S 136: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Asphalt**
Augter, Kayser € 16,50

2019

- S 127: Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton**
Villaret, Kiehne, Riwe, Villaret
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 128: Reduzierung der Schwindverformungen des Straßenbetons durch den Einsatz neuartiger Schwindreduzierer**
Breitenbücher, Penttilä, Schulte-Schrepping
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 129: Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt**
Hase, Beyersdorf, Hase, Rademacher
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 130: Entwicklung einer Prüfsystematik für Porous Mastic Asphalt (PMA)**
Radenberg, Holzwarth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-63

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

www.schuenemann-verlag.de

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