

KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton – Verteilungsfunktion und Extremwerte

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 155

bast

KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton – Verteilungsfunktion und Extremwerte

von

Stephan Villaret
Gisela Augter
Sascha Kayser
Axel Riwe

Villaret Ingenieurgesellschaft mbH
Hoppegarten

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 155

bast

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

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

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

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

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

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

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 08.0254
KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton –
Verteilungsfunktion und Extremwerte

Fachbetreuung

Dirk Jansen

Referat

Dimensionierung und Straßenaufbau

Herausgeber

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

Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag

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

ISSN 0943-9323

ISBN 978-3-95606-601-6

Bergisch Gladbach, August 2021

Kurzfassung – Abstract

KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton – Verteilungsfunktion und Extremwerte

KiST-Zonen sind klimainduzierte Straßentemperaturzonen, die Deutschland in Zonen einteilen, in denen die dargestellte Größe ähnliche Werte annimmt. Bei den Größen, für die KiST-Zonen bestimmt werden, handelt es sich um Größen, die für die Dimensionierung und die Substanzbewertung des Oberbaus benötigt werden und deren räumliche Verteilung von Klimafaktoren dominiert wird.

Auf der Basis stündlicher meteorologischer Daten von 328 Messstationen des Deutschen Wetterdienstes der letzten 15 Jahre wurden Temperatursimulationen für typische Straßenbefestigungen mit Betondecke gerechnet. An 50 dieser Stationen sind die Temperaturverläufe in den Betondecken für unterschiedliche Deckendicken ermittelt worden. Für alle berechneten Temperaturverläufe wurden die Temperaturanteile berechnet, welche eine Plattenbiegung (mechanisch äquivalenter Temperaturgradient) bzw. Plattendehnung (mittlere Plattentemperatur) bewirken.

Auf der Grundlage statistischer Auswertungen wurden die maßgebenden Temperaturgradienten für die Dimensionierung und Substanzbewertung mit ihren Häufigkeitsverteilungen für unterschiedliche Deckendicken ermittelt. Jeweils ein maßgebender Gradient und ein Verteilungsparameter ist dann für Deutschland auf ein 1 x 1 km – Raster umgerechnet worden.

Im Ergebnis entstanden eine KiST-Zonen-Karte für die semiprobabilistische und die probabilistische Verfahrensweise, die als Entscheidungsgrundlage für die RDO Beton und RSO Beton vorliegen. Darüber hinaus wurde ein Vorschlag für die Änderung und Ergänzung der derzeit gültigen RDO Beton 09 mit ihrer semiprobabilistischen Verfahrensweise aufgestellt.

KiST-zones-map RDO and RSO Beton – distribution function and extreme values

KiST-zones are climate-induced road temperature zones that divide Germany into zones in which the size shown assumes similar values. The parameters for which KiST-zones are determined are those required for the dimensioning and substance evaluation of the superstructure and whose geographical distribution is dominated by climate factors.

On the basis of hourly meteorological data from 328 weather stations of the Deutscher Wetterdienst (Germany's National Meteorological Service) of the last 15 years, temperature simulations for typical road pavements with concrete pavement were calculated. The temperature curves in the concrete slabs for different slab thicknesses were determined at 50 weather stations. For all calculated temperature curves, the temperature components were defined and calculated which cause slab bending (mechanically equivalent temperature gradient) or slab expansion (mean slab temperature).

On the basis of statistical evaluations, the decisive temperature gradients for dimensioning and substance evaluation with their frequency distributions were determined for different slab thicknesses and extrapolated to an evenly spaced grid.

As a result, a KiST-zone-map was developed for the semiprobabilistic and the probabilistic methods, which are available as a basis for decisions for RDO Beton and RSO Beton. In addition, a suggestion for the modification and addition of the currently valid RDO Beton 09 with its semiprobabilistic procedure was prepared.

Summary

KiST-zones-map RDO and RSO Beton – distribution function and extreme values

1 Task

The relevant temperature gradients within a concrete pavement are dependent on the climatic environmental conditions and therefore assumes different values within Germany. These geographic differences were worked out according to the guidelines and then graphically displayed in maps.

The definition of the temperature gradient to be used for the dimensioning was revised. It is now calculated not only from the temperature difference of the slab edges (top and bottom), but derived from a mechanically equivalent linear temperature profile.

For the temperature gradients suitable probabilistic distribution functions were determined and dimensioning relevant values were calculated.

In addition, a procedure was developed and described with which it is possible to provide the mean slab temperature as the climatic input variable for probabilistic calculations in addition to the temperature gradient. For this purpose a two-dimensional distribution function was determined, which describes the probability for the simultaneous occurrence of certain gradient values and mean slab temperatures.

2 Type and scope of investigations

The temperature gradients and the mean slab temperatures were derived from the vertical temperature curve in the concrete slab. A modified calculation model from [WEL 2008, KAY 2007] was used to calculate these temperature gradients from the climate data.

In order to differentiate the dimensioning-relevant temperature gradients and parameters of the dis-

tribution functions geographically sufficiently, these temperature calculations were carried out for more than 300 different locations in Germany at which the German Meteorological Service (DWD) records the meteorological observation values necessary for calculations. The data basis of the project refers to a period of 15 years.

The temperatures calculated using the empirical-physical simulation model at different depth positions in the concrete surface were converted into a mechanically equivalent linear temperature curve. The increase of this temperature curve corresponds to the temperature gradient to be used for the dimensioning (mechanically equivalent gradient – MÄG).

The exceedance frequencies of the decisive temperature gradients according to the procedure of RDO Beton 09 [FGSV09] currently refer to the frequency of all positive temperature gradients. Since the share of positive temperature gradients in all temperature gradients – they are also negative – can be represented very differently throughout Germany, the safety level resulting from the above mentioned exceeding probabilities is also very different. In order to guarantee the same safety in the dimensioning procedure related to the load case „temperature“, the exceedance probabilities were related to the totality of all temperature gradients (positive and negative) within the framework of this R&D project and quantitatively determined accordingly. Furthermore, the respective parameters of the momentary and extreme value distribution were calculated from the location-related temperature gradients.

Since the decisive temperature gradients as well as the gradient distributions are strongly influenced by the concrete slab thickness, this influence had to be considered in form of a gradient correction function depending on the concrete slab thickness. For the development of this function, temperature gradients for 50 selected stations as well as for five different concrete slab thicknesses were calculated and analysed.

Finally, the results of the gradient analysis, which were then available for more than 300 stations throughout Germany, were transferred to grid points with a grid size of 1x1km and graphically displayed in maps. These are a detection-dependent exceedance frequency and a parameter of the instantaneous value distribution.

3 Examination results

3.1 Distribution functions

As a result of the statistical evaluation of the calculated gradient values, the 3-parametric logarithmic normal distribution could be identified as a suitable function to describe the scattering of the temperature gradients.

The parameters of the distribution functions were determined for all stations.

3.2 Slab thickness function

A slab thickness function could be determined on the basis of the gradient values for different slab thicknesses calculated for 50 stations. This function makes it possible to determine the temperature gradient for any slab thickness based on a reference value. The reference value is the gradient value for a 30cm thick concrete slab.

Similarly, functions were defined which allow the calculation of the distribution parameters of the gradient values as a function of the slab thickness. Again, the parameter values for the 30cm thick slab serve as reference values.

3.3 Extreme value distribution

The extreme values of a log normal distribution lie in the interesting area of an extreme value distribution of type I, i.e. a Gumbel distribution. For probabilistic dimensioning, their parameters have been determined directly from the parameters of the log normal distribution so far. A detailed mathematical analysis has shown that this procedure calculates too large values for the scale parameters. It is therefore not possible to derive the extreme value distribution from the distribution of the instantaneous values.

As a result of the extreme value analysis, it was found that the extreme values of the mechanically equivalent temperature gradient are very likely to be described by an extreme value distribution of type III.

Comparative calculations have shown that using the Gumbel distribution results are almost identical. The requirement is that the Gumbel parameters are not calculated from the instantaneous value distribution, but from random sample values.

3.4 KiST-zones

KiST-zones are climate-induced pavement temperature zones. They divide Germany into zones in which the variables shown assumes similar values. The variables for which KiST-zones are to be determined are the mechanically equivalent temperature gradient (MÄG) and the mean slab temperature. Their spatial distribution of the mean slab temperature is determined to a greater extent by the temperature climate than that of the MÄG.

This is due to the fact that the temperature curve in the slab as a whole is determined by the temperature climate and the typical characteristics of the temperature climate (a pronounced annual cycle and a clear dependence on the height of a location) are strongly dampened in the calculation of the MÄG. This leads to the fact that the estimated values from the log normal distribution of the MÄG cannot be reproduced as exactly in the grid as estimated values from the distribution of the mean slab temperature, because in the calculation of grid values for climate-induced quantities the connection of these quantities with the spatial distribution of the climate factors is in the foreground.

3.4.1 Decisive exceeding probability

Of the three decisive excess probabilities, only one must be converted into a KiST-zone-map, since these three probabilities can be easily converted into each other. A map for the 92% quantile value has been produced.

An implementation of the requirements from dimensioning results is not possible and would also not be practicable, because a lot of zones would develop. Therefore, the zone width is determined on basis of the mapping quality of the site values on the grid: It is 1.2K/m. There are 5 zones. You can see the relief and the influence of the coast. In addition, the particularly warm Upper Rhine Valley and its side valleys as well as the valleys influenced by the Föhn reaching from the edge of the Alps to the Danube stand out.

3.4.2 Parameter of distribution

The log normal distribution of the MÄG is required for probabilistic dimensioning. However, this method is not yet ready for practice. Therefore, no zone boundaries or widths can yet be determined.

However, it can be assumed that the approximation of the distribution of the instantaneous values of the MÄG will be maintained by a log normal distribution. Thus nothing will change in the distribution parameters determined in this project. Therefore, instead of raster data with KiST-zone numbers, a raster file with values of the scale parameter of the MÄG, calculated to an accuracy of 0.1K/m, is provided. The other two parameters can be calculated from the scale parameter.

The data base generated by simulation calculations within the framework of the research project is also available for future scientific work.

3.4.3 Mean slab temperature und Gumbel distribution

The distribution of the mean slab temperature was determined only exemplarily for 3 locations.

Conceptual considerations regarding probabilistic dimensioning method are aimed at completely dispensing with the use of extreme value distributions and instead using a damage hypothesis, similar to the method used for asphalt.

It should therefore be noted that the definition of KiST-zones for the Gumbel distribution does not make sense because there will be no practical application.

4 Conclusions and recommendations

Essential components of the results obtained can be transferred directly into the dimensioning practice.

The factor m_{T3} in the dimensioning procedure has been set at 1.0 in any case so far. The results of the research project now allow a differentiated allocation of numerical values which take the local conditions into account in an appropriate way. It is proposed to incorporate a KiST-zone-map into the pavement design guide, which allows the user to find the relevant zone for the specific construction project. The m_{T3} factor is assigned via a table. The dimensioning procedure therefore is changed only insignificantly. The dimensioning, however, is more target-oriented and oriented to the local conditions.

For probabilistic dimensioning, an analogous procedure is possible as soon as the procedure has been completed.

Inhalt

Abkürzungen	9	6.2.4 Vergleich mit der bisherigen Berechnung des fühlbaren Wärmefflusses.	25
Symbole	9	6.3 Abflussmodell	26
1 Einleitung	11	6.4 Kurzwelliges Reflexionsverhalten der Fahrbahn	26
2 Zielstellung	11	6.5 Vergleich von Modellergebnissen.	27
3 Vorgehensweise	12	6.5.1 Mit Messwerten	27
4 Datengrundlage	13	6.5.2 Räumliche Verteilung	29
4.1 Zeitraum	13	7 Parametrisierung	30
4.2 Meteorologische Daten	13	7.1 Konstruktionsaufbau	30
4.3 Standorte für Regressions- rechnungen	14	7.2 Thermische Materialeigenschaften ...	30
5 Temperatursimulation	16	7.3 Reflexionseigenschaften	32
5.1 Modellierung der Straßen- befestigung	16	7.4 Sonstige Berechnungsparameter.	34
5.2 Berechnungsansatz	16	8 Relevante klimainduzierte Temperaturzustände	35
5.2.1 Terme der Bilanzgleichung	16	9 Berechnung und Auswertung der Temperaturgradienten	38
5.2.2 Berechnung der Temperaturen in der Befestigung	17	9.1 Lognormalverteilung	38
5.3 Randbedingungen	18	9.2 Maßgebende Temperatur- gradienten	40
5.3.1 Starttemperaturprofil	18	9.2.1 Anpassung der Überschreitungs- wahrscheinlichkeiten	40
5.3.2 Temperaturgang an der System- untergrenze	18	9.3 Übertragung der Ergebnisse auf andere Deckendicken	42
5.4 Eingangsgrößen	18	9.3.1 Verteilungsparameter und maß- gebende Temperaturgradienten	42
6 Modellmodifikationen	19	9.3.2 Betondeckendickenfunktion	42
6.1 Langwellige Gegenstrahlung	19	9.4 Extremwertanalyse des mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten	46
6.2 Wärmeübergangskoeffizient	19	9.4.1 Grundlagen	46
6.2.1 Größenordnung des Wärmeüber- gangskoeffizienten	20	9.4.2 Datenaufbereitung	48
6.2.2 Größenordnung der einzelnen Bilanzterme	20	9.4.3 Teststationen	49
6.2.3 Bestimmung des Wärmeübergangs- koeffizienten aus GMA- und DWD- Messungen	21	9.4.4 Parametervergleich der Gumbel- verteilungen	51

9.4.5	Generalisierte Extremwertverteilungen	52	Literatur	93
9.4.6	Extremwertverteilung für die probabilistische Dimensionierung	59	Bilder	94
9.5	Gumbelverteilungen	59	Tabellen	99
9.5.1	Eignung der Gumbelverteilung für die rechnerische Dimensionierung	59	Die Anhänge zum Bericht sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter https://bast.opus.hbz-nrw.de abrufbar.	
9.5.2	Allgemeine Eigenschaften der Gumbelverteilung	60		
9.5.3	Berechnung der Gumbelparameter aus den Parameterwerten der zugrundeliegenden Verteilung der zufälligen Werte	61		
9.5.4	Berechnung der Gumbelparameter aus einer Stichprobe unter Verwendung von Schätzfunktionen	62		
9.5.5	Berechnung der Gumbelparameter unter der Benutzung von Niveau-kreuzungsraten	63		
9.5.6	Fazit	64		
9.6	Mittlere Plattentemperatur	64		
9.6.1	Bedeutung	64		
9.6.2	Vorgehensweise	65		
10	KiST-Zonen für die RDO und RSO Beton	69		
10.1	Einfluss der Klimafaktoren	69		
10.2	Semiprobabilistisches Verfahren	73		
10.3	Probabilistisches Verfahren	75		
10.4	Zonenbildung	77		
10.4.1	Einfluss der Regionalisierung	77		
10.4.2	92%-Quantil der Lognormalverteilung	79		
10.4.3	Skalen-Parameter der Lognormalverteilung	85		
10.4.4	Parameter der Gumbelverteilung	90		
11	Empfehlungen und Ausblick	90		
11.1	Empfehlungen zur Einbindung der Ergebnisse in die RDO Beton	90		
11.2	Ausblick	92		

Abkürzungen

BAB	Bundesautobahn
DWD	Deutscher Wetterdienst
EPM	empirisch-physikalisches Modell
EX	Extremwertverteilung
FBO	Fahrbahnoberfläche
FSS	Frostschuttschicht
GEV	generalisierte Extremwertverteilung
GMA	Glättemeldeanlage
GPV	generalisierte Paretoverteilung
GV	Gumbelverteilung
iid	independent identically distributed
KB	Konfidenzbereich
LNv	Lognormalverteilung
MÄG	mechanisch äquivalenter Temperaturgradient
POT	Peaks over Threshold
PP	Poisson-Punktprozess
RD	Raumdichte
RDO Asphalt	Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdecke
RDO Beton	Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen
RSO Beton	Richtlinien für die Bewertung der strukturellen Substanz von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen
SE	Standardfehler
STS	Schottertragschicht
sWK	spezifische Wärmekapazität
TLF	Temperaturleitfähigkeit
TPL	mittlere Plattentemperatur
UF	Umrechnungsfaktor

UTC coordinated Universal Time (koordinierte Weltzeit)

WKW Wiederkehrwert

WLF Wärmeleitfähigkeit

WÜK Wärmeübergangskoeffizient

Symbole

Materialkennwerte

α_l, α_k Absorptionskoeffizient für langwellige (l) und kurzwellige (k) Strahlung [-]

α Wärmeübergangskoeffizient [$W/m^2/K$]

λ_w Wärmeleitfähigkeit [$W/m/K$]

a_g Temperaturleitzahl [m^2/h]

ρ_A Raumdichte [kg/m^3]

c_p spezifische Wärmekapazität [$Ws/kg/K$]

α_T Wärmedehnzahl

E_c Elastizitätsmodul

Thermische und meteorologische Kenngrößen

q_G Globalstrahlung [W/m^2]

q_{AG} Atmosphärische Gegenstrahlung [W/m^2]

q_{FB} Abstrahlung der Fahrbahn [W/m^2]

q_H fühlbarer Wärmestrom [W/m^2]

q_L latenter Wärmestrom [W/m^2]

q_B Bodenwärmestrom [W/m^2]

ϵ_A atmosphärischer Emissionskoeffizient [-]

σ_B Stefan-Boltzmann-Konstante = $5,67 \cdot 10^{-8}$ [$W/m^2/K^4$]

N Bedeckungsgrad [Achtel]

L latente Verdunstungsenthalpie in Abhängigkeit von der Fahrbahnoberflächentemperatur in Wh/kg

V_{Pot} potentielle Verdunstung [$kg/m^2/h$]

BM_{H_2O} Benetzungswassermenge [mm]

ϑ	Temperatur [°C]	STE	Standardfehler (einer Anpassung oder einer Regression)
ϑ_{Luft}	Lufttemperatur [°C]	x_i	Stichprobenwerte
ϑ_{FBO}	Temperatur der Fahrbahnoberfläche [°C]	p	Quantil
$d\vartheta/dz$	Temperaturgradient [K/m]	1-p	Überschreitungswahrscheinlichkeit
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz [K]		
δ_T	mechanisch äquivalenter Temperaturgradient (MÄG)		
$\bar{\vartheta}$	mittlere Temperatur [°C]		

Sonstige Größen

Δz	Dickendifferenz, Subschichtdicke, Weginkrement [cm]
Δt	Zeitschritt, Zeitdifferenz [s]
T	Zeitraum
z	Tiefenposition [cm]
j	Index für die Subschicht
k	Index für den Zeitschritt
n	Anzahl F_N Normalkraft
h	Plattendicke
b	Breite
x_0	Lageparameter der LNV
σ_I	Formparameter der LNV
μ_I	Skalenparameter der LNV
μ	Lageparameter der GEV
β	Skalenparameter der GEV
ζ	Formparameter der GEV
u	Schwellenwert der GPV
σ_u	Skalenparameter der GPV
ζ	Formparameter der GPV
μ_{GV}	Lageparameter der GV
β_{GV}	Formparameter der GV
σ	Standardabweichung der Grundgesamtheit
s	Standardabweichung der Stichprobenwerte

1 Einleitung

Die Berechnungsverfahren nach den RDO Beton 09 [FGSV09] und den sich in Erstellung befindlichen RSO Beton benötigen die sich in der Betondecke einstellenden Temperaturverhältnisse, um den Belastungsfall „Temperatur“ rechnerisch abbilden zu können.

Die RDO Beton befinden sich derzeit sowohl in einer redaktionellen Überarbeitungsphase (kurzfristige Aktualisierung) als auch parallel in einer grundhaften Überarbeitung (langfristige Aktualisierung).

Die redaktionelle Überarbeitung der RDO Beton bezieht sich weiterhin auf die Verfahrensweise zur rechnerischen Dimensionierung, wie sie in der RDO Beton 09 [FGSV09] beschrieben ist. Gemäß dieser Verfahrensweise werden die dimensionierungsrelevanten Nachweise unter Verwendung entsprechender Temperaturgradienten geführt. In Abhängigkeit vom Nachweis sind dabei folgende Überschreitungswahrscheinlichkeiten definiert:

- quasidynamischer Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit → Verwendung des Temperaturgradienten, der mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,3 % überschritten wird (extreme Einzelast),
- quasidynamischer Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit → Verwendung des Temperaturgradienten, der mit einer Wahrscheinlichkeit von 10 % überschritten wird (extreme Einzellast),
- Ermüdungsnachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit → Verwendung des Temperaturgradienten, der mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % überschritten wird (extreme Einzelast).

Die Überschreitungshäufigkeiten beziehen sich dabei auf die Häufigkeit aller positiven Temperaturgradienten. Ein positiver Gradient liegt vor, wenn die Temperatur an der Oberseite der Betondecke größer ist als die Temperatur an der Unterseite der Betondecke.

In der grundhaften Überarbeitung der RDO Beton werden die Beanspruchungen künftig unter Verwendung der Finiten-Element-Methode ermittelt. Darüber hinaus wird das Dimensionierungskonzept in ein rein probabilistisches Verfahren überführt. Insbesondere das probabilistische Dimensionie-

rungskonzept erfordert Verteilungsfunktionen sowie Extremwertverteilungen der Temperaturgradienten als Eingangsgrößen.

2 Zielstellung

Das Forschungsprojekt soll zum einen die aktualisierten Temperatureingangsgrößen für die redaktionelle Überarbeitung der RDO Beton und zum anderen die notwendigen Informationen für die grundhafte Überarbeitung der RDO Beton sowie für die sich in Erstellung befindlichen [RSO Beton] bereitstellen.

Die maßgebenden Temperaturgradienten, sowie deren Momentanwert- und Extremwertverteilungen sind von den klimatischen Umgebungsbedingungen abhängig und nehmen damit innerhalb Deutschlands unterschiedliche Werte an. Diese geografischen Unterschiede sind zu erarbeiten, richtlinienkonform aufzubereiten sowie in Karten darzustellen.

Die Temperaturgradienten werden aus meteorologischen Beobachtungswerten berechnet. Das dafür erforderliche Berechnungsmodell [WEL 2008, KAY 2007] soll hinsichtlich seiner Ansätze zur Berechnung der einzelnen Terme der Energiebilanz kritisch überprüft und ggf. modifiziert werden.

Weiteres Ziel ist, die bisherige Berechnung des Temperaturgradienten (Temperaturdifferenz der Plattenränder bezogen auf die Plattendicke) zu überarbeiten. Dazu soll ein mechanisch äquivalenter linearer Temperaturverlauf bestimmt werden, dessen Anstieg dann dem zugehörigen Temperaturgradienten entspricht.

Die nachweisabhängigen Überschreitungshäufigkeiten (0,3 %, 10 % und 50 %) der maßgebenden Temperaturgradienten gemäß der Verfahrensweise der RDO Beton 09 [FGSV09] beziehen sich derzeit auf die Häufigkeit aller positiven Temperaturgradienten. Da der Anteil der positiven Temperaturgradienten an allen Temperaturgradienten – sie sind auch negativ – sich deutschlandweit sehr unterschiedlich darstellen kann, ist das aus den o. g. Überschreitungswahrscheinlichkeiten resultierende Sicherheitsniveau ebenfalls sehr unterschiedlich. Um im Dimensionierungsverfahren die gleiche, auf den Lastfall „Temperatur“ bezogene, Sicherheit zu gewährleisten, sind die Überschreitungswahrscheinlichkeiten künftig auf die Gesamtheit aller

Temperaturgradienten (positive und negative) zu beziehen und entsprechend quantitativ festzulegen.

Im FE04.197 [Heft 1050] konnte festgestellt werden, dass die Anwendung der in der aktuellen Fassung der RDO Beton 09 [FGSV09] beschriebenen Überschreitungswahrscheinlichkeiten auf Zeitreihen stündlicher Temperaturgradienten zu deutlich größeren maßgebenden Temperaturgradienten führt, als sie durch die Gradientenfunktion dieser aktuellen Fassung der RDO Beton 09 [FGSV09] berechnet werden. Umfangreiche Dimensionierungsberechnungen, die im FE04.197 durchgeführt und ausgewertet wurden, zeigen, dass die nachweis-spezifischen Temperaturgradienten der derzeit aktuellen Fassung der RDO Beton 09 [FGSV09] zu plausiblen Dimensionierungsergebnissen führen, jedoch nicht zu den vorgegebenen Überschreitungswahrscheinlichkeiten passen. Aus diesem Grund sind die nachweisabhängigen Überschreitungswahrscheinlichkeiten im Rahmen dieses Projektes so anzupassen, dass sie für eine Referenz-Betondeckendicke von 30 cm in etwa den Temperaturgradienten entsprechen, die für die gleiche Betondeckendicke auch in der aktuellen Fassung der RDO Beton 09 [FGSV09] beschrieben werden.

Darüber hinaus soll ein Vorgehen entwickelt und beschrieben werden, mit dem es möglich ist, neben den Temperaturgradienten auch die mittlere Plattentemperatur als klimatische Eingangsgrößen für Berechnungen bereitstellen zu können. Dazu soll eine zweidimensionale Verteilungsfunktion ermittelt werden, die dem Wertepaar (mittlere Plattentemperatur, Temperaturgradient) Wahrscheinlichkeiten zuordnet. Diese zweidimensionalen Verteilungsfunktionen können für Einzelfallanwendungen der Substanzbewertung relevant werden, wenn die Nullspannungstemperaturen der zu bewertenden Strecken bekannt sind.

3 Vorgehensweise

Die Temperaturgradienten und die mittleren Plattentemperaturen werden aus dem vertikalen Temperaturverlauf in der Betonplatte abgeleitet. Die Berechnung dieses vertikalen Verlaufs beschränkt sich dabei nicht auf die Betonplatte. Sie muss aus numerischen Gründen bis in eine Tiefe fortgeführt werden, in der sich eine konstante Temperatur einstellt. Die Berechnungen beziehen sich dabei auf ein definier-

tes Befestigungsmodell (= definierte Konstruktions-schichten und Schichtdicken) (siehe Kapitel 7.1).

Um die dimensionierungsrelevanten Temperaturgradienten bzw. Parameter der Verteilungsfunktionen (nachfolgend auch als thermische Eingangsgrößen bezeichnet) ausreichend geografisch zu differenzieren, werden diese Temperaturberechnungen für mehr als 300 unterschiedliche Standorte in Deutschland (siehe Kapitel 4), an denen der Deutsche Wetterdienst (DWD) die für die Berechnungen notwendigen meteorologischen Beobachtungswerte erfasst (siehe Kapitel 4.2), durchgeführt. Um statistisch abgesicherte Aussagen zu den o. g. thermischen Eingangsgrößen machen zu können, müssen diese Beobachtungswerte für einen entsprechend großen Zeitraum vorliegen. Die Datenbasis des Projektes bezieht sich dabei auf einen Zeitraum von 15 Jahren (siehe Kapitel 4.1).

Die mittels eines empirisch-physikalischen Simulationsmodells (siehe Kapitel 5.2) berechneten Temperaturen an verschiedenen Tiefenpositionen in der Betondecke werden in einen mechanisch äquivalenten linearen Temperaturverlauf umgerechnet (siehe Kapitel 8). Der Anstieg dieses linearen Temperaturverlaufs entspricht dem zugehörigen Temperaturgradienten (mechanisch äquivalenter Temperaturgradient).

Diese Temperaturgradienten werden richtlinienkonform ausgewertet. Dafür sind aus den berechneten Temperaturgradienten jeder Station die maßgebenden Temperaturgradienten entsprechend der relevanten Überschreitungshäufigkeiten (siehe Kapitel 9.2) zu ermitteln. Außerdem werden aus den standortbezogenen Temperaturgradienten die jeweiligen Parameter der Momentan- sowie der Extremwertverteilung berechnet (siehe Kapitel 9.1 und 9.5).

Da die maßgebenden Temperaturgradienten sowie die Gradientenverteilungen stark von der Betondeckendicke beeinflusst werden, ist dieser Einfluss in Form einer Gradienten-korrekturfunktion in Abhängigkeit der Betondeckendicke zu berücksichtigen (siehe Kapitel 9.3). Für die Erarbeitung dieser Funktion werden die Temperaturgradienten für 50 ausgewählte Stationen (siehe Kapitel 4.3) sowie für fünf unterschiedliche Betondeckendicken (siehe Kapitel 7.1) berechnet.

Abschließend werden die Ergebnisse der Gradientenanalyse, die dann für mehr als 300 Stationen deutschlandweit vorliegen, auf Gitterpunkte im Rastermaß von 1x1 km übertragen und in Karten gra-

fisch dargestellt. Es handelt sich dabei um die Werte der nachweisabhängigen Überschreitungshäufigkeiten und die Parameterwerte der Momentanverteilung.

4 Datengrundlage

Das empirisch-physikalische Modell zur Berechnung der Temperaturverteilung (EPM), dessen Ergebnisse die Grundlage aller Berechnungen in diesem Projekt sind, benötigt stündliche meteorologische Beobachtungswerte als Input. Sie sind für dieses Projekt vom Deutschen Wetterdienst (DWD) zur Verfügung gestellt worden.

4.1 Zeitraum

Gemäß den „Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen“ (RDO Beton) ist die Dimensionierung nach folgendem Grundsatz vorzunehmen:

„Die Dicke des Straßenaufbaus ist so festzulegen, dass ein ausreichender Ermüdungswiderstand sowie eine ausreichende Tragfähigkeit gegen Belastung aus Verkehr und Witterung während der geplanten Nutzungsdauer sowie eine ausreichende Frostsicherheit gewährleistet sind. Für ein ausreichendes Tragverhalten sind die Dicken sowie die Eigenschaften der Schichten so festzulegen, dass weder das Planum noch die Schichten während der geplanten Nutzungsdauer des Oberbaus strukturelle Schädigungen erleiden.“

Die geplante Nutzungsdauer beläuft sich im übergeordneten Netz derzeit auf 30 Jahre. Daher werden für die Dimensionierung repräsentative Daten eines 30-jährigen Zeitraumes hinsichtlich der Belastung aus Verkehr und Witterung benötigt.

Beide Größen können aber nicht mehr als stationär betrachtet werden. Die Daten eines zurückliegenden 30-Jahres-Zeitraumes sind daher nicht repräsentativ für zukünftige Zeiträume dieser Dauer. Aus diesem Grunde ist schon im [FE 04.198/2004/ARB] ein 15-jähriger Zeitraum für die Erfassung der Witterungsbelastung herangezogen worden. Dieser Zeitraum umfasst die Jahre 1991 bis 2005. Er liegt auch allen Auswertungen, die in den [Heften 976, 1050 und 1072] veröffentlicht sind, zugrunde.

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wird die Datenbasis zur Beschreibung der Witterungsbelastung für die RDO Beton sowie RSO Beton aktualisiert. Aus den o. g. Gründen wird dafür wieder ein 15-jähriger Zeitraum verwendet. Er umfasst die Jahre 2001 bis 2015 und entspricht dem Zeitraum, der für die Überarbeitung der RDO Asphalt herangezogen wurde [FE 89.0305/2015].

4.2 Meteorologische Daten

Für dieses Forschungsvorhaben 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 und ggf. korrigiert als auch für jeden vorhandenen Termin vollständig und erfordern keine Missing Data Behandlung und keine Berechnung der Globalstrahlung wie in [FE 04.198/2004/ARB] beschrieben.

Die Daten jeder DWD- Station umfassen UTC referenzierte Stundenwerte der in Tabelle 4.1 aufgeführten Beobachtungselemente. Zusätzlich macht der DWD die in Tabelle 4.2 aufgeführten Angaben zur Herkunft der Werte.

Element	Name	Integration	Einheit
FF	Windgeschwindigkeit	Mittel der letzten 10 Minuten	m/s
GS	Globalstrahlung	Stundensumme	J/cm ²
N	Bedeckungsgrad	Terminwert	Achtel
TD	Taupunkt 2 m	Terminwert	°C
TT	Lufttemperatur 2 m	Terminwert	°C
RR	Niederschlagshöhe	Stundensumme	mm
RR_JN	Niederschlag gefallen J/N	letzte Stunde	0: nein, 1: ja
TB05	Erdbodentemperatur in 5 cm Tiefe	Terminwert	°C
TB20	Erdbodentemperatur in 20 cm Tiefe	Terminwert	°C
TB50	Erdbodentemperatur in 50 cm Tiefe	Terminwert	°C
TB100	Erdbodentemperatur in 100 cm Tiefe	Terminwert	°C

Tab. 4-1: Vom DWD gelieferte Beobachtungselemente; die kursiv angegebenen Elemente sind nicht weiter verwendet worden

Herkunft	Beschreibung
O	Original
Z	durch zeitlich Interpolation ersetzt
R	räumlich ersetzt
S	durch sonstige Verfahren ersetzt
M	manuell ersetzt

Tab. 4-2: Bedeutung der Angaben zur Herkunft der Beobachtungselemente (Quelle: DWD)

	O	Z	R	S	M
FF	54,4 %	13,5 %	32,1 %	0,0 %	0,0 %
GS	21,1 %	0,0 %	0,0 %	78,8 %	0,1 %
N	43,2 %	15,0 %	39,1 %	2,8 %	0,0 %
TD	90,2 %	4,4 %	5,1 %	0,3 %	0,0 %
TT	90,2 %	4,9 %	4,8 %	0,1 %	0,0 %
RR	80,7 %	0,0 %	0,0 %	19,3 %	0,0 %

Tab. 4-3: Anteil der verschiedenen Herkünfte an den vom DWD gelieferten Daten

Prozentual verteilen sich die unterschiedlichen Datenherkünfte aller gelieferten Daten auf die Beobachtungselemente wie in Tabelle 4-3 zu sehen.

Es sind die klassischen Beobachtungswerte der Klimatologie, die einen großen Anteil an Originalwerten haben: Lufttemperatur, Taupunkt und Niederschlagshöhe.

Wenn Werte ersetzt werden, weil sie nicht beobachtet wurden oder aber der Beobachtungswert fehlerhaft ist, dann werden sie i. d. R. durch Interpolation ersetzt: Räumliche Interpolation bedeutet, dass der zu ersetzende Wert aus Werten desselben Termins benachbarter Stationen errechnet wird, zeitliche Interpolation, dass der Wert aus den Werten früherer Termine derselben Station errechnet wird.

Bei der Globalstrahlung bedeutet „S“, dass die Stundensumme aus der Sonnenscheindauer – auch ein klassisches Klimaelement – errechnet wird, denn nur wenige Stationen verfügen über ein Strahlungsmessgerät. Beim Niederschlag bedeutet „S“, dass die stündlichen Niederschläge anhand der 12- und 24-stündigen Summen, die auch beobachtet werden, ersetzt werden.

Die Messung der Windgeschwindigkeit ist grundsätzlich problematisch, weil diese Größe in Bodennähe sehr stark von den Verhältnissen in der Umgebung der Station beeinflusst wird. Aus diesem Grund

ist auch eine Ersetzung schwierig. Deshalb sollte der Windgeschwindigkeit an einem Standort – wenn möglich – kein allzu großer Einfluss auf die Berechnung der Fahrbahnoberflächentemperatur eingeräumt werden.

Der Bedeckungsgrad hingegen lässt sich räumlich und zeitlich gut interpolieren und damit auch gut ersetzen.

Manuelle Ersetzungen oder Ergänzungen sind sehr selten. Sie werden nur dann vorgenommen, wenn die automatische Ersetzung zu fachlich falschen Ergebnissen geführt hat [JAN/SED 2001].

Der DWD hat die Daten im ASCII-Format geliefert und in diesem Format werden sie auch vom Berechnungsprogramm (EPM) verarbeitet.

4.3 Standorte für Regressionsrechnungen

Es gibt 380 DWD-Stationen (im Folgenden als Standorte bezeichnet), die im Zeitraum 2001 bis 2015 lückenlose Daten der für dieses Projekt benötigten Größen (siehe Tabelle 4.1) haben. Eine Liste dieser Standorte ist im Anhang zu finden.

33 der 380 Stationen sind im Zeitraum 2001 bis 2015 so verlegt worden, dass die Beobachtungen vor und nach der Verlegung nicht mehr homogen sind. In diesem Falle sollte eine Station eigentlich nicht fortgeführt, sondern neu eingerichtet werden. Das wird aber nicht immer beachtet. Es wird in der elektronischen Stationsakte jedoch vermerkt, wenn infolge einer Verlegung mit einem Bruch in der Beobachtungsreihe zu rechnen ist. Diese Akte ist für die 380 Stationen und den Zeitraum 2001 bis 2015 entsprechend ausgewertet worden. In der Tabelle der Standorte im Anhang steht in diesem Fall in der Spalte Bemerkung „verlegt“.

Für die Modellrechnungen im DWD werden fehlende Daten gelegentlich auch dann ergänzt, wenn ein Standort zeitweise nicht in Betrieb ist oder nur den Niederschlag misst. In diesem Fall gibt es kaum Originaldaten der Lufttemperatur. 19 der 380 Stationen weisen für weniger als 10 Jahre Originalwerte der Lufttemperatur auf, in der Spalte Bemerkung steht in diesem Fall „wenig Originalwerte“.

Standorte, die verlegt wurden oder für mehr als 5 Jahre im Zeitraum 2001 bis 2015 keine Originalmesswerte der Lufttemperatur aufweisen, sind von

der Berechnung des Temperaturverlaufs im Straßenkörper ausgeschlossen worden. Damit gibt es für diese Berechnungen insgesamt 328 Standorte.

Die Karte in Bild 4.1 zeigt die Standorte aller Stationen. Grün und gelb eingezeichnete Standorte gehören zu Stationen, deren Daten im Projekt verwendet werden, violett zu jenen, die verworfen worden sind.

Die Temperaturgradienten, die mit vorgegebener Wahrscheinlichkeit überschritten werden, hängen von der Dicke der Betonplatte ab. Dieser Zusammenhang ist anhand der EPM-Ergebnisse neu festzulegen. Dazu werden aber nicht die Ergebnisse al-

ler Standorte gebraucht. Es sind aus den 328 Standorten 50 ausgesucht worden. Das Auswahlkriterium war die Anzahl originaler Werte der Globalstrahlung, denn die kurzwellige Einstrahlung ist der einzige Energiefluss, der nicht parametrisiert werden muss. Die 50 ausgewählten Standorte sind in der Karte (Bild 4.1) gelb eingetragen. Der Anteil originaler Messwerte der Globalstrahlung liegt bei diesen Stationen zwischen 99,7 % und 58,9 %.

Aus diesen 50 Standorten werden auch jene ausgesucht, deren Ergebnisse für die Extremwertanalyse und die Aufstellung 2-dim. Häufigkeitsverteilungen benutzt werden.

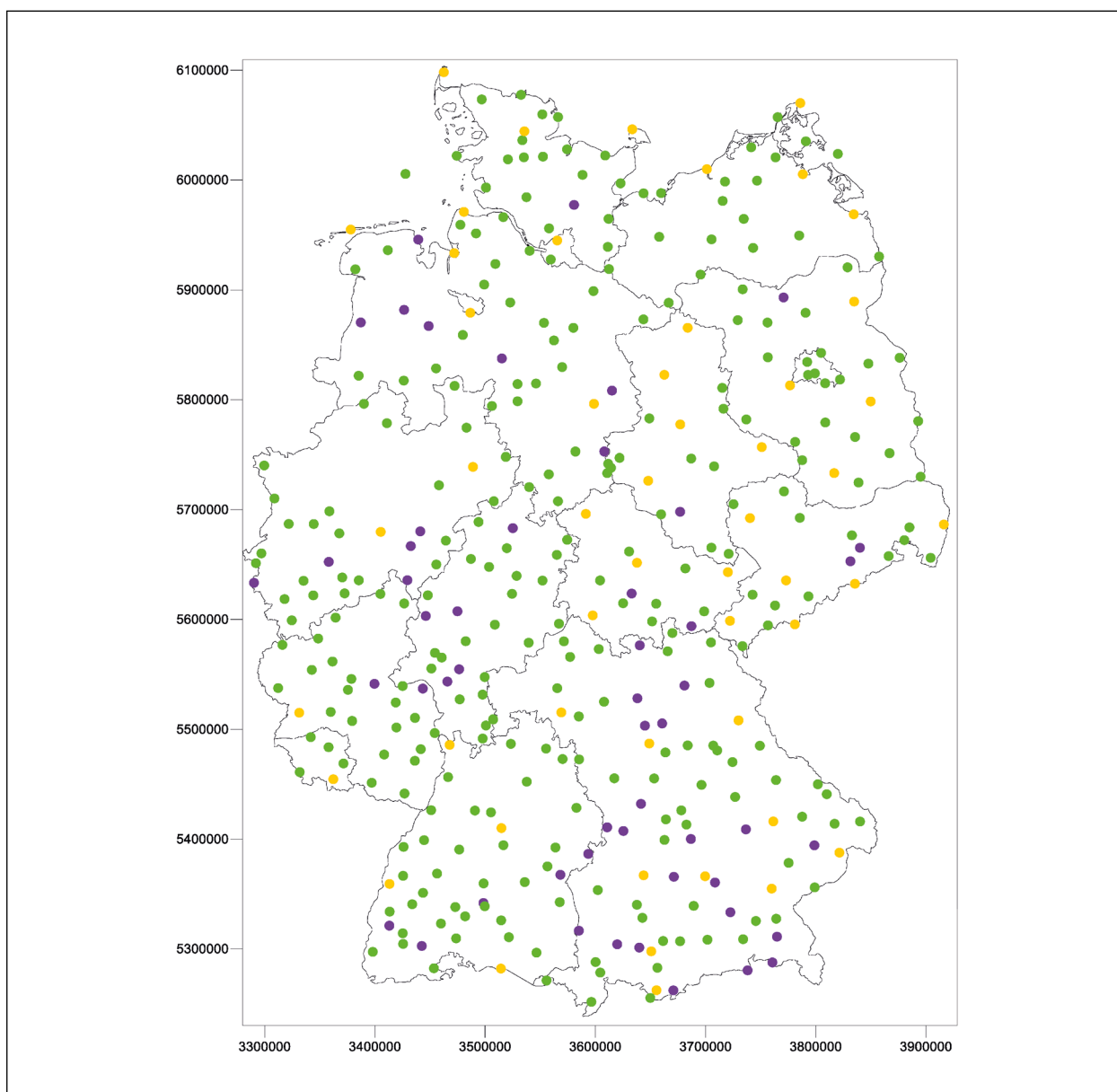


Bild 4.1: Standorte (DWD-Stationen) mit lückenlosen Daten im Zeitraum 2001 bis 2015 (grün und gelb: Daten werden für Berechnungen verwendet, gelb: Daten werden auch für die Regressionsrechnungen Überschreitungshäufigkeit = $f(\text{Deckendicke})$ verwendet, violett: Daten wurden verworfen)

5 Temperatursimulation

Die Temperaturen in und auf einer Straßenbefestigung können mithilfe eines auf empirisch-physikalischen Zusammenhängen basierenden numerischen Rechenmodells ermittelt werden.

Im Ergebnis der Temperatursimulationen erhält man

- eine Zeitreihe der Fahrbahnoberflächentemperatur sowie
- Zeitreihen für die Temperaturen in unterschiedlichen Tiefenpositionen innerhalb der Straßenbefestigung.

5.1 Modellierung der Straßenbefestigung

Für die Temperatursimulation wird ein Modell der Straßenbefestigung benötigt. Das Modell beinhaltet:

- Art und Reihenfolge der Konstruktionsschichten
- Dicke der Konstruktionsschichten und Dicke des gesamten Befestigungsmodells
- Thermophysikalische Materialeigenschaften der Konstruktionsschichten

Die einzelnen Konstruktionsschichten werden für den Berechnungsalgorithmus der Temperatursimulation in Subschichten der Dicke Δz unterteilt. Für die Berechnung ist es dabei erforderlich eine konstante Subschichtdicke Δz zu wählen. Die gewählte Subschichtdicke beeinflusst den Berechnungsschritt Δt (siehe Kapitel 5.2.2).

5.2 Berechnungsansatz

Die Fahrbahnoberflächentemperaturen werden aus der Wärmebilanz berechnet. Dazu wird die Wärmebilanzgleichung (5-1) der Fahrbahnoberfläche nacheinander für jeden Zeitschritt Δt des gesamten betrachteten Zeitraums gelöst. Die Fahrbahnoberflächentemperatur beeinflusst dabei verschiedene Bilanzterme und wird iterativ ermittelt.

$$q_G \cdot (1 - \alpha_k) + q_{AG} \cdot (1 - \alpha_l) - q_{FB} - q_L - q_H - q_B = 0 \quad (5-1)$$

q_G Globalstrahlung (Messwert) [W/m²]

q_{AG} Atmosphärische Gegenstrahlung [W/m²]

q_{FB} Abstrahlung der Fahrbahn [W/m²]

q_H fühlbarer Wärmestrom [W/m²]

q_L latenter Wärmestrom [W/m²]

q_B Bodenwärmestrom [W/m²]

α_l, α_k Absorptionskoeffizient für langwellige (l) und kurzwellige (k) Strahlung [-]

5.2.1 Terme der Bilanzgleichung

Nachfolgend sind die Formeln zur Berechnung der einzelnen Bilanzterme dargestellt.

Atmosphärische Gegenstrahlung

$$q_{AG} = \varepsilon_A \cdot \sigma_B \cdot (\vartheta_{Luft} + 273,15)^4 \cdot k(N) \quad (5-2)$$

q_{AG} Atmosphärische Gegenstrahlung [W/m²]

ε_A atmosphärischer Emissionskoeffizient [-] (siehe Kapitel 6.1, Gleichung (6-1))

ϑ_{Luft} Lufttemperatur [°C]

σ_B Stefan-Boltzmann-Konstante = $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/m²/K⁴]

$k(N)$ Korrekturfunktion für den Bewölkungszustand (siehe Kapitel 6.1, Gleichung (6-2))

Abstrahlung der Fahrbahn

$$q_{AG} = (1 - \alpha_l) \cdot \sigma_B \cdot (\vartheta_{FBO} + 273,15)^4 \quad (5-3)$$

q_{FB} Abstrahlung der Fahrbahn [W/m²]

ϑ_{FBO} Temperatur der Fahrbahnoberfläche [°C]

α_l Absorptionskoeffizient für langwellige Strahlung [-]

σ_B Stefan-Boltzmann-Konstante = $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/m²/K⁴]

Fühlbarer Wärmestrom

$$q_H = \alpha \cdot (\vartheta_{FBO} - \vartheta_{Luft}) \quad (5-4)$$

q_H Fühlbarer Wärmestrom [W/m²]

ϑ_{Luft} Lufttemperatur [°C]

ϑ_{FBO} Temperatur der Fahrbahnoberfläche [°C]

α Wärmeübergangskoeffizient [W/m²/K]

Latenter Wärmestrom

$$q_L = L \cdot V_{\text{akt}} \quad (5-5)$$

$$L = (2,498 - 0,00242 \cdot \vartheta_{\text{FBO}}) \cdot 277,78 \quad (5-6)$$

q_L Latenter Wärmestrom [W/m²]

L latente Verdunstungsenthalpie in Abhängigkeit von der Fahrbahnoberflächentemperatur in W · h/kg

V_{akt} aktuelle Verdunstung [kg/m²/h]

ϑ_{FBO} Temperatur der Fahrbahnoberfläche [°C]

Bodenwärmestrom

$$q_B = -\lambda_W \cdot \frac{d\vartheta}{dz} \quad (5-7)$$

q_B Bodenwärmestrom [W/m²]

λ_W Wärmeleitfähigkeit [W/m/K]

$d\vartheta/dz$ Temperaturgradient [K/m]

Der Bodenwärmestrom bezieht sich – wie alle Bilanzterme – auf die Fahrbahnoberfläche. Der Temperaturgradient $d\vartheta/dz$ entspricht daher dem Anstieg des vertikalen Temperaturverlaufs an der Fahrbahnoberfläche. Durch die Weg- und Zeit-Diskretisierung wandelt sich der Differentialquotient $d\vartheta/dz$ in den Differenzenquotienten $\Delta\vartheta/\Delta z$ um und lässt sich mit Gleichung (5-8) berechnen.

$$\frac{\Delta\vartheta}{\Delta z} = \frac{\vartheta(z = 0\text{cm}) - \vartheta(z = 0\text{cm} - \Delta z)}{\Delta z} \quad (5-8)$$

Die Berechnung der Temperatur an der Tiefenposition $-\Delta z$ unterhalb der Fahrbahnoberfläche erfolgt mit Gleichung (5-11).

5.2.2 Berechnung der Temperaturen in der Befestigung

Bei der Berechnung eines sich zeitlich ändernden Temperaturprofils in der Straßenbefestigung wird vorausgesetzt, dass die Temperaturverteilung horizontal homogen ist. Sie kann deshalb mithilfe der verkürzten Differentialgleichung (5-9) erfolgen.

$$\frac{d\vartheta}{dt} = a_\vartheta \cdot \frac{d^2\vartheta}{dz^2} \quad (5-9)$$

Durch die Diskretisierung des Weges und der Zeit wandelt man die entsprechenden Differentialquotienten in Differenzenquotienten um.

$$\frac{\Delta\vartheta}{\Delta t} = a_\vartheta \cdot \frac{\Delta^2\vartheta}{\Delta z^2} \quad (5-10)$$

$\Delta\vartheta$ zeitabhängige Differenz zweier Temperaturen in unterschiedlichen Tiefen [K]

Δt Zeitschritt der Berechnung [s]

$\Delta^2\vartheta$ tiefenabhängige Differenz zweier Temperaturdifferenzen zu einer bestimmten Zeit [K]

Δz^2 Abstand der betrachteten Tiefenpositionen [cm]

Durch Zuordnen von j für eine beliebige Tiefe z sowie k für eine beliebige Zeit t ist Gleichung (5-10) zu überführen in:

$$\vartheta_{j,k+1} = \vartheta_{j,k} + a_\vartheta \cdot \frac{\Delta t}{\Delta z^2} (\vartheta_{j+1,k} - 2 \cdot \vartheta_{j,k} + \vartheta_{j-1,k}) \quad (5-11)$$

$\vartheta_{j,k+1}$ Temperatur in der Tiefe $z = j$ zum Zeitpunkt $t = k+1$ [°C]

$\vartheta_{j,k}$ Temperatur in der Tiefe $z = j$ zum Zeitpunkt $t = k$ (= vorangegangener Zeitschritt) [°C]

$\vartheta_{j+1,k}$ Temperatur in der Tiefe $z = j+1$ (nächst höhere Tiefenposition) zum Zeitpunkt $t = k$ (= vorangegangener Zeitschritt) [°C]

$\vartheta_{j-1,k}$ Temperatur in der Tiefe $z = j-1$ (nächst tiefer Tiefenposition) zum Zeitpunkt $t = k$ (= vorangegangener Zeitschritt) [°C]

Gleichung (5-11) als Lösung der Gleichung (5-10) beruht dabei auf dem expliziten Differenzenverfahren.

Mit Gleichung (5-13) kann für einen definierten Befestigungsaufbau (siehe Kapitel 5.1) die Temperatur in jeder Tiefenposition und zu jedem Zeitpunkt berechnet werden. Um die numerische Stabilität des Berechnungsverfahrens zu gewährleisten, muss der Quotient aus dem angesetzten Zeitintervall Δt und der gewählten Subschichtdicke Δz , multipliziert mit der Temperaturleitzahl a_ϑ , einen Wert kleiner gleich 0,5 ergeben [DEMIDOWITSCH et al., 1968].

$$a_\vartheta \cdot \frac{\Delta t}{\Delta z^2} \leq 0,5 \quad (5-12)$$

a_ϑ Temperaturleitzahl [m²/h]

Ausgehend von dem Material im Befestigungsaufbau mit der höchsten Temperaturleitfähigkeit und einer vorgegebenen Subschichtdicke Δx wird der maximal zulässig Zeitschritt Δt_{max} zur Einhaltung des Stabilitätskriterium ermittelt.

5.3 Randbedingungen

Die Temperaturberechnungen benötigen entsprechend Kapitel 5.2.1 und 5.2.2 folgende Randbedingungen:

- Vertikales Temperaturprofil zu Beginn der Simulation (Starttemperaturprofil) und
- zeitlicher Temperaturverlauf (Temperaturgang) an der Unterseite des Befestigungsaufbaus.

5.3.1 Starttemperaturprofil

Das Starttemperaturprofil (vertikaler Temperaturverlauf zum Zeitpunkt t_1) kann vereinfacht als linear verlaufendes Temperaturprofil definiert werden und lässt sich gemäß Gleichung (5-13) berechnen. Die aus dieser Vereinfachung gegenüber dem wahren aber i. d. R. unbekanntem Starttemperaturprofil resultierenden Berechnungsfehler klingen bei Einhaltung des Stabilitätskriteriums gemäß Gleichung (5-12) schon nach wenigen Zeitschritten ab.

$$\vartheta_{t_1}(z) = \vartheta_{\text{Luft},t_1} - \frac{\vartheta_{\text{Luft},t_1} - \vartheta_{x_u,t_1}}{\frac{n_{\Delta z}}{\Delta z} + 1} \cdot z \quad (5-13)$$

$\vartheta_{t_1}(z)$ Temperatur in Abhängigkeit der Tiefe x zum Zeitpunkt t_1 [°C]

$\vartheta_{z=0,t_1}$ Fahrbahnoberflächentemperatur zum Zeitpunkt t_1 [°C]

ϑ_{z_u,t_1} Temperatur an der Unterseite des betrachteten Befestigungsaufbaus zum Zeitpunkt t_1 [°C]

Δz Subschichtdicke [cm]

z Tiefe u. OK Fahrbahnoberfläche [cm]

$n_{\Delta z}$ Anzahl der Subschichten

5.3.2 Temperaturgang an der Systemuntergrenze

Der zeitliche Temperaturverlauf (Temperaturgang) an der Unterseite des betrachteten Befestigungsaufbaus (Systemunterseite) muss als kontinuierliche Zeitreihe mit dem Zeitschritt Δt (mit $\Delta t \leq \Delta t_{\text{max}}$) vorliegen.

In [WEL 2008] und [KAY 2007] wurde die untere Grenze des Befestigungsmodells stets in 2,5 m Tiefe u. FBO definiert. Der Temperaturgang des Bo-

dens in dieser Tiefe wurde dabei als Funktion der Zeit beschrieben.

Im Rahmen dieses FuE-Projektes wird eine größere Tiefe als untere Grenze des Befestigungsmodells festgelegt. Gemäß [DWD 1995] kann in einer Bodentiefe von 12 m eine konstante Temperatur von 9,5 °C für ganz Deutschland angesetzt werden.

5.4 Eingangsgrößen

Für die Berechnung von Oberflächentemperaturganglinien werden folgende meteorologische Beobachtungswerte benötigt:

- Lufttemperatur [°C],
- Luftfeuchtigkeit [%],
- Windgeschwindigkeit [m/s],
- Niederschlagshöhe [mm/m²/h],
- Bedeckungsgrad (0 – 8) [Achtel],
- Globalstrahlung [W/m²].

Sie liegen als Messwerte/Beobachtungswerte in Form von Zeitreihen mit einem Messwertzeitschritt $\Delta t_{ZR} = 1\text{h}$ (Stunde) vor.

Ist der für die Simulationen gewählte Zeitschritt Δt (mit $\Delta t \leq \Delta t_{\text{max}}$) kleiner als der Messwertzeitschritt Δt_{ZR} , sind die stündlichen Werte an den Simulationszeitschritt Δt anzupassen.

Dazu werden die Zeitreihen um Zwischenzeitschritte ergänzt. Die Anzahl der Zwischenzeitschritte ergibt sich aus:

$$n_{ZZS} = \frac{\Delta t_{ZR}}{\Delta t} - 1 \quad (5-14)$$

n_{ZZS} Anzahl Zwischenzeitschritte [-]

Δt_{ZR} Zeitschritt der gemessenen/beobachteten Klimaparameterzeitreihen [s]

Δt Simulationszeitschritt [s]

Bis auf die Niederschlagshöhe erfolgt die Ergänzung durch lineare Interpolation nach Gleichung (5-15). Die stündliche Niederschlagshöhe wird gleichmäßig auf alle Zwischenzeitschritte aufgeteilt.

$$y(t_i + \Delta t) = y(t_i) + \frac{y(t_i + \Delta t_{ZR}) - y(t_i)}{n_{ZZS} + 1} \quad (5-15)$$

$y(t_i + \Delta t)$	interpolierter Datenpunkt der Zeitreihe zum Zeitpunkt $t_i + \Delta t$
$y(t_i)$	bekannter Datenpunkt der Zeitreihe zum Zeitpunkt t_i
$y(t_i + \Delta t_{ZR})$	bekannter Datenpunkt der Zeitreihe zum Zeitpunkt $t_i + \Delta t_{ZR}$
n_{ZS}	Anzahl Zwischenzeitschritte

6 Modellmodifikationen

6.1 Langwellige Gegenstrahlung

Die Gleichung zur Berechnung der Gegenstrahlung wurde zwar beibehalten, aber die Parametrisierungen des atmosphärischen Emissionskoeffizienten für langwellige Strahlung und der Bewölkungskorrektur sind gegenüber [KAY 2007] und [WEL 2008] verändert worden. Sie wurden der im DWD, Abteilung Agrarmeteorologie, gebräuchlichen Methode angepasst:

Der Emissionskoeffizient wird nach [IDSO 1981] berechnet:

$$\varepsilon_A = 0,70 + 5,95 \cdot 10^{-5} \cdot f_d \cdot e^{1500/(\vartheta_{Luft} + 273,15)} \quad (6-1)$$

ε_A atmosphärischer Emissionskoeffizient [-]

f_d Dampfdruck [hPa]

ϑ_{Luft} Lufttemperatur [°C]

Der Ansatz für die Bewölkungskorrektur, die die atmosphärische Gegenstrahlung mit zunehmendem

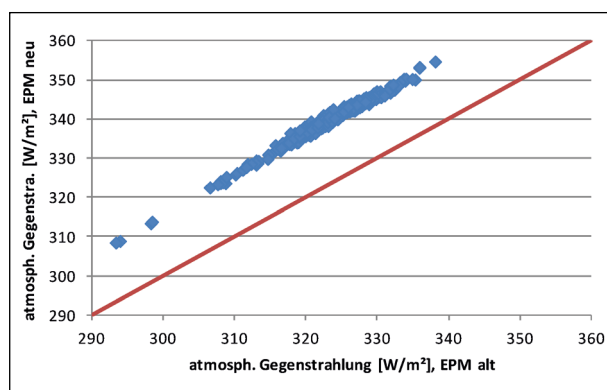


Bild 6.1: Vergleich der mittleren atmosphärischen Gegenstrahlung, berechnet nach dem bisherigen (EPM alt) und dem neuen Ansatz (EPM neu), Datengrundlage: 328 Standorte, 2001 bis 2015, April bis September

Bedeckungsgrad erhöht, wurde von [DWD 1995] ermittelt:

$$k(N) = 0,20 \cdot \left(\frac{N}{8}\right)^2 \quad (6-2)$$

$k(N)$ Bewölkungskorrektur [-]

N Bedeckungsgrad [Achtel]

Dieser Berechnungsansatz erhöht die atmosphärische Gegenstrahlung im Vergleich zur Berechnung nach [WEL 2008, KAY 2007]. Im Mittel des Zeitraums 2001 bis 2015 beträgt die Zunahme bei der neuen Berechnung 17 W/m² im Sommerhalbjahr (siehe Bild 6.1), berechnet für das ganze Jahr sind es 15 W/m².

6.2 Wärmeübergangskoeffizient

Der fühlbare Wärmefluss q_H wird im EPM nach der Gleichung

$$q_H = \alpha \cdot (\vartheta_{FBO} - \vartheta_{Luft}) \quad (6-3)$$

α Wärmeübergangskoeffizient [W/(m²·K)]

ϑ_{FBO} Temperatur der Fahrbahnoberfläche [°C]

ϑ_{Luft} Lufttemperatur in 2 m über Grund [°C]

berechnet. Der Wärmeübergangskoeffizient wird dabei nach der Ähnlichkeitstheorie bestimmt [WIN 2017], einer in der Bauphysik gebräuchlichen Methode. Er ist von der Windgeschwindigkeit in Fahrbahnnähe und von den thermodynamischen Eigenschaften der Luft über der Fahrbahn abhängig. Die Windgeschwindigkeit hat den dominierenden Einfluss.

Der turbulente Austausch fühlbarer Wärme, dessen Wärmefluss hier berechnet wird, wird über einer Straße – insbesondere über einer Autobahn – aber eher vom fließenden Verkehr als vom bodennahen Windfeld bestimmt [BÄUM 2003]. Dies soll im EPM abgebildet werden. Dabei wird angenommen, dass die verkehrsinduzierte Turbulenz eine räumlich konstante Größe ist und nicht von der Verkehrsstärke abhängt. Außerdem wird angenommen, dass der Einfluss des bodennahen Windfeldes so gering ist, dass er vernachlässigt werden kann.

Es gibt weitere Gründe, den Wärmeübergangskoeffizienten nicht anhand der vom DWD gemessenen Windgeschwindigkeit zu berechnen: Für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten wäre

eine Umrechnung der Windgeschwindigkeit von dem Wert, der an einer DWD-Station in Höhen zwischen 8 und 20 m über Grund gemessen wird, auf eine Höhe von 2 m über Grund (auf die Höhe, in der die Lufttemperatur gemessen wird) nötig. Bei dieser Umrechnung müssten viele Einflussgrößen berücksichtigt werden, die gar nicht oder nur ungefähr bekannt sind:

- Rauigkeitslänge am Ort der Windmessung
- Höhe des Windmessers über Grund – wird vom DWD häufig geändert!
- Rauigkeitslänge im Umfeld der Fahrbahn – die Verhältnisse sind äußerst unterschiedlich (Streckenabschnitte in Waldschneisen, landwirtschaftlich genutzten Freiflächen oder bebautem Gebiet, Fahrbahn eben zur Umgebung oder in Dammlage).

Der verkehrsinduzierte Wärmeübergangskoeffizient soll daher mithilfe von Messwerten der Fahrbahnoberflächentemperatur als Restglied aus der Wärmebilanz bestimmt werden. Bei dieser Methode wirken sich alle Fehler, die man bei der Bestimmung der einzelnen Bilanzterme macht, auf das Ergebnis – in diesem Fall den fühlbaren Wärmefluss – aus. Daher ist es wichtig, sich anhand eines Literaturstudiums im Vorfeld ein Bild von der Größenordnung der einzelnen Bilanzterme und des Wärmeübergangskoeffizienten zu machen.

6.2.1 Größenordnung des Wärmeübergangskoeffizienten

In der Literatur findet sich nur eine Quelle, bei der der Wärmeübergangskoeffizient im fließenden Verkehr bestimmt wurde: [KRE/BÖL 1981] haben diesen Fall betrachtet, indem sie Verdunstungsmessungen auf einer Landstraße im fließenden Verkehr durchgeführt haben. Diese Messungen haben aber nur an einem Ort und – das ist aus der Veröffentlichung nicht zu entnehmen – wahrscheinlich auch nur an einem Tag stattgefunden. Der aus diesen Messungen resultierende Wärmeübergangskoeffizient kann also nur als grober Richtwert, gültig für Geschwindigkeiten um 80 km/h, benutzt werden – das sagen die Autoren selbst.

Dieser Richtwert ist mit $30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ wesentlich größer ist als die Wärmeübergangskoeffizienten, die die Autoren für unbefahrene Straßen ermittelt haben und die im Bereich von 2 (Windstille) bis $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (Starkwind) liegen.

Für Wärmeübergangskoeffizienten, die in der Bauphysik mit der Ähnlichkeitstheorie für eine längs angestrahlte Platte berechnet werden, ergeben sich Werte zwischen $2.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (bei 0.5 m/s Windgeschwindigkeit) und $60 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (bei 20 m/s Windgeschwindigkeit) [WIN 2017]. Man kann also wohl davon ausgehen, dass der verkehrsinduzierte Wärmeübergangskoeffizient im Bereich von mindestens 10 bis $\sim 30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ liegt.

6.2.2 Größenordnung der einzelnen Bilanzterme

Messungen der Terme der Energiebilanzgleichung finden in der Regel über natürlichem Boden und nicht über versiegelten Flächen statt. Sie werden an vielen Orten weltweit vorgenommen, weil man mit ihrer Hilfe die Menge an CO_2 , die der Boden aufnehmen kann, abschätzen will. Dabei gibt es immer – egal, wie sorgfältig die Messungen durchgeführt werden – ein Problem: Die Summe der gemessenen Werte ist nicht Null! Zu diesem Problem der Schließung der Energiebilanz gibt es viele Veröffentlichungen (siehe z. B. [FOK 2008] oder [WIL et al. 2002]).

Beispielhaft soll in Bild 6.2 ein mittlerer Tagesgang der Bilanzkomponenten gezeigt werden, gemessen von Mitte Mai bis Mitte Juni 2003 über einem Maisfeld in der Nähe von Lindenberg.

Die Schließungslücke ist in Bild 6.2 als Residuum (Residual) dargestellt. Sie liegt in der Größenordnung des Bodenwärmestroms und hat einen deutlichen Tagesgang. Es ist nicht vollständig geklärt, worin die Ursache für diese Lücke liegt. Die Mikrometeorologen, die diese Messungen vornehmen,

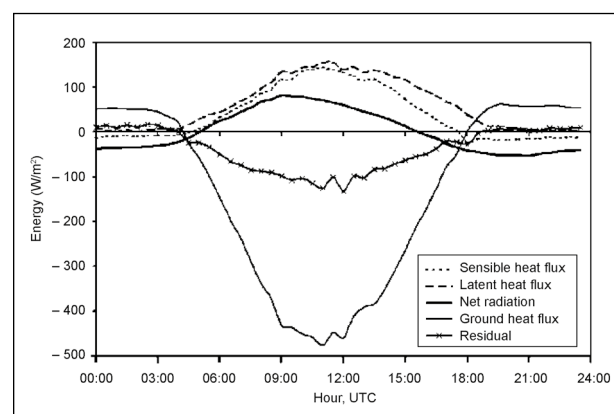


Bild 6.2: Mittlerer Tagesgang der Energiebilanzkomponenten über Mais während des Experiments LITFASS-2003 [FOK 2008]

sind sich aber dahingehend einig, dass es die turbulenten Flüsse sensibler und latenter Wärme sind, die bei der Messung unterschätzt werden und dass die Lücke umso größer wird, je heterogener die Umgebung der Messstelle ist, weil dann die Messungen der einzelnen Komponenten nicht gleichermaßen repräsentativ für den Punkt, für den die Bilanz errechnet wird, sind.

Bei der Berechnung der Fahrbahnoberflächentemperatur als Restglied aus den vier Energiebilanztermen, von denen drei (Netto-Strahlungsbilanz, sensibler und latenter Wärmestrom) anhand meteorologischer Messwerte bestimmt werden, gibt es das Problem der Repräsentanz auch: Die Energiebilanz über einer Rasenfläche, über der die Lufttemperatur vom DWD gemessen wird, kann nicht repräsentativ für die Bilanz über einer Fahrbahnoberfläche sein: Über einer Grasfläche spielt die Verdunstung eine wesentlich größere Rolle als über einer versiegelten Fläche. Dadurch erwärmt sich die Luft über einer Grasfläche langsamer und weniger stark als die Luft über einer Fahrbahn. Das ist gut in Bild 6.3 zu erkennen, das gemessene Lufttemperaturen über Beton (TL_Beton), über Gras (TL_DWD) und neben der Autobahn in 4 m Höhe über nicht versiegeltem Grund (TL_GMA) zeigt. Die Daten stammen aus dem Juli 2017.

Berechnet man die Fahrbahnoberflächentemperatur für viele Standorte in Deutschland, um die Ergebnisse in einer Karte darzustellen (und das ist

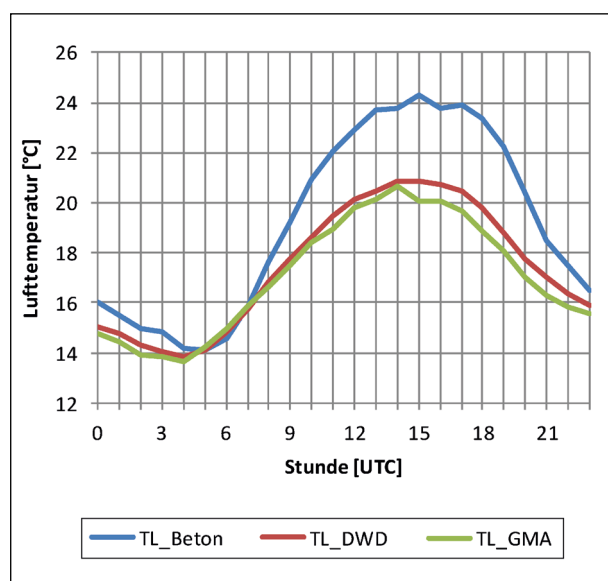


Bild 6.3: Mittlere Tagesgänge der Lufttemperatur, Juli 2017; blau: gemessen über Beton (Fa. Villaret, Autobahnkreuz Vulkaneifel), rot: gemessen über Gras (DWD-Station Büchel), grün: gemessen neben der Autobahn (GMA Kelberg an der A1)

das Ziel dieses Projekts), dann hat dieses Repräsentanzproblem qualitativ keinen Einfluss auf das Ergebnis, weil der DWD die Lufttemperatur unter standardisierten Bedingungen misst. Daher ist der Unterschied hinsichtlich der Energiebilanz überall gleich.

Bestimmt man jedoch den fühlbaren Wärmestrom als Restglied aus einer Energiebilanz, bei der die Fahrbahnoberflächentemperatur von einer Glättemeldeanlage (GMA) gemessen wird, dann gibt es bei den einzelnen Stationspaaren GMA <--> DWD Unterschiede hinsichtlich der Repräsentanz, die sich im Wärmeübergangskoeffizienten wiederfinden. Man muss also davon ausgehen, dass die so berechneten Wärmeübergangskoeffizienten deutliche Unterschiede aufweisen und dies bei der Festlegung eines Koeffizienten für die EPM-Berechnungen berücksichtigen.

6.2.3 Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten aus GMA- und DWD-Messungen

Methode

Die Wärmebilanzgleichung für die Fahrbahnoberfläche (Gleichung (5-1)) kann nach dem turbulenten Fluss sensibler Wärme, q_H , aufgelöst werden, wenn man über Messwerte der Fahrbahnoberflächentemperatur verfügt. Aus ihnen kann zum einen die langwellige Abstrahlung von der Fahrbahnoberfläche berechnet werden (Gleichung (5-3)) und sie können zum anderen als obere Randbedingung für das Differenzenverfahren zur Berechnung des vertikalen Temperaturverlaufs, aus dem der Bodenwärmestrom bestimmt wird, herangezogen werden. Man benötigt also neben den meteorologischen Messwerten für das EPM auch Messwerte der Fahrbahnoberflächentemperatur. Diese liefern die Glättemeldeanlagen. Zusätzlich werden Materialparameter für den Straßenkörper, an dessen Oberfläche die Temperaturen gemessen werden, gebraucht.

Materialparameter

Der Wärmeübergangskoeffizient ist nicht von den Materialeigenschaften des Straßenbelags abhängig. Für seine Bestimmung sind Materialparameter benutzt worden, die sowohl zu Asphalt als auch zu Beton passen, denn es ist nicht immer zweifelsfrei bekannt, in welchem Material die GMA-Messungen durchgeführt werden. Sie sind in der Tabelle 6.1 aufgeführt.

Parameter	Wert
Wärmeleitfähigkeit	1,6 W/(m·K)
spezifische Wärmekapazität	850 W·s/(kg·K)
Dichte	2.350 kg/m ³
Albedo	0,20
langwelliges Emissionsvermögen	0,95

Tab. 6.1: Materialparameter für die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten

Für die Modellierung der Straßenbefestigung wurden hier sowie bei allen weiteren Berechnungen im Kapitel 6 die Angaben aus [KAY 2007] herangezogen.

Das Differenzenverfahren zur Bestimmung des Bodenwärmestroms ist mit Zeitschritten von 3,75 Minuten ausgeführt worden (das sind 16 Zeitschritte pro Stunde). Damit konnten die Temperaturen im Belag in einem Abstand von ~ 24 mm berechnet werden.

Vervollständigung der Oberflächentemperaturen

Das Differenzenverfahren benötigt lückenlose obere Grenzwerte, also Fahrhahnoberflächentemperaturen. Die Messwerte der GMA sind aber sowohl lücken- als auch fehlerhaft. Die Datenprüfung und die Füllung von Datenlücken wurden manuell durchgeführt:

- Lücken von bis zu 5 Stunden, die in den Stunden auftraten, in denen der Tagesgang der Oberflächentemperatur keinen Wendepunkt hat, sind durch lineare Interpolation gefüllt worden.
- Alle anderen Lücken wurden gefüllt, indem in der Nähe der Lücke ein gleichlanger Zeitabschnitt mit vergleichbarer Lufttemperatur (diese war, da von DWD-Stationen stammend, lückenlos) gesucht und für diesen Abschnitt die stündlichen Differenzen (Fahrhahnoberflächentemperatur – Lufttemperatur) bestimmt wurden. Mit diesen Differenzen und den Lufttemperaturen der Lücke sind dann die Fahrhahnoberflächentemperaturen für die Lücke bestimmt worden.
- Fehlerhafte Messwerte sind häufig Werte, die über viele Stunden gleich bleiben. Diese wurden wie zuvor beschrieben ersetzt.

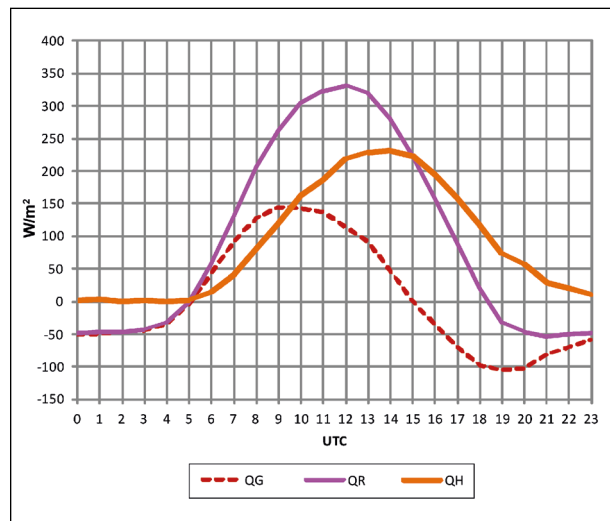


Bild 6.4: Mittlerer stündlicher Tagesgang des Bodenwärmestroms (QG), des Nettostrahlungsflusses (QR, Vorzeichen wurde umgedreht) und des turbulenten Flusses fühlbarer Wärme (QH), Rostock-Laage, April bis September, 2015 – 2016

Vorstudie

Die Aufbereitung der GMA-Daten für die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten ist sehr aufwändig. Deshalb sind zuerst anhand der Messwerte einer GMA, die in einer Betondecke misst und für die es eine DWD-Station in unmittelbarer Nachbarschaft gibt, alle Bilanzterme berechnet und ihre mittleren Tagesgänge mit entsprechenden Werten aus der Literatur verglichen worden. Damit wurde überprüft, ob die Bestimmung des fühlbaren Wärmestroms als Restglied der Energiebilanz an der Fahrhahnoberfläche überhaupt zu realistischen Ergebnissen führt.

Die GMA, die die o. a. Bedingungen erfüllt, ist Rostock-Laage. Sie liegt an der A19 direkt an der Ausfahrt Laage und ist von Freiland umgeben. Die zugehörige DWD-Station auf dem Flugplatz Rostock-Laage ist ~ 5 km entfernt.

Bild 6.4 zeigt die Energieflussdichten des Bodenwärmestroms (QG), des turbulenten fühlbaren Wärmestroms (QH), der sich als Restglied der Energiebilanz ergibt, und der Strahlungsbilanz (QR, lang- und kurzwellig). Bezüglich der Vorzeichen der Energieflüsse wurde hier wie in Bild 6.2 verfahren – allerdings gilt das in Bild 6.4 für den Nettostrahlungsfluss nicht, dieser ist zum besseren Vergleich positiv dargestellt.

Die Energieflüsse, die in Bild 6.4 dargestellt sind, zeigen Verläufe und Größenordnungen, die den gemessenen Flüssen aus Bild 6.2 ähneln und sind da-

mit zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten geeignet.

Da sich der Oberbau einer Straße aber anders verhält als natürlicher, bewachsener Boden, setzt hier der Transport von Wärme von der Oberfläche in den Boden früher ein und er ist auch deutlich größer. Auch der fühlbare Wärmestrom ist größer. Das liegt daran, dass über einer Straße nicht so viel Energie für die Verdunstung verbraucht wird wie über einem bewachsenen Boden – in diesem Fall gar keine, weil der latente Wärmestrom, der ohnehin der kleinste der Bilanzterme ist, bei der Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten außer Acht gelassen wird.

In Bild 6.5 ist der mittlere Tagesgang des Wärmeübergangskoeffizienten zu sehen, der sich aus dem in Bild 6.4 dargestellten fühlbaren Wärmefluss ergibt. Sein merkwürdiger Verlauf resultiert aus der

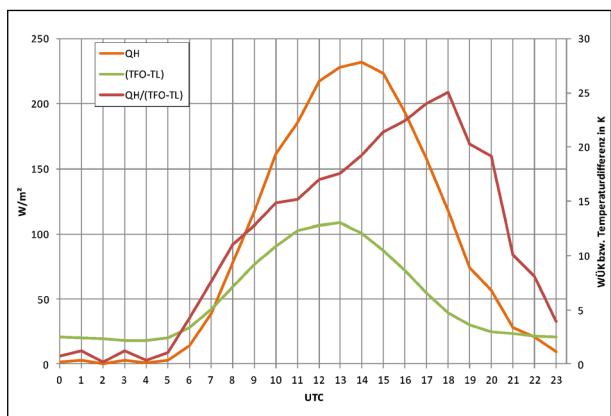


Bild 6.5: Mittlere Tagesgänge des fühlbaren Wärmestroms (QH), der Differenz der Fahrbahnoberflächentemperatur (TFO) und der Lufttemperatur (TL) sowie des Wärmeübergangskoeffizienten (QH/(TFO-TL)), Rostock-Laage, April bis September, 2015 – 2016

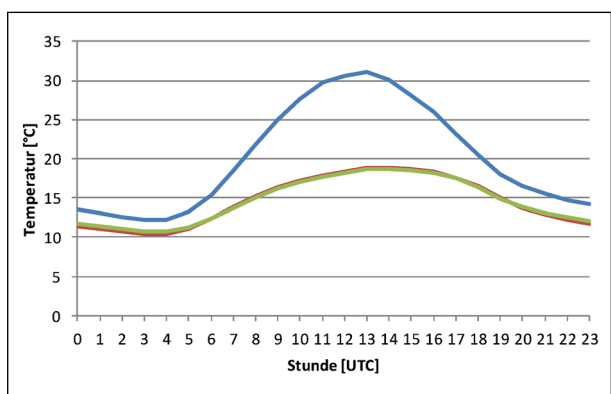


Bild 6.6: Mittlere Tagesgänge der Temperatur; blau: Fahrbahnoberfläche, grün: Lufttemperatur an der GMA, rot: Lufttemperatur an der DWD-Station Rostock-Laage, April bis September, 2015 – 2016

oben erwähnten Verschiebung der Tagesgänge von Luft- und Fahrbahnoberflächentemperatur, die in Bild 6.6 dargestellt ist.

Berechnung

Der Tagesgang des Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) ist anhand gemessener Belagstemperaturen von 10 GMA-Stationen mit jeweils einem ein- bis dreijährigen Messzeitraum (aus den Jahren 2015 bis 2017) ermittelt worden.

Die Ergebnisse – mittlere Tagesgänge des Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) – sind in Bild 6.7 und Bild 6.8 dargestellt, getrennt für das Sommer- und Winterhalbjahr.

Sie unterscheiden sich für die beiden Halbjahre erheblich: Im Sommerhalbjahr (Bild 6.7) sind die Unterschiede zwischen den Standorten geringer als im Winterhalbjahr und der Tagesgang ist – auf höherem Niveau – weniger ausgeprägt. Außerdem sind hier alle Koeffizienten größer als Null. Im Winterhalbjahr (Bild 6.8) errechnen sich – vor allem an den Standorten Allerbeck und Zollhaus – vom frühen Abend bis zum späten Morgen im Mittel negative Wärmeübergangskoeffizienten, die es aber nicht geben dürfte, denn der Wärmeübergangskoeffizient ist positiv definit. Diese unsinnigen Ergebnisse sind darauf zurückzuführen, dass die Repräsentanz der Messungen an der DWD-Station für die Verhältnisse am GMA Standort im Winter bei windschwachen Wetterlagen noch weniger gewährleistet ist als im Sommer, weil die Atmosphäre im Winter stabiler geschichtet ist. Das führt, insbesondere in Bodennähe, zur Ausbildung von lokal geprägten Verhältnissen. Es ist daher typisch, dass die unsinnigen Wär-

GMA Standort	BAB	DWD Standort
Heede GMA	A031N	Dörpen
Salzenforst GMA	A004E	Kubschütz
Pulvermühle GMA	A063S	Kaiserslautern
Allerbeck GMA	A002E	Hannover Langenhagen
Zollhaus GMA	A073S	Nürnberg Netzstall
Schulenburg GMA	A352W	Hannover Langenhagen
Kaditz GMA	A004W	Dresden Hosterwitz
Laage GMA	A019S	Rostock Laage
Bekond GMA	A001W	Trier Petrisberg
AS-Schoenebeck GMA	A014X	Magdeburg

Tab. 6.2: Standorte, deren Daten zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten benutzt wurden

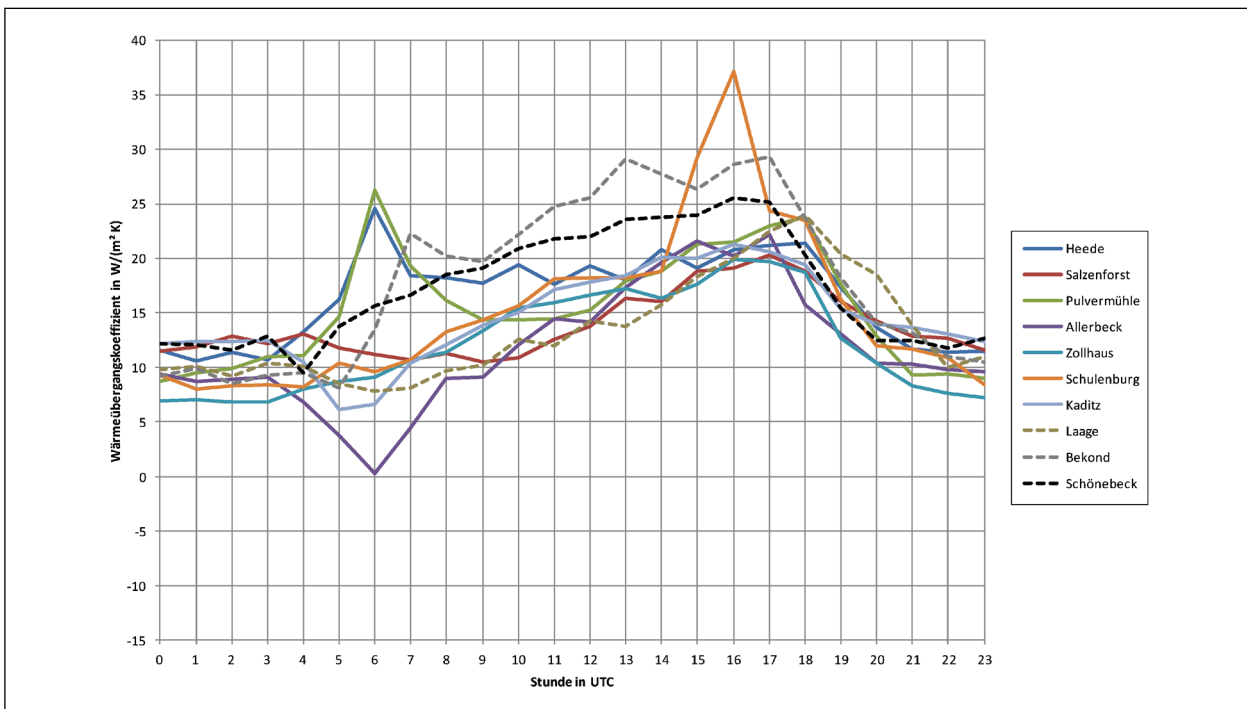


Bild 6.7: Mittlere Tagesgänge des Wärmeübergangskoeffizienten für 10 Standorte; Zeitraum: 2015 bis 2017, April bis September

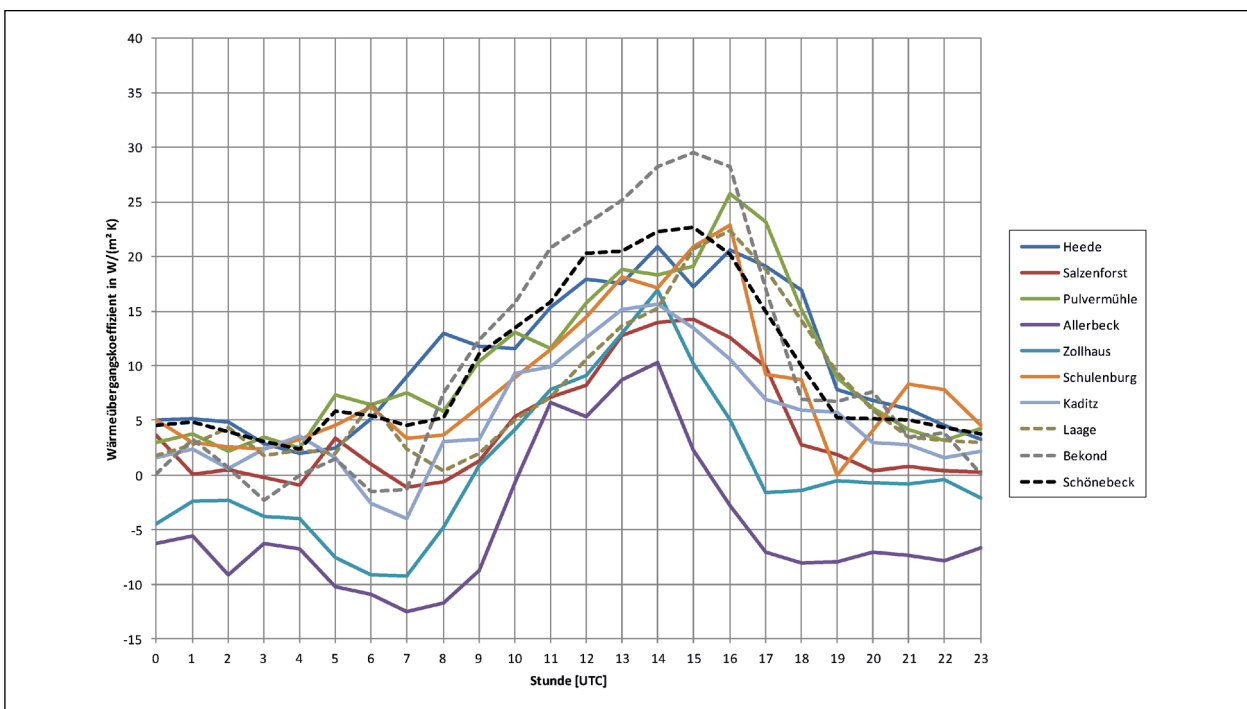


Bild 6.8: Mittlere Tagesgänge des Wärmeübergangskoeffizienten für 10 Standorte; Zeitraum: 2015 bis 2017, Oktober bis März

meübergangskoeffizienten vor allem an den beiden GMA-Standorten auftreten, die sich im Wald befinden (Zollhaus und Allerbeck). Die Standorte der DWD-Stationen werden i. d. R. so gewählt, dass eng begrenzte, lokale Effekte keinen allzu großen Einfluss auf die Messungen haben.

In diesem Projekt werden Belastungen auf Betonfahrbahnen untersucht, die durch große positive Temperaturgradienten in der Betonplatte entstehen. Diese treten in der Zeit der größten Einstrahlung und damit vorwiegend um die Mittagszeit und im Sommerhalbjahr auf. Der Tagesgang des Wärme-

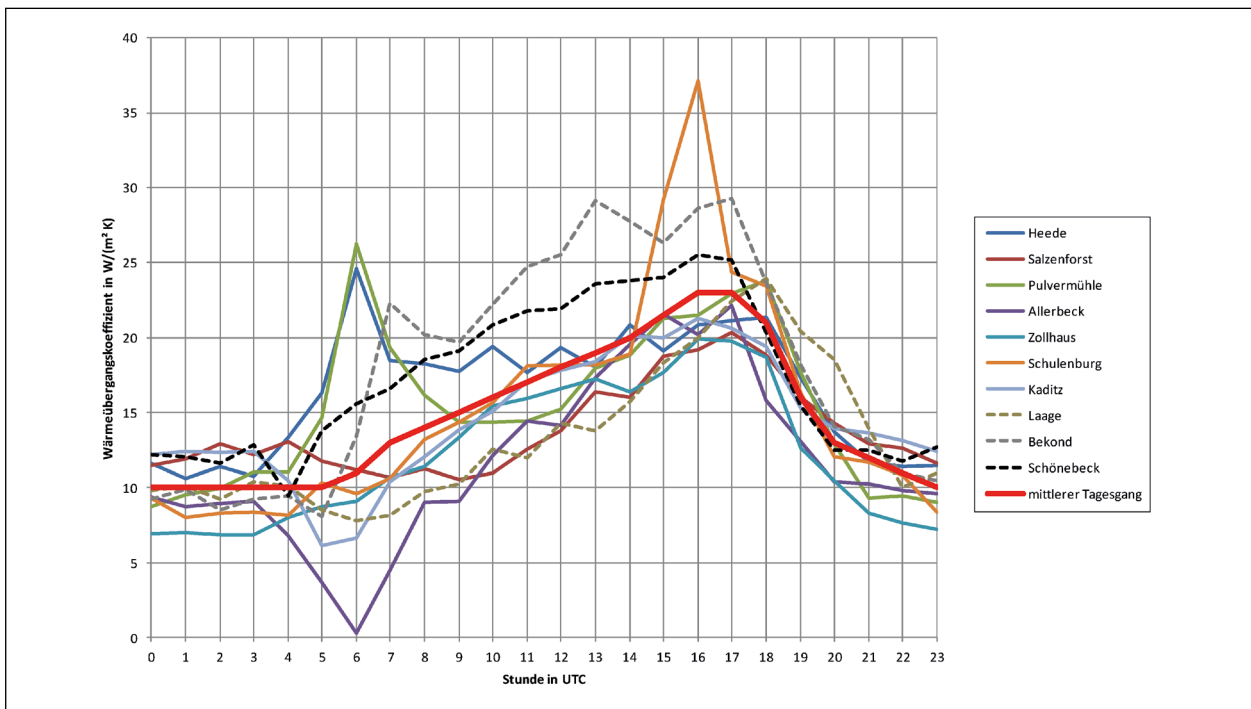


Bild 6.9: Mittlere Tagesgänge des Wärmeübergangskoeffizienten für die Berechnung des fühlbaren Wärmestroms mit dem EPM

übergangskoeffizienten ist deshalb anhand der täglichen Verläufe des Sommerhalbjahres festgelegt worden und zwar manuell nach Augenmaß. Er konnte nicht aus den in Bild 6.7 dargestellten Verläufen errechnet werden, weil es in diesen Ergebnissen Effekte gibt, die allein aus der Positionierung der Sonde, mit der die Oberflächentemperatur gemessen wird, resultieren: Wenn diese – z. B. durch eine Brücke über die Autobahn – in der Zeit, in der sich die Fahrbahnoberflächentemperatur schnell ändert, im Schatten liegt, ergeben sich die Spitzen, die in Bild 6.7 zu sehen sind. Sie würden bei der Bildung eines Mittelwertes aus den 10 dargestellten Verläufen stören.

Der manuell festgelegte Tagesgang des Wärmeübergangskoeffizienten ($WÜK$), der zur Berechnung des fühlbaren Wärmestroms im EPM benutzt wird, ist in Bild 6.9 dargestellt. Seine stündlichen Werte können der Tabelle 7.7 entnommen werden.

6.2.4 Vergleich mit der bisherigen Berechnung des fühlbaren Wärmeflusses

Der Wärmeübergangskoeffizient wird bisher anhand der Windgeschwindigkeit berechnet. In Bild 6.10 sind die fühlbaren Wärmeflüsse, berechnet zum einen in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit und zum anderen mit dem hier neu entwi-

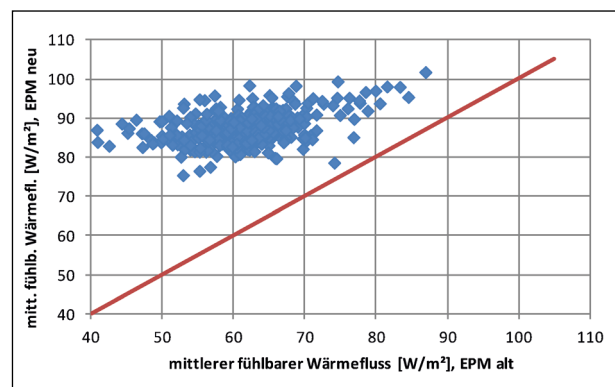


Bild 6.10: Vergleich des mittleren fühlbaren Wärmeflusses, berechnet nach dem bisherigen (EPM alt) und dem neuen Ansatz (EPM neu), Datengrundlage: 328 Standorte, 2001 bis 2015, April bis September

ckelten Wärmeübergangskoeffizienten, gegeneinander aufgetragen. Es handelt sich um Stundenmittelwerte, berechnet für den Zeitraum 2001 bis 2015, Sommerhalbjahr (Apr bis Okt) und für 328 Standorte in der Bundesrepublik.

Die Ergebnisse unterscheiden sich deutlich: Bei der neuen Berechnung ist der Wärmeübergangskoeffizient für alle Standorte gleich. Der Unterschied hinsichtlich des fühlbaren Wärmeflusses wird daher von der Differenz der Fahrbahnoberflächen- und der Lufttemperatur bestimmt. Bei der bisherigen Berechnung kommt die Windgeschwindigkeit als Einflussfaktor hinzu. Dadurch nehmen die bisher

berechneten fühlbaren Wärmeflüsse einen breiteren Wertebereich ein, gleichzeitig sind sie deutlich niedriger als die neuen Werte. Damit wird bei der neuen Version des EPM ein größerer Anteil der Energie, die der Fahrbahn zugeführt wird, in den fühlbaren Wärmefluss umgesetzt. Das führt zu niedrigeren Fahrbahnoberflächentemperaturen. Man kann dem Bild 6.10 zudem entnehmen, dass die neuen und alten Berechnungsergebnisse für den fühlbaren Wärmefluss weniger gut korrelieren, als das für den latenten Wärmefluss (Bild 6.11) und die langwellige Gegenstrahlung (Bild 6.1) der Fall ist. Damit hat die neue Berechnung auch einen Einfluss auf die räumliche Verteilung der mittleren Fahrbahnoberflächentemperatur (siehe dazu Bild 6.14 und Bild 6.15).

6.3 Abflussmodell

Die Wassermenge, die für die Verdunstung zur Verfügung steht, wird von der Niederschlagshöhe bestimmt. Regelkonforme Fahrbahnoberflächen sind so gestaltet, dass der Niederschlag abfließen kann.

In Anlehnung an die Bemessungsvorschriften von Entwässerungseinrichtung im Verkehrsbau [FGSV05] wurde in [KAY 2007] und [WEL 2008] davon ausgegangen, dass 85 % (= Abflussbeiwert) des gefallenen Niederschlags abfließen und damit nicht für die Verdunstung zur Verfügung stehen. Die Berücksichtigung eines konstanten relativen Abflussbeiwertes im Zuge der Verdunstungsberechnung führt jedoch dazu, dass bei stärkeren Niederschlagsmengen die für die Verdunstung zur Verfügung stehende Wassermenge über- und bei kleinen Niederschlagsmengen unterschätzt wird.

Tatsächlich wird in Abhängigkeit der Oberflächenbeschaffenheit/Oberflächentextur zunächst eine bestimmte Wassermenge benötigt, um die gesamte Oberfläche mit Wasser zu benetzen. Erst nach der quasi vollständigen Benetzung wird weiterer auf der Oberfläche ankommender Niederschlag zum Abfluss gebracht. In [ATV04] wird für undurchlässige befestigte Flächen dieser Benetzungsverlust mit 0,3 mm bis 0,7 mm angegeben.

Im Rahmen dieses Projekts ist die Benetzungsmenge (BM_{H_2O}) für 1 m² einer Asphaltdecke mit einfachen Mitteln (Zollstock, Gartenspritze (Drucksprüher), Personenwaage) und erstaunlich konformem Ergebnis ermittelt worden: Unter atmosphärischen Bedingungen, die kaum Verdunstung zuließen

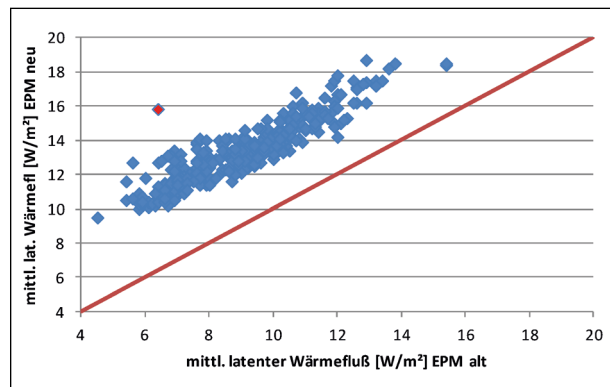


Bild 6.11: Vergleich des mittleren latenten Wärmeflusses, berechnet nach dem bisherigen (EPM alt) und dem neuen Ansatz (EPM neu); Datengrundlage: 328 Standorte, 2001 bis 2015, April bis September

(Lufttemperatur 0 °C, windstill, Himmel bedeckt), wurde die Benetzungsmenge sechsmal gemessen. Sie lag bei allen Versuchen zwischen 0,5 und 0,6 mm/m² und damit in dem in [ATV04] angegebenen Bereich.

Das neue Abflussmodell erhöht die Wassermenge, die auf der Fahrbahn verdunstet und vergrößert damit auch den latenten Wärmefluss gegenüber der bisherigen Berechnung. In Bild 6.11 sind die Stundenmittel des Sommerhalbjahres einander gegenübergestellt: Die mittlere Zunahme beträgt 4,4 W/m², fällt also gegenüber der Veränderung bei der langwelligigen Gegenstrahlung sehr gering aus. Der Zusammenhang ist hier auch weniger eng, damit wirkt sich die veränderte Berechnung auch auf die räumliche Verteilung der Berechnungsergebnisse aus. Da der latente Wärmefluss aber die kleinste Komponente der Bilanzgleichung ist, wird sich diese Veränderung kaum bemerkbar machen.

Der rot markierte Datenpunkt stammt vom Brocken: Hier nimmt der latente Wärmefluss besonders stark zu, weil es hier die meisten Stunden mit Niederschlag gibt.

6.4 Kurzweiliges Reflexionsverhalten der Fahrbahn

Feuchte und nasse Fahrbahnen sind – wie auch bei nicht bewachsenen Boden zu beobachten – dunkler als trockene [LERCH 1991]. Ihr Reflexionsvermögen für kurzweilige Strahlung (Albedo) ist daher gegenüber einer trockenen Oberfläche reduziert. So hat nach [GEI 2009] nasser Beton eine Albedo, die der des Asphalts ähnlich ist. Die Abnahme der Albedo mit der Nässe wird bei der Modellierung berück-

sichtigt, indem für trockene, feuchte (Wassermenge auf der Fahrbahn größer Null und kleiner als Benetzungsmenge) und nasse (Wassermenge = Benetzungsmenge) Fahrbahnen unterschiedliche Werte für die Albedo angesetzt werden.

6.5 Vergleich von Modellergebnissen

Bisher ist nur dargestellt worden, wie sich die Modifikationen, die für dieses Projekt am EPM vorgenommen wurden, auf die einzelnen Terme der Energiebilanz auswirken. Jetzt soll anhand der Fahrbahnoberflächentemperatur dargestellt werden, welchen Einfluss diese Änderungen insgesamt auf die Modellergebnisse haben.

6.5.1 Mit Messwerten

Für diese Untersuchung sind drei Glättemeldeanlagen (GMA) ausgesucht worden, deren Messungen nicht für die Neufestlegung des Wärmeübergangskoeffizienten benutzt worden sind (Tabelle 6.3).

Anders als der Wärmeübergangskoeffizient hängt die berechnete Fahrbahnoberflächentemperatur von den Materialeigenschaften der obersten Berechnungsschicht ab. Deshalb sind bei der Berechnung der Fahrbahnoberflächentemperatur nicht die generischen Materialparameter, die bei der Festle-

GMA Standort	BAB	Messtechnik von Fa.	DWD Standort	mFF
AS Frankfurt-Seckbach	A661S	Lufft	Frankfurt Westend	2,4 m/s
Blume	A1S	Micks	Wuppertal	3,6 m/s
Schöffelding	A96E	Swarco/Vaisalla	Landsberg	3,7 m/s

Tab. 6.3: GMA- und DWD-Standorte für den Vergleich der Modellergebnisse; mff: mittlere Windgeschwindigkeit am Standort in den Jahren 2015 bis 2017

Parameter	Wert	Einheit
Wärmeleitfähigkeit	1,1	W/(m·K)
Spez. Wärmekapazität	750	Ws/(kg·K)
Raumdichte	2.300	Kg/m ³
Albedo trocken	15	%
Albedo feucht	10	%
Albedo nass	5	%

Tab. 6.4: Materialparameter der Asphaltdecke

gung der Wärmeübergangskoeffizienten benutzt wurden, zum Einsatz gekommen, sondern Parameter, die besser an den Fahrbahnoberbau angepasst sind: Alle betrachteten GMA messen in Asphalt.

Dennoch muss betont werden, dass die tatsächlichen Verhältnisse am Messort der GMA nicht bekannt sind. Es ist also durchaus möglich, dass die tagsüber durchweg positiven Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Werten (s. u.) darauf zurückzuführen sind, dass die Albedo bei der Berechnung zu niedrig angesetzt wurde.

Ein Vergleich für Betonfahrbahnen konnte nicht vorgenommen werden, da zum Zeitpunkt dieser Untersuchung (April 2018) noch keine Materialparameter für Beton festgelegt waren.

Es sind 3 GMA ausgesucht worden, für die möglichst viele Messwerte vorliegen. Im DWD werden erst seit 2015 vermehrt auch Messwerte aus dem ganzen Jahr und nicht nur aus dem Winter archiviert. Daher kam nur der 3-jährige Zeitraum 2015 bis 2017 infrage. Die ausgesuchten GMA – Frankfurt-Seckbach, Blume und Schöffelding – haben jeweils Datenlücken, die weniger als 10 % aller Stundenwerte ausmachen.

Für die Beurteilung der Übereinstimmung von Messwerten und Modellergebnissen wurden zwei Ergebnisse betrachtet, getrennt nach Jahr, Sommerhalbjahr und Winterhalbjahr:

1. die mittlere Fahrbahnoberflächentemperatur
2. der mittlere Tagesgang der Fahrbahnoberflächentemperatur

Mittlere Fahrbahnoberflächentemperatur

Die berechneten Mittelwerte unterscheiden sich von den gemessenen für das neue EPM um bis zu 1,4 K, für das alte Modell gibt es Unterschiede bis zu 4,6 K. Dabei sind die berechneten Werte vor allem im Sommerhalbjahr höher als die gemessenen. Für die Berechnung mit dem alten EPM ist der Unterschied zu den gemessenen Werten vor allem dort groß, wo die Windgeschwindigkeit niedrig ist: Hierin zeigt sich der Einfluss des modifizierten Wärmeübergangskoeffizienten.

Im Winterhalbjahr sind die Unterschiede zwischen berechneten und gemessenen Werten und auch die Unterschiede zwischen dem ursprünglichen und dem modifizierten Modell so klein, dass sie innerhalb der Modellgenauigkeit liegen.

Zeitraum	Fra-Seckbach			Schöffelding			Blume		
	GMA	neu	alt	GMA	neu	alt	GMA	neu	alt
Jahr	14,6	15,3	16,9	12,3	12,3	13,2	13,0	13,4	4,1
Sommerhj.	22,0	23,4	26,6	20,2	20,5	22,4	19,2	20,2	21,8
Winterhj.	7,2	7,1	7,3	4,9	4,1	3,9	6,1	5,6	6,3

Tab. 6.5: Gemessene und berechnete mittlere Fahrbahnoberflächentemperaturen in °C; Zeitraum: 2015 bis 2017, GMA: Messwert der GMA, neu: modifiziertes EPM, alt: altes EPM

Angesichts der vielen Unsicherheiten, die in das Berechnungsergebnis eingehen – Repräsentanz der meteorologischen Messungen und der gewählten Materialparameter für die GMA – sind die Unterschiede zwischen den neu berechneten mittleren Fahrbahnoberflächentemperaturen und den entsprechenden Messwerten unerheblich. Das alte Modell hingegen berechnet im Sommer bei niedrigen Windgeschwindigkeiten mit der hier verwendeten Albedo zu hohe Werte (Tabelle 6.5).

Mittlerer Tagesgang

Der Modifikation des EPM hinsichtlich des Wärmeübergangskoeffizienten soll zu einer guten Übereinstimmung berechneter und gemessener Tagesgänge führen. Dieses Ziel wird nur bedingt erreicht:

Die mittleren Tagesgänge für das Sommerhalbjahr sind in Bild 6.12 dargestellt. An allen drei Standorten ist die Amplitude des berechneten Tagesgangs für das neue EPM etwas und für das alte EPM deutlich größer als die gemessene. Die Differenz zwischen beiden Werten erreicht um 14 UTC ihr Maximum. Sie liegt bei der neuen Berechnung zwischen 1,7 K für Schöffelding und 2,9 K für Frankfurt-Seckbach, bei dem alten EPM werden Differenzen von 6,0 K und 8,6 K erreicht.

Im Winterhalbjahr (Bild 6.13) sind die Unterschiede hinsichtlich der beiden Modellergebnisse nicht so groß, aber auch in diesem Fall passt die neue Berechnung besser zu den gemessenen Werten.

Für die neue Berechnung gilt: Für Frankfurt-Seckbach passen die Tagesgänge sehr gut zusammen, in Schöffelding und Blume hat der berechnete Tagesgang wieder eine größere Amplitude als der gemessene. Dabei treten die größten Differenzen in Schöffelding am Ende der Nacht und in Blume – wie im Sommerhalbjahr – zur Mittagszeit auf. Sie liegen für die drei Stationen zwischen 0,7 K und 1,8 K und sind damit kleiner als die Differenzen für das Sommerhalbjahr. Der mittlere Tagesgang des Wärme-

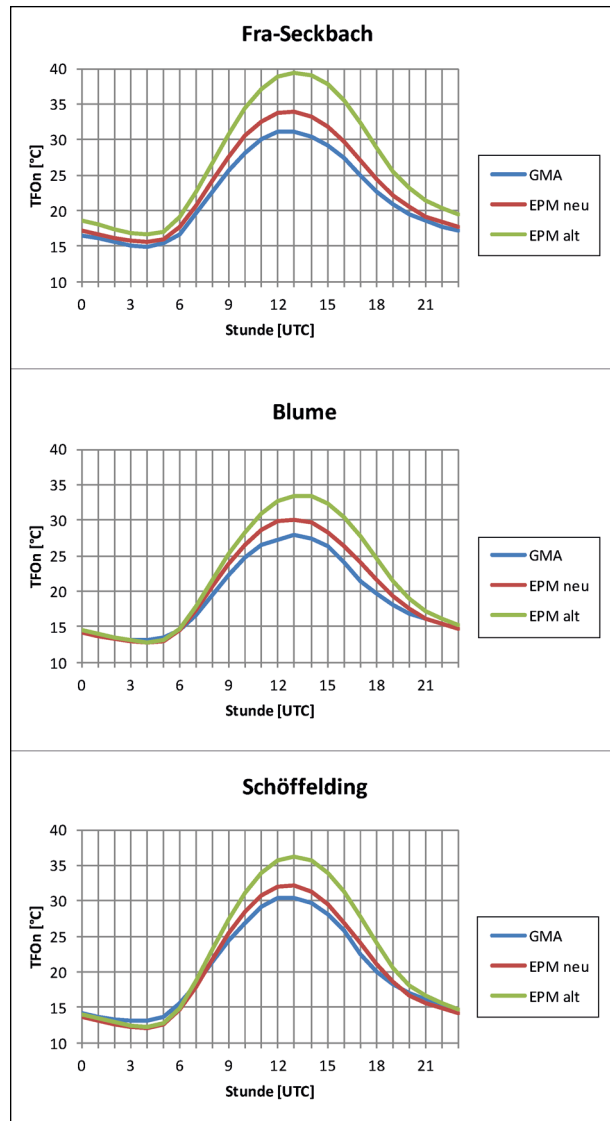


Bild 6.12: Mittlerer Tagesgang der Fahrbahnoberflächentemperatur gemessen an der GMA und berechnet mit dem EPM, 2015 bis 2017, Sommerhalbjahr

übergangskoeffizienten führt also im Winterhalbjahr nicht zu größeren Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Werten als im Sommerhalbjahr.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Modifikationen am Berechnungsmodell dazu geführt haben, dass

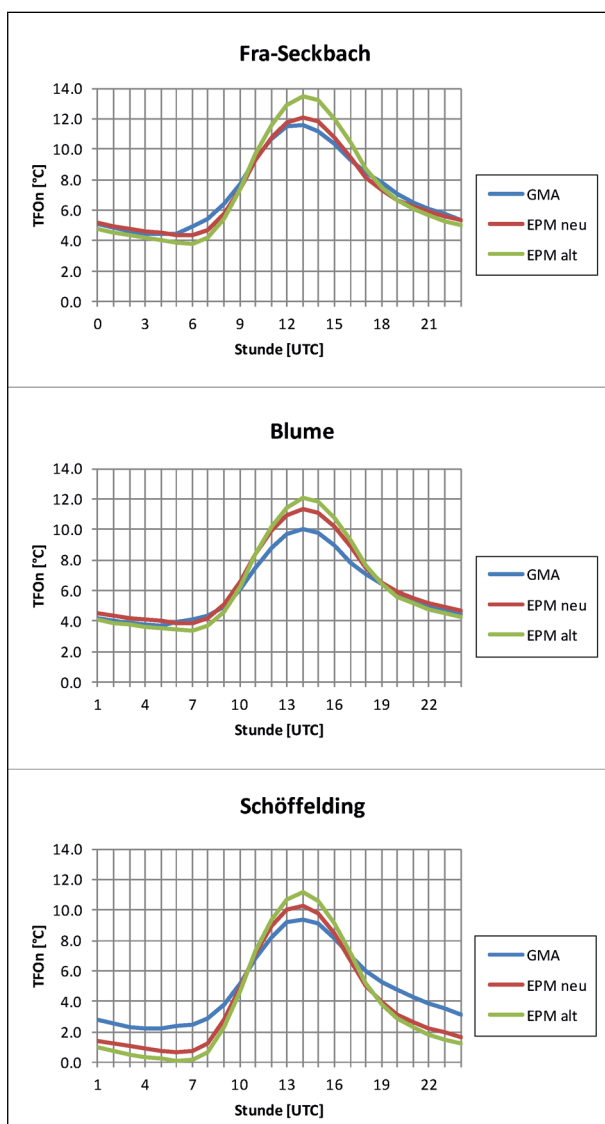


Bild 6.13: Mittlerer Tagesgang der Fahrbahnoberflächentemperatur gemessen an der GMA und berechnet mit dem EPM, 2015 bis 2017, Winterhalbjahr

die berechneten Fahrbahnoberflächentemperaturen gegenüber dem alten Modell tagsüber sinken. Das gilt vor allem für das Sommerhalbjahr, dessen Ergebnisse für die thermische Belastung der Fahrbahn maßgebend sind.

6.5.2 Räumliche Verteilung

In den Bildern 6.14 und 6.15 sind mittlere Fahrbahnoberflächentemperaturen für das Sommerhalbjahr und den Zeitraum 2001 bis 2015 in Kartenform dargestellt. Die Darstellung basiert auf Rasterwerten im 1 km x 1 km-Raster.

Die Oberflächentemperatur des Sommerhalbjahrs ist bei der neuen Berechnung im Mittel aller 328 Stationen, deren Ergebnisse den Rasterdaten zu-

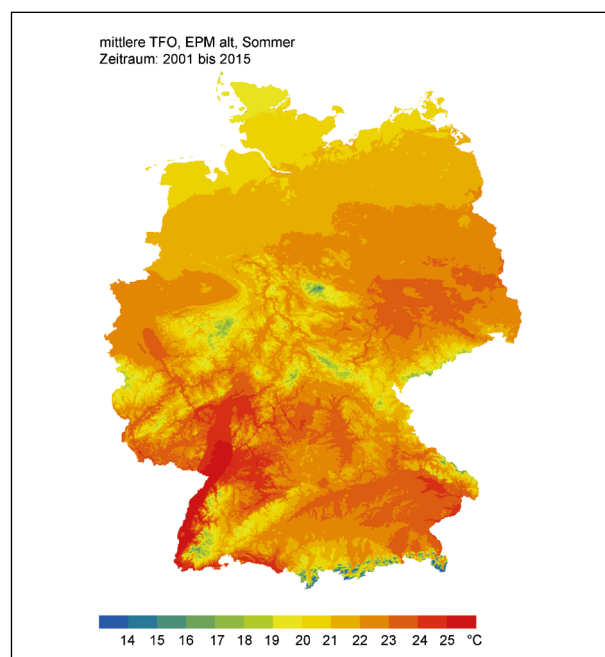


Bild 6.14: Mittlere Fahrbahnoberflächentemperatur der Monate April bis September, berechnet mit den originalen Ansätzen [KAY 2007]

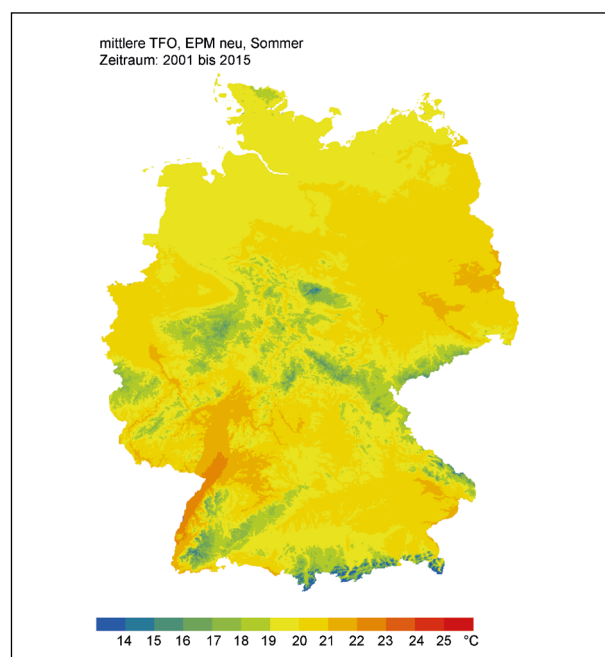


Bild 6.15: Mittlere Fahrbahnoberflächentemperatur der Monate April bis September, berechnet mit den modifizierten Ansätzen für die langwellige Gegenstrahlung (siehe Bild 6.1), den fühlbaren Wärmefluss (siehe Bild 6.2) und die zu verdunstende Niederschlagshöhe (siehe Bilder 6.3 und 6.4)

grunde liegen, um 2 K niedriger als bei der bisherigen Berechnung.

Der Einfluss der Windgeschwindigkeit ist bei der alten Berechnung vor allem in Norddeutschland er-

kennbar, wo der Wind mit zunehmendem Abstand von der Küste abnimmt und die Fahrbahnoberflächentemperatur dementsprechend zunimmt.

Bei der neuen Berechnung ist der Einfluss des Reliefs ausgeprägter. Insgesamt haben sich die Modellmodifikationen aber mehr auf das Temperaturniveau als auf die räumliche Verteilung ausgewirkt.

7 Parametrisierung

Für die Anwendung des Berechnungsmodells (Kapitel 5.2) sind verschiedenste Parameter quantitativ festzulegen.

Die Parameter können jeweils einer der folgenden Gruppen zugeordnet werden:

- Konstruktionsaufbau,
- Thermische Materialeigenschaften,
- Reflexionseigenschaften,
- sonstige Berechnungsparameter.

7.1 Konstruktionsaufbau

Der Konstruktionsaufbau, der für die Temperatursimulationen an den 328 Stationen (siehe Kapitel 4.3) im Rahmen dieses FuE-Projektes herangezogen wird, umfasst die in Tabelle 7.1 angegebenen

Schicht-Nr. (fortlaufend von oben)	Art der Konstruktions-schicht	Dicke der Konstruktions-schicht
1	Betondecke	0,30 m
2	Schottertragschicht	0,20 m
3	Frostschuttschicht	0,30 m
4	Boden	11,2 m

Tab. 7.1: Gewählter Befestigungsaufbau

Modifizierte Befestigungsaufbauten	Art der Konstruktions-schicht	Dicke der Konstruktionsschicht			
		Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
1	Betondecke	0,10 m	0,20 m	0,40 m	0,50 m
2	Schottertragschicht	0,20 m	0,20 m	0,20 m	0,20 m
3	Frostschuttschicht	0,30 m	0,30 m	0,30 m	0,30 m
4	Boden	11,40 m	11,30 m	11,10 m	11,00 m

Tab. 7.2: Modifizierte Befestigungsaufbauten

Konstruktionsschichten und Konstruktionsschichtdicken.

Damit ergibt sich eine Gesamtdicke des modellierten Befestigungsaufbaus von 12,0 m. Zur Ermittlung des funktionalen Zusammenhangs zwischen Betondeckendicke und dimensionierungsrelevanten Temperaturgradienten sind für 50 Stationen (siehe Kapitel 4.3) die Temperatursimulationen mit gegenüber Tabelle 7.1 veränderten Betondeckendicken durchzuführen (siehe Tabelle 7.2).

7.2 Thermische Materialeigenschaften

Für die Temperaturberechnung sind folgende thermische Materialeigenschaften erforderlich:

- Wärmeleitfähigkeit (WLF) des Materials der obersten Befestigungsschicht [W/m/K]
- Spezifische Wärmekapazität (sWK) des Materials der obersten Befestigungsschicht [Ws/kg/K],
- Raumdichte (RD) des Materials der obersten Befestigungsschicht [kg/m³],
- Temperaturleitfähigkeit (TLF) der Materialien der übrigen Befestigungsschichten [m²/s].

Die Temperaturleitfähigkeit kann bei Kenntnis der übrigen drei Eigenschaften aus diesen berechnet werden:

$$a_g = \frac{\lambda_W}{c_p \cdot \rho_A} \quad (7-1)$$

a_g Temperaturleitfähigkeit [m²/s]

λ_W Wärmeleitfähigkeit [W/m/K]

ρ_A Raumdichte [kg/m³]

c_p spezifische Wärmekapazität [Ws/kg/K]

Material	WLF [W/m/K]	RD [kg/m ³]	sWK [Ws/kg/K]	TLF [10 ⁻⁶ m ² /s]	Quelle
Beton	1,00	2.100	880	0,54	[LUM 2018]
Beton	1,60	2.200	960 – 1.000	0,73 – 0,76 ^{*)}	[SCHW 2018]
Beton	2,10	2.400	960 – 1.000	0,88 – 0,91 ^{*)}	[SCHW 2018]
Beton	1,15 – 1,65	2.000 – 2.600	1.000	0,44 – 0,82 ^{*)}	[IZ B 2018]
Sandboden (trocken)	0,27	1.650	800	0,20	[LUM 2018]
Sandboden (trocken)	0,70	1.500	921,6	0,51	[JAE 1981]
Sandboden (trocken)	0,33	1.520			[DUB 1997]
Sandboden (feucht)	0,58	1.750	1.000	0,33	[LUM 2018]
Sandboden (feucht)	1,88	1.500	1.198,8	1,05	[JAE 1981]
Sandboden (feucht)	1,14	1.640			[DUB 1997]
Tonboden	1,28	1.450	880	1,00	[LUM 2018]
Kies (trocken)	0,35	2.500	560	0,25	[BLU 2001]
Kies (feucht)	2,90	2.500	920	1,26	[BLU 2001]
Erde (trocken)	0,35	1.500	840	0,28	[BLU 2001]
Erde (feucht)	2,50	1.800	1.260	1,10	[BLU 2001]
Erde (tonig)	1,51	1.500	1.080	0,93	[BLU 2001]
Erdreich (10 % Feuchte)	0,50 – 2,00	1.000 – 2.000			[SCHW 2018]
Sand (trocken)	0,40	1.500	658	0,41	[BLU 2001]
Sand (feucht)	1,00	1.700	700	0,84	[BLU 2001]
Schotter	2,30	2.754	850	0,98	[GLU 2007]

^{*)} Die Temperaturleitfähigkeit ist aus den Literaturangaben die übrigen Eigenschaften gemäß Gleichung (7-1) errechnet.

Tab. 7.3: Thermische Materialeigenschaften unterschiedlicher Stoffe

Material	WLF [W/m/K]	RD [kg/m ³]	sWK [Ws/kg/K]	TLF ^{*)} [10 ⁻⁶ m ² /s]	TLF ^{*)} [cm ² /h]
Beton	1,00 – 2,10	2.000 – 2.600	880 – 1.000	0,38 – 1,19	13,8 – 43,0
Asphalt	0,70 – 0,90	2.000 – 2.500	840 – 920	0,30 – 0,54	11,0 – 19,3
Sandboden ^{**)}	0,30 – 1,90	1.500 – 1.750	800 – 1.200	0,17 – 1,36	6,0 – 48,9
Erdreich ^{**)}	0,35 – 2,50	1.000 – 2.000	840 – 1.260	0,14 – 2,98	5,0 – 107,1
Schotter	2,30	2.750	850	0,98	35,4

^{*)} Die Temperaturleitfähigkeit ist aus den Grenzwerten der übrigen Eigenschaften gemäß Gleichung (7-1) errechnet.
^{**)} Werte sind sehr stark vom Feuchtegehalt abhängig

Tab. 7.4: Wertebereiche der thermischen Materialeigenschaften unterschiedlicher Stoffe

Für diese Eigenschaften finden sich in der Literatur sehr unterschiedliche Angaben. Einen Überblick gibt Tabelle 7.3.

Zusammenfassend ergeben sich in etwa die in Tabelle 7.4 angegebenen Wertebereiche.

Für die einzelnen Schichten des in Kapitel 7.1 definierten Modells zum Befestigungsaufbau sind die thermischen Materialparameter wie folgt festgelegt worden:

Boden

Da die thermischen Materialeigenschaften eines Bodens sowohl sehr stark von der Beschaffenheit des Bodens wie auch vom Wassergehalt abhängen, werden für die Bodenschicht des Modellaufbaus folgende Werte angenommen:

Wärmeleitfähigkeit: $\lambda_W = 1,4 \text{ W/m/K}$

Raumdichte: $\rho_A = 1.500 \text{ kg/m}^3$

Spezifische Wärmekapazität: $c_p = 1.050 \text{ Ws/kg/K}$

Diese Werte entsprechen den Mittelwerten der Wertegrenzen aus Tabelle 7.4 und ergeben ein mittlere Temperaturleitfähigkeit von:

$$a_g = 0,90 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 32,6 \text{ cm}^2/\text{h}$$

Schottertragschicht (STS)

Für Schottertragschichten kann davon ausgegangen werden, dass die thermischen Eigenschaften ebenfalls sehr unterschiedlich ausfallen können und u. a. davon abhängen, aus welcher Gesteinsart die STS besteht.

Orientiert man sich an den Werten, die in der Literatur zu finden sind, werden für die Schottertragschicht des Modellaufbaus folgende Werte angenommen:

Wärmeleitfähigkeit: $\lambda_W = 2,3 \text{ W/m/K}$

Raumdicke: $\rho_A = 2.200 \text{ kg/m}^3$

Spezifische Wärmekapazität: $c_p = 850 \text{ Ws/kg/K}$

Die Wärmeleitfähigkeit sowie die spezifische Wärmekapazität entsprechen den Angaben aus der Literatur (Tabelle 7.3). Für die Dichte wurde ein von der Literaturangabe abweichender Wert angenommen, der sich an den Erfahrungen (Prüfzeugnisse für STS-Gemische im Straßenbau) der Autoren orientiert.

Aus diesen Werten ergibt sich eine rechnerische Temperaturleitfähigkeit von:

$$a_g = 1,23 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 44,3 \text{ cm}^2/\text{h}$$

Frostschuttschicht

Konkrete Literaturangaben zu den thermischen Materialeigenschaften einer Frostschuttschicht (FSS) liegen den Autoren nicht vor. Da jedoch eine FSS in ihrer Zusammensetzung einer STS ähnelt, kann davon ausgegangen werden, dass die thermischen Eigenschaften der FSS ähnlich der einer STS sind. Deshalb werden für die FSS des Modellaufbaus die gleichen Werte wie für die darüber liegende STS angenommen:

Wärmeleitfähigkeit: $\lambda_W = 2,3 \text{ W/m/K}$

Raumdicke: $\rho_A = 2.200 \text{ kg/m}^3$

Spezifische Wärmekapazität: $c_p = 850 \text{ Ws/kg/K}$

Temperaturleitfähigkeit: $a_g = 1,23 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 44,3 \text{ cm}^2/\text{h}$

Betondecke

Für die Betondecke werden die thermischen Materialparameter ebenfalls aus den Literaturangaben abgeleitet (= Mittelwerte der Wertegrenzen aus Tabelle 7.4).

Wärmeleitfähigkeit: $\lambda_W = 1,6 \text{ W/m/K}$

Raumdicke: $\rho_A = 2.300 \text{ kg/m}^3$

Spezifische Wärmekapazität: $c_p = 940 \text{ Ws/kg/K}$

Temperaturleitfähigkeit: $a_g = 0,74 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 26,6 \text{ cm}^2/\text{h}$

7.3 Reflexionseigenschaften

Die Anwendung der Wärmebilanzgleichungen (Kapitel 5.2) erfordert für das Material der obersten modellierten Befestigungsschicht die Reflexionseigenschaften für kurz- und für langwellige Strahlung.

In [WIL 2014] wurden umfangreiche Messungen zum solaren Strahlungsreflexionsgrad (Tabelle 7.5) sowie zum Emissionsgrad im infraroten Spektralbereich (= Absorptionsgrad = 1-Reflexionsgrad) (Tabelle 7.6) an verschiedensten Betonsteinproben unterschiedlicher Farbe und Oberflächentextur durchgeführt.

Während der Emissionsgrad von Beton für langwellige Strahlung in einem recht engen Wertebereich von 0,92 bis 0,95 liegt, weist der solare Reflexionsgrad der untersuchten Betonsteinproben mit Werten von ca. 0,09 bis 0,76 einen weitaus größeren Bandbreite auf. Er ist abhängig von der Farbe sowie der Textur der Oberflächen.

In Bild 7.1 sind für die in [WIL 2014] untersuchten neutralfarbigen Betonsteinproben fotografische Darstellungen hinterlegt. Straßenbetonoberflächen entsprechen dabei am ehesten den Proben

- DV340007 grau, unbehandelt, makrofein bzw.
- DV340009 grau, unbehandelt, makrorau.

Für diese Betonsteinproben liegt das kurzwellige Reflexionsvermögen im Bereich von 0,25 bis 0,31 sowie das langwellige Reflexionsvermögen im Bereich von 0,94 bis 0,95.

Proben-Nr.	Probekörper-bezeichnung Fraunhofer ISE	Farbe (augenscheinlich)	Oberflächentextur (augenscheinlich)	Solarer Strahlungs- reflexionsgrad (Gewichtung nach ASTM G 173-03 hemisphärisch)	
1	DV340001	weiß	glatt, porenfrei		0,756
2	DV340003	quarzweiß	geschliffen		0,618
3	DV340005	hellgrau	unbehandelt, makrofein		0,377
4	DV340007	grau	unbehandelt, makrofein		0,308
5	DV340009	grau	unbehandelt, makrorau		0,250
6	DV340011	dunkelgrau	unbehandelt, makrofein		0,168
7	DV340013	anthrazit	geschliffen		0,104
8	DV340015	schwarz	unbehandelt, makrorau		0,087
9	DV340017	beige	stahlkugelgestrahlt		0,581
10	DV340019	gelb	sandgestrahlt		0,415
11	DV340021	ocker	unbehandelt, makrofein		0,405
12	DV340023	beige-rot	geschliffen		0,603
13	DV340025	rot	geschliffen		0,314
14	DV340027	rot	unbehandelt, makrorau		0,244
15	DV340029	rot	unbehandelt, makrofein		0,268
16	DV340031	braun	unbehandelt, makrorau		0,191

Tab. 7.5: Solarer Strahlungsreflexionsgrad unterschiedlicher Betonsteinproben [WIL 2014]

Proben-Nr.	Probekörper-bezeichnung Fraunhofer ISE	Farbe (augenscheinlich)	Oberflächentextur (augenscheinlich)	Hemisphärischer thermi- scher Emissionsgrad	
				bei 300 K	bei 300 K
1	DV340001	weiß	glatt, porenfrei	0,954	0,950
2	DV340003	quarzweiß	geschliffen	0,930	0,927
3	DV340005	hellgrau	unbehandelt, makrofein	0,947	0,944
4	DV340007	grau	unbehandelt, makrofein	0,944	0,940
5	DV340009	grau	unbehandelt, makrorau	0,951	0,948
6	DV340011	dunkelgrau	unbehandelt, makrofein	0,938	0,935
7	DV340013	anthrazit	geschliffen	0,941	0,940
8	DV340015	schwarz	unbehandelt, makrorau	0,944	0,941
9	DV340017	beige	stahlkugelgestrahlt	0,944	0,942
10	DV340019	gelb	sandgestrahlt	0,930	0,927
11	DV340021	ocker	unbehandelt, makrofein	0,941	0,937
12	DV340023	beige-rot	geschliffen	0,926	0,923
13	DV340025	rot	geschliffen	0,926	0,923
14	DV340027	rot	unbehandelt, makrorau	0,952	0,949
15	DV340029	rot	unbehandelt, makrofein	0,941	0,937
16	DV340031	braun	unbehandelt, makrorau	0,939	0,935

Tab. 7.6: Thermischer Emissionsgrad unterschiedlicher Betonsteinproben [WIL 2014]



Bild 7.1: Fotografische Darstellung der untersuchten neutralfarbigen Betonsteinproben [WIL 2014]

In Zukunft werden Betonoberflächen häufiger als Waschbeton ausgeführt bzw. die Oberflächentextur durch Grinding-Verfahren hergestellt. Durch beide Verfahren werden die groben Gesteinskörnungen stärker freigelegt als bei herkömmlichen Texturierungsverfahren. In der Folge sind solche Betonoberflächen häufig etwas dunkler als herkömmlich texturierte Straßenbetonflächen. Je dunkler die

Oberfläche wird, desto geringer wird auch die Albedo dieser Oberfläche im kurzwelligen Strahlungsspektrum und desto größer werden Tagesschwankungen der Oberflächentemperatur und in der Konsequenz auch die Temperaturgradienten in der Betondecke.

Vor diesem Hintergrund sowie in Anlehnung an die Ergebnisse aus [WIL 2014] werden für die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Temperatursimulationen folgende Reflexionseigenschaften für die Betondecke festgelegt:

Reflexionsvermögen für kurzwellige Strahlung:

$\alpha_k = 25 \%$ (trockene Fahrbahnoberfläche)

$\alpha_k = 20 \%$ (feuchte Fahrbahnoberfläche)

$\alpha_k = 15 \%$ (nasse Fahrbahnoberfläche)

Reflexionsvermögen für langwellige Strahlung:

$\alpha_L = 5 \%$

7.4 Sonstige Berechnungsparameter

Subschichtdicke

Um aus den Temperatursimulationen Temperaturgradienten ableiten zu können, sind die Temperaturen in unterschiedlichen Tiefenpositionen zu berechnen. Der Berechnungsansatz zur Ermittlung dieser Temperaturen (siehe Kapitel 5.2.2) ist daran gebunden, dass das Befestigungsmodell in Subschichten der gleichen Dicke Δz unterteilt wird. Je kleiner dieser Wegschritt gewählt wird, desto besser lässt sich der Temperaturverlauf über die Dicke der Betondecke abbilden und desto genauer kann der daraus resultierende Temperaturgradient berechnet werden.

Für die Temperaturberechnungen wurde deshalb ein Weginkrement

$\Delta z = 0,01 \text{ m}$

festgelegt.

Benetzungswassermenge

Die Berechnung des latenten Wärmestroms (Gleichung (5-5)) ist abhängig von der zur Verdunstung zur Verfügung stehenden Wassermenge. Diese ist wiederum von der Niederschlagsmenge sowie von der für die Benetzung der Fahrbahnoberfläche erforderlichen Wassermenge (BM_{H_2O}) abhängig. Die-

se Benetzungswassermenge gibt die maximal mögliche Wassermenge vor, die zur Verdunstung gebracht werden kann (siehe Kapitel 6.3).

Sie wird in Anlehnung an die Literatur [ATV04] mit

$$BM_{H_2O} = 0,5 \text{ mm}$$

festgelegt.

Wärmeübergangskoeffizient (WÜK)

Der Wärmeübergangskoeffizient zur Berechnung des fühlbaren Wärmestroms (Gleichung (5-4)) wird durch einen festgelegten Tagesgang (siehe Kapitel 6.2) im Berechnungsmodell berücksichtigt (Tabelle 7.7).

UTC	WÜK
0	10,0
1	10,0
2	10,0
3	10,0
4	10,0
5	10,0
6	11,0
7	13,0
8	14,0
9	15,0
10	16,0
11	17,0
12	18,0
13	19,0
14	20,0
15	21,5
16	23,0
17	23,0
18	21,0
19	16,0
20	13,0
21	12,0
22	11,0
23	10,0

Tab. 7.7: Stündliche Werte (Zeitangabe: UTC) des Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK in $W/(m^2K)$)

8 Relevante klimainduzierte Temperaturzustände

Der Verlauf der Betontemperatur ϑ über die Plattendicke ist im Allgemeinen nichtlinear. Dieser Temperaturzustand lässt sich in drei Komponenten aufspalten (Bild 8.1):

- den konstanten Anteil $\bar{\vartheta}$,
- den linearen Anteil ϑ_{lin} ,
- den nichtlinearen Anteil ϑ_{nl} .

Der konstante Anteil $\bar{\vartheta}$ bewirkt eine (positive oder negative) Plattendehnung. Wird die Dehnung behindert, so wird eine entsprechende Spannung aufgebaut. Über den Querschnitt integriert ergibt sich eine Normalkraft.

Im Zuge einer Abkühlung zieht sich der Beton zusammen. Diese Bewegung wird aber, sofern die Fugen gerissen sind, lediglich durch die Reibung unter der Platte bzw. an den Dübeln behindert. Die Zugkräfte, welche der lineare Temperaturanteil erzeugt, bleiben damit unbedeutend.

Im Falle einer Temperaturerhöhung können sich dagegen erheblich Druckkräfte aufbauen. Das ergibt sich allein daraus, dass die Ausdehnung des Betons nach dem Schließen der Fugen komplett behindert wird. Aufgrund der hohen Druckfestigkeit des Betons, sind die so entstehenden Druckspannungen jedoch normalerweise ungefährlich. Nur im Zusammenwirken mit ungünstigen, planmäßig nicht vorkommenden Randbedingungen kann es zu Hitzeschäden kommen (vgl. [VILLARET 2014-1], [VILLARET 2014-2]). Im Regelfall sind aber nur Zugspannungen für den Beton als kritisch anzusehen. Diese werden durch die temperaturbedingten Druckspannungen reduziert.

Damit sind die Wirkungen des konstanten Anteils des Temperaturzustandes entweder unbedeutend (Zugspannungen) oder sogar günstig (Druckspannungen). Aus diesem Grund wird in den gegenwärtigen

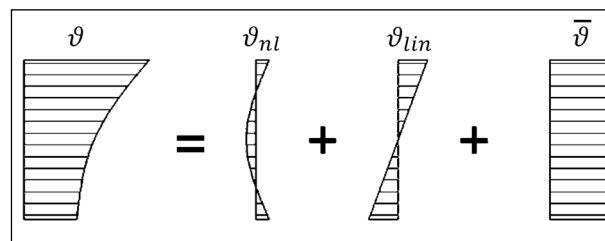


Bild 8.1: Temperaturanteile

tigen Dimensionierungsrichtlinien der konstante Temperaturanteil vernachlässigt. Das Dimensionierungsergebnis liegt damit auf der sicheren Seite. Für eine zielgenauere Dimensionierung bzw. für eine Substanzbewertung kann es aber von Bedeutung sein, auch diesen Einfluss zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit auch für ausgewählte Fälle eine Verteilungsfunktion für den konstanten Anteil der Plattenerwärmung bestimmt.

Der lineare Temperaturanteil ϑ_{lin} erzeugt eine Biegung der Platte (Aufschüsselung oder Aufwölbung) aber keine Gesamtdehnung. Bei Behinderung dieser Verformung entsteht eine entsprechende Biegespannung. Aufgrund des Eigengewichtes der Platte ist eine gewisse Verformungsbehinderung immer gegeben. Die Verkehrsbelastung führt oftmals zu einer vollständigen Rückstellung der temperaturbedingten Plattenverformung. Damit hat der lineare Temperaturanteil einen sehr großen Einfluss auf den Spannungszustand im Betonquerschnitt und muss in jedem Fall bei der Dimensionierung berücksichtigt werden.

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

Für die weiter zu untersuchenden Temperaturanteile ($\bar{\vartheta}$ und ϑ_{lin}) lassen sich einfache Formeln finden.

Der konstante Temperaturanteil wird definitionsgemäß durch einen einzigen Temperaturwert $\bar{\vartheta}$ repräsentiert. Bei vollständiger Dehnbehinderung ergibt sich im Querschnitt eine Normalkraft. Unter der Voraussetzung linearen Materialverhaltens berechnet sich diese nach der Formel:

$$F_N = \bar{\vartheta} \cdot \alpha_T \cdot E_c \cdot h \cdot b \quad (8-1)$$

F_N Normalkraft im Betonquerschnitt

α_T Wärmedehnzahl Beton

E_c Elastizitätsmodul Beton

h Plattendicke

b Querschnittsbreite

Für die Normalkraft, die der gesamte Temperaturzustand im Querschnitt erzeugt, gilt:

$$F_N = \int_0^h (T(z) \cdot \alpha_T \cdot E_c \cdot b) dz \quad (8-2)$$

$$F_N = \alpha_T \cdot E_c \cdot b \cdot \int_0^h T(z) dz \quad (8-3)$$

z Abstand zur Unterseite der Platte

$\vartheta(z)$ Betontemperatur im Abstand z von der Plattenunterseite

Definitionsgemäß entspricht die Normalkraft, welche der konstante Temperaturanteil erzeugt, genau der Normalkraft, welche der gesamte Temperaturzustand hervorruft. Gleichung (8-1) und (8-3) führen also zum selben Ergebnis. Die Gleichsetzung liefert:

$$\bar{\vartheta} \cdot \alpha_T \cdot E_c \cdot h \cdot b = \alpha_T \cdot E_c \cdot b \cdot \int_0^h \vartheta(z) dz \quad (8-4)$$

$$\bar{\vartheta} \cdot h = \int_0^h \vartheta(z) dz \quad (8-5)$$

$$\bar{\vartheta} = \frac{1}{h} \int_0^h \vartheta(z) dz \quad (8-6)$$

Wenn diskrete Temperaturwerte vorliegen, kann näherungsweise gerechnet werden:

$$\bar{\vartheta} \approx \frac{1}{h} \sum_{i=1}^n \vartheta_i \cdot \Delta z_i \quad (8-7)$$

ϑ_i Temperaturwert i (Bild 8.2)

Δz_i Temperaturwert ϑ_i zugeordnete Querschnittsdicke (Bild 8.2)

Der konstante Temperaturanteil kann damit als mittlere Plattentemperatur aufgefasst werden und wird im Folgenden auch durchgehend so bezeichnet.

Den linearen Temperaturanteil betreffend können analoge Überlegungen angestellt werden. Der lineare Temperaturanteil kann ganz allgemein als lineare Funktion beschreiben werden:

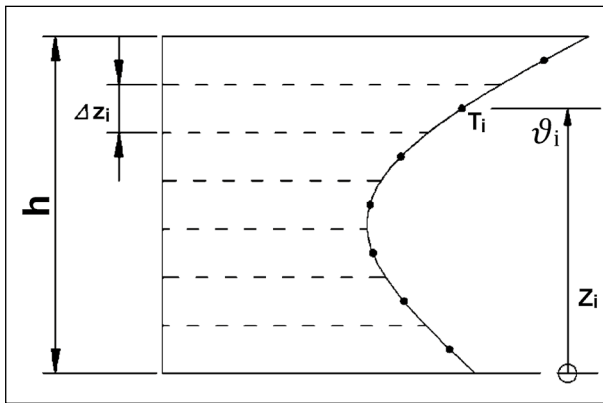


Bild 8.2: Diskrete Temperaturwerte im Plattenquerschnitt

$$\vartheta_{lin}(z) = a + \delta_T \cdot z \quad (8-8)$$

$\vartheta(z)$ Wert für den linearen Temperaturanteil im Abstand z von der Plattenunterseite

a Wert für den linearen Temperaturanteil an der Plattenunterseite

δ_T Anstieg des Wertes für den linearen Temperaturanteil (Gradient)

Damit ist δ_T der gesuchte Wert.

Bei vollständiger Dehnbehinderung erzeugt dieser lineare Temperaturverlauf im Betonquerschnitt ein Biegemoment. Unter der Voraussetzung linearen Materialverhaltens gilt dafür die Formel:

$$M = \int_0^h (\vartheta_{lin}(z) \cdot (z - \frac{h}{2}) \cdot \alpha_T \cdot E_c \cdot b) dz \quad (8-9)$$

$$M = \alpha_T \cdot E_c \cdot b \cdot \int_0^h \vartheta_{lin}(z) \cdot (z - \frac{h}{2}) dz \quad (8-10)$$

Durch das Einsetzen von Gleichung (8-8) ergibt sich:

$$M = \alpha_T \cdot E_c \cdot b \cdot \int_0^h \left((a + \delta_T \cdot z) \cdot (z - \frac{h}{2}) \right) dz \quad (8-11)$$

$$M = \alpha_T \cdot E_c \cdot b \cdot \int_0^h \left(a \cdot z + \delta_T \cdot z^2 - \frac{a \cdot h}{2} - \frac{\delta_T \cdot z \cdot h}{2} \right) dz \quad (8-12)$$

Die Integration liefert:

$$M = \alpha_T \cdot E_c \cdot b \cdot \left(\frac{a \cdot z^2}{2} + \frac{\delta_T \cdot z^3}{3} - \frac{a \cdot h \cdot z}{2} - \frac{\delta_T \cdot z^2 \cdot h}{4} \right) \Big|_0^h \quad (8-13)$$

$$M = \alpha_T \cdot E_c \cdot b \cdot \left(\frac{a \cdot h^2}{2} + \frac{\delta_T \cdot h^3}{3} - \frac{a \cdot h^2}{2} - \frac{\delta_T \cdot h^3}{4} \right) \quad (8-14)$$

$$M = \alpha_T \cdot E_c \cdot b \cdot \left(\frac{\delta_T \cdot h^3}{12} \right) \quad (8-15)$$

Für das Biegemoment, welches durch den gesamten Temperaturzustand im Querschnitt erzeugt wird gilt:

$$M = \int_0^h (\vartheta(z) \cdot (z - \frac{h}{2}) \cdot \alpha_T \cdot E_c \cdot b) dz \quad (8-16)$$

$$M = \alpha_T \cdot E_c \cdot b \cdot \int_0^h \vartheta(z) \cdot (z - \frac{h}{2}) dz \quad (8-17)$$

Definitionsgemäß ist das durch den Linearanteil erzeugte Biegemoment genauso groß wie das Biegemoment, welches der gesamte Temperaturzustand erzeugt. Die Ergebnisse aus Gleichung (8-15) und (8-17) können also gleichgesetzt werden:

$$\alpha_T \cdot E_c \cdot b \cdot \left(\frac{\delta_T \cdot h^3}{12} \right) = \alpha_T \cdot E_c \cdot b \cdot \int_0^h \vartheta(z) \cdot (z - \frac{h}{2}) dz \quad (8-18)$$

$$\left(\frac{\delta_T \cdot h^3}{12} \right) = \int_0^h \vartheta(z) \cdot (z - \frac{h}{2}) dz \quad (8-19)$$

Eine elementare Umformung liefert die Formel für den gesuchten Wert δ_T :

$$\delta_T = \frac{12 \cdot \int_0^h T(z) \cdot (z - \frac{h}{2}) dz}{h^3} \quad (8-20)$$

Wenn diskrete Temperaturwerte vorliegen, kann näherungsweise gerechnet werden:

$$\delta_T \approx \frac{12 \cdot \sum_{i=1}^n T_i \cdot \left(z_i - \frac{h}{2} \right) \cdot \Delta z_i}{h^3} \quad (8-21)$$

Es genügt also ein einziger Parameter, um den für die Plattenbiegung relevanten Temperaturanteil vollständig zu erfassen. Der Parameter δ_T wird deshalb als mechanisch äquivalenter Temperaturgradient (MÄG) bezeichnet.

9 Berechnung und Auswertung der Temperaturgradienten

Es sind stündliche Werte des mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten (MÄG in K/m (gemäß Gleichung (8-21))), der mittleren Plattentemperatur (TPL in °C), der Temperatur an der Fahrbahnoberfläche (TFO in °C) und der Temperatur an der Unterseite der Betonplatte (TFU in °C) mit den in Kapitel 7 angegebenen Materialparametern und für eine Deckendicke von $h = 30$ cm berechnet worden. Die Berechnung erfolgte für 328 Standorte und den Zeitraum 2001 bis 2015. Zusätzlich sind entsprechende Berechnungen an 50 ausgewählten Standorten (siehe Kapitel 4.3) für Deckendicken von $h = 10$ cm, $h = 20$ cm, $h = 40$ cm und $h = 50$ cm durchgeführt worden.

Ein Beispiel für die Ergebnisse ist in Tabelle 9.1 zu sehen.

Die Stundenwerte des mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten müssen, um sie in die Verfahrensweisen der RDO Beton bzw. der RSO Beton einbinden zu können, statistisch aufbereitet werden. Die Ergebnisse dieser Aufbereitung werden nachfolgend beschrieben.

9.1 Lognormalverteilung

Für die rein probabilistischen Verfahrensweisen der sich in der Erstellung befindlichen RSO Beton sowie die grundlegende Überarbeitung der RDO Beton werden die Stundenwerte der berechneten stationsbezogenen Temperaturgradienten durch eine Verteilungsfunktion abgebildet.

In [HEFT 1072] wurde untersucht, welche Verteilungsfunktion geeignet ist, die Streuung der Temperaturgradienten abzubilden. Im Ergebnis systemati-

STID	DICKE	JAHR	MONAT	TAG	UTC	MAEG	TPL	TFO	TFU
5404	300	2003	7	10	0	-17.1	23.4	18.8	24.4
5404	300	2003	7	10	1	-20.4	22.7	17.5	24.2
5404	300	2003	7	10	2	-23.0	22.1	16.7	24.0
5404	300	2003	7	10	3	-24.6	21.5	16.0	23.7
5404	300	2003	7	10	4	-25.3	21.0	15.7	23.4
5404	300	2003	7	10	5	-24.3	20.6	16.0	23.1
5404	300	2003	7	10	6	-20.6	20.5	17.3	22.8
5404	300	2003	7	10	7	-12.8	20.7	20.1	22.5
5404	300	2003	7	10	8	-0.5	21.4	24.3	22.2
5404	300	2003	7	10	9	15.8	22.6	29.6	22.0
5404	300	2003	7	10	10	30.0	23.9	33.1	21.9
5404	300	2003	7	10	11	35.7	24.9	33.3	21.9
5404	300	2003	7	10	12	43.4	26.1	36.7	22.1
5404	300	2003	7	10	13	48.9	27.1	37.8	22.4
5404	300	2003	7	10	14	51.0	28.0	38.4	22.7
5404	300	2003	7	10	15	47.0	28.5	36.3	23.1
5404	300	2003	7	10	16	40.1	28.6	34.5	23.6
5404	300	2003	7	10	17	32.3	28.5	32.4	24.0
5404	300	2003	7	10	18	24.7	28.2	30.6	24.4
5404	300	2003	7	10	19	15.2	27.7	27.6	24.7
5404	300	2003	7	10	20	1.9	26.7	23.2	24.9
5404	300	2003	7	10	21	-9.9	25.6	20.3	25.1
5404	300	2003	7	10	22	-17.8	24.6	18.6	25.1
5404	300	2003	7	10	23	-22.8	23.7	17.4	25.0

Tab. 9.1: Auszug aus den Ergebnisdateien

scher Vergleiche wurde die 3-parametrische logarithmische Normalverteilung als geeignete Verteilungsfunktion identifiziert.

Die Dichtefunktion folgt folgender Formel:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_l \cdot (x-x_0) \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln(x-x_0)-\mu_l)^2}{2 \cdot \sigma_l^2}} \quad (x > x_0) \quad (9-1)$$

x_0 Lageparameter der Lognormalverteilung

σ_l Formparameter der Lognormalverteilung

μ Skalenparameter der Lognormalverteilung

Für die Verteilungsfunktion gibt es keine geschlossene Darstellung. Sie muss über das Integral berechnet werden:

$$F(x) = \int_{x_0}^x f(x) dx \quad (x > x_0) \quad (9-2)$$

Für die Schätzung der Verteilungsparameter aus einer Stichprobe muss der Schiefekoeffizient herangezogen werden (siehe [PLATE 1993]). Dieser ist zu berechnen mit:

$$C_{sx} = \frac{M_{c3}}{S^3} \quad (9-3)$$

mit

$$M_{c3} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} (x_i - MW)^3 \quad (x > x_0) \quad (9-4)$$

x_i Stichprobenwerte

S Standardabweichung der Stichprobenwerte

MW Mittelwert der Stichprobenwerte

N Umfang der Stichprobe

Mit C_{sx} lassen sich die beiden Hilfsgrößen A und B berechnen:

$$A = \frac{C_{sx}}{2} + \sqrt{\frac{C_{sx}^2}{4} + 1} \quad (9-5)$$

$$B = \frac{C_{sx}}{2} - \sqrt{\frac{C_{sx}^2}{4} + 1} \quad (9-6)$$

Aus A und B lässt sich der Variationskoeffizient der verschobenen Stichprobe berechnen:

$$C_{vx} = A^{\frac{1}{3}} + B^{\frac{1}{3}} \quad (9-7)$$

Außerdem gilt für die um den Betrag $x-x_0$ verschobene Stichprobe offensichtlich die Beziehung:

$$C_{vx} = \frac{S}{MW - x_0} \quad (9-8)$$

Durch Umstellung erhält man die Formel zur Berechnung von x_0 :

$$x_0 = \frac{C_{vx} \cdot MW - S}{C_{cx}} \quad (9-9)$$

Nachdem x_0 bekannt ist, lassen sich die Parameter μ_l und σ_l aus den logarithmierten Werten der Stichprobe berechnen:

$$\mu_l = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \ln(x_i - x_0) \quad (9-10)$$

$$\sigma_l = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} (\ln(x_i - x_0) - \mu_l)^2} \quad (x > x_0) \quad (9-11)$$

Bild 9.1 und Bild 9.2 zeigen die so berechnete Dichte und Verteilungsfunktion beispielhaft für die Station 164 (Angermünde), jeweils mit dem Histogramm der zugeordneten Stichprobe. In Bild 9.3 ist der Quantilplot zu sehen.

Wie in Bild 9.2 und Bild 9.3 sichtbar wird, ist die Übereinstimmung insgesamt gut. Bei den höheren Gradientenwerten gibt es jedoch eine etwas deutlichere Abweichung. Dies ist mehr oder weniger ausgeprägt bei allen Stationen der Fall. Es wäre also wahrscheinlich möglich, mit einer kombinierten Verteilungsfunktion (z. B. Summe aus zwei logarithmischen Normalverteilungen) eine noch bessere Anpassung zu erzielen. Berücksichtigt man aber die

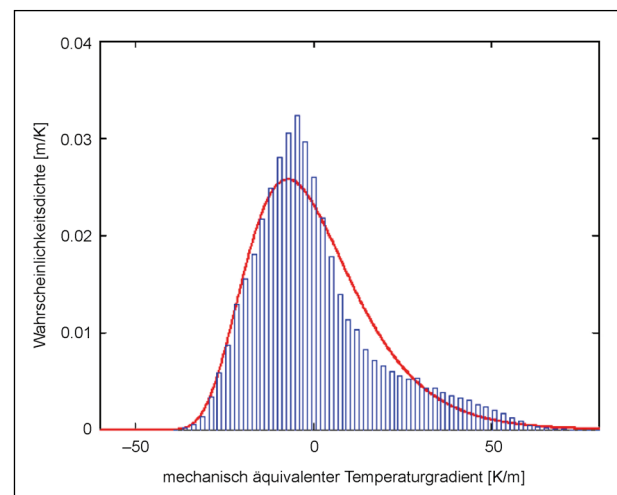


Bild 9.1: Dichtefunktion und Histogramm der Stichprobe für den mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten an der Station 164

erreichbare Präzision bei der Simulation der Gradientenwerte und die bei anderen Komponenten des Dimensionierungsverfahrens mögliche Genauigkeit, so erscheint ein komplizierterer Ansatz für die Verteilungsfunktion nicht sinnvoll. Dies gilt auch im Hinblick auf die Praktikabilität und Akzeptanz des Verfahrens.

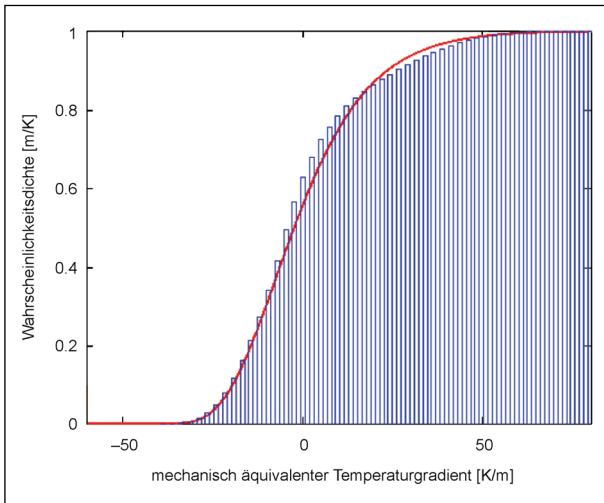


Bild 9.2: Verteilungsfunktion und Histogramm der Stichprobe für den mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten an der Station 164

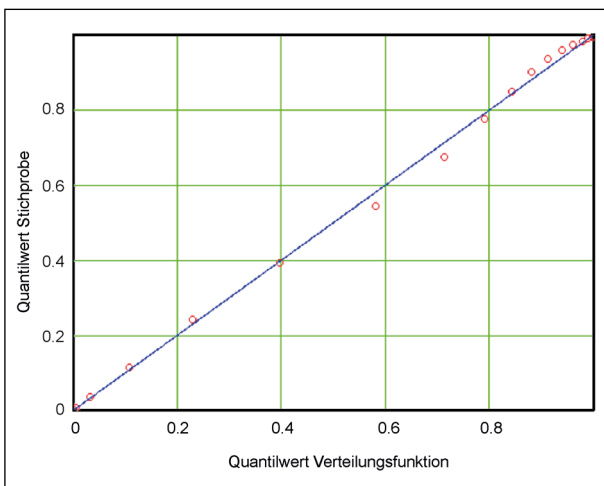


Bild 9.3: Quantilplot Histogramm-Verteilungsfunktion

9.2 Maßgebende Temperaturgradienten

Für die semiprobabilistische Verfahrensweise der RDO Beton (redaktionelle Überarbeitung) sind definierte Temperaturgradienten in Abhängigkeit festgelegter Überschreitungshäufigkeiten erforderlich. Diese maßgebenden Temperaturgradienten können entweder aus der Stichprobe (stündliche berechnete Temperaturgradienten) oder der an die Stichprobe angepassten 3-parametrischen Lognormalverteilung ermittelt werden. Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den rein probabilistischen Verfahren wird empfohlen, die maßgebenden Temperaturgradienten aus den Lognormalverteilungen zu berechnen

9.2.1 Anpassung der Überschreitungswahrscheinlichkeiten

In Abhängigkeit des Nachweises, der im Rahmen der Dimensionierung von Betonstraßenbefestigungen gemäß der semiprobabilistischen Verfahrensweise der RDO Beton 09 [FGSV09] zu führen ist, werden unterschiedliche Überschreitungshäufigkeiten und entsprechend zugehörige Temperaturgradienten maßgebend (Tabelle 9.2).

Die Anwendung dieser Temperaturgradienten im Zuge von Dimensionierungsberechnungen führte in der Vergangenheit zu plausiblen und mit den Erfahrungen aus der praktischen Anwendung übereinstimmenden Berechnungsergebnissen.

Im Rahmen dieses FuE-Projektes sind die Verfahrensweisen zur Berechnung der Temperaturbedingungen in der Straßenbefestigung sowie die Berechnung des Temperaturgradienten (mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten) gegenüber vorangegangenen Projekten ([Heft 1050] – Seite 32), FE04/197, AWDSTAKO V1.5) überarbeitet und verbessert worden. Darüber hinaus hat sich die Daten-

Nachweis	Überschreitungshäufigkeit (1-p)	Temperaturgradient einer 30 cm Betondecke
quasidynamischer Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit (QNGT)	0,3 %	42,17 K/m
quasidynamischer Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (QNGG)	10 %	27,41 K/m
Ermüdungsnachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ENGT)	50 %	15,66 K/m

Tab. 9.2: Nachweis spezifische Überschreitungshäufigkeiten und Temperaturgradienten (für eine 30 cm dicke Betondecke) gemäß den RDO Beton 09 [FGSV09]

basis für diese Berechnungen deutlich verdichtet. In der Konsequenz ergeben sich damit aber Veränderungen in der Größe der nachweisspezifischen Temperaturgradienten, die zu höheren und nicht plausiblen Unterschieden in den Betondeckendicken führen können ([Heft 1050] – Seite 35). Daher sind die Überschreitungshäufigkeiten der einzelnen Nachweise so zu bestimmen, dass aus den Verteilungsfunktionen maßgebende Temperaturgradienten errechnet werden, die, bezogen auf eine 30 cm dicke Betondecke, denen der RDO Beton 09 [FGSV09] in etwa entsprechen. Die so bestimmten Überschreitungshäufigkeiten sollen sich hierbei nicht mehr nur auf die positiven Temperaturgradienten sondern auf die Gesamtheit aller Temperaturgradienten (positive und negative) beziehen.

Im Ergebnis dieser Anpassung, die mit den Stundenwerten der 50 ausgewählten Stationen (siehe 4.3) vorgenommen wurde, konnten die Überschreitungshäufigkeiten aus dem FE04/197 ([Heft 1050] – Seite 36) bestätigt werden. Demnach werden für

die unterschiedlichen Nachweise die in Tabelle 9.3 dargestellten Überschreitungswahrscheinlichkeiten maßgebend.

Die für eine 30 cm dicke Betondecke aus den stationsspezifischen Verteilungen (Verteilungsparameter siehe Tabelle A.3 bis Tabelle A.5 im Anhang) berechneten Temperaturgradienten, bezogen auf die angepassten Quantile (Tabelle 9.3), sind im Anhang in Tabelle A.9 dargestellt.

Berechnet man diese Temperaturgradienten für alle 328 Standorte erhält man das in Tabelle 9.4 dargestellte Ergebnis.

Die Mittelwerte entsprechen denen, die für die 50 ausgewählten Stationen berechnet werden. Die Spannweite der Werte innerhalb Deutschlands nimmt von 6,7 K/m für das 84%-Quantil auf 17 K/m für das 97,5%-Quantil zu. Dabei findet man immer die kleinsten Werte im NW und die größten im SO Deutschlands. Das ist in Bild 9.4 beispielhaft für das 92%-Quantil zu sehen.

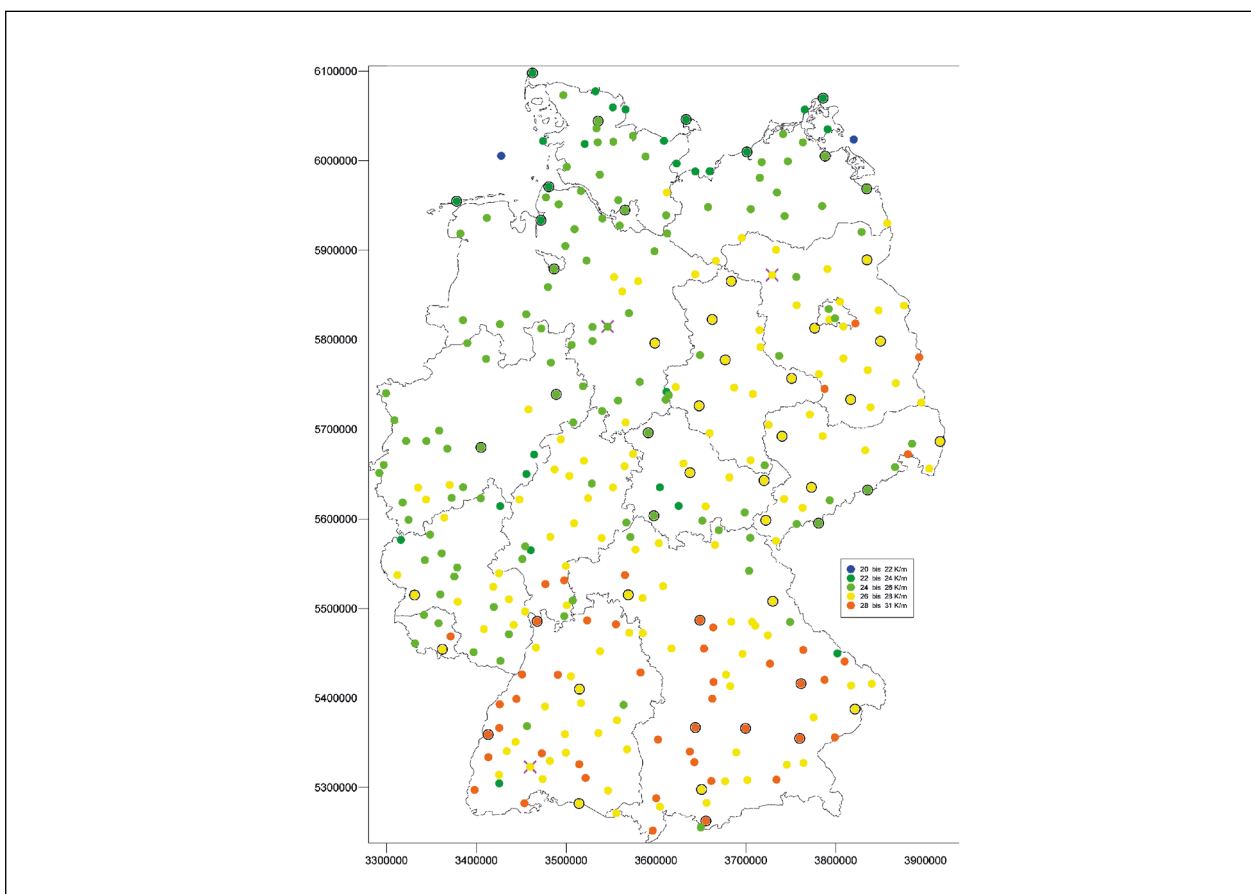


Bild 9.4: Verteilung der 92%-Quantilwerte des Temperaturgradienten in Deutschland, Klassenebreite: 2 K/m, beginnend bei 20 K/m, schwarz eingekreist: Stationen zur Festlegung der Überschreitungshäufigkeiten (= Lernstichprobe für das Regressionsmodell), Hinterlegt mit magenta-farbenem Kreuz: Kontrollstichprobe für das Regressionsmodell

Nachweis	Überschreitungswahrscheinlichkeit 1-p (p-Quantil) bezogen auf alle Temperaturgradienten	Temperaturgradient einer 30 cm Betondecke (Mittelwert der Gradienten der 50 Stationen aus Kapitel 4.3)
quasidynamischer Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit (QNGT)	2,5 % (97,5 %)	42,1 K/m
quasidynamischer Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (QNGG)	8 % (92 %)	26,3 K/m
Ermüdungsnachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ENGT)	16 % (84 %)	16,4 K/m

Tab. 9.3: Angepasste nachweisabhängige Überschreitungswahrscheinlichkeiten und Temperaturgradienten einer 30 cm dicken Betondecke

	ENGT	QNGG	QNGT
kleinster Wert	12,3 K/m	20,0 K/m	32,4 K/m
größter Wert	19,0 K/m	30,7 K/m	49,4 K/m
Mittelwert	16,4 K/m	26,2 K/m	41,6 K/m

Tab. 9.4: Maßgebende Temperaturgradienten, berechnet für 328 Standorte; ENGT, QNGG, QNGT: siehe Tabelle 9.3

9.3 Übertragung der Ergebnisse auf andere Deckendicken

9.3.1 Verteilungsparameter und maßgebende Temperaturgradienten

An die mithilfe des EPM berechneten stündlichen, mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten wurden, getrennt nach Stationen und Betondeckendicken, 3-parametrische Lognormalverteilungen angepasst. Die 3 Verteilungsparameter (x_0 = Lageparameter, μ_1 = Skalenparameter, σ_1 = Formparameter) für die 50 untersuchten Stationen sowie die fünf unterschiedlichen Betondeckendicken sind in Tabelle A.3 bis Tabelle A.5 im Anhang dargestellt.

Basierend auf den in Kapitel 9.2.1 beschriebenen angepassten nachweisabhängigen Überschreitungswahrscheinlichkeiten (Tabelle 9.3), können aus den Gradientenverteilungsfunktionen der 50 Stationen sowie der fünf Betondeckendicken (siehe Tabelle A.3 bis Tabelle A.5 im Anhang) die maßgebenden Temperaturgradienten berechnet werden. Diese Gradienten sind in Tabelle A.6 bis Tabelle A.8 – auch im Anhang – dargestellt.

9.3.2 Betondeckendickenfunktion

Die stündlichen Temperaturgradienten und somit auch die Verteilungsparameter der Temperaturgradienten, wie auch die aus diesen Verteilungen ab-

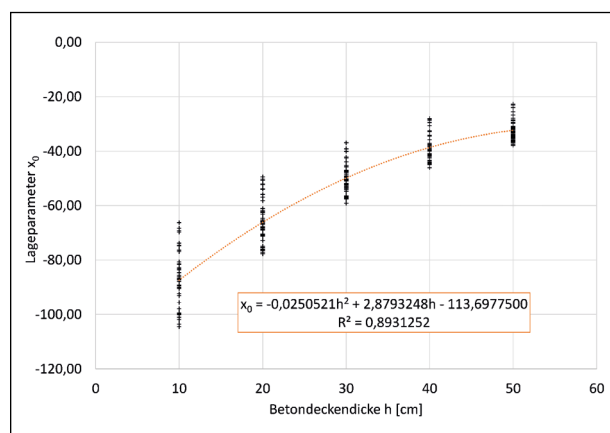


Bild 9.5: Lageparameter x_0 der 50 für die Regression ausgewählten Stationen (siehe Tabelle A.3) in Abhängigkeit der Betondeckendicke h

geleiteten, maßgebenden Temperaturgradienten, sind sehr stark von der Betondeckendicke abhängig. Für den Dimensionierungsprozess ist es deshalb erforderlich, diese Abhängigkeit funktional zu beschreiben.

Da die Verteilungsparameter bzw. die maßgebenden Temperaturgradienten der 50 betrachteten Stationen quantitativ sehr unterschiedlich ausfallen (siehe Tabelle A.3 bis Tabelle A.5 sowie Tabelle A.6 bis Tabelle A.8), bietet sich an, als abhängige Größe der Betondeckendickenfunktion die relative Änderung der Verteilungsparameter bzw. der maßgebenden Temperaturgradienten, bezogen auf die jeweiligen Werte einer 30 cm dicken Betondecke, heranzuziehen und in Abhängigkeit zur Betondeckendicke darzustellen.

In Bild 9.5 und Bild 9.6 sind die Zusammenhänge zwischen dem Lageparameter x_0 und der Betondeckendicke (Bild 9.5) sowie zwischen der relativen Änderung des Lageparameter x_0 (bezogen auf den Wert bei einer Betondeckendicke von $h = 30$ cm) und der Betondeckendicke (Bild 9.6) dargestellt.

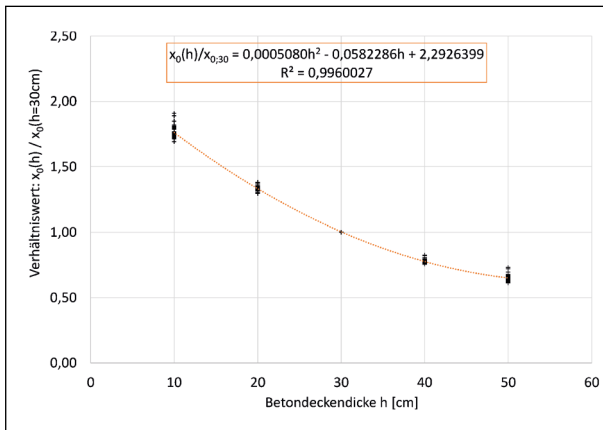


Bild 9.6: Zusammenhang zwischen der Betondeckendicke h und dem betondeckendickenspezifischen Verhältnisswert des Verteilungsparameters x_0 (= Quotient des betondeckendickenspezifischen Verteilungsparameters x_0 bezogen auf die Verteilungsparameter x_0 bei $h = 30$ cm) der 50 für die Regression ausgewählten Stationen

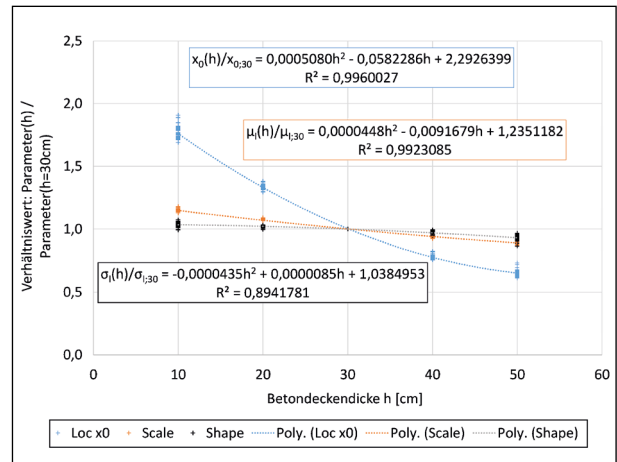


Bild 9.7: Zusammenhang zwischen Betondeckendicke h und den betondeckendickenspezifischen Verhältnisswerten der Verteilungsparameter (= Quotient des betondeckendickenspezifischen Verteilungsparameter $x_0(h)$, $\sigma_l(h)$ bzw. $\mu_l(h)$) bezogen auf die Verteilungsparameter $(x_{0,30}, \sigma_{l,30}$ bzw. $\mu_{l,30})$ bei $h = 30$ cm) der 50 für die Regression ausgewählten Stationen

Dickenabhängigkeit der Verteilungsparameter für das probabilistische Verfahren

Für die funktionale Beschreibung der Dickenabhängigkeit der drei Verteilungsparameter (x_0 , μ_l und σ_l) werden deren relative Änderungen bezogen auf die Werte einer 30 cm dicken Betondecke (= Verhältnisswerte) herangezogen. Diese Verhältnisswerte ergeben den Umrechnungsfaktor.

$$x_0(h) = x_{0,30} \cdot UF_{x_0}(h) \tag{9-12}$$

$$\mu_l(h) = \mu_{l,30} \cdot UF_{\mu_l}(h) \tag{9-13}$$

$$\sigma_l(h) = \sigma_{l,30} \cdot UF_{\sigma_l}(h) \tag{9-14}$$

$x_0(h), \mu_l(h), \sigma_l(h)$ Verteilungsparameter in Abhängigkeit der Betondeckendicke h

$x_{0,30}, \mu_{l,30}, \sigma_{l,30}$ Verteilungsparameter der Betondeckendicke von $h = 30$ cm

$UF_{x_0}(h), UF_{\mu_l}(h), UF_{\sigma_l}(h)$ Umrechnungsfaktor in Abhängigkeit der Betondeckendicke h

Die Zusammenhänge der parameterspezifischen Umrechnungsfaktoren werden durch Polynome 2.- Grades funktional beschrieben.

$$UF_{x_0}(h) = a_{x_0} \cdot h^2 + b_{x_0} \cdot h + c_{x_0} \tag{9-15}$$

$$UF_{\mu_l}(h) = a_{\mu_l} \cdot h^2 + b_{\mu_l} \cdot h + c_{\mu_l} \tag{9-16}$$

$$UF_{\sigma_l}(h) = a_{\sigma_l} \cdot h^2 + b_{\sigma_l} \cdot h + c_{\sigma_l} \tag{9-17}$$

$UF_{x_0}(h), UF_{\mu_l}(h), UF_{\sigma_l}(h)$ Umrechnungsfaktor in Abhängigkeit der Betondeckendicke h

$x_0(h), \mu_l(h), \sigma_l(h)$ Verteilungsparameter in Abhängigkeit der Betondeckendicke h

a, b, c Verteilungsparameterabhängige Modellparameter der Regressionsfunktion

In Bild 9.7 sind die Zusammenhänge zwischen den Verhältnisswerten der Verteilungsparameter und der Betondeckendicke sowie die zugehörigen Regressionsfunktionen dargestellt.

Beispielhaft für drei unterschiedliche Quantile sind in Bild 9.9 bis Bild 9.11 die aus den Verteilungsfunktionen direkt ermittelten Temperaturgradienten denen, die durch Anwendung des Regressionsansatzes ermittelt werden, gegenübergestellt. Das Modell weist über alle drei betrachteten Quantile eine vergleichbare Genauigkeit auf, auch wenn Bild 9.9 bis Bild 9.11 diese Aussage nicht stützen. Die vermeintlich größeren Ungenauigkeiten des Regressionsmodells bei den niedrigeren Quantilen wie sie Bild 9.9 bis Bild 9.11 zu entnehmen sind, sind der Skalierung der Diagramme geschuldet. Schaut man sich die quadrierten absoluten Abweichungen zwischen den Gradienten des Regressionsmodells und den Gradienten der Verteilungsfunktionen an (Tabelle 9.5), wird deutlich, dass das Modell, wie zu

erwarten, bei den größeren Quantilen die höheren Ungenauigkeiten aufweist.

Die Häufigkeitsverteilung der relativen Abweichungen zwischen den Temperaturgradienten aus dem Regressionsmodell und den Temperaturgradienten der Verteilungsfunktionen sind in Bild 9.8 darge-

Quantil	Summe der quadrierten Abweichungen [K ² /m ²]	Mittelwert der quadrierten Abweichungen [K ² /m ²]
97,5 %	886	3,5
92 %	637	2,5
84 %	494	2,0

Tab. 9.5: Genauigkeit des Regressionsmodells in Abhängigkeit vom Quantil

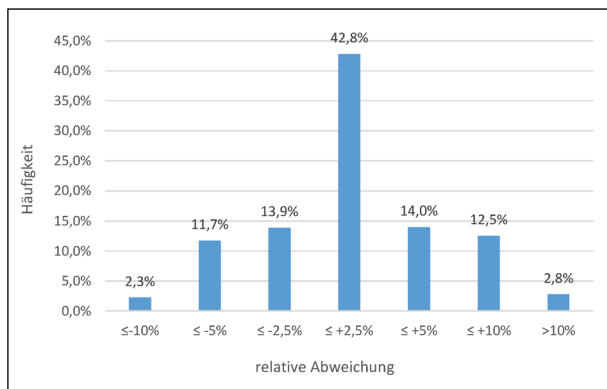


Bild 9.8: Häufigkeitsverteilung der relativen Abweichungen zwischen den Temperaturgradienten, die aus den Verteilungsfunktionen direkt ermittelt werden und den Temperaturgradienten, die aus dem Regressionsansatzes resultieren

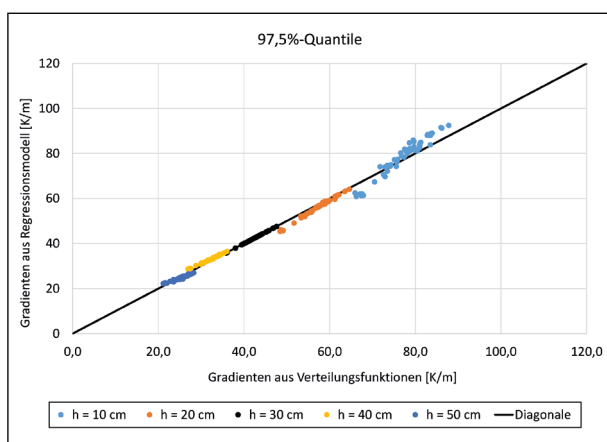


Bild 9.9: Gegenüberstellungen der 97,5%-Quantilwerte (Temperaturgradienten der Überschreitungshäufigkeit = 2,5 %) aus den stationsindividuellen Verteilungsfunktionen (Gradienten gemäß Tabelle A.6) sowie aus dem Regressionsmodell für unterschiedliche Betondeckendicken h

stellt. Knapp 43 % aller mit dem Regressionsansatz ermittelten Gradienten weichen maximal $\pm 2,5\%$ von den Temperaturgradienten der zugehörigen Verteilungsfunktionen ab. Innerhalb einer relativen Abweichungsspanne von $\pm 5\%$ liegen sogar etwas mehr als 70 % aller berechneten Temperaturgradienten.

Das Regressionsmodell kann damit bei der probabilistischen Dimensionierung zur Umrechnung von Verteilungsparametern auf andere Deckendicken eingesetzt werden.

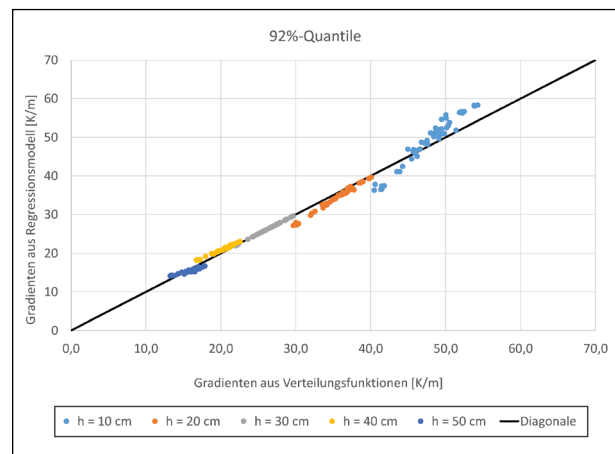


Bild 9.10: Gegenüberstellungen der 92%-Quantilwerte (Temperaturgradienten der Überschreitungshäufigkeit = 8 %) aus den stationsindividuellen Verteilungsfunktionen (Gradienten gemäß Tabelle A.7) sowie aus dem Regressionsmodell für unterschiedliche Betondeckendicken h

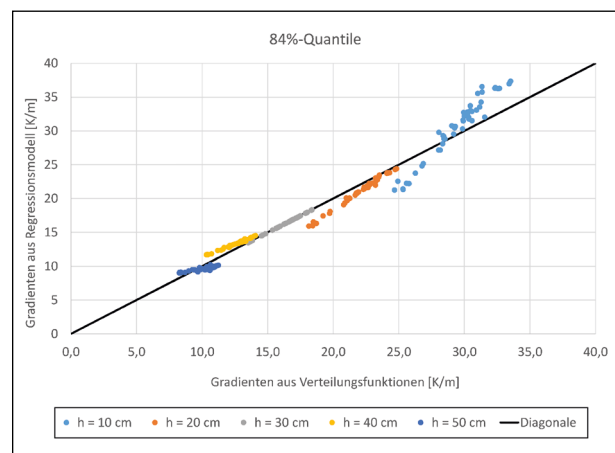


Bild 9.11: Gegenüberstellungen der 84%-Quantilwerte (Temperaturgradienten der Überschreitungshäufigkeit = 16 %) aus den stationsindividuellen Verteilungsfunktionen (Gradienten gemäß Tabelle A.8) sowie aus dem Regressionsmodell für unterschiedliche Betondeckendicken h

Dickenabhängigkeit der maßgebenden Temperaturgradienten für das semi-probabilistische Verfahren

Für die semiprobabilistische Verfahrensweise der RDO Beton 09 [FGSV09] werden, abhängig vom zu führenden Nachweis, statt der Gradientenverteilungsfunktionen konkrete Quantilwerte der Temperaturgradienten benötigt (siehe Kapitel 9.2). Auch für diese Quantilwerte werden Korrekturfunktionen für die Berücksichtigung unterschiedlicher Betondeckendicken benötigt. Äquivalent zur Dickenabhängigkeit der Verteilungsparameter bietet sich auch für die maßgebenden Temperaturgradienten an, die Dickenabhängigkeit nicht auf die absoluten Werte der Temperaturgradienten sondern auf einen Verhältniswert zu beziehen. Als Basis für die Bildung der Verhältniswerte dienen die Temperaturgradienten einer 30 cm dicken Betondecke. Die Verhältniswerte ergeben wiederum den dickenabhängigen Umrechnungsfaktor.

$$\delta_T(h) = \delta_{T;30} \cdot UF_{\delta_T}(h) \quad (9-18)$$

$\delta_T(h)$ mechanisch äquivalenter Temperaturgradient (MÄG) in Abhängigkeit der Betondeckendicke h

$\delta_{T;30}$ mechanisch äquivalenter Temperaturgradient (MÄG) der Betondeckendicke $h = 30$ cm

$UF_{\delta_T}(h)$ Umrechnungsfaktor des MÄG in Abhängigkeit der Betondeckendicke h

Die Betondeckendickenabhängigkeit des Umrechnungsfaktors kann dann als Polynom 2.-Grades funktional beschrieben werden.

$$UF_{\delta_T}(h) = a_{\delta_T} \cdot h^2 + b_{\delta_T} \cdot h + c_{\delta_T} \quad (9-19)$$

$UF_{\delta_T}(h)$ Umrechnungsfaktor in Abhängigkeit der Betondeckendicke h

$a_{\delta_T}, b_{\delta_T}, c_{\delta_T}$ Modellparameter der Regressionsfunktion

In Bild 9.12 ist der Zusammenhang zwischen den Verhältniswerten (Umrechnungsfaktoren) der maßgebenden mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten und der Betondeckendicke einschließlich der zugehörigen Regressionsfunktion dargestellt.

Der dargestellte Zusammenhang sowie die angepasste Regressionsfunktion unterscheiden nicht zwischen den nachweisabhängigen Überschreitungswahrscheinlichkeiten.

Die Abhängigkeit der maßgebenden mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten von der nachweisabhängigen Überschreitungswahrscheinlichkeit wird in Anlehnung an das FE 04.194/2004/ARB [Heft 976] wiederum durch einen Umrechnungsfaktor UF_{1-p} beschrieben. Dieser kann unabhängig von der Betondeckendicke

- für das Verhältnis MÄG(2,5 %) : MÄG(8 %) im Durchschnitt mit 1,60 und
- für das Verhältnis MÄG(16 %) : MÄG(8 %) im Durchschnitt mit 0,62

angesetzt werden (Bild 9.13).

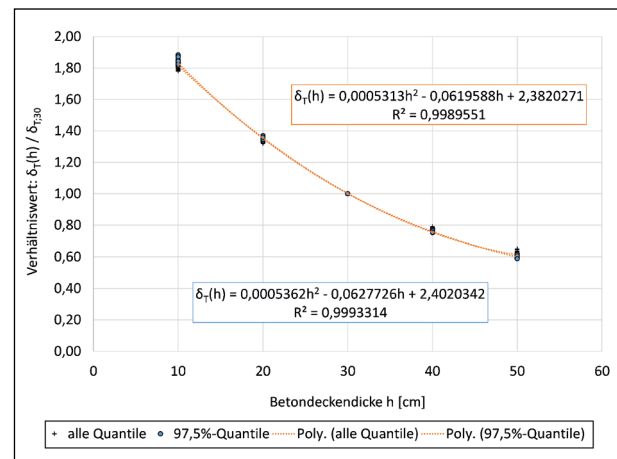


Bild 9.12: Zusammenhang zwischen der Betondeckendicke h und den betondeckendickenspezifischen Verhältniswerten des MÄG (= Quotienten der betondeckendickenspezifischen MÄG $\delta_T(h)$ bezogen auf die $\delta_{T;30}$ (MÄG-Werte bei $h = 30$ cm))

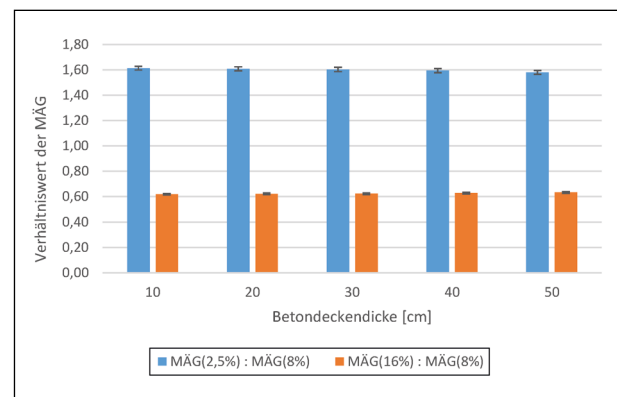


Bild 9.13: Mittlere Verhältniswerte (= Umrechnungsfaktor UF_{1-p}) zwischen dem MÄG der Überschreitungswahrscheinlichkeit $1-p = 2,5$ % (Quantil: $p = 97,5$ %) und dem MÄG der Überschreitungswahrscheinlichkeit $1-p = 8$ % (Quantil: $p = 92$ %) sowie zwischen dem MÄG der Überschreitungswahrscheinlichkeit $1-p = 16$ % (Quantil: $p = 84$ %) und dem MÄG der Überschreitungswahrscheinlichkeit $1-p = 8$ % (Quantil: $p = 92$ %); der Fehlerindikator beschreibt +/- Standardabweichung

Die Gradientenfunktion für die semiprobabilistische Verfahrensweise der RDO Beton 09 [FGSV09] ergibt sich dann zu folgender Form:

$$\delta_T(h, 1-p) = \delta_{T;30;8} \cdot (a_{\delta_T} \cdot h^2 + b_{\delta_T} \cdot h + c_{\delta_T}) \cdot UF_{1-p} \quad (9-20)$$

mit

$$UF_{1-p} = 1,60 \text{ für } 1-p = 2,5 \% (p = 97,5 \%)$$

$$UF_{1-p} = 1,00 \text{ für } 1-p = 8,0 \% (p = 92 \%)$$

$$UF_{1-p} = 0,62 \text{ für } 1-p = 16,0 \% (p = 84 \%)$$

$$a_{\delta_T} = 53,13 \cdot 10^{-5}$$

$$b_{\delta_T} = 6.195,88 \cdot 10^{-5}$$

$$c_{\delta_T} = 238.202,13 \cdot 10^{-5}$$

Darin sind

$\delta_T(h, p)$	Mechanisch äquivalenter Temperaturgradient (MÄG) in Abhängigkeit der Betondeckendicke h sowie der Überschreitungswahrscheinlichkeit $1-p$ [K/m]
$\delta_{T;30;8}$	Mechanisch äquivalenter Temperaturgradient (MÄG) der Betondeckendicke $h = 30$ cm bei einer Überschreitungswahrscheinlichkeit $1-p = 8,0 \%$ [K/m]
UF_{1-p}	Umrechnungsfaktor zur Berücksichtigung anderer Überschreitungswahrscheinlichkeiten $1-p$ [-]
$a_{\delta_T}, b_{\delta_T}, c_{\delta_T}$	Regressionsparameter

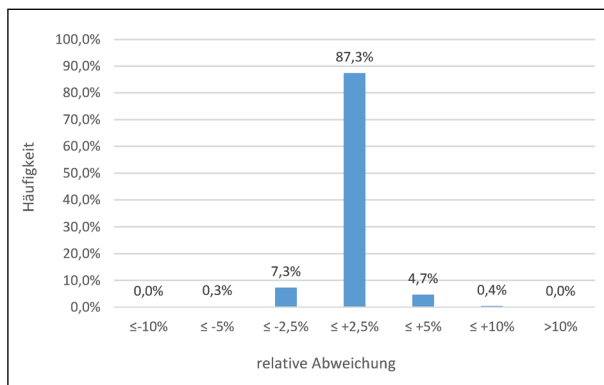


Bild 9.14: Häufigkeitsverteilung der relativen Abweichungen zwischen den Temperaturgradienten, die aus den Verteilungsfunktionen direkt ermittelt werden und den Temperaturgradienten, die aus dem Regressionsansatzes (der Gradientenfunktion) resultieren

Die Anwendung der Gradientenfunktion führt zu sehr geringen Abweichungen im Vergleich zu den Gradienten aus den Verteilungsfunktionen. Mehr als 87 % aller mit dem Regressionsansatz ermittelten Gradienten weichen maximal +/-2,5 % von den Temperaturgradienten der zugehörigen Verteilungsfunktionen ab (Bild 9.14). Und mehr als 99 % aller Werte liegen innerhalb einer relativen Abweichungsspanne von +/-5 % (Bild 9.14).

9.4 Extremwertanalyse des mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten

Bei der Dimensionierung von Betonplatten interessieren selten auftretende Gradienten, die in den Ausläufern der Dichtefunktion der stündlichen Gradienten liegen. Die Lognormalverteilung, die an die stündlichen Werte angepasst wird, beschreibt das Verhalten dieser Zufallsvariablen ausgehend von ihren Momenten: Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe, Kurtosis etc. Ihre Ausläufer repräsentieren das Verhalten der Extremwerte jedoch relativ schlecht. Im vorliegenden Konzept für die probabilistische Dimensionierung werden die Parameter einer Extremwertverteilung – der Gumbelverteilung für 15-jährige Extremwerte – aus den Parametern der Lognormalverteilung bestimmt. Daher soll anhand einer klassischen Extremwertanalyse überprüft werden, ob

- die Gumbel-Parameter, die aus der Lognormalverteilung berechnet werden, mit denen, die sich aus den Jahresmaxima ergeben, übereinstimmen.
- die Extremwerte des mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten (MÄG) durch eine Gumbel-Verteilung zutreffend beschrieben werden

9.4.1 Grundlagen

Es gibt zwei Möglichkeiten, ein extremes Ereignis zu definieren: Unter der Annahme einer univariaten, unabhängig und identisch verteilten Zufallsvariablen kann ein extremes Ereignis

- a. das Maximum einer Stichprobe mit einer bestimmten Länge n (= Blockzeitspanne)
- b. ein Ereignis, welches einen bestimmten Schwellenwert übersteigt (Peaks over Threshold, abgekürzt POT) sein.

Als Blockzeitspanne wählt man i. d. R. ein Jahr und passt eine Extremwertverteilung an Jahresmaxima an. Die Zahl der Freiheitsgrade entspricht dann der Zahl der Jahre, für die man Werte hat. Im vorliegenden Fall sind das 15 Werte aus dem Zeitraum 2001 bis 2015.

Wenn man an Stelle der Jahresmaxima alle Werte oberhalb einer Schwelle betrachtet, dann wird dieser Schwellenwert häufiger überschritten, man hat also mehr Werte (bzw. Freiheitsgrade) für die Anpassung der Verteilung. Das hat zwei Vorteile:

1. Einzelne Werte wie z. B. Ausreißer haben keinen allzu großen Einfluss auf das Ergebnis.
2. Durch die höhere Zahl der Freiheitsgrade werden die Konfidenzbereiche für die Schätzwerte (das sind die Verteilungsparameter bzw. die Quantile, die bei der Extremwertanalyse Wiederkehrwerte heißen) kleiner. Man kann so z. B. den Bereich, in dem ein Temperaturgradient liegt, mit dem einmal in 50 Jahren zu rechnen ist, enger eingrenzen.

Bei der Definition a. konvergieren die extremen Ereignisse zu einer generalisierten Extremwertverteilung (GEV) (Fisher-Tippett-Theorem), bei der Definition b. folgen sie einer generalisierten Paretoverteilung (GPV). Diese ist nach unten durch den Schwellenwert beschränkt und daher wahrscheinlich für die Dimensionierungsrechnungen nicht zu gebrauchen.

Kombiniert man die Verteilung der Peaks over Threshold, die durch die GPV beschrieben wird, mit einem Poisson-Punktprozess, der die Verteilung der Anzahl der Überschreitungen bei gegebener Stichprobenlänge n beschreibt, dann kann man zeigen, dass die GEV und GPV Modelle völlig konsistent sind und auch für die Peaks over Threshold eine GEV bestimmen. Näheres hierzu findet sich u. a. bei [COL 2001].

Nachfolgend werden nur die grundlegenden Gleichungen und Zusammenhänge beschrieben.

Fisher-Tippet-Theorem

Wenn n unabhängige Zufallsvariablen X_1, \dots, X_n die gleiche, unbeschränkte Verteilungsfunktion $F(x) = P(X_i \leq x)$ haben, dann hat das Maximum $M_n = \max(X_1, X_2, \dots, X_n)$ einer solchen Stichprobe die Verteilungsfunktion

$$\begin{aligned} P(M_n \leq x) &= P(X_1 \leq x, \dots, X_n \leq x) \\ &= P(X_1 \leq x) \cdot \dots \cdot P(X_n \leq x) \\ &= F^n(x). \end{aligned}$$

Wenn n gegen unendlich geht, dann geht die Wahrscheinlichkeit, dass das Maximum unter einem bestimmten Wert x fällt, gegen 0 und der Wert M_n gegen unendlich. Somit ist diese entartete Grenzverteilung $F^n(x)$ für $n \rightarrow \infty$, die nur die Werte 0 und 1 annimmt, nicht geeignet, Informationen über das Verhalten von Maxima großer Stichproben zu liefern. In der Praxis bedeutet dies, dass man eine Extremwertverteilung für den MÄG nicht aus der Verteilung seiner stündlichen Werte ableiten kann.

Es wurde jedoch von Fisher und Tippett 1928 gezeigt, dass die Folge der M_n mit einer Folge von a_n und b_n normiert werden kann, so dass $F^n(a_n x + b_n)$ nicht mehr entartet ist und gegen eine Verteilungsfunktion $H(x)$ konvergiert. Das Fisher-Tippett-Theorem besagt also, dass die Verteilungsfunktion für das normierte Maximum $(M_n - b_n)/a_n$ gegen eine bestimmte Verteilung konvergiert:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} F^n(a_n x + b_n) = H(x) \quad (9-21)$$

$H(x)$ ist die generalisierte Extremwertverteilung GEV.

Die Generalisierte Extremwertverteilung (GEV) hat folgende Verteilungsfunktion:

$$H(x) = \exp\left(-\left(1 + \zeta \cdot \frac{x - \mu}{\beta}\right)^{-1/\zeta}\right) \quad (9-22)$$

μ Lageparameter

β Skalenparameter

ζ Formparameter

Die GEV hat drei Klassen mit folgenden Eigenschaften:

Typ I: Gumbel-Verteilung

$$H(x) = e^{-e^{-x}}, -\infty < x < \infty \quad (9-23)$$

Typ II: Fréchet-Verteilung

$$H(x) = e^{-x^a}, 0 < x < \infty \quad (9-24)$$

Typ III: (inverse) Weibull-Verteilung

$$H(x) = e^{-(-x)^a}, -\infty < x < 0 \quad (9-25)$$

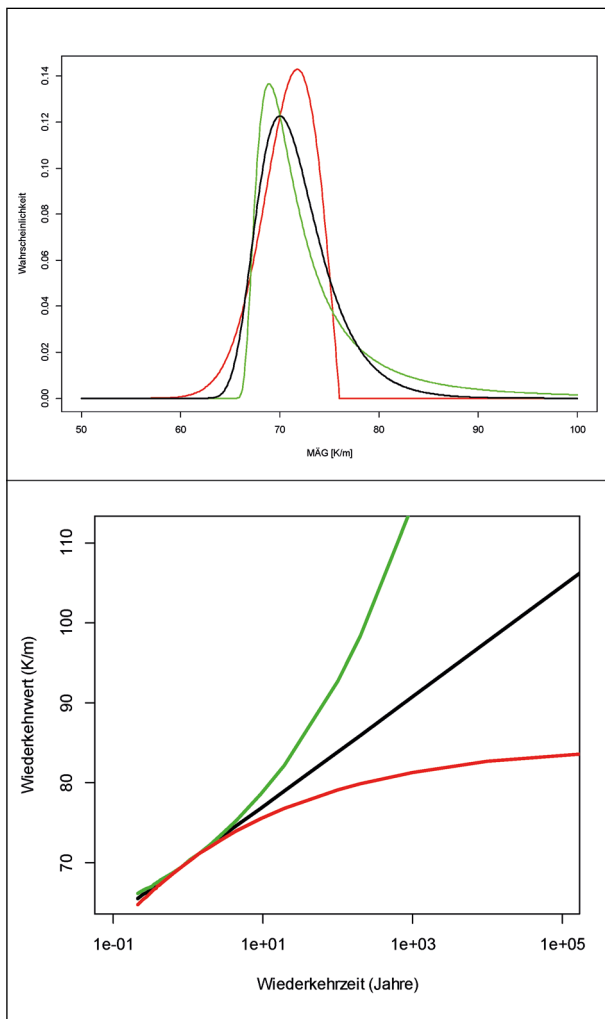


Bild 9.15: Dichteverteilung (oben) und Wiederkehrwerte (unten) für GEV mit Lageparameter = 70, Skalenparameter = 0.3 und schwarz: Formparameter = 0 Gumbel, Typ I; grün: Formparameter = 0,5 Fréchet, Typ II; rot: Formparameter = -0,5 Weibull, Typ III

Passt man eine GEV an Daten an, denn entscheidet der Formparameter darüber, welchen Verteilungstyp man erhält: Für die Gumbelverteilung ist $\zeta = 0$, für die Fréchet-Verteilung ist $\zeta > 0$ und für die Weibull-Verteilung ist $\zeta < 0$.

Extremwerte aus Typ I und Typ II der GEV haben keine obere Grenze, während die Extremwerte, die durch eine Typ III-Verteilung approximiert werden, einem oberen Grenzwert zustreben. Dieser wird mit der Gleichung $OG = \mu - \beta/\zeta$ berechnet.

Es folgt aus dem Fisher-Tippet-Theorem, dass die Extremwerte von Normal-, Lognormal-, Gamma- oder Weibullverteilungen gegen die Gumbel-Verteilung konvergieren. Damit kann man davon ausgehen, dass die Maxima des MÄG, dessen stündliche Werte ja durch eine Lognormalverteilung oder eine

Gammaverteilung approximiert werden können [Heft 1072], durch eine Gumbel-Verteilung beschrieben werden.

Generalisierte Pareto-Verteilung (GPV)

Gegeben sei eine iid-Stichprobe X_i mit der Verteilung $F(x)$. Die Werte der Stichprobe, die einen Schwellenwert u überschreiten: $Y_i = X_i - u$ beschreiben die extremen Ereignisse. Wenn sich der Schwellenwert u dem oberen Ende der Verteilung nähert, dann nähert sich die Verteilungsfunktion der Überschreitungen, $F_u(y)$, der GPV:

$$F_u(y) = 1 - \left(1 + \zeta \frac{y}{\sigma_u}\right)^{-1/\zeta} \quad (9-26)$$

u Schwellenwert

σ_u Skalenparameter

ζ Formparameter

Wenn das Maximum einer Stichprobe gegen eine GEV konvergiert, dann konvergieren die Peaks over Threshold (das sind die o. a. Y_i) gegen eine GPV. Beide Verteilungen haben in diesem Fall denselben Formparameter ζ .

9.4.2 Datenaufbereitung

Stichproben, die mit statistischen Verfahren untersucht werden, sollten iid-Stichproben sein, d. h. die Stichprobenwerte müssen unabhängig voneinander (independent) und gleichartig verteilt (identically distributed) sein. Der Prozess, der durch die Grundgesamtheit aller Daten, aus denen die Stichprobe entnommen wird, beschrieben wird, muss dementsprechend stochastisch und stationär sein. Maxima aufeinanderfolgender Jahre, die wie die Maxima des MÄG im Sommerhalbjahr auftreten, erfüllen diese Voraussetzung.

Aufeinanderfolgende Stundenwerte des MÄG hingegen beschreiben keinen stationären, stochastischen Prozess, denn der MÄG weist einen ausgeprägten Tages- und Jahresgang auf.

Für die Extremwertanalyse mit Peaks over Threshold müssen also iid-Stichproben aus den Stundenwerten gezogen werden. Da man an besonders großen Gradienten interessiert ist, liegt es nahe, die Stundenwerte zuerst durch tägliche Maxima zu ersetzen. Damit gibt es per se keinen Tagesgang mehr.

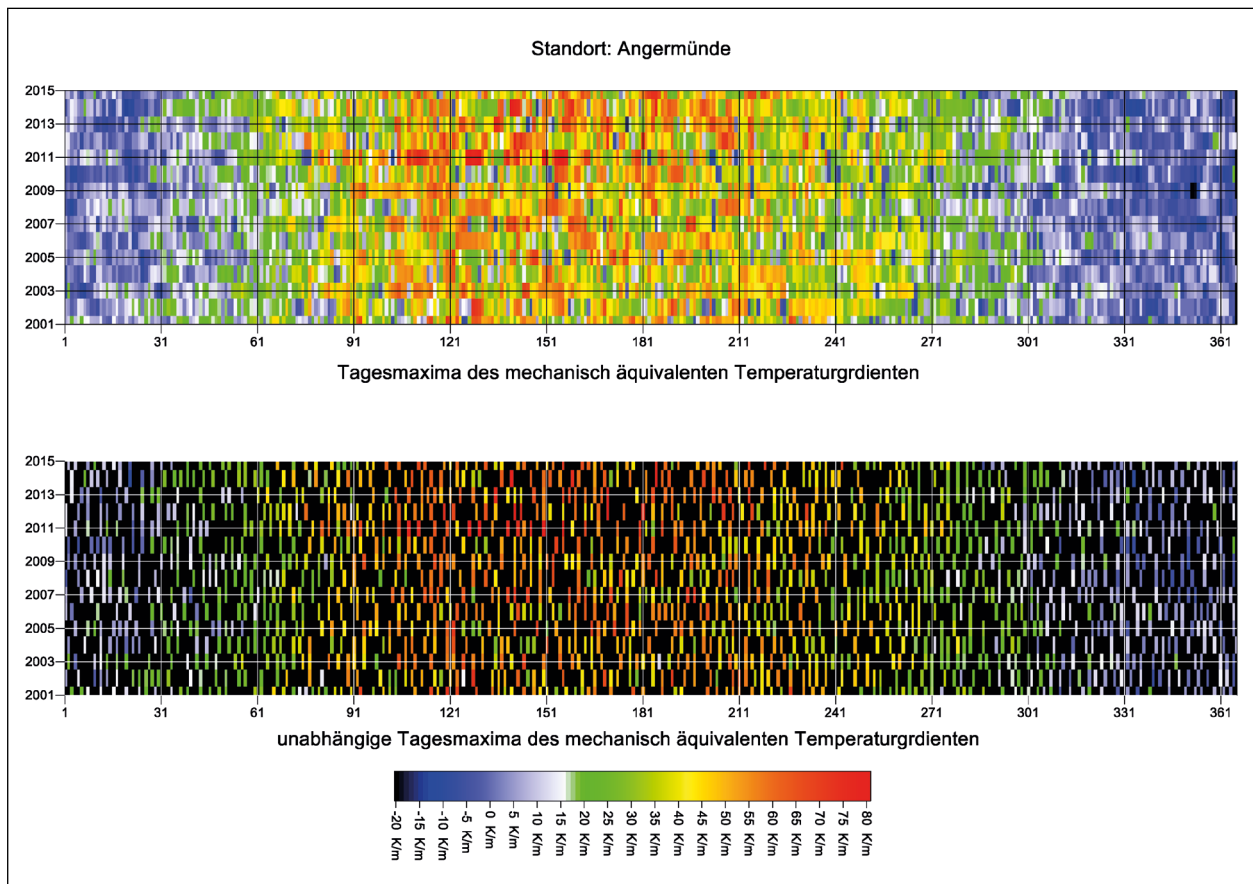


Bild 9.16: Tagesmaxima (oben) und unabhängige Tagesmaxima (unten) des mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten; die schwarzen Felder unten repräsentieren die abhängigen Tagesmaxima

In einem zweiten Schritt müssen aus diesen Tagesmaxima, die für aufeinanderfolgende Tage ggf. durch die Wetterlage miteinander verbunden und demnach nicht unabhängig sind, die unabhängigen Tagesmaxima extrahiert werden. Das erfolgt nach dem Prinzip: Zwischen zwei Maxima muss ein Minimum liegen. In Bild 9.16 sind exemplarisch alle Maxima und die sich daraus ergebenden unabhängigen Maxima zu sehen. Man kann dieser Abbildung auch entnehmen, dass die größten dieser Werte nicht in allen Monaten auftreten. Jahresmaxima sowie unabhängige Tagesmaxima oberhalb eines Schwellenwertes wird man daher nur im Sommerhalbjahr finden. Die Peaks over Threshold sind also keine Zufallsstichprobe aus der Menge der täglichen Maxima, sondern werden ganz gezielt aus dem Abschnitt des Jahres entnommen, für den man Stationarität hinsichtlich der Maxima annehmen kann.

9.4.3 Teststationen

Die in Bild 9.17 dargestellte Karte zeigt die Lage von 13 Stationen, die so ausgewählt wurden, dass sie das Spektrum der Parameter der Lognormalverteilung, die an alle Stundenwerte des MÄG angepasst werden, weitestgehend abdecken.

Die Standorte an der Küste fallen durch eine geringe Spannweite des MÄG und damit einen kleinen Skalenparameter sowie einen kleinen Lageparameter auf. Die Station Gardelegen hat einen ungewöhnlich kleinen Formparameter.

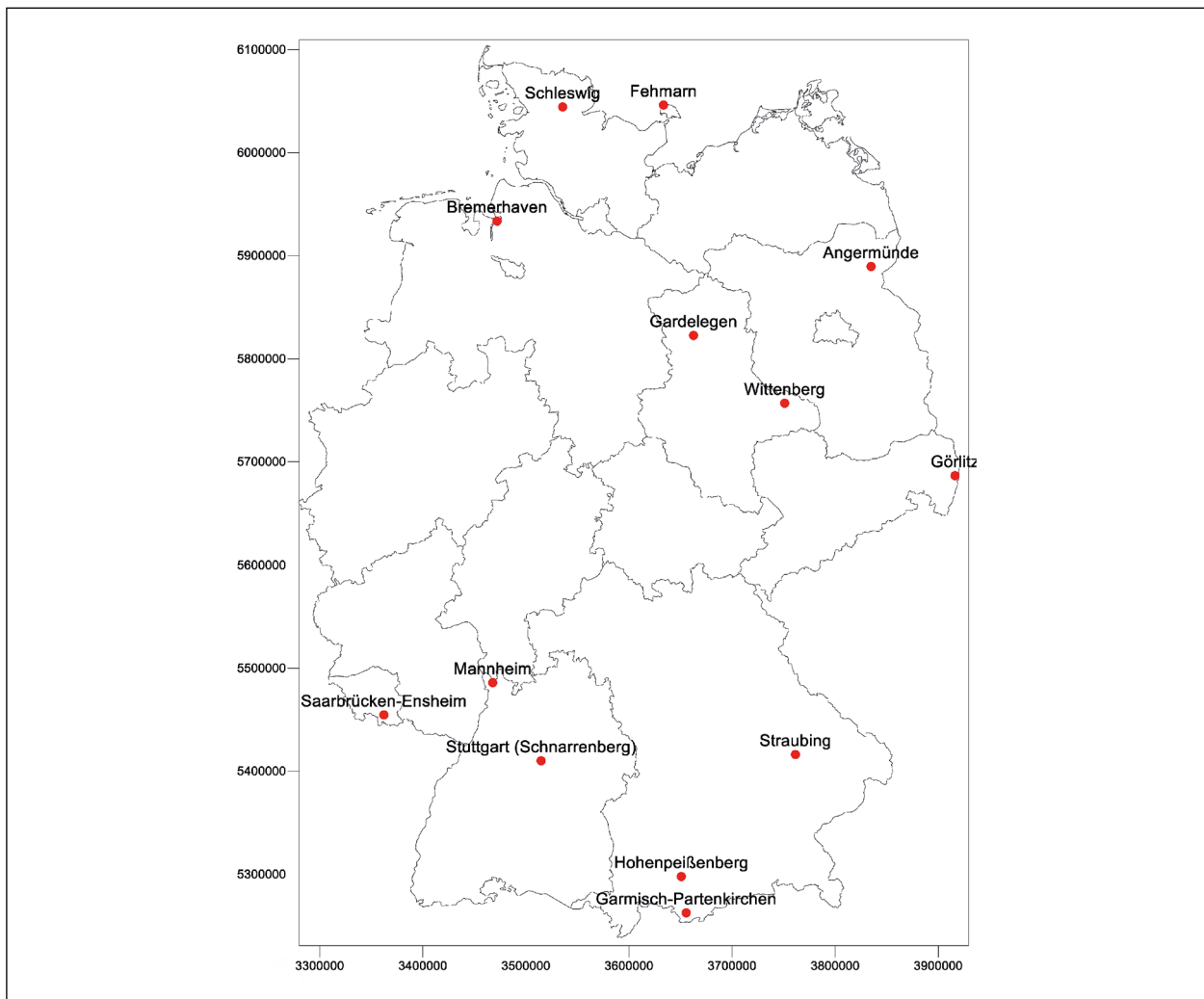


Bild 9.17: Standorte für die Extremwertanalyse

Stations_ID	Stationsname	MÄG_MAX	MÄG_MIN	LN_LOC	LN_SCALE	LN_SHAPE
164	Angermünde	80,9	-39,8	-53,4	3,93	0,32
701	Bremerhaven	70,7	-33,7	-39,1	3,61	0,36
1544	Gardelegen	79,1	-46,9	-58,9	4,04	0,30
1550	Garmisch-Partenkirchen	82,3	-46,8	-56,7	3,98	0,34
1684	Görlitz	74,9	-41,3	-51,9	3,90	0,34
2290	Hohenpeißenberg	81,8	-41,9	-48,0	3,80	0,37
4336	Saarbrücken-Ensheim	79,6	-39,7	-52,8	3,91	0,34
4466	Schleswig	73,0	-36,2	-45,0	3,75	0,35
4911	Straubing	78,3	-43,0	-56,3	3,98	0,33
4928	Stuttgart (Schnarrenberg)	76,9	-41,5	-52,0	3,90	0,34
5516	Fehmarn	66,7	-34,0	-39,0	3,60	0,36
5629	Wittenberg	75,8	-40,5	-52,0	3,90	0,33
5906	Mannheim	80,8	-41,3	-56,3	3,98	0,33

Tab. 9.6: Lognormalverteilungs-Parameter und Extremwerte des MÄG für die ausgesuchten Standorte; MÄG_MAX: größter Wert des MÄG, MÄG_MIN: kleinster Wert des MÄG, LN_LOC: Lageparameter der Lognormalverteilung, LN_SCALE: Skalensparameter, LN_SHAPE: Formparameter

9.4.4 Parametervergleich der Gumbelverteilungen

Wie eingangs erwähnt, werden die Verteilungen 15-jähriger Maxima (d. h. Stichprobenlänge bzw. Blockzeitspanne = 15 Jahre) für die probabilistische Dimensionierung durch Gumbel-Verteilungen beschrieben. Gumbelverteilungen haben eine konstante Schiefe von 1,14 und keine obere Grenze.

Für den Vergleich der Verteilungsparameter werden Gumbelverteilungen an die Jahresmaxima des MÄG angepasst. Bei der Dimensionierung erfolgt die Umrechnung der Parameter einer Gumbelverteilung auf andere Blockzeitspannen, indem der Lageparameter für die neue Zeitspanne gleich dem Wiederkehrwert, der sich aus der ursprünglichen Blockzeitspanne ergibt, gesetzt wird. Der Skalenparameter wird nicht verändert (siehe dazu Kapitel 9.5.1). Für den angestrebten Vergleich wird daher der Lageparameter, der aus der Lognormalverteilung ermittelt wurde, mit dem Wiederkehrwert für 15 Jahre, der sich aus der Gumbelverteilung ergibt, die an die Jahresmaxima angepasst wird, verglichen. Die Skalenparameter können direkt verglichen werden. Es wird angenommen, dass die Ergebnisse beider Methoden gleichwertig sind, wenn sich die

Verteilungsparameter aus der Lognormalverteilung innerhalb des 95%-Konfidenzbereichs der Parameter der Gumbelverteilung, die mit der Maximum-Likelihood-Methode an die Jahresmaxima angepasst wird, befinden. Alle für den Vergleich benötigten Größen sind in der Tabelle 9.7 aufgeführt.

Die Verteilungen der jährlichen Maxima weisen Schiefen auf (siehe Tabelle 9.7, Spalte „Schiefe“), die zeigen, dass es sich hier zumeist nicht um Gumbelverteilungen handeln kann.

Die Lageparameter aus der Lognormalverteilung (Spalte „Lagep.“) liegen – mit Ausnahme der Station Garmisch-Partenkirchen – etwas unterhalb des 95%-Konfidenzbereichs, den die 15-jährigen Wiederkehrwerte einnehmen. Diese Differenz wird sich ggf. nur wenig auf das Dimensionierungsergebnis auswirken. Die Skalenparameter hingegen (Spalte „Skalp.“), die eigentlich dieselbe Größenordnung haben müssten wie die Skalenparameter der jährlichen Maxima, betragen das 3- bis 6-fache. Dieser Unterschied ist nicht plausibel. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die Berechnung der Gumbelparameter anhand der Lognormalverteilung aller Stundenwerte des MÄG nicht zu befriedigenden Ergebnissen führt.

Station	Standort	Schiefe	aus LNV		aus Jahresmaxima			
			Lagep.	Skalp.	WKW 15J, 95 %KB		SP, 95 %KB	
					von	bis	von	bis
164	Angermünde	0,99	67,5	12,94	70,4	80,5	2,22	5,34
701	Bremerhaven	0,07	59,6	12,19	66,9	75,0	1,88	4,31
1544	Gardelegen	0,07	69,2	12,88	74,1	85,3	2,54	5,92
1550	Garmisch-Partenkirchen	0,39	78,0	15,38	77,4	86,0	1,92	4,50
1684	Görlitz	-0,13	71,8	14,07	72,7	79,0	1,62	3,47
2290	Hohenpeissenberg	0,28	73,1	15,03	76,2	84,7	2,19	4,68
4336	Saarbrücken-Ensheim	1,15	72,0	14,10	73,2	79,0	1,33	3,09
4466	Schleswig	0,79	65,6	13,14	67,9	73,5	1,29	2,99
4911	Straubing	-0,12	74,2	14,34	74,6	84,9	2,39	5,50
4928	Stuttgart-Schnarrenberg	0,27	71,9	14,11	73,8	79,3	1,32	2,98
5516	Fehmarn	-0,46	59,1	12,02	64,9	75,2	2,53	5,55
5629	Wittenberg	-0,35	69,6	13,51	73,4	80,8	1,89	4,05
5906	Mannheim	0,35	73,3	14,08	76,6	85,4	2,05	4,69

Tab. 9.7: Parameter der Gumbelverteilung; Schiefe: Schiefe der Verteilung der jährlichen Maxima; LNV: Lognormalverteilung; WKW 15J, 95 % KB: 95%-Konfidenzbereich des Wiederkehrwertes für 15 Jahre; SP, 95 % KB: 95%-Konfidenzbereich des Skalenparameters

9.4.5 Generalisierte Extremwertverteilungen

Jahresmaxima

Wenn man eine GEV an Stelle der Gumbelverteilung an die Maxima anpasst, dann trifft man keine Vorentscheidung hinsichtlich des Formparameters, der bei einer Gumbelverteilung immer Null ist.

Die Schiefen der Verteilungen der Jahresmaxima haben schon gezeigt, dass die Maxima des MÄG offenbar nicht zu einer Gumbelverteilung konvergieren. Wenn man stattdessen eine GEV an die jährlichen Maxima anpasst, dann wird diese Einschätzung für die meisten der 13 Stationen bestätigt (Tabelle 9.8).

Die Formparameter sind i. d. R. negativ, die Verteilung also vom Typ III. Damit haben die Extremwerte des MÄG einen endlichen oberen Grenzwert (siehe auch Bild 9.15). Das ergibt physikalisch auch Sinn, denn extreme Gradienten treten dann auf, wenn die meteorologischen Bedingungen eine rasche Aufheizung der Fahrbahnoberfläche ermöglichen. Dazu bedarf es großer direkter Einstrahlung und die Einstrahlung kann nicht beliebig groß werden.

Eine Ausnahme bildet Angermünde mit einem deutlich positiven Formparameter, der aber nicht mit Sicherheit größer als Null ist, denn sein Standardfehler beträgt 0,27: Damit liegt dieser Formparameter mit 95%iger Wahrscheinlichkeit im Bereich von -0,39 bis 0,66. Betrachtet man die Zeitreihe der jährlichen Maxima für diese Station (Bild 9.18),

dann erkennt man, dass ab 2011 die Jahresmaxima größer sind als in allen Jahren zuvor und der Wert für 2011 eventuell ein Ausreißer ist.

Eine weitere Ausnahme ist Fehmarn: An diesem Standort, der von allen Standorten am meisten maritim geprägt ist, sind alle Parameter größer oder kleiner als die der anderen Standorte. Und die Anpassung der GEV an die Maxima des MÄG ist so exakt (siehe Bild 9.19), dass sich für den Skalen- und den Formparameter kein Standardfehler berechnen lässt. Bezüglich des größten und kleinsten der berechneten Stundenwerte des MÄG sowie der Lage- und Skalenparameter der zugehörigen Lognormalverteilung der Stundenwerte nimmt Fehmarn unter den 13 Standorten dieselbe Rolle ein. Es besteht demnach wohl ein gewisser Zusammenhang



Bild 9.18: Die fünf größten mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten eines Jahres; Zeitraum: 2001 bis 2015, Standort: Angermünde

Station	Standort	Schiefe	Lage K/m	Skalen K/m	Form	STE Lage	STE Skalen	STE Form
164	Angermünde	0,99	65,2	3,55	0,135	1,09	0,86	0,27
701	Bremerhaven	0,07	63,4	3,47	-0,335	1,05	0,82	0,26
1544	Gardelegen	0,07	69,5	4,92	-0,382	1,53	1,26	0,31
1550	Garmisch-Partenkirchen	0,39	73,5	3,35	-0,105	1,05	0,80	0,29
1684	Görlitz	-0,13	69,7	2,64	-0,398	0,76	0,57	0,21
2290	Hohenpeissenberg	0,28	71,8	3,45	-0,208	0,97	0,65	0,14
4336	Saarbrücken-Ensheim	1,15	70,3	2,17	0,048	0,63	0,46	0,19
4466	Schleswig	0,79	65,1	2,16	-0,027	0,64	0,47	0,21
4911	Straubing	-0,12	70,7	4,79	-0,565	1,39	1,18	0,24
4928	Stuttgart-Schnarrenberg	0,27	71,2	2,27	-0,207	0,67	0,49	0,23
5516	Fehmarn	-0,46	61,4	5,52	-1,041	0,00		
5629	Wittenberg	-0,35	70,0	3,04	-0,420	0,87	0,64	0,19
5906	Mannheim	0,35	72,5	3,53	-0,157	1,07	0,80	0,26

Tab. 9.8: Parameter der GEV für die jährlichen Maxima des MÄG (STE: Standardfehler)

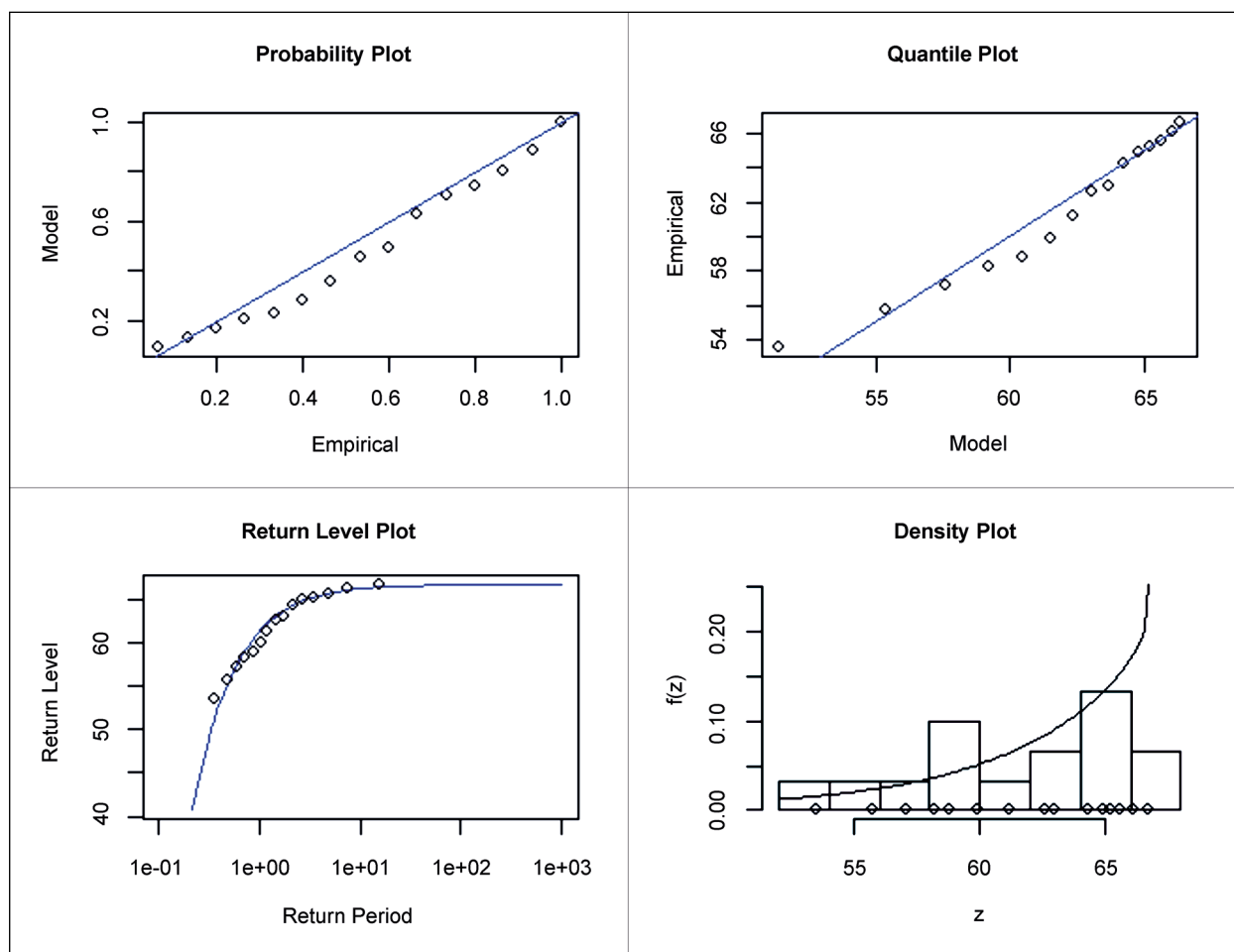


Bild 9.19: Anpassung einer GEV an die Jahresmaxima des MÄG; Zeitraum: 2001 bis 2015, Standort: Fehmarn

zwischen den Verteilungen der Stunden- und der der Extremwerte.

Wenn man die Standardfehler in der Tabelle 9.8 betrachtet, dann erkennt man, dass diese für den Lage- und Skalenparameter wesentlich kleiner sind als die Parameter selbst, während sie für den Formparameter in etwa dieselbe Größenordnung haben wie der Parameter. Das bedeutet, dass die Aussage „der Formparameter ist kleiner als Null“ für diese Ergebnisse nicht signifikant ist.

Werte oberhalb einer Schwelle (POT)

Will man eine Verteilung an die Werte oberhalb einer Schwelle anpassen, benötigt man zuerst einen passenden Schwellenwert. Er darf das Ergebnis der Anpassung nicht beeinflussen. Es gibt keine numerische Methode zur Ermittlung des passenden Schwellenwertes. Eine Möglichkeit besteht darin, die Schwellenwerte schrittweise zu erhöhen und jeweils an die Werte oberhalb der Schwelle eine ge-

neralisierte Paretoverteilung (GPV) anzupassen. Man sucht dann die obere Grenze des Bereichs, in dem sich die resultierenden Verteilungsparameter nicht ändern. Der Skalenparameter muss dazu normiert werden.

Für die Station Angermünde sind die resultierenden Verteilungsparameter mit ihren Konfidenzbereichen in Bild 9.20 zu sehen. Der Bereich, in dem die Parameter annähernd konstant sind, also in etwa auf einer Horizontalen liegen, liegt bei 55 bis 61 K/m. Es wird eine GPV an alle POT mit einer Schwelle von 55 K/m und 61 K/m angepasst (Tabelle 9.9) – entsprechende Anpassungen mit Schwellenwerten von 59 und 60 führen nicht zu deutlich anderen Ergebnissen.

Für die resultierende GPV ergibt sich jetzt ein negativer Formparameter – also eine Typ III-Verteilung. Allerdings ist dieser Parameter nur für den Schwellenwert von 55 K/m mit Sicherheit kleiner als Null und das liegt an der großen Zahl der Überschreitungen (= Freiheitsgrade).

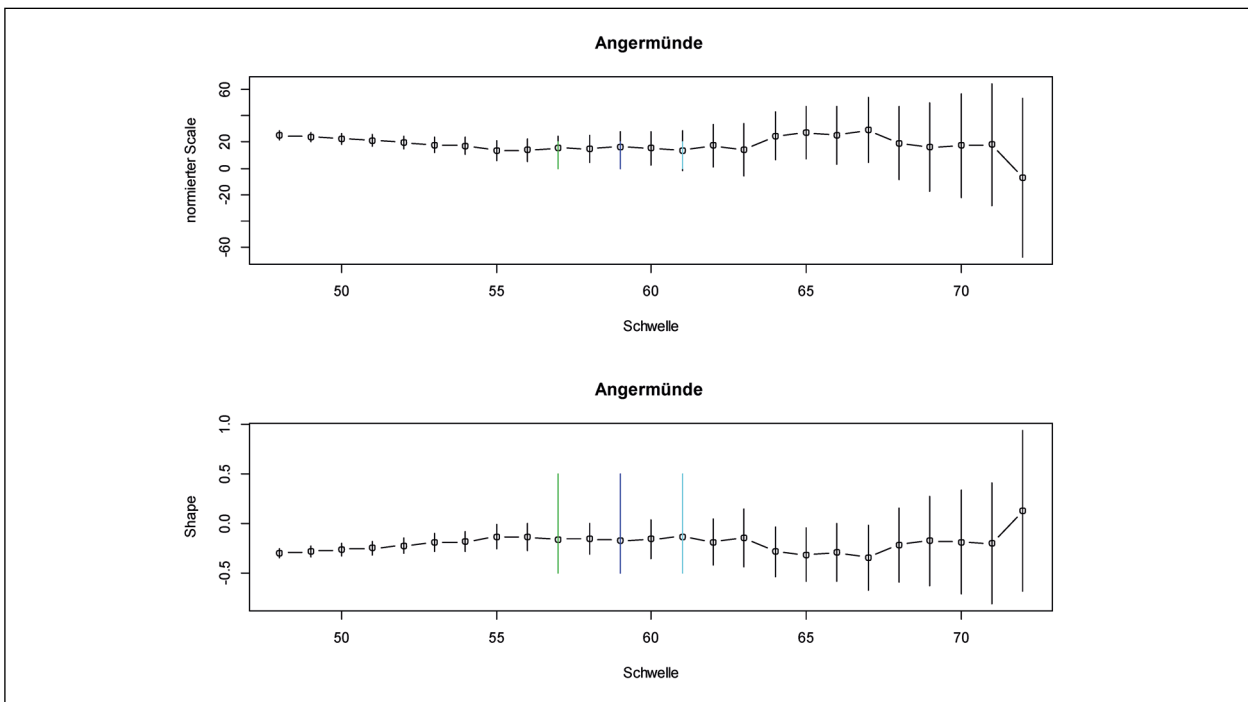


Bild 9.20: Änderung der Verteilungsparameter mit Änderung der Schwelle; vertikale schwarze Balken: 95%-Konfidenzbereich der Parameter, die farbigen Balken grenzen den Bereich konstanter Parameter ein

Schwelle	ZdÜ	Skalenp. ± STE	Formp. ± STE
55 K/m	225	6,084 ± 0,559	-0,134 ± 0,064
61 K/m	81	5,173 ± 0,835	-0,128 ± 0,118

Tab. 9.9: Ergebnisse der Anpassung einer GPV an unabhängige MÄG > 55 und 61 K/m; ZdÜ: Zahl der Überschreitungen, STE: Standardfehler

Bild 9.21 und Bild 9.22 zeigen die Güte der Anpassung: Für die beiden oberen Abbildungen, in denen die empirischen mit den theoretischen Wahrscheinlichkeiten verglichen werden, gilt: Je enger die empirischen Werte der Geraden folgen, desto besser die Anpassung. Der Return Level Plot zeigt die theoretischen Wiederkehrwerte mit dem 95%-Konfidenzbereich, zum Vergleich sind auch hier die empirischen Werte eingetragen. Unten rechts sind die empirische und die theoretische Dichteverteilung zu sehen. Bei der theoretischen Verteilung handelt es sich immer um eine generalisierte Paretoverteilung.

Man kann den Bildern (Bild 9.21 und Bild 9.22) entnehmen, dass die Güte der Anpassung für beide Schwellenwerte sehr ähnlich ist – der deutlich erkennbare Unterschied besteht in der Breite des Konfidenzbereichs für die Wiederkehrwerte (Return Level Plot), was aus der unterschiedlichen Zahl der Überschreitungen resultiert. Da im Zweifelsfall immer der größere Schwellenwert der bessere ist, weil

man mit ihm weniger Gefahr läuft, Werte in die Anpassung einzubeziehen, die gar keine Extremwerte sind, wird man sich in diesem Fall für den Schwellenwert 61 K/m entscheiden. Er entspricht dem 95%-Quantil der Verteilung der positiven unabhängigen Maxima. Anhand der Daten des Standortes Fehmarn soll überprüft werden, ob sich ein entsprechender Schwellenwert auch für Standorte mit deutlich anderen Verteilungsparametern eignet.

Die fünf größten MÄG eines jeden Jahres, die in Bild 9.23 dargestellt sind, sind hier – wo die Ostsee den Tagesgang der Lufttemperatur und damit auch den der Fahrbahnoberflächentemperatur dämpft – deutlich niedriger als in Angermünde. Sie liegen in einigen Jahren auch alle eng beieinander – zum Teil so eng, dass die Unterschiede kleiner als die Modellgenauigkeit für einen einzelnen Wert sind, die bei 5 K/m anzusetzen ist. Das ist in Angermünde genauso und es zeigt, dass die meteorologischen Bedingungen für das Auftreten extremer Gradienten nicht so außergewöhnlich sind, als dass sie nicht in fast jedem Jahr mehrmals pro Jahr auftreten könnten. Solche Ereignisse, die nicht – wie z. B. Orkan oder Hochwasser – an besondere Wetterlagen gebunden sind, werden in der Meteorologie i. d. R. nicht als Extremwerte eingestuft.

Die Suche nach einem Schwellenwert ist auch für den Standort Fehmarn schwierig (Bild 9.24): Der

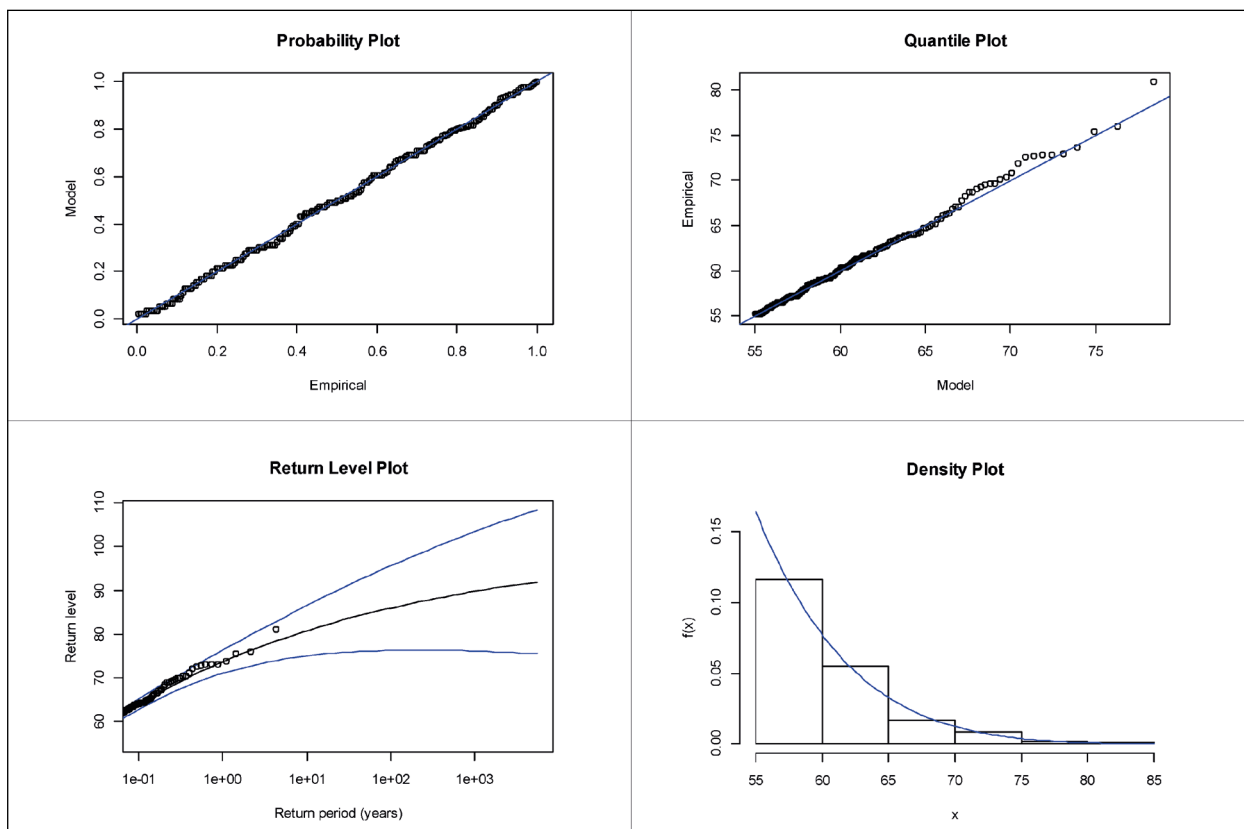


Bild 9.21: Anpassung einer GPV an unabhängige Tagesmaxima > 55 K/m des MÄG; Zeitraum: 2001 bis 2015, Standort: Angermünde

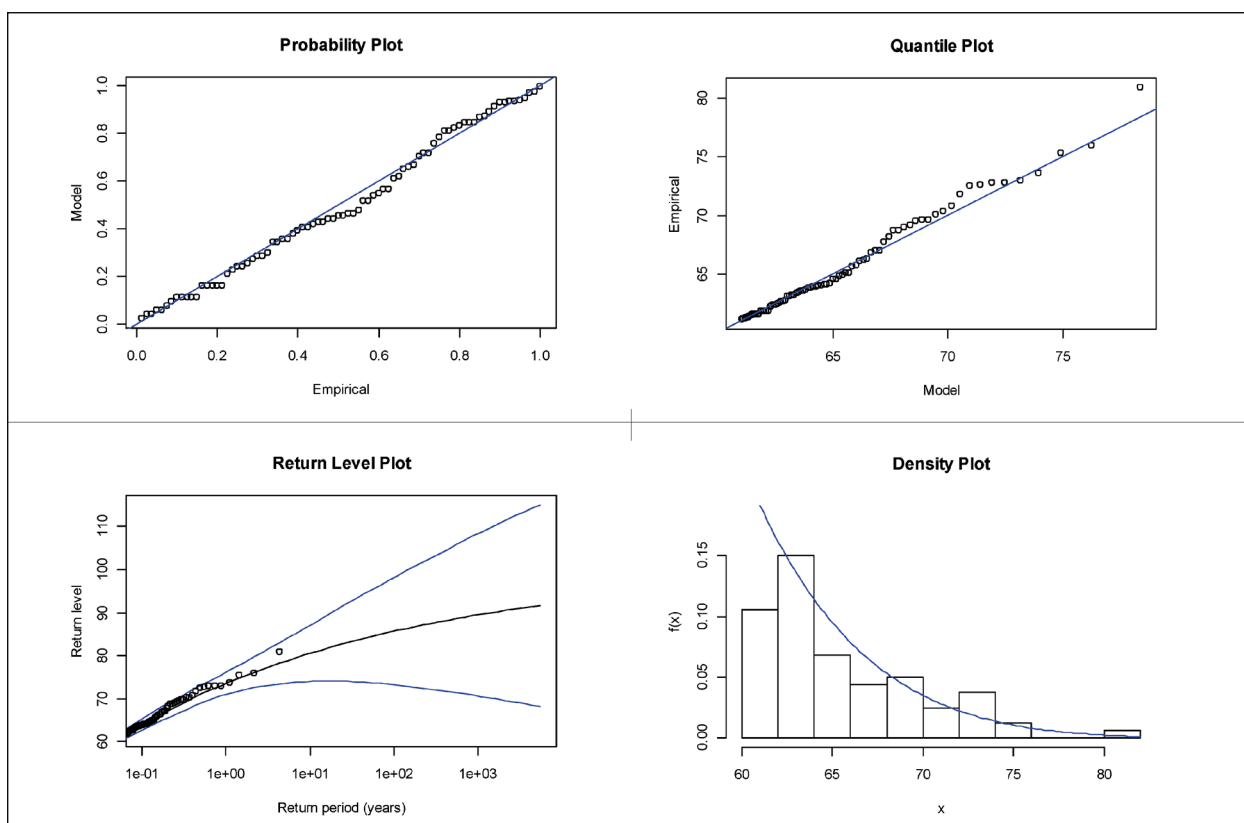


Bild 9.22: Anpassung einer GPV an unabhängige Tagesmaxima > 61 K/m des MÄG; Zeitraum: 2001 bis 2015, Standort: Angermünde

Wert 50 K/m markiert das Ende des Bereichs, in dem die Skalen- und die Formparameter kontinuierlich an- bzw. absteigen. Er wäre eigentlich geeignet, wird aber 182-mal in den 15 Jahren überschritten – das ist so viel, dass man kaum von einem Extremwert sprechen kann. Und der Wert 55 K/m dürfte die oberste Schwelle markieren, weil bei größeren Werten die Unsicherheiten bezüglich der Verteilungsparameter, die durch die senkrechten Striche dargestellt werden, doch deutlich ansteigen.

Das 95%-Quantil beträgt bei diesem Standort 53,8 K/m und liegt damit in dem Bereich, der für die Festlegung des Schwellenwertes infrage kommt. An-

passungen erfolgen deshalb für die drei Schwellenwerte 52 K/m, 53,8 K/m und 55 K/m. Die Parameter der GPV und ihre Standardfehler sind in Tabelle 9.10 abzulesen, die Plots zur Beurteilung der Güte der Anpassung für den Schwellenwert, der dem 95%-Quantil entspricht, in Bild 9.25 aufgeführt. Es ist unmöglich, anhand dieser Ergebnisse einen Schwellenwert auszuwählen. Man kann lediglich anhand Bild 9.25, das einen guten Zusammenhang zwischen der empirischen und der theoretischen Verteilung zeigt, konstatieren, dass man mit dem 95%-Quantilwert offenbar nicht falsch liegt. Er wird bei der Anpassung in Tabelle 9.10 für alle 13 Standorte benutzt.

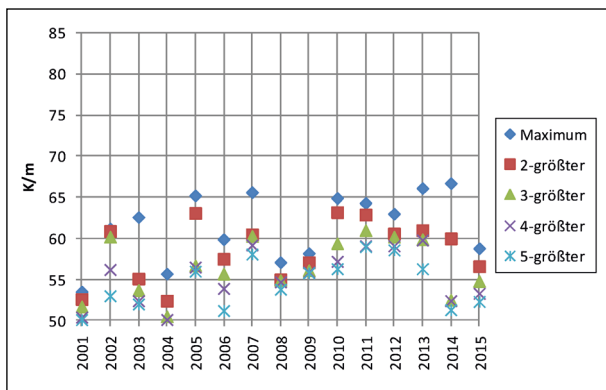


Bild 9.23: Die fünf größten, mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten eines Jahres; Zeitraum: 2001 bis 2015, Standort: Fehmarn

Schwelle	ZdF	Scale ±STE	Shape±STE
52 K/m	127	5,55 ± 0,68	-0,288 ± 0,089
53,8 K/m	84	5,92 ± 0,85	-0,399 ± 0,103
55 K/m	71	4,93 ± 0,84	-0,329 ± 0,129

Tab. 9.10: Ergebnisse der Anpassung einer GPV bei unterschiedlichen Schwellenwerten; Zeitraum: 2001 bis 2015, Standort: Fehmarn, STE: Standardfehler

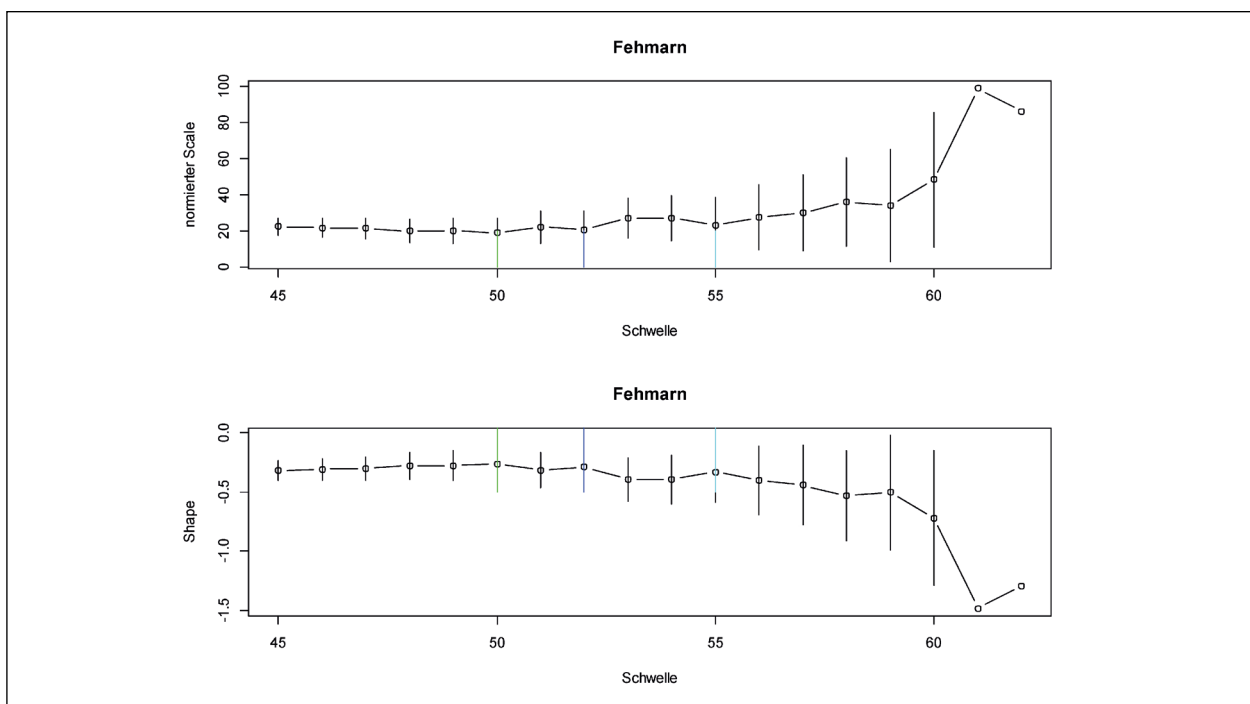


Bild 9.24: Änderung der Verteilungsparameter in Abhängigkeit vom Schwellenwert; Zeitraum: 2001 bis 2015, Standort: Fehmarn, vertikale schwarze Balken: 95%-Konfidenzbereich der Parameter, die farbigen Balken grenzen den Bereich konstanter Parameter ein

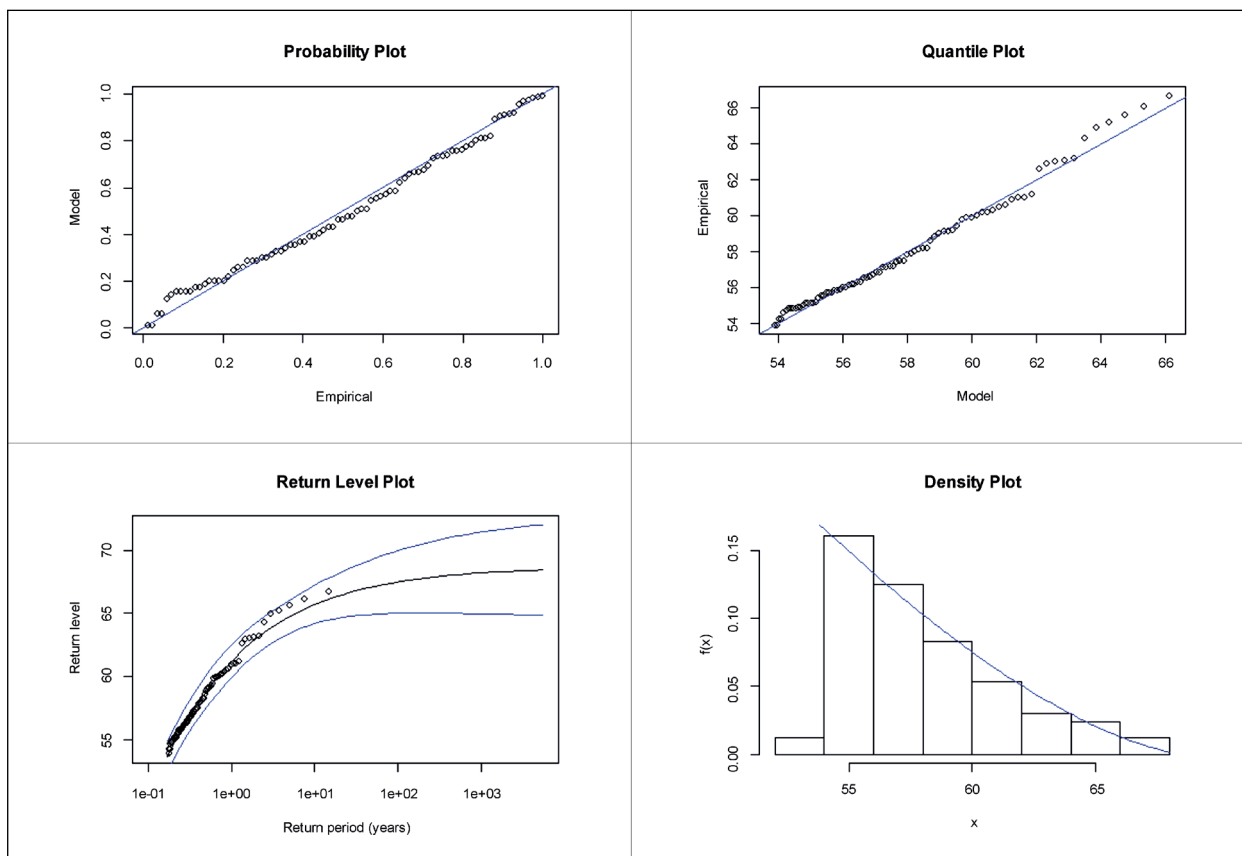


Bild 9.25: Anpassung einer GPV an unabhängige Tagesmaxima $> 53,8$ K/m des MÄG; Zeitraum: 2001 bis 2015, Standort: Fehmarn

Anpassung

Bei der Suche nach einem Schwellenwert wurde eine generalisierte Paretoverteilung (GPV) an die Werte oberhalb einer Schwelle angepasst. Nur dann kann man die empirische und die theoretische Verteilung direkt vergleichen und entsprechende Abbildungen (z. B. Bild 9.25) zur Beurteilung der Güte der Anpassung erzeugen.

Für die 13 Standorte sind die POT jetzt mit einem Poisson-Punktprozess (PP) kombiniert worden. Dadurch kann eine GEV angepasst werden, deren Parameter sich besser mit denen der Gumbelverteilungen und der GEV für die Jahresmaxima vergleichen lassen. Die Ergebnisse der Anpassung sind in Tabelle 9.11 aufgeführt.

Vergleicht man die Standardfehler mit dem zugehörigen Verteilungsparameter, dann sieht man, dass sich der Lageparameter recht genau festlegen lässt, denn hier beträgt der Standardfehler ca. 1 % des Parameterwertes. Für den Skalenparameter sind das ~ 10 % und für den Formparameter beträgt der Standardfehler zwischen 20 % und 75 % des Parameterwertes. Es sind dann auch nicht alle Formpa-

rameter mit Sicherheit kleiner als Null. Für diejenigen, die rot hinterlegt sind, ist die Obergrenze des 95%-Konfidenzbereichs > 0 .

Die Lageparameter sind denen der Gumbelverteilungen und der GEV für Jahresmaxima sehr ähnlich, auch die Varianz (ausgedrückt durch den Variationskoeffizient) innerhalb der 13 Standorte ist mit 5 % bis 6 % vergleichbar. Skalen- und Formparameter können nur für die GEV verglichen werden. Hier fällt auf, dass sich die Werte der 13 Standorte für die POT viel weniger unterscheiden als für die Jahresmaxima: Der Variationskoeffizient für den Skalenparameter beträgt für die Jahresmaxima 31 %, für die POT sind es 14 %. Die entsprechenden Werte für den Formparameter sind 108 % und 40 %. Das zeigt ganz deutlich, dass die Anpassung einer Extremwertverteilung an die POT die Unterschiede hinsichtlich der Verteilungsform glättet, während das unterschiedliche Niveau der extremen MÄG von der Wahl des Verfahrens nicht beeinflusst wird. Beispielhaft ist das für die Standorte Bremerhaven und Straubing in Bild 9.26 zu sehen: Die GEV für die Jahresmaxima unterscheiden sich sowohl hinsichtlich des Lageparameters (d. h. des MÄG-Wertes für das Maximum der Verteilung) als

Station	Standort	Schwelle	ZdÜ	Lage	Skalen	Form	STE Lage	STE Skalen	STE Form
164	Angermünde	61,0	81	68,4	4,00	-0,139	0,87	0,40	0,10
701	Bremerhaven	56,5	81	63,5	3,25	-0,283	0,73	0,32	0,11
1544	Gardelegen	63,1	81	71,4	3,65	-0,336	0,82	0,32	0,10
1550	Garmisch-Partenkirchen	69,1	79	75,7	3,14	-0,271	0,71	0,30	0,11
1684	Görlitz	64,4	77	69,5	2,43	-0,296	0,55	0,23	0,11
2290	Hohenpeissenberg	66,7	79	73,0	3,14	-0,220	0,70	0,31	0,09
4336	Saarbrücken-Ensheim	64,5	81	70,1	2,99	-0,136	0,66	0,33	0,10
4466	Schleswig	60,1	82	65,4	2,74	-0,161	0,60	0,30	0,10
4911	Straubing	66,0	79	71,9	2,91	-0,238	0,65	0,30	0,12
4928	Stuttgart-Schnarrenberg	64,8	80	71,4	2,73	-0,415	0,62	0,20	0,09
5516	Fehmarn	53,8	84	61,2	2,92	-0,399	0,68	0,24	0,10
5629	Wittenberg	63,4	79	70,6	2,90	-0,464	0,64	0,23	0,09
5906	Mannheim	64,8	81	71,5	3,52	-0,169	0,77	0,31	0,10

Tab. 9.11: Parameter der GEV für POT+PP; rot hinterlegt: Wert ist nicht mit Sicherheit < 0 , ZdÜ: Zahl der Überschreitungen (Freiheitsgrade), STE: Standardfehler

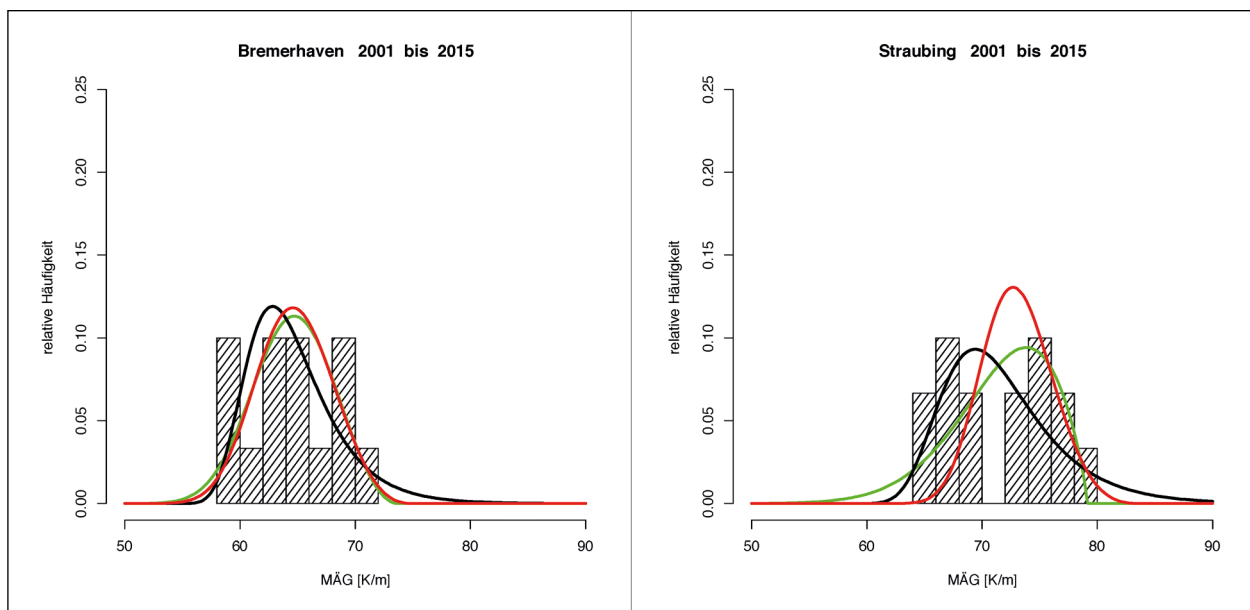


Bild 9.26: Extremwertverteilungen für Bremerhaven und Straubing (schwarz: Gumbel, grün: GEV für Jahresmaxima, rot: GEV für POT)

auch hinsichtlich der Form. Für die GEV, die an die POT angepasst wurde, gibt es nur einen deutlichen Unterschied hinsichtlich der Lage.

In Anhang 11A.5 befinden sich für alle 13 Standorte Abbildungen mit den drei Verteilungsfunktionen. Sie zeigen deutlich, dass

- Extremwerte des MÄG für die meisten Standorte durch eine GEV vom Typ III beschrieben werden und

- die Ergebnisse für die POT denen für die Jahresmaxima ähneln, wenn die Jahresmaxima keine Auffälligkeiten zeigen (wie das für Angermünde der Fall ist).

9.4.6 Extremwertverteilung für die probabilistische Dimensionierung

Es stellt sich nach Abschluss dieser Extremwertanalyse die Frage, welcher Typ der Extremwertverteilung für die probabilistische Dimensionierung benutzt werden sollte: Der Typ I, also die Gumbelverteilung oder der Typ III, die inverse Weibullverteilung. Diese Frage kann aus klimatologischer Sicht nicht beantwortet werden, sie muss im Rahmen von Dimensionierungsrechnungen entschieden werden. Hier sollen aber die infrage kommenden Verteilungen für den Standort Wittenberg, dessen Jahresmaxima fraglos zu einer GEV vom Typ III konvergieren, aufgezeigt werden, damit man die Unterschiede optisch einordnen kann. Zum Vergleich wird zusätzlich die für die Dimensionierung berechnete Verteilung dargestellt (Bild 9.27 und Bild 9.28).

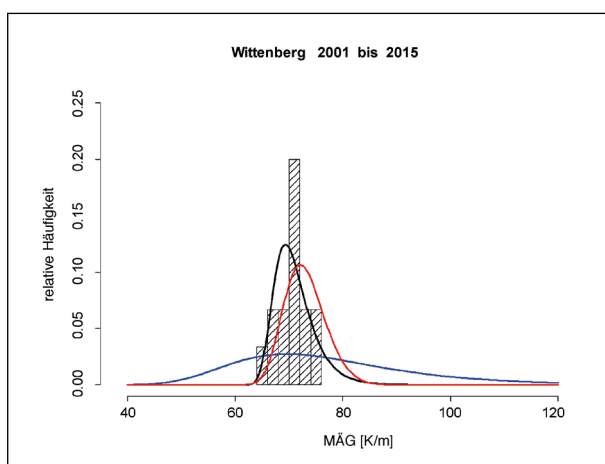


Bild 9.27: Dichteverteilungen für Wittenberg (blau: Gumbelparameter aus der Lognormalverteilung, schwarz: Gumbelverteilung aus den Jahresmaxima, rot: GEV aus den Werten oberhalb von 64,8 K/m)

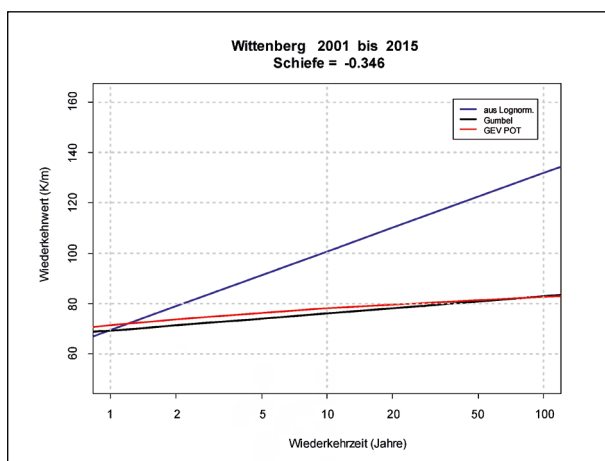


Bild 9.28: Wiederkehrwerte für Wittenberg

Die Unterschiede hinsichtlich der Dichteverteilungen (Bild 9.27) fallen für alle drei Verteilungen deutlich aus, wenn sich auch die Verteilungen, die nicht aus der zugehörigen Lognormalverteilung der Stundenwerte ermittelt wurden, wesentlich weniger voneinander unterscheiden als von der Verteilung (blau), die gemäß [HEFT 1072] für die probabilistische Dimensionierung benutzt wird.

Betrachtet man hingegen die Wiederkehrwerte, dann können die Unterschiede für die Wiederkehrzeiten ≥ 30 Jahre für die Extremwertverteilungen vom Typ I und Typ III als unerheblich eingestuft werden.

9.5 Gumbelverteilungen

9.5.1 Eignung der Gumbelverteilung für die rechnerische Dimensionierung

Die Extremwertanalyse in Kapitel 9.4 hat ergeben, dass die Verteilung der Extremwerte für die meisten Stationen am besten mit einer Typ III-GEV beschrieben werden kann. Dies ist wahrscheinlich auf die Tatsache zurückzuführen, dass für den mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten tatsächlich eine physikalisch bedingte obere Grenze existiert. Diese für den konkreten Fall zu identifizieren ist aber äußerst aufwendig.

Andererseits hat die exemplarische Extremwertanalyse auch gezeigt, dass eine Gumbel-Verteilung, die an die jährlichen Maxima des Zeitraums 2001 bis 2015 angepasst wird, die Verteilung extremer mechanisch äquivalenter Temperaturgradienten ebenfalls mit guter Genauigkeit beschreibt. Eine vergleichende Berechnung der Ausfallrate unter Verwendung der Gumbelverteilung bzw. der Typ III-GEV hat gezeigt, dass die Unterschiede in den Berechnungsergebnissen sehr klein sind.

Die entsprechende Berechnung wurde für den Standort Straubing durchgeführt. Hier sind die Unterschiede zwischen den beiden Verteilungen relativ groß (siehe Bild 9.26). Der Standort ist damit für eine vergleichende Untersuchung geeignet. Die Parameter für die Typ III-GEV sind in Tabelle 9.8 aufgeführt. Die Gumbelparameter für den 1-Jahres-Zeitraum wurden Tabelle A.10 entnommen und mit Formel (9-40) auf den 1-Jahres-Zeitraum zurückgerechnet. Für die weiteren Berechnungsparameter wurden in der Praxis häufig vorkommende Werte gewählt (Tabelle 9.12 und Tabelle 9.13).

	Rechenannahmen
Plattenlänge	5,0 m
Plattenbreite	4,25 m
Mittlere Plattendicke	250 mm
Beton	StC35/45-3,7
Wärmedehnzahl	$11,5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$
Unterlage	HGT
Fugen	verank./verdüb.
B-Zahl	800.000

Tab. 9.12: Rechenannahmen für die Berechnung der Ausfallrate unter Verwendung von Extremwertverteilungen

Gumbelverteilung		Typ III-GEV		
Lage	Skalen	Lage	Skalen	Form
69,63	3,37	70,7	4,79	-0,565

Tab. 9.13: Parameter der Extremwertverteilungen für den Standort Straubing

Für die Beschreibung der Streuung der Deckendicke und der Betonfestigkeit wurden die Verteilungsfunktionen aus [Heft 1072] verwendet. Die Streuung der Radlast wurde mit der im Forschungsprojekt FE 04.0285/2014/ORB (Aktualisierung und Anpassung der Straßenbelastungsdaten für die Dimensionierung) neu definierten Verteilungsfunktion für den Fall „Fernverkehr“ angesetzt.

Die Auswertung des entsprechenden 4-fach-Integrals erbrachte für die Gumbelverteilung eine Ausfallrate von 1,9002 % und für die Typ III-GEV eine Ausfallrate von 1,871 %. Da mit Straubing schon ein ungünstiger Standort für die Vergleichsrechnung gewählt wurde und die Abweichung sehr klein ist, kann ohne weitere Untersuchung gefolgert werden, dass die Gumbelverteilung für den vorgesehenen Verwendungszweck ausreichend genau ist.

Die Gumbelverteilung bietet gegenüber der Typ III-GEV eine Reihe von mathematischen Vorteilen. Die Bestimmung der Parameter ist wesentlich einfacher und die Verteilung lässt sich auf andere Blockzeitspannen umrechnen. Speziell die Möglichkeit der einfachen Anpassung der Funktion auf bestimmte Betrachtungszeiträume ist für die Dimensionierungspraxis und vor allem die Substanzbewertung sehr vorteilhaft.

Als Extremwertverteilung für die mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten wird deshalb die Gumbelverteilung benutzt. Wichtig ist dabei, dass

die Parameter der Verteilungsfunktion mit einem geeigneten Verfahren bestimmt werden.

Im Folgenden werden die wesentlichen mathematischen Eigenschaften der Gumbelverteilung erläutert und verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Verteilungsparameter vorgestellt und bezüglich ihrer Eignung diskutiert.

9.5.2 Allgemeine Eigenschaften der Gumbelverteilung

Die Formel für die Gumbelverteilung lautet (siehe z. B. [RINNE 2008]):

$$F_{GV}(x) = e^{-e^{-\frac{x-\mu_{GV}}{\beta_{GV}}}} \quad (9-27)$$

μ_{GV} Lageparameter der Gumbelverteilung

β_{GV} Formparameter der Gumbelverteilung

Für die zugehörige Dichtefunktion gilt damit:

$$f_{GV}(x) = \frac{1}{\beta_{GV}} \cdot e^{-\frac{x-\mu_{GV}}{\beta_{GV}}} \cdot e^{-e^{-\frac{x-\mu_{GV}}{\beta_{GV}}}} \quad (9-28)$$

Die Bestimmung der Parameter für eine Extremwertverteilung ist im Allgemeinen nicht trivial, weil Extremwerte per Definition selten vorkommende Werte sind und deshalb keine hinreichend großen Stichproben zur Verfügung stehen. Diese Problematik wurde bereits in Kapitel 9.3 dargestellt.

Die Gumbelverteilung bietet eine interessante mathematische Eigenschaft, welche die Parameterbestimmung erleichtert. Allgemein gilt die grundlegende Beziehung:

$$F_{EX}(x) = (F(x))^n \quad (9-29)$$

$F(x)$ Verteilung der zufälligen Werte

$F_{EX}(x)$ Extremwertverteilung

n Anzahl der unabhängigen Realisierungen der Zufallsgröße x

Jede Extremwertverteilung bezieht sich also auf eine bestimmte Anzahl unabhängiger Realisierungen n .

Es sei $F_{GV,1}(x)$ eine Gumbelverteilung für x , die sich auf n_1 Realisierungen bezieht und $F_{GV,2}(x)$ eine Gumbelverteilung für x , die sich auf n_2 Realisierungen bezieht. Wenn man

$$n_2 = k \cdot n_1 \quad (9-30)$$

definiert, dann gilt entsprechend Formel (9-29):

$$F_{GV,2}(x) = (F(x))^{n_2} = (F(x))^{k \cdot n_1} = ((F(x))^{n_1})^k \quad (9-31)$$

Durch Einsetzen der Formel für die Gumbelverteilung ergibt sich:

$$F_{GV,2}(x) = \left(e^{-e^{-\frac{x-\mu_1}{\beta_1}}} \right)^k \quad (9-32)$$

μ_1 Lageparameter der Gumbelverteilung für n_1 Realisierungen

β_1 Formparameter der Gumbelverteilung für n_1 Realisierungen

Durch einige elementare Umformungen gewinnt man auch für $F_{GV,2}(x)$ die Struktur der Gumbelverteilung:

$$F_{GV,2}(x) = e^{-k \cdot e^{-\frac{x-\mu_1}{\beta_1}}} \quad (9-33)$$

$$F_{GV,2}(x) = e^{-e^{\ln(k)} \cdot e^{-\frac{x-\mu_1}{\beta_1}}} \quad (9-34)$$

$$F_{GV,2}(x) = e^{-e^{\left(\ln(k) - \frac{x-\mu_1}{\beta_1}\right)}} \quad (9-35)$$

$$F_{GV,2}(x) = e^{-e^{-\frac{1}{\beta_1}(-\ln(k) \cdot \beta_1 + (x-\mu_1))}} \quad (9-36)$$

$$F_{GV,2}(x) = e^{-e^{-\frac{1}{\beta_1}(x - (\mu_1 + \ln(k) \cdot \beta_1))}} \quad (9-37)$$

$$F_{GV,2}(x) = e^{-e^{-\left(\frac{x - (\mu_1 + \ln(k) \cdot \beta_1)}{\beta_1}\right)}} \quad (9-38)$$

Ein Parametervergleich zeigt, dass für den Lageparameter gilt:

$$\mu_2 = \mu_1 + \ln(k) \cdot \beta_1 \quad (9-39)$$

$$\mu_2 = \mu_1 + \ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \cdot \beta_1 \quad (9-40)$$

μ_2 Lageparameter der Gumbelverteilung für n_2 Realisierungen

Es ist also auf einfache Weise möglich, eine einmal bekannte Gumbelverteilung auf eine andere Anzahl unabhängiger Realisierungen und damit auf einen anderen Betrachtungszeitraum umzurechnen. Der Formparameter ändert sich dabei nicht.

Aufgrund der eingangs beschriebenen Problematik gibt es eine Reihe unterschiedlicher Methoden zur Bestimmung der Gumbelparameter, deren Eignung

jeweils am konkreten Fall überprüft werden muss. Es wurden deshalb drei unterschiedliche Verfahren angewendet und bewertet.

9.5.3 Berechnung der Gumbelparameter aus den Parameterwerten der zugrundeliegenden Verteilung der zufälligen Werte

Da auch die Verteilung der extremen Werte letztendlich von der Verteilung der zufälligen Werte abhängt, ist es naheliegend die Parameter der Extremwertverteilung aus den Parameterwerten der zugrundeliegenden Verteilung der zufälligen Werte abzuleiten. Es gilt die grundlegende Beziehung nach Formel (9-29).

Damit lässt sich die Extremwertverteilung einfach bestimmen. Mit einem geeigneten Anpassungsverfahren können dann die Parameter für die Gumbelverteilung berechnet werden. Der Wert für n ist dabei iterativ so zu bestimmen, dass der Erwartungswert der Gumbelverteilung dem Extremwert der zur Verfügung stehenden Stichprobe entspricht. Anschließend kann durch Anwendung der Formel (9-40) eine Umrechnung auf den gewünschten Prognosezeitraum erfolgen.

Beispielhaft wird hier diese Vorgehensweise für die Station 164 (Angermünde) gezeigt. Die Parameter der Lognormalverteilung sind in Tabelle 9.6 angegeben:

- Lageparameter: -53,4 K/m
- Skalenparameter: 3,93
- Formparameter: 0,32

Die Iteration für den Wert n ergibt hier $n = 470$.

Die Extremwertverteilung für einen 15-Jahres-Zeitraum kann man berechnen mit:

$$F_{EX}^{(15)}(x) = (F_{LNV}(x))^{470} \quad (9-41)$$

$F_{LNV}(x)$ Lognormalverteilung für x

Die Anpassung an eine Gumbelverteilung gelingt nahezu perfekt. Bild 9.29 zeigt, dass die Abweichungen kaum sichtbar sind.

Die durch die Anpassung erzeugten Gumbelparameter betragen:

$$\mu_{GV} = 73,5$$

$$\beta_{GV} = 12,7$$

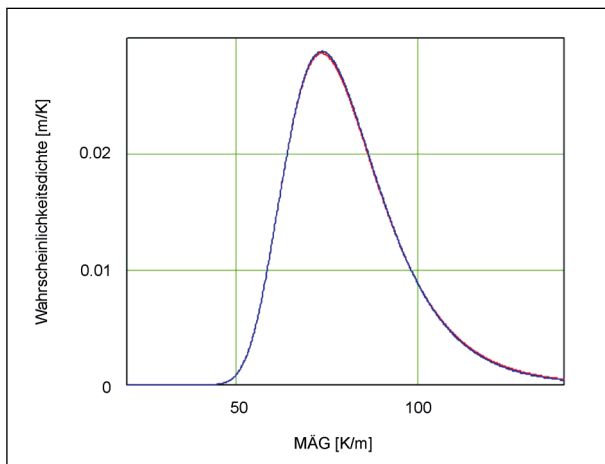


Bild 9.29: Extremwertverteilung (rot) und angepasste Gumbelverteilung (blau) für einen 15-Jahres-Zeitraum an der Station Angermünde

Der Lageparameter μ_{GV} liegt infolge der Iteration für n automatisch im plausiblen Bereich. Für den Formparameter β_{GV} kann die Plausibilität überprüft werden, indem man die Streuung der Extremwerte betrachtet.

Wie oben gezeigt wurde, hängt die Form der Gumbelverteilung nicht vom Betrachtungszeitraum ab. Das bedeutet, dass sich die Streuung der Extremwerte ebenfalls nicht mit dem Betrachtungszeitraum ändert, wenn eine gute Anpassung an die Gumbelverteilung möglich ist. Die Streuung der 1-Jahres-Extremwerte sollte also etwa der Streuung der 15-Jahres-Extremwerte entsprechen. Die 1-Jahres-Werte können aus der Stichprobe der Gradientenwerte für die Station 164 abgeleitet werden. Sie sind in Tabelle 9.14 zusammengestellt.

Die empirische Standardabweichung der Werte aus Tabelle 9.14 beträgt:

$$s = 5,103 \text{ K/m}$$

Für eine gumbelverteilte Zufallsgröße kann die Standardabweichung σ mit einer einfachen Formel berechnet werden (siehe z. B. [RINNE 2008]):

$$\sigma = \frac{\beta_{GV} \cdot \pi}{\sqrt{6}} \quad (9-42)$$

Für den berechneten β_{GV} -Wert von 12,7 ergibt sich:

$$\sigma = \frac{12,7 \cdot \pi}{\sqrt{6}} = 16,29$$

Der durch die Verteilungsfunktion bestimmte Streuungswert ist also mehr als dreimal so groß wie der empirische Wert. Dies erscheint wenig plausibel.

Jahr	Extremwert des Temperaturgradienten [K/m]
2001	67,7
2002	68,2
2003	64,0
2004	61,5
2005	66,2
2006	61,6
2007	67,0
2008	64,6
2009	63,6
2010	64,1
2011	80,9
2012	72,8
2013	72,5
2014	73,6
2015	68,7

Tab. 9.14: 1-Jahres-Extremwerte der Gradienten für die Station 164

Ursächlich für die schlechte Übereinstimmung ist offenbar die ungenügende Anpassung der Lognormalverteilung an die sehr hohen Gradientenwerte. Da die Funktionswerte der Verteilungsfunktion in den für die Extremwerte relevanten Bereichen ohnehin sehr klein sind, können bereits geringe absolute Abweichungen gleichbedeutend mit großen Relativabweichungen sein. Es ist festzustellen, dass die untersuchte Vorgehensweise in diesem Fall wenig geeignet ist. Dies bestätigt die bereits in Kapitel 9.4.4 gewonnene Aussage.

9.5.4 Berechnung der Gumbelparameter aus einer Stichprobe unter Verwendung von Schätzfunktionen

Eine Stichprobe zweifelsfrei unabhängiger Extremwerte bildet die in Tabelle 9.14 zusammengefasste Stichprobe der 1-Jahres-Maxima. Sie ist mit 15 Einzelwerten gerade umfangreich genug, um eine statistische Auswertung zuzulassen. Als Schätzfunktionen für die Gumbelparameter stehen zwei einfache Formeln zur Verfügung (siehe z. B. [RINNE 2008]):

$$\beta_{GV} = \frac{s \cdot \sqrt{6}}{\pi} \quad (9-43)$$

$$\mu_{GV} = \bar{\delta}_T - 0,577216 \cdot \beta_{GV} \quad (9-44)$$

$\bar{\delta}_T$ empirischer Mittelwert (Punktschätzung für den Erwartungswert)

s empirische Standardabweichung

Für die hier verwendete Stichprobe ergibt sich:

$$\bar{\delta}_T = 67,8$$

$$s = 5,103$$

Damit liefern die Schätzfunktionen die Parameterwerte:

$$\beta_{1GV} = \frac{5,103 \cdot \sqrt{6}}{\pi} = 3,98$$

$$\mu_{1GV} = 67,8 - 0,577216 \cdot 3,98 = 65,5$$

μ_{1GV}, β_{1GV} Gumbelparameter für die Verteilung der 1-Jahres-Extremwerte

Die Umrechnung auf den 15-jährigen Betrachtungszeitraum erfolgt mit Gleichung (9-40).

$$\begin{aligned} \mu_{15GV} &= \mu_{1GV} + \ln(15) \cdot \beta_{1GV} \\ &= 65,5 + \ln(15) \cdot 3,98 = 76,27 \end{aligned}$$

$$\beta_{15GV} = \beta_{1GV} = 3,98$$

μ_{15GV}, β_{15GV} Gumbelparameter für die Verteilung der 15-Jahres-Extremwerte

Der Erwartungswert EW_{δ_T} kann berechnet werden, indem man in Formel (9-44) den empirischen Mittelwert durch den Erwartungswert ersetzt und die Gleichung entsprechend umstellt:

$$EW_{\delta_T} = \mu_{GV} + 0,577216 \cdot \beta_{GV} \quad (9-45)$$

Für die 15-Jahres-Gumbelverteilung ergibt sich:

$$EW_{\delta_{T,15}} = 76,27 + 0,577216 \cdot 3,98 = 78,57$$

$EW_{\delta_{T,15}}$ Erwartungswert für den Extremwert in 15 Jahren

Der Erwartungswert weicht damit nur geringfügig vom tatsächlichen Extremwert (80,9) ab. Die Abweichung beträgt ca. 3 %. Die Standardabweichung liegt zwangsläufig im plausiblen Bereich, da sie direkt aus der Stichprobe abgeleitet wurde.

Eine Umrechnung auf einen 30-Jahres-Zeitraum ist ebenfalls über Gleichung (9-40) möglich:

$$\begin{aligned} \mu_{30GV} &= \mu_{1GV} + \ln(30) \cdot \beta_{1GV} \\ &= 65,5 + \ln(30) \cdot 3,98 = 79,04 \end{aligned}$$

$$\beta_{30GV} = \beta_{1GV} = 3,98$$

$\beta_{30GV}, \beta_{30GV}$ Gumbelparameter für die Verteilung der 30-Jahres-Extremwerte

Es ist festzustellen, dass das Verfahren brauchbare Ergebnisse für die Gumbelparameter liefert.

9.5.5 Berechnung der Gumbelparameter unter der Benutzung von Niveaurekennungsraten

Eine weitere Möglichkeit für die Bestimmung der Gumbelparameter ergibt sich, wenn eine näherungsweise gültige Beziehung zwischen Extremwertverteilung und Niveaurekennungsraten benutzt wird (siehe [SPAETHE 1992], Kapitel 2.4.4).

Handelt es sich bei der Niveaurekennung um ein seltenes Ereignis, so gilt näherungsweise:

$$v^+(r) = \frac{1}{T} \cdot (1 - F_{EX}(r)) \quad (9-46)$$

r betrachteter Niveaurekennungswert

$v^+(r)$ mittlere Anzahl der positiven Kreuzungen des Niveaus r pro Zeiteinheit (Niveaurekennungsraten)

F_{EX} Extremwertverteilung (hier als Gumbelverteilung definiert)

T Betrachtungszeitraum

Indem die Niveaurekennungsraten für mehrere Niveaus berechnet werden, gewinnt man Stützstellen für eine Anpassung der Gumbelparameter. Vorteilhaft ist, dass dabei die gesamte 15-Jahres-Stichprobe benutzt werden kann.

Bei der Wahl der Überschreitungsniveaus ist darauf zu achten, dass es sich um hohe Niveaurekennungswerte handelt, welche für die Extremwertverteilung relevant sind. Andererseits ist darauf zu achten, dass die gewählten Werte so weit auseinanderliegen, dass auch die empirische Verteilung in diesem Bereich hinreichend glatt abgebildet wird. Dies ist problematisch, weil die empirische Verteilung für hohe Niveaus nur wenige Werte liefert.

Die Lösung besteht darin, zunächst Gumbelverteilungen für kürzere Betrachtungszeiträume zu be-

Betrachtungszeitraum für die Anpassung der Gumbelverteilung an die Niveaureisrate	Gumbelparameter für einen Zeitraum von 30 Jahren	
	μ_{GV30}	β_{GV30}
1 Tag	83,4	2,67
1 Woche	81,86	2,66
1 Monat	81,80	2,62
¼ Jahr	81,66	2,52
1 Jahr	74,09	1,94

Tab. 9.15: Gumbelparameter für den 30-Jahres-Zeitraum

stimmen und anschließend eine Umrechnung gemäß Formel (9-40) vorzunehmen.

Mit diesem Vorgehen erreicht man, dass bereits niedrigere Niveauewerte, welche in der Stichprobe häufiger vorkommen, für die Extremwertverteilung relevant sind.

Für die Station 164 wurden die Berechnungen unter Verwendung unterschiedlich langer Betrachtungszeiträume durchgeführt. Tabelle 9.15 zeigt die berechneten Gumbelparameter für den 30-Jahres-Zeitraum.

Es ist ersichtlich, dass das Verfahren relativ robust bezüglich der Wahl des Betrachtungszeitraumes für die Anpassung an die Niveaureisrate ist. Zeiträume zwischen einem Tag und drei Monaten erscheinen praktikabel. Die Werte für die berechneten Parameter liegen in der gleichen Größenordnung wie die Parameterwerte, welche mit den Schätzfunktionen gewonnen wurden.

9.5.6 Fazit

Für die Dimensionierung bzw. die Substanzbewertung kann die Streuung der Extremwerte der mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten mit einer Gumbelverteilung beschrieben werden.

Es gibt verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Parameter der Gumbelverteilung. Jedes dieser Verfahren besitzt seine spezifische Problematik. Die hier untersuchten Verfahren zeigen, dass sowohl die Parameterbestimmung mit Schätzfunktionen, wie auch die Benutzung der Niveaureisraten plausible Ergebnisse liefern. Beim letztgenannten Verfahren erscheint es aber nicht als gesichert, dass die Methodik in jedem Fall ohne geeignete Justierung der Überschreitungsniveaus funktioniert. Aus diesem Grund ist für die automatisierte

Berechnung der Parameterwerte für alle 328 Stationen die Benutzung der Schätzfunktionen besser geeignet.

Die Gumbelparameter für die untersuchten 328 Stationen wurden mit den Schätzfunktionen berechnet. Die betreffenden Werte sind in Tabelle A.10 aufgeführt.

9.6 Mittlere Plattentemperatur

9.6.1 Bedeutung

Die mechanische Beanspruchung der Betonstraßenplatten ergibt sich vor allem aus den verkehrsbzw. temperaturbedingten Biegespannungen. Der Einfluss des Temperaturzustandes ist dabei hauptsächlich durch die Plattenverformung verursacht, welche der Temperaturgradient bewirkt. Im Hinblick auf die mechanische Plattenbeanspruchung ist der Temperaturgradient also die wichtigste Komponente des Temperaturzustandes. Aus diesem Grund wird bisher im Dimensionierungsverfahren auch nur der Gradient des Temperaturzustandes berücksichtigt. Die anderen Komponenten (konstante Temperaturänderung, nichtlineare Temperaturänderung) werden vernachlässigt.

Für eine genauere Berechnung der Plattenbeanspruchung ist es aber erforderlich, den gesamten Temperaturzustand zu berücksichtigen. Den nichtlinearen Temperaturanteil betreffend fehlen derzeit noch die theoretischen Grundlagen. Einfacher verhält es sich mit der über den Plattenquerschnitt konstanten Temperaturänderung (mittlere Plattentemperatur). Diese lässt sich mit einem einzigen Wert beschreiben und in ihrer mechanischen Wirkung gut erfassen.

Die mittlere Plattentemperatur spielt keine Rolle, wenn die Quertugen im Fahrbahnplattensystem offen sind (also bei niedrigen Temperaturen). Wenn die Fugen geschlossen sind, bewirkt die temperaturbedingte Plattendehnung den Aufbau einer Druckspannung. Im Normalfall sind die so im Plattenquerschnitt entstehenden Druckspannungen aber deutlich kleiner als die Druckfestigkeit des Betons. Die für den Versagensfall maßgebenden Biegezugspannungen werden durch die Druckspannungen abgemindert. Die temperaturbedingten Druckspannungen erhöhen also die Tragfähigkeit der Platten.

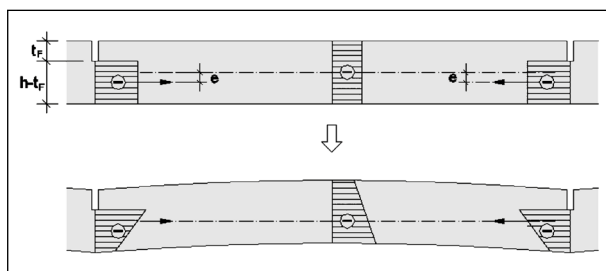


Bild 9.30: Wirkung der infolge temperaturbedingter Ausdehnung im Plattenquerschnitt entstehenden Druckspannungen

Im Fugenbereich wird aber die Druckkraft aufnehmende Querschnitt durch den Kerbschnitt vermindert. Die Druckspannung wird dadurch im Fugenbereich erhöht (Bild 9.30). Gleichzeitig wird durch den Kerbschnitt an der Fuge ein Versatzmoment erzeugt, welches zusätzliche Biegung hervorruft (Bild 9.30). Direkt im Fugenbereich entstehen damit Spannungsspitzen, welche im Extremfall zum Betonversagen (Hitzeaufbruch, Blow-up) führen können. Die Wirkung der über den Betonquerschnitt konstanten Temperaturerhöhung ist also komplex.

Um eine Grundlage für spätere systematische Analysen dieses Sachverhaltes zu schaffen, wurden beispielhaft für drei Stationen die Verteilungsfunktionen für die mittlere Plattentemperatur abgeleitet.

Da die gleichzeitige Wirkung von Plattendehnung (mittlere Plattentemperatur) und Plattenbiegung (Temperaturgradient) von besonderer Bedeutung ist, wurde außerdem die verbundene Verteilungsfunktion für beide Temperaturkomponenten bestimmt. Diese gibt Aufschluss über die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens bestimmter Werte dieser Temperaturkomponenten.

Als Stationen wurden ausgewählt: Angermünde (164), Fehmarn (5516) und Lahr (2812).

9.6.2 Vorgehensweise

Stündliche Werte für die mittlere Plattentemperatur wurden im Zuge der in Kapitel 8 erläuterten Berechnungen ermittelt. Die Streuung dieser Stichproben wurde zunächst mit Histogrammen visualisiert (Bild 9.31 bis 9.33).

Es ist deutlich erkennbar, dass sich für die Verteilungsfunktionen zwei Modalwerte ergeben. Damit ist als grundsätzliche Struktur die Summe aus zwei Verteilungsfunktionen mit jeweils einem Modalwert geeignet. Da davon ausgegangen werden kann,

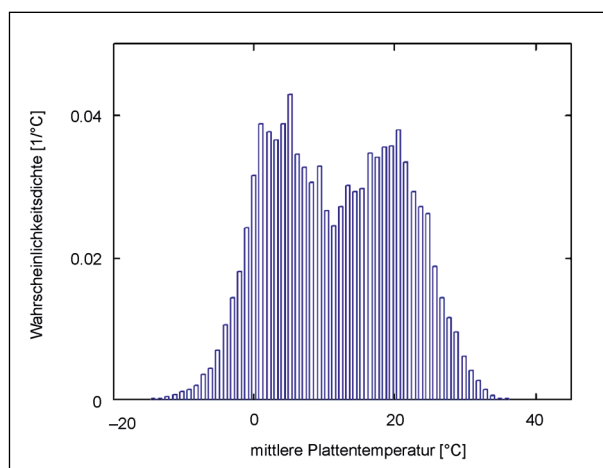


Bild 9.31: Streuung der Stichprobe für die mittlere Plattentemperatur (Station Angermünde)

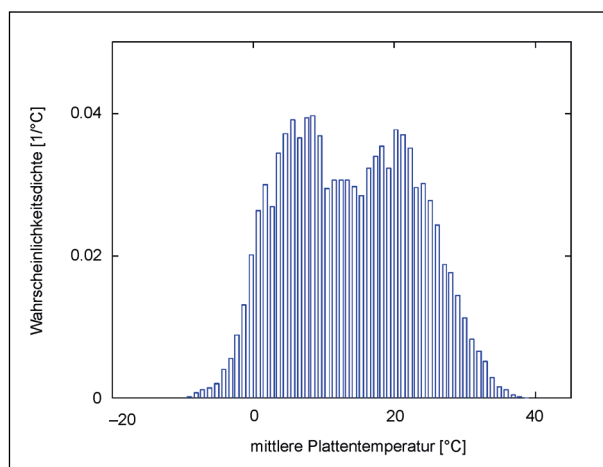


Bild 9.32: Streuung der Stichprobe für die mittlere Plattentemperatur (Station Lahr)

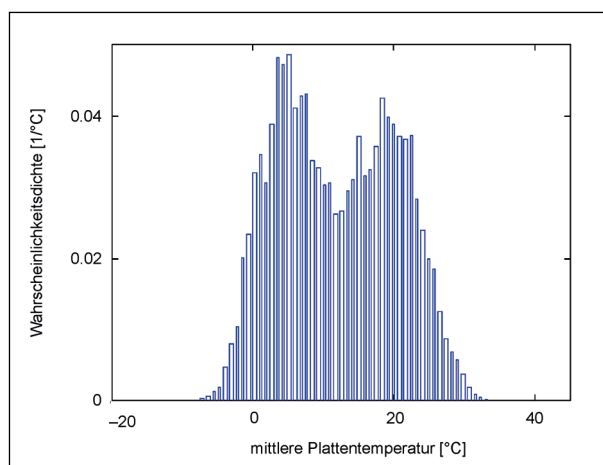


Bild 9.33: Streuung der Stichprobe für die mittlere Plattentemperatur (Station Fehmarn)

dass die mittlere Plattentemperatur von einer Vielzahl verschiedener Einflüsse abhängt, liegt es nahe zwei Normalverteilungen zu wählen. Diese sind jeweils mit einem Faktor zu skalieren.

Für die Dichtefunktion gilt damit:

$$f_{\bar{\theta}}(x) = a1 \cdot f1_n(x) + a2 \cdot f2_n(x) \quad (9-47)$$

$f_{\bar{\theta}}(x)$ Dichtefunktion für die mittlere Plattentemperatur

$f1_n(x)$ erste Normalverteilung

a1 Skalierungsfaktor für die erste Normalverteilung

$f2_n(x)$ zweite Normalverteilung

a2 Skalierungsfaktor für die zweite Normalverteilung

Weil das Integral über die Dichtefunktionen gleich 1 sein muss, gilt:

$$a2 = 1 - a1 \quad (9-48)$$

Damit ergibt sich vollständig ausgeschrieben:

$$f_{\bar{\theta}}(x) = \frac{a1}{\sigma1 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu1)^2}{2 \cdot \sigma1^2}} + \frac{(1 - a1)}{\sigma2 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu2)^2}{2 \cdot \sigma2^2}} \quad (9-49)$$

$\mu1$ Erwartungswert für die erste Normalverteilung

$\sigma1$ Standardabweichung für die erste Normalverteilung

$\mu2$ Erwartungswert für die zweite Normalverteilung

$\sigma2$ Standardabweichung für die zweite Normalverteilung

Für die Anpassung der Parameter wurden 8 gleichmäßig über den relevanten Wertebereich verteilte Stützstellen benutzt. Unter Anwendung einer geeigneten Fittingmethode (hier Levenberg-Markquardt) ließen sich die in Tabelle 9.16 dargestellten Parameterwerte bestimmen.

	$\mu1$	$\sigma1$	a1	$\mu2$	$\sigma2$
Angermünde	2,766	4,213	0,436	18,446	6,054
Lahr	4,950	4,649	0,447	20,481	6,082
Fehmarn	4,430	4,089	0,486	18,974	5,750

Tab. 9.16: Parameter für die Verteilungsfunktion für die mittlere Plattentemperatur

Die Anpassung ist in allen drei Fällen gut. Bild 9.34 zeigt die angepasste Dichtefunktion für die Station Angermünde.

Um die zweidimensionale Verteilungsfunktion zu bestimmen, ist es erforderlich, die Streuung des mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten in die Betrachtung einzubeziehen. Eine entsprechende Stichprobe wurde im Rahmen der Bearbeitung von Kapitel 8 generiert und in Kapitel 9.1 statistisch ausgewertet. Bei der Verteilungsfunktion handelt es sich um eine dreiparametrische logarithmische Normalverteilung mit den in Tabelle 9.17 angegebenen Parametern:

Auf dieser Datengrundlage ist es möglich zunächst die Streuung der kombinierten Stichprobe zu visualisieren. Bild 9.35 zeigt die Verteilung der gleichzeitig auftretenden mittleren Temperaturwerte und Gradientenwerte am Beispiel der Station Angermünde.

Für die zweidimensionale Verteilung der mittleren Temperaturwerte und Gradientenwerte ist die gegenseitige Abhängigkeit dieser Größen von Bedeutung. Der Korrelationskoeffizient der beiden Stichproben beträgt 0,33 für Angermünde, 0,34 für Lahr und 0,32 für Fehmarn. Das bedeutet, dass es eine

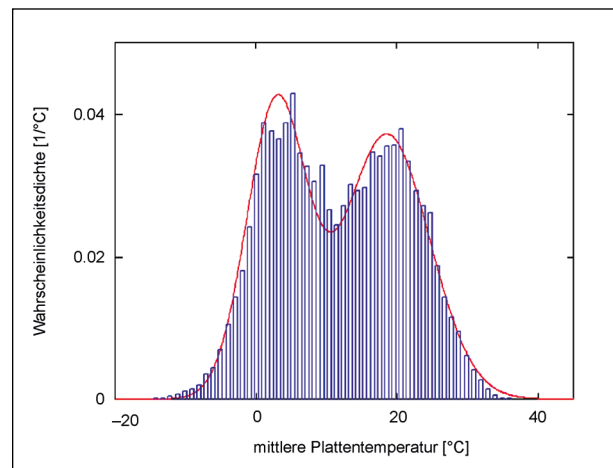


Bild 9.34: Streuung der Stichprobe und die angepasste Dichtefunktion für die mittlere Plattentemperatur (Station Angermünde)

Station	Loc [K/m]	Scale [K/m]	Shape σ
Angermünde	-53,4	3,932	0,319
Lahr	-56,7	3,993	0,322
Fehmarn	-39,0	3,603	0,363

Tab. 9.17: Parameter für die logarithmische Normalverteilung zur Beschreibung der Streuung des MÄG

gewisse Korrelation gibt, welche aber nicht sehr stark ausgeprägt ist (0 unkorreliert / 1 vollständige Korrelation).

Sofern von einer gegenseitigen Unabhängigkeit ausgegangen werden kann, braucht für die Bestimmung der Verteilungsfunktion auf die Gleichzeitigkeit der tatsächlich gemessenen Werte keine Rücksicht genommen werden. Die Gleichzeitigkeit ist rein zufällig und nur von der Wahrscheinlichkeit der jeweiligen Einzelwerte abhängig. Die Wahrscheinlichkeit für das gleichzeitige Auftreten ist also das Produkt der Einzelwahrscheinlichkeiten. Das Histogramm für die zweidimensionale Verteilung kann also berechnet werden, indem jeweils das Produkt der einzelnen Histogrammwerte gebildet wird. Bild 9.36 zeigt das so berechnete Histogramm der Stichprobenwerte für die Station Angermünde.

Ein Vergleich mit Bild 9.35 zeigt, dass trotz deutlich erkennbarer Unterschiede eine grundsätzliche Ähnlichkeit besteht. Es ist zu vermuten, dass die unter der Annahme der gegenseitigen Unabhängigkeit berechnete Verteilung (Bild 9.36) für die Verwendung in der Dimensionierung bzw. Substanzbewertung hinreichend genau ist.

Unter dieser Voraussetzung gilt für die zweidimensionale Verteilungsfunktion:

$$f_{2d}(x, y) = f_{\delta_T}(x) \cdot f_{\bar{\vartheta}}(y) \quad (9-50)$$

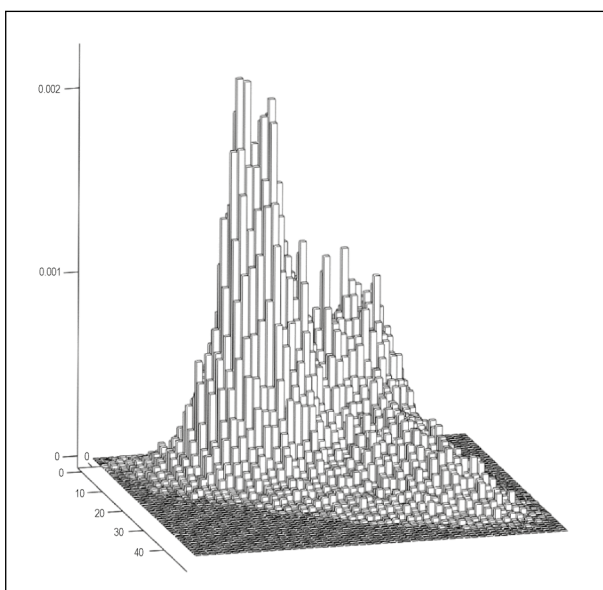


Bild 9.35: Verteilung der gleichzeitig auftretenden Werte der mittleren Plattentemperatur und der mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten (Station Angermünde)

$f_{2d}(x, y)$ Zweidimensionale Dichtefunktion für den mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten und die mittlere Plattentemperatur

$f_{\delta_T}(x)$ Dichtefunktion für den mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten

$f_{\bar{\vartheta}}(y)$ Dichtefunktion für die mittlere Plattentemperatur

Die Funktionen f_{δ_T} und $f_{\bar{\vartheta}}$ sind die Randverteilungen der zweidimensionalen Verteilungsfunktion. Ausgeschrieben lautet die Formel:

$$f_{2d}(x, y) = \left(\frac{1}{\sigma_1 \cdot (x - x_0) \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln(x-x_0)-\mu_1)^2}{2 \cdot \sigma_1^2}} \right) \cdot \left(\frac{a1}{\sigma_1 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(y-\mu_1)^2}{2 \cdot \sigma_1^2}} + \frac{(1-a1)}{\sigma_2 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(y-\mu_2)^2}{2 \cdot \sigma_2^2}} \right) \quad (9-51)$$

x_0 Lageparameter der Lognormalverteilung

σ_1 Formparameter der Lognormalverteilung

μ_1 Skalenparameter der Lognormalverteilung

Bild 9.37 zeigt eine so berechnete zweidimensionale Verteilungsfunktion.

In Bild 9.38 ist gleichzeitig das Histogramm der Stichprobe dargestellt.

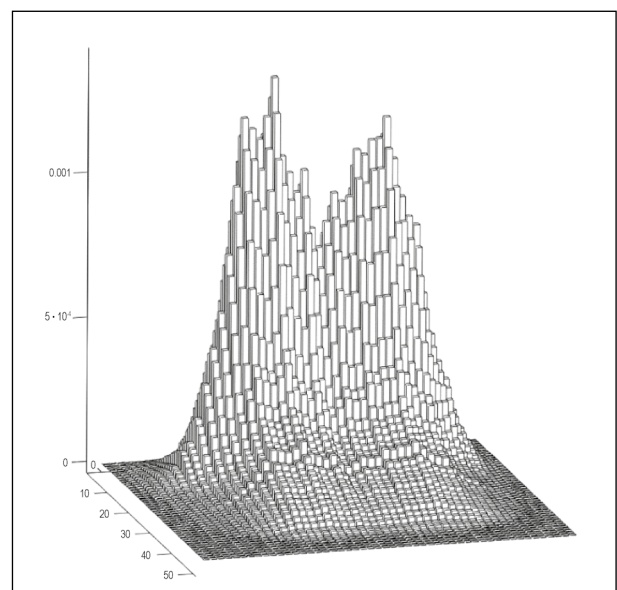


Bild 9.36: Verteilung der gleichzeitig auftretenden Werte der mittleren Plattentemperatur und der mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten bei Voraussetzung gegenseitiger Unabhängigkeit (Station Angermünde)

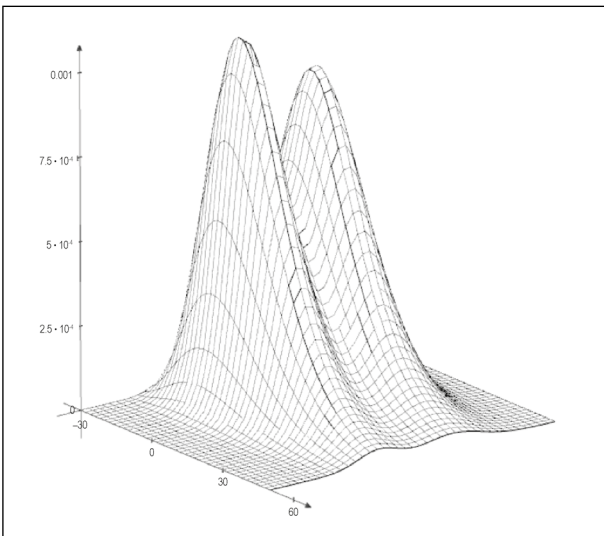


Bild 9.37: Zweidimensionale Verteilungsfunktion für den mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten und der mittleren Plattentemperatur unter der Voraussetzung der gegenseitigen Unabhängigkeit

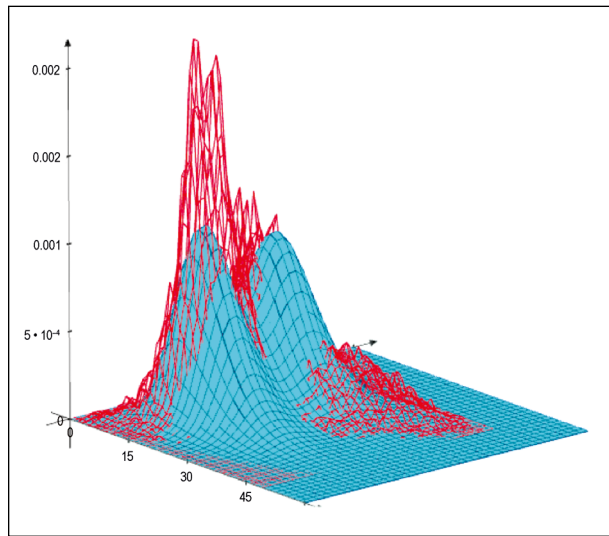


Bild 9.39: Zweidimensionale Verteilungsfunktion (blau) für den mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten und der mittleren Plattentemperatur unter der Voraussetzung der gegenseitigen Unabhängigkeit und Histogramm der Stichprobe, welche die vorhandene Abhängigkeit berücksichtigt

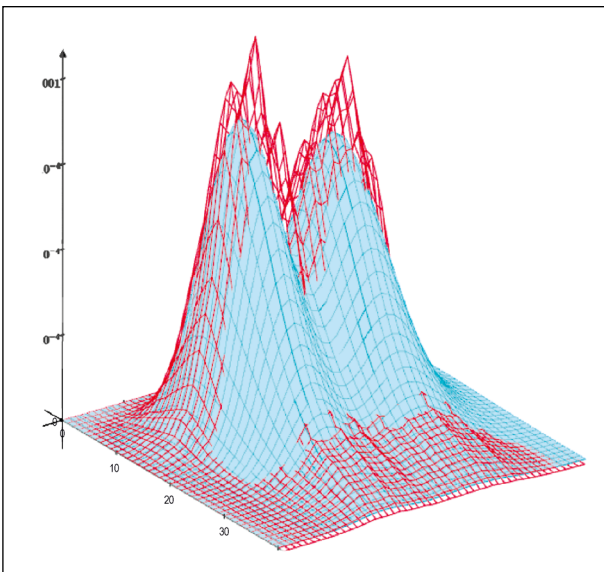


Bild 9.38: Zweidimensionale Verteilungsfunktion (blau) für den mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten und der mittleren Plattentemperatur unter der Voraussetzung der gegenseitigen Unabhängigkeit und Histogramm der Stichprobe

Wie deutlich erkennbar ist, ist die Übereinstimmung zwischen Stichprobe und Funktion sehr gut. Aufschlussreicher ist aber der Vergleich mit dem Histogramm der Stichprobe, welches die tatsächliche Gleichzeitigkeit berücksichtigt (Bild 9.35). Dieser Vergleich ist in Bild 9.39 visualisiert.

Wie zu erwarten, ist die Übereinstimmung hier weniger gut. Prinzipiell folgt aber auch in diesem Vergleich der Funktionsverlauf dem Verlauf der empirisch ermittelten Wahrscheinlichkeiten.

	Rechenannahmen
Plattenlänge	5,0 m
Plattenbreite	4,25 m
Mittlere Plattendicke	250 mm
Beton	StC35/45-3,7
Wärmedehnzahl	$11,5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$
Unterlage	HGT
Fugen	verank./verdüb.
B-Zahl	100 Mio.

Tab. 9.18: Rechenannahmen für die Berechnung der Ausfallrate

Um die Zulässigkeit der Annahme einer gegenseitigen Unabhängigkeit näher zu untersuchen, wurde für ein praxisrelevantes Beispiel (Tabelle 9.18) die Ausfallrate bezogen auf den Lastfall Ermüdung/Querfuge berechnet. Dabei wurden alternativ beide Varianten der Verteilungsfunktionen verwendet (Bild 9.35 und Bild 9.36).

Für die Streuung der mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten und der mittleren Plattentemperatur wurden die für die Station Angermünde berechneten Funktionen angesetzt.

Zur Beschreibung der Streuung der Deckendicke und der Betonfestigkeit wurden die Verteilungsfunktionen verwendet, welche in [Heft 1072] definiert wurden. Als Verteilungsfunktion für die Radlast wur-

de die im Forschungsprojekt FE 04.0285/2014/ORB (Aktualisierung und Anpassung der Straßenbelastungsdaten für die Dimensionierung) neu definierte Verteilungen für den Fall „Fernverkehr“ angesetzt.

Die Ermittlung der Ausfallrate mit dem in [Heft 1072] angegebenen Verfahren erfordert in diesem Fall die Berechnung eines 5-fach-Integrals. Dies bedingt sehr lange Rechenzeiten und ist deshalb nur im Rahmen von Forschungsvorhaben realisierbar. Für ein praktikables Dimensionierungsverfahren wären ggf. Näherungsmethoden zu benutzen.

Die durchgeführten Berechnungen ergaben bei Berücksichtigung der gegenseitigen Abhängigkeit (Bild 9.35) eine Ausfallrate von 3,31820 % und bei Annahme der gegenseitigen Unabhängigkeit (Bild 9.36) eine Ausfallrate von 3,318235 %. Die o. g. Vermutung ist damit bestätigt. Die Auswirkungen der Unterschiede in den Verteilungsfunktionen sind marginal. Für die probabilistische Dimensionierung kann eine gegenseitige Unabhängigkeit von mittlerer Plattentemperatur und mechanisch äquivalentem Temperaturgradienten angenommen werden.

Entsprechend wurden auch für die anderen beiden untersuchten Stationen die Parameterwerte analog bestimmt. Die Übereinstimmung mit den empirischen Werten liegt jeweils auf vergleichbarem Niveau. In Tabelle 9.19 sind die berechneten Parameterwerte zusammengestellt.

Die außerordentlich geringe Differenz zwischen den beiden oben berechneten Ausfallraten ist wahrscheinlich auch darauf zurückzuführen, dass die mittlere Plattentemperatur insgesamt für die Dimensionierung eine untergeordnete Rolle spielt. Ob bzw. unter welchen Bedingungen überhaupt eine Berücksichtigung sinnvoll ist, müssen weitergehende Untersuchungen zeigen.

10 KiST-Zonen für die RDO und RSO Beton

10.1 Einfluss der Klimafaktoren

KiST-Zonen sind klimainduzierte Straßentemperaturzonen. Sie teilen Deutschland in Zonen ein, in denen die dargestellte Größe ähnliche Werte annimmt. Bei den Größen, für die KiST-Zonen bestimmt werden, handelt es sich um Größen, die für die Dimensionierung und die Substanzbewertung des Oberbaus benötigt werden und deren räumliche Verteilung von Klimafaktoren dominiert wird.

Die maßgeblichen Klimafaktoren in Deutschland sind das Relief, die Maritimität bzw. die Kontinentalität (d. h. die Entfernung von der Küste) und die geografische Breite. Diese Faktoren beeinflussen die räumliche Verteilung der meteorologischen Größen, die zur Berechnung der Temperatur an der Fahrbahnoberfläche benötigt werden (siehe Kapitel 5), insbesondere die der Lufttemperatur, der Niederschlagshöhe und der Globalstrahlung.

Für die Dimensionierung von Betonplatten wird das einwirkende Moment, das aus dem mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten resultiert, benötigt. Für eine genauere Berechnung der mechanischen Beanspruchung der Betonstraßenplatten kann zudem – wenn die Nullspannungstemperatur bekannt ist – der Einfluss der mittleren Plattentemperatur auf den Spannungszustand berücksichtigt werden.

Beide Größen resultieren aus der Temperaturverteilung innerhalb der Betonplatte. Die Differentialgleichungen zur Berechnung des Wärmeflusses durch die Betonplatte sind nur von der Wärmeleitfähigkeit des Materials abhängig und werden mit dem expliziten Differenzenverfahren berechnet. Dieses benötigt als obere Randbedingung die Temperatur an der Fahrbahnoberfläche, die in direktem Kontakt mit der Atmosphäre steht und somit eine klimainduzierte Größe darstellt.

Station	μ_1	σ_1	a_1	μ_2	σ_2	x_0	μ_L	σ_L
Angermünde	2,766	4,213	0,436	18,446	6,054	-53,4	3,932	0,319
Lahr	4,950	4,649	0,447	20,481	6,082	-56,7	3,993	0,322
Fehmarn	4,430	4,089	0,486	18,974	5,750	-38,9	3,603	0,363

Tab. 9.19: Parameter für die zweidimensionale Verteilungsfunktion für den mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten und die mittlere Plattentemperatur (Formel (9-51))

Der mechanisch äquivalente Temperaturgradient (MÄG) ist derjenige Temperaturgradient, welcher bei konstanter Wirkung über den Plattenquerschnitt die gleiche Biegung erzeugt wie der vorhandene Temperaturzustand (siehe Kapitel 8). Der MÄG ist maßgeblich von der Temperatur an bzw. kurz unter der Fahrbahnoberfläche und der Temperatur an der Unterseite der Betonplatte abhängig. Beide Temperaturen – und auch der Temperaturverlauf dazwischen – haben Tagesgänge, die sich hinsichtlich der Amplitude unterscheiden und gegeneinander verschoben sind (Bild 10.1). Es sind diese beiden Unterschiede, die den Gradienten bestimmen. Er ist damit nicht a priori klimainduziert.

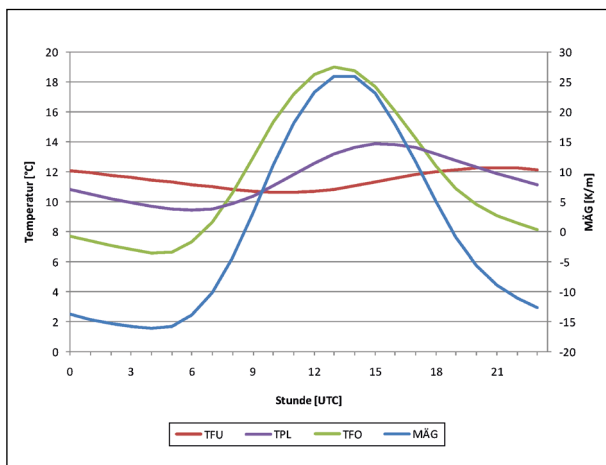


Bild 10.1: Mittlere Tagesgänge des mechanisch äquivalenten Gradienten (MÄG) sowie unterschiedlicher Temperaturen der Betonplatte; TFO: Temperatur an der Oberseite, TFU: Temperatur an der Unterseite, TPL: mittlere Plattentemperatur, Standort: Weihenstephan, Zeitraum: 2001 bis 2015

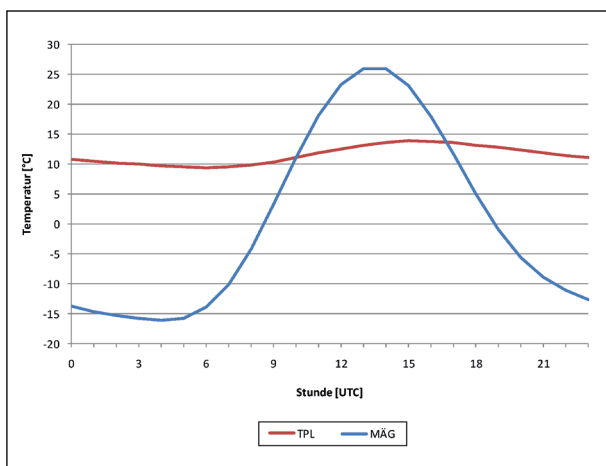


Bild 10.2: Mittlere Tagesgänge der mittleren Plattentemperatur (TPL) und des mechanisch äquivalenten Gradienten (MÄG); Plattendicke: 30 cm, Standort: Weihenstephan, Zeitraum: 2001 bis 2015

In Bild 10.1 sind die Amplituden nicht direkt vergleichbar, weil sich die Werte des MÄG auf die rechte Ordinate beziehen. Bezieht man alles auf die linke Ordinate und vergleicht den Tagesgang des mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten mit dem der mittleren Plattentemperatur – die Temperaturen an der Ober- und Unterseite werden bei der Dimensionierung von Betonplatten nicht benötigt – kommt man zu dem in Bild 10.2 dargestellten Ergebnis:

Der mechanisch äquivalente Temperaturgradient hat im Vergleich zur mittleren Plattentemperatur einen sehr ausgeprägten Tages- (Bild 10.2) und einen wenig ausgeprägten Jahresgang (Bild 10.3). Das führt zu deutlichen Unterschieden bei der räumlichen Verteilung von Quantilwerten dieser beiden Größen, die für die Bilder 10.4 und 10.5 direkt aus der Summenhäufigkeitsverteilung der Stundenwerte berechnet wurden.

Die Karten für die mittlere Temperatur einer Betonplatte von 30 cm Dicke (Bild 10.4) zeigen, dass die unterschiedlichen Quantilwerte unterschiedliche Jahreszeiten repräsentieren: Der Wert des 1. Quartils zeigt eine typische Verteilung für die Wintermonate, der des 99,87%-Quantils für den Hochsommer, die Werte des 2. und 3. Quartils für die Übergangszeiten Frühjahr und Herbst. Dabei unterscheiden sich die Karten für die mittlere Plattentemperatur nur wenig hinsichtlich der Spannweite und des Detailliertheitsgrades. Der wesentliche Unterschied besteht in der im Verlauf des Jahres stattfindenden Verschiebung der höheren Temperaturen von den westlichen, maritim beeinflussten Landesteilen in

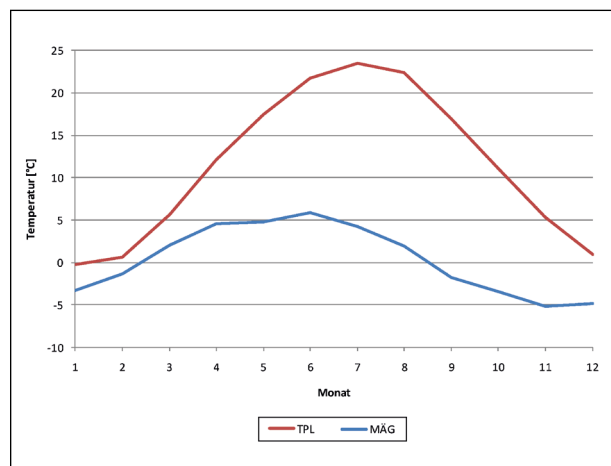


Bild 10.3: Mittlere monatliche Jahrgänge der mittleren Plattentemperatur (TPL) und des mechanisch äquivalenten Gradienten (MÄG); Plattendicke: 30 cm, Standort: Weihenstephan, Zeitraum: 2001 bis 2015

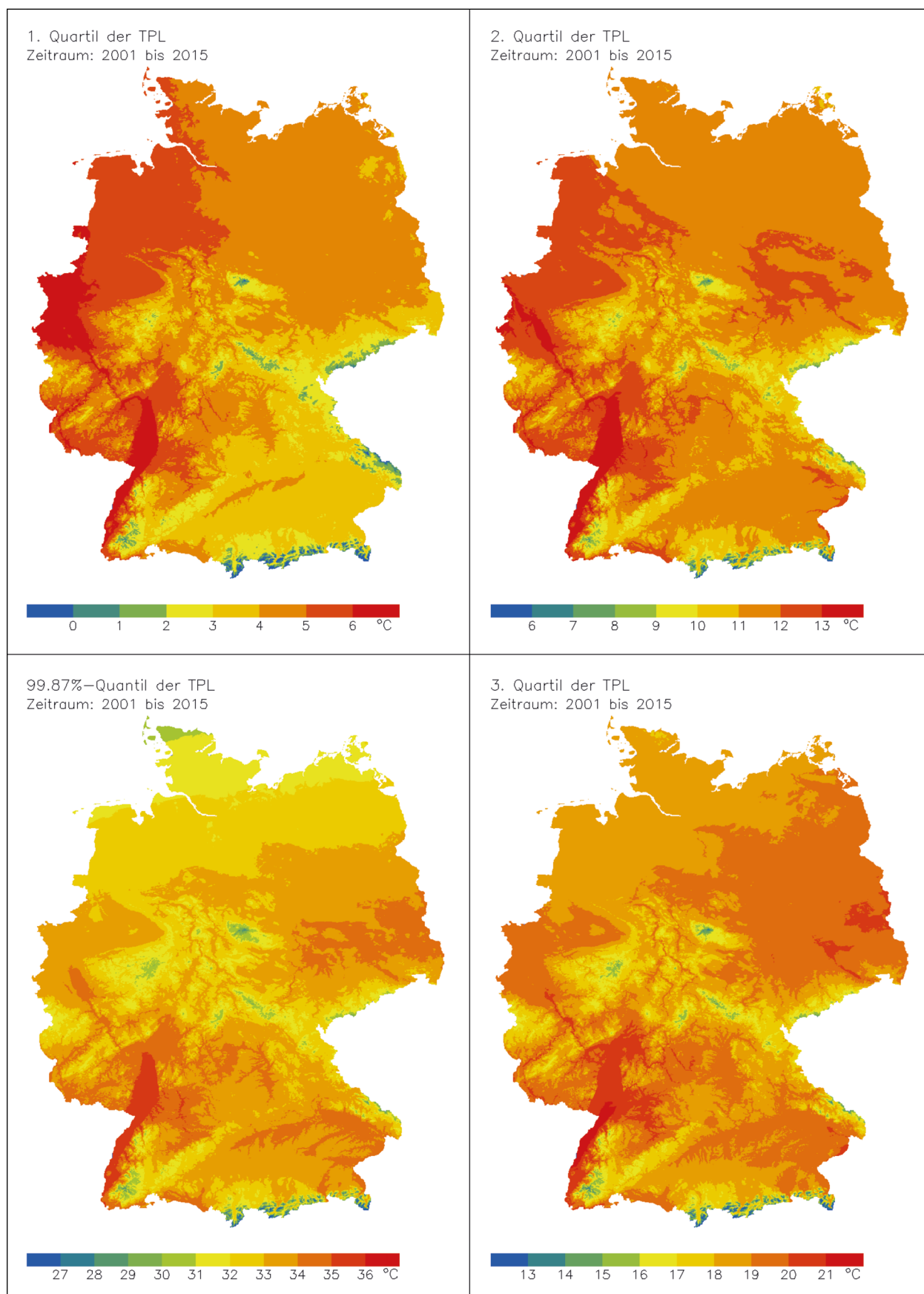


Bild 10.4: Räumliche Verteilung von Quantilwerten der mittleren Plattentemperatur; Dicke: 30 cm, Zeitraum: 2001 bis 2015

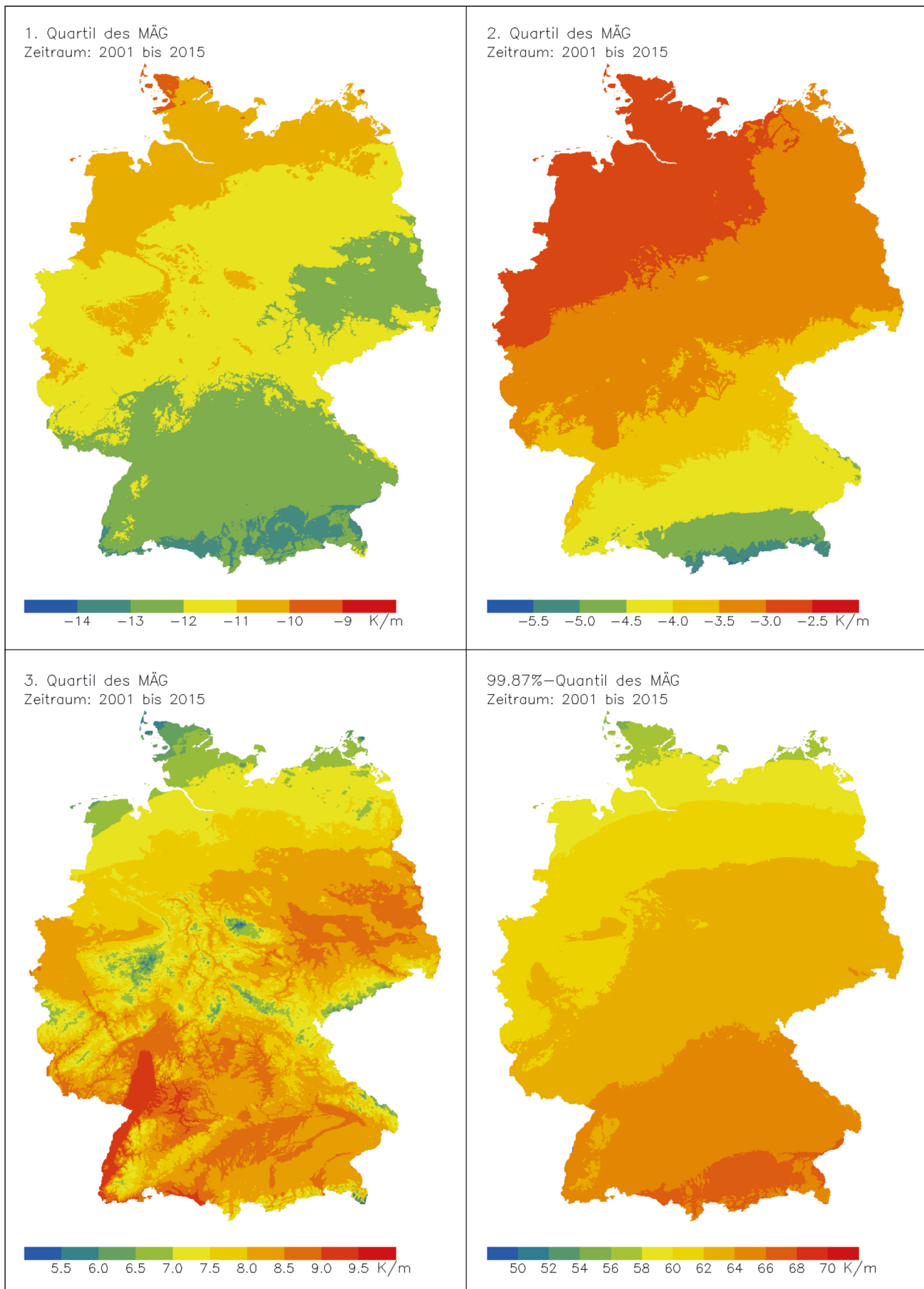


Bild 10.5: Räumliche Verteilung von Quantilwerten des MÄG, Dicke: 30 cm, Zeitraum: 2001 bis 2015

den Osten, dessen Klima eher kontinental geprägt ist.

Für den mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten sind die Unterschiede bei den drei Quartilwerten viel größer, insbesondere, was den Grad der Detaillierung betrifft. Das liegt daran, dass hier nicht unterschiedliche Jahres- sondern Tageszeiten mit ganz unterschiedlichen Spannweiten innerhalb Deutschlands zu sehen sind: Die Werte des 1. und 2. Quartils zeigen Stundenwerte aus der Nacht sowie den frühen Morgen- und den späten Abendstunden, die des 3. Quartils die Werte jener Stunden vor und nach dem Sonnenhöchststand und die 99,87%-Quantilwerte die Werte von den Mittagstunden. Die dominierende Einflussgröße nachts ist die langwellige Ein- und Ausstrahlung, die dazu führt, dass die Gradienten vom maritim geprägten Norden nach Süden hin abnehmen. Mittags dominiert die kurzwellige Einstrahlung die räumliche Verteilung, der mechanisch äquivalente Temperaturgradient nimmt dann mit abnehmender geografischer Breite zu, weil auch die Sonnenhöhe in dieser Richtung zunimmt. In den Stunden dazwischen sind Ein- und Ausstrahlung nicht so dominierend und dann zeigt sich der Einfluss des Reliefs.

Es gibt einen zweiten grundsätzlichen Unterschied: Die zuvor dargestellten Karten sagen nichts darüber aus, wie gut die Standortwerte im Raster abgebildet werden. Wenn man den Standortwert und den zugehörigen Rasterwert korreliert, dann erkennt man, dass sich die mittlere Plattentemperatur viel besser regionalisieren lässt als der mechanisch äquivalente Temperaturgradient (Bild 10.6 und Bild 10.7).

Diese Beispiele zeigen, dass der mechanisch äquivalente Temperaturgradient eine klimainduzierte Größe ist, bei der der Einfluss der Klimafaktoren nicht so stark ausgeprägt ist wie bei der Plattentemperatur. Bei der Einteilung von Rasterdaten in Zonen muss man diese Unschärfe berücksichtigen.

10.2 Semiprobalistisches Verfahren

Für dieses Dimensionierungsverfahren werden die Quantilwerte des mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten für drei unterschiedliche Nachweise benötigt (siehe Tabelle 10.1).

Diese Quantile werden aus den Parametern der Lognormalverteilung und nicht aus den Stundenwerten selbst bestimmt. Durch die Anpassung der Ver-

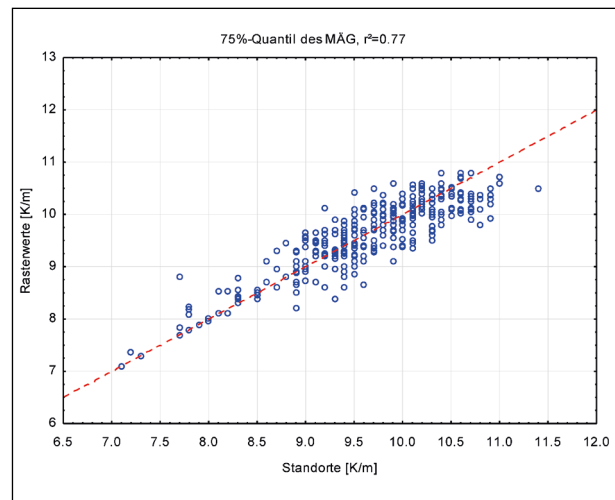


Bild 10.6: Vergleich der Standortwerte und der zugehörigen Rasterwerte, dargestellte Größe: 75%-Quantilwerte (3. Quartil) des MÄG berechnet aus den Stundenwerten

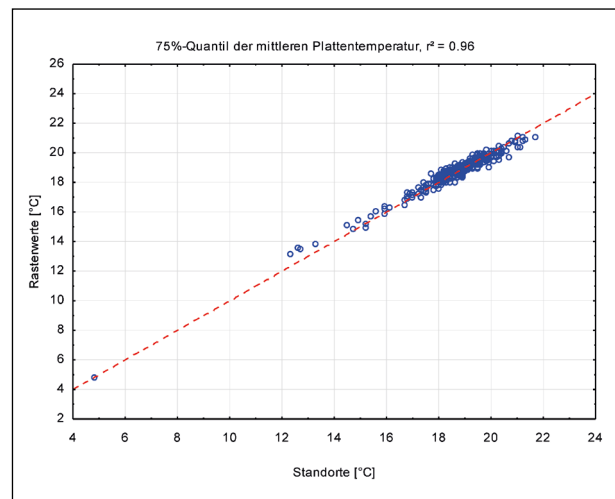


Bild 10.7: Vergleich der Standortwerte und der zugehörigen Rasterwerte, dargestellte Größe: 75%-Quantilwerte (3. Quartil) des MÄG berechnet aus den Stundenwerten

Nachweis	Quantil
Ermüdungsnachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit	84 %
quasidynamischer Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	92 %
quasidynamischer Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit	97,5 %

Tab. 10.1: Quantile der Summenhäufigkeitsverteilung des MÄG für unterschiedliche Nachweise

teilung und dadurch, dass die drei Quantilwerte enger beieinander liegen als die bisher gezeigten Quantilwerte, werden die Unterschiede hinsichtlich der räumlichen Verteilung viel kleiner (Bild 10.8).

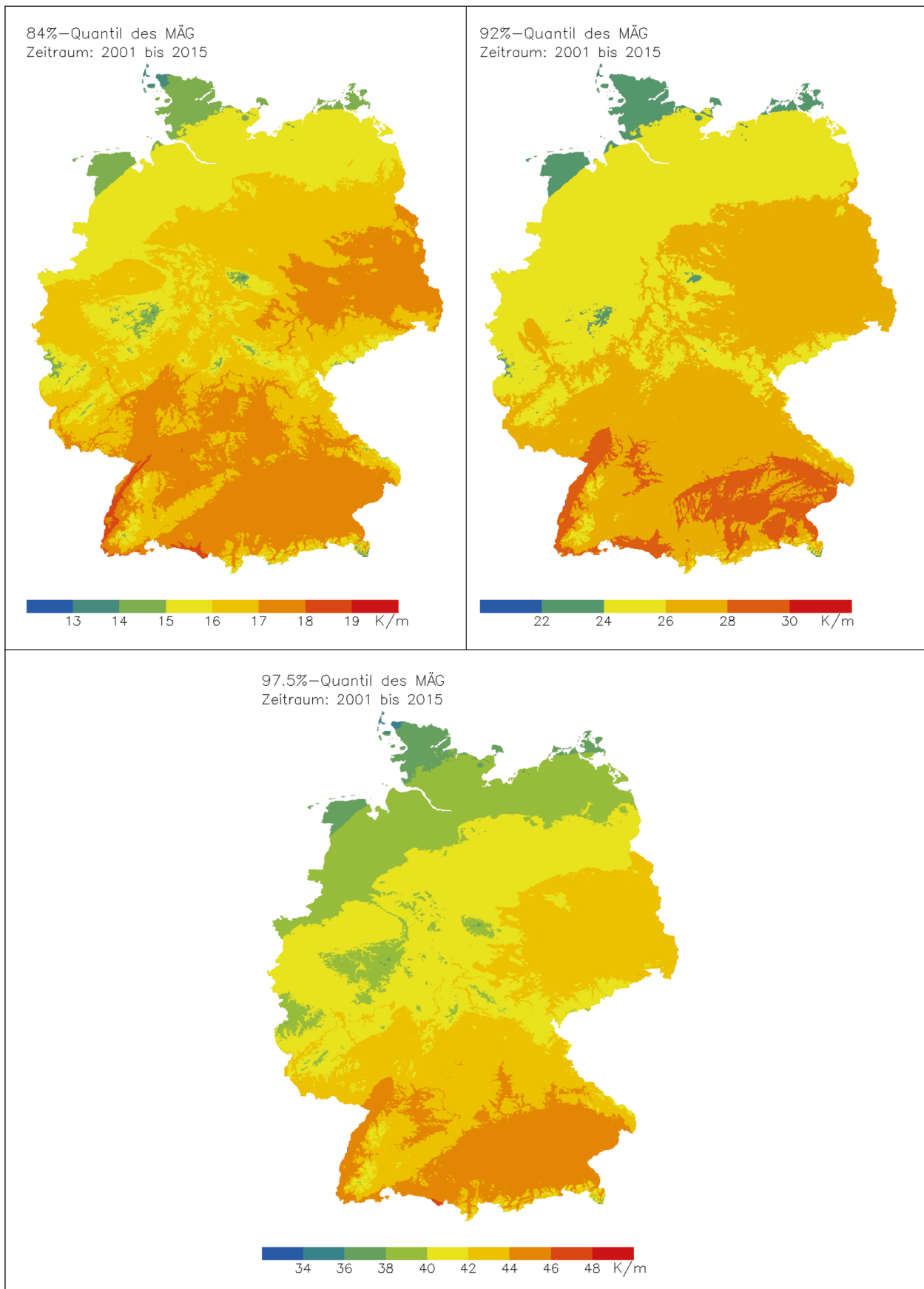


Bild 10.8: Räumliche Verteilungen der Quantilwerte für die Nachweise im semiprobabilistischen Verfahren

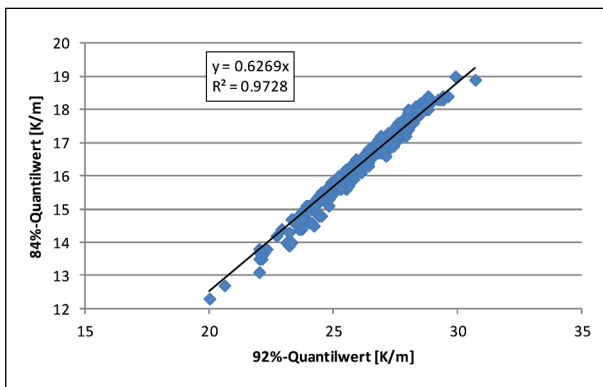


Bild 10.9: Verhältnis des 92%- und des 84%-Quantilwertes für alle 328 Stationen, Verhältniswert ermittelt aus 50 Stationen ergibt sich zu 0,62

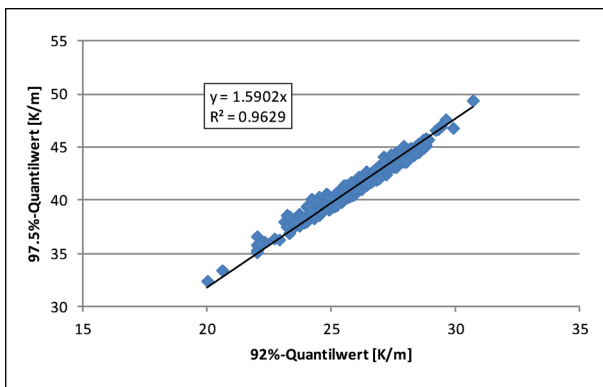


Bild 10.10: Verhältnis des 92%- und des 97,5%-Quantilwertes für alle 328 Stationen, Verhältniswert ermittelt aus 50 Stationen ergibt sich zu 1,60

Die Auswertung der mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten für die 50 Stationen hat bereits gezeigt, dass es zwischen den drei Quantilwerten feste, von der Dicke der Betondecke unabhängige Umrechnungsfaktoren gibt. Für die Deckendicke von 30 cm kann man zeigen, dass diese Faktoren auch für alle 328 Stationen Gültigkeit haben (siehe Bild 10.9 und Bild 10.10).

Damit reicht einer der drei Quantilwerte für die Festlegung von KiST-Zonen für das semiprobabilistische Verfahren aus. Es wird der 92%-Wert vorgeschlagen.

10.3 Probabilistisches Verfahren

Dieses Verfahren arbeitet nicht mit festgelegten Quantilwerten, sondern mit Verteilungen: An alle Stundenwerte des mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten wird eine Lognormalverteilung angepasst (siehe dazu Kapitel 9.1). Daher werden

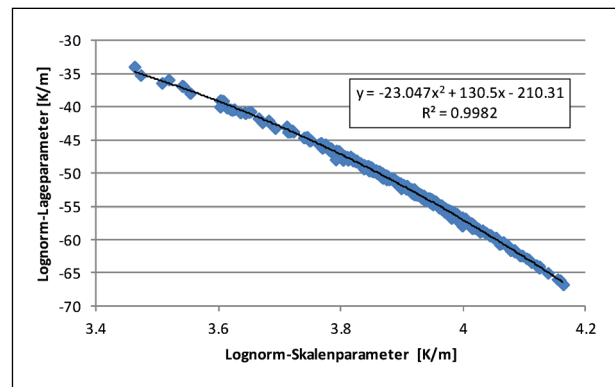


Bild 10.11: Zusammenhang zwischen dem Skalen- und dem Lageparameter der Lognormalverteilung, Grundlage: Verteilungen für 328 Standorte mit Stundenwerten aus dem Zeitraum 2001 bis 2015

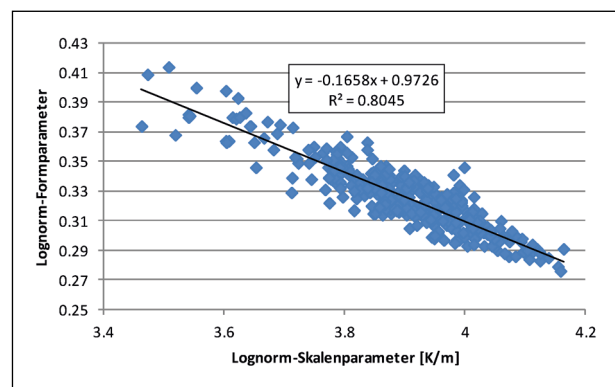


Bild 10.12: Zusammenhang zwischen dem Skalen- und dem Formparameter der Lognormalverteilung, Grundlage: Verteilungen für 328 Standorte mit Stundenwerten aus dem Zeitraum 2001 bis 2015

für das probabilistische Verfahren Zonen benötigt, die die Verteilungsparameter repräsentieren. Dabei sollen wieder möglichst wenig unterschiedliche Zonen entstehen.

Die drei Parameter der Lognormalverteilung sind nicht unabhängig (Bild 10.11 und Bild 10.12): Skalen- und Lageparameter korrelieren so gut, dass man in jedem Fall nur einen der beiden Werte für eine Zoneneinteilung heranziehen muss. Bezüglich der Berechnung des Formparameters aus dem Skalen- oder dem Lageparameter ist zu überprüfen, wie sich die unterschiedlichen Ergebnisse auf die Berechnung von Quantilwerten auswirken.

Die räumlichen Verteilungen der drei Parameter sind ähnlich (Bild 10.13): Man erkennt den von NW nach SO abnehmenden maritimen Einfluss sowie das Relief. Für den Formparameter sind diese Zusammenhänge etwas weniger ausgeprägt als für die beiden anderen Parameter.

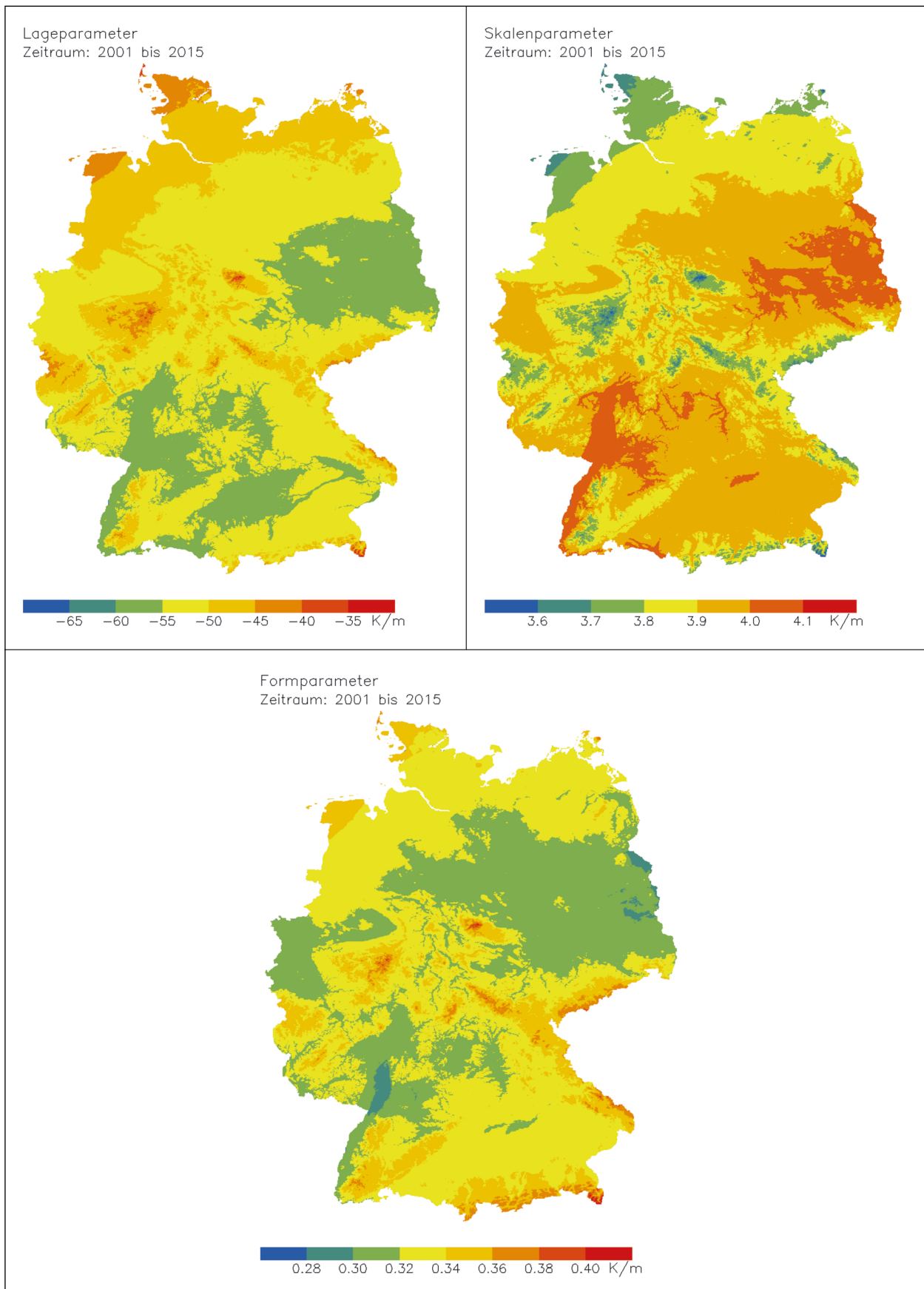


Bild 10.13: Räumliche Verteilungen der Parameter der Lognormalverteilung

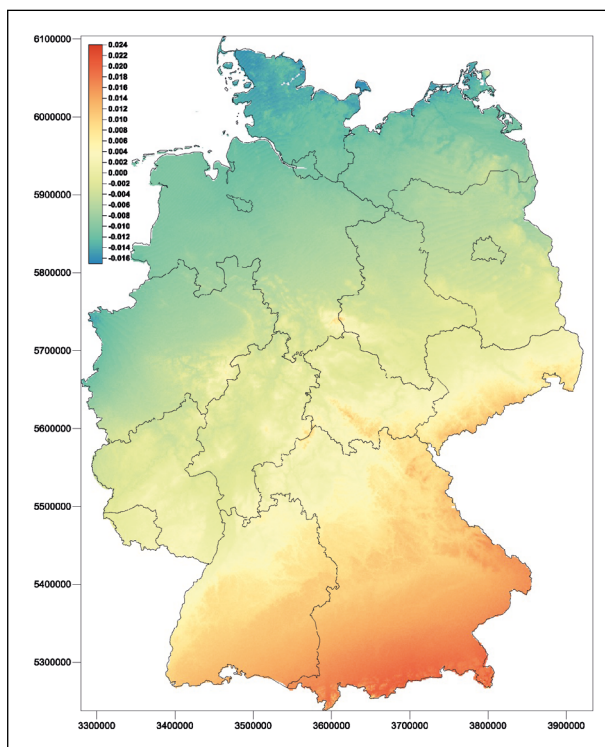


Bild 10.14: Räumliche Verteilung der Differenzen regionalisierter Formparameter und aus dem Skalenparameter berechneter Formparameter der Lognormalverteilung

Wenn man die Gleichung aus Bild 10.12 benutzt, um aus den Rasterwerten des Skalenparameters Rasterwerte des Formparameters zu berechnen und das Ergebnis mit den Rasterwerten vergleicht, die anhand der Formparameter der Standorte berechnet werden, dann liegen die Differenzen der beiden Parameter im Bereich von $-0,016$ (blau) bis $+0,024$ (orange). Sie nehmen systematisch von NW nach SO zu (Bild 10.14).

Berechnet man aus diesen Differenzen und typischen Skalen- und Formparametern für den NW und den SO Deutschlands Differenzen für Quantilwerte, kommt man zu dem in Bild 10.15 dargestellten Ergebnis.

Im Nordwesten bewegen sich die Differenzen zwischen $-0,3$ und $3,0$ K/m. Im Südosten sind sie mit $1,5$ bis $-8,0$ K/m deutlich größer.

In beiden Landesteilen liegen sie bis zum 97,5%-Quantil in dem Bereich, in dem auch die Differenzen zwischen den Quantilwerten aus der Lognormalverteilung und den Daten liegen. Bei höheren Quantilen ist die Differenz, die sich aus den unterschiedlich berechneten Formparametern ergibt, geringer als die Differenz zwischen den Quantilwerten aus der Verteilung und aus den Daten. Man

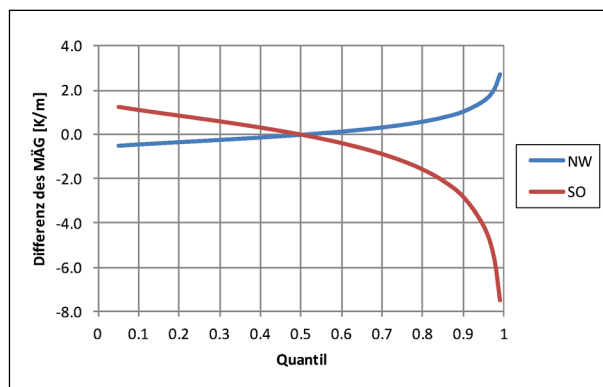


Bild 10.15: Differenzen von Quantilwerten des MÄG für Standorte ganz im Norden und am Alpenrand

kann also davon ausgehen, dass Lognormalverteilungen, deren Formparameter aus dem Skalenparameter errechnet wird, die Daten genauso gut repräsentieren wie Verteilungen mit direkt berechneten Formparametern. Damit benötigt man für die drei Parameter der Lognormalverteilung nur eine KiST-Zonen-Karte.

10.4 Zonenbildung

10.4.1 Einfluss der Regionalisierung

Die Klassenbreiten für die Zoneneinteilung richten sich nach dem Zweck, für den die Daten benötigt werden, in diesem Fall für die Dimensionierung von Betonplatten. Bei der Festlegung muss man aber berücksichtigen, wie gut die Rasterwerte die Standortdaten abbilden. Als Hilfe zur Entscheidungsfindung werden daher in Tabelle 10.2 einige Zahlen vorgestellt.

Die Rasterwerte haben denselben Mittelwert wie die Standortwerte, aus denen sie errechnet werden. Ihr Wertebereich (Range) ist aber immer etwas kleiner. Betrachtet man die zugehörigen Häufigkeitsverteilungen der Standortwerte, dann erkennt man (Bild 10.16 bis Bild 10.17), dass nur wenige Standortwerte außerhalb des Bereichs der Rasterwerte liegen.

Das Bestimmtheitsmaß (BMass, Tabelle 10.2) – es beschreibt den Zusammenhang von Standortwert und zugehörigem Rasterwert – ist am besten geeignet, die Güte der Rasterwerte in Bezug auf die Treue der Abbildung der Standortwerte zu beschreiben:

Der Skalenparameter der Lognormalverteilung hat ein etwas größeres Bestimmtheitsmaß als der La-

	Standorte				Raster					
	Mittel	von	bis	Range	Mittel	von	bis	Range	STE	BMass
LNV-Lagep. [K/m]	-52,0	-66,7	-33,9	32,8	-52	-61	-35	26	3,037	0,62
LNV-Skalenp. [K/m]	3,90	3,46	4,16	0,701	3,9	3,47	4,07	0,6	0,062	0,65
LNV-Formp.	0,327	0,276	0,414	0,138	0,325	0,295	0,414	0,119	0,013	0,56
QLNV92 [K/m]	26,2	20,0	30,7	10,7	26,2	21,6	29,1	7,5	0,590	0,81

Tab. 10.2: Kennwerte zur Beschreibung der Güte der Rasterwerte (LNV: Lognormalverteilung, QLN92: 92%-Quantilwert aus der LNV, STE: Standardfehler, BMass: Bestimmtheitsmaß)

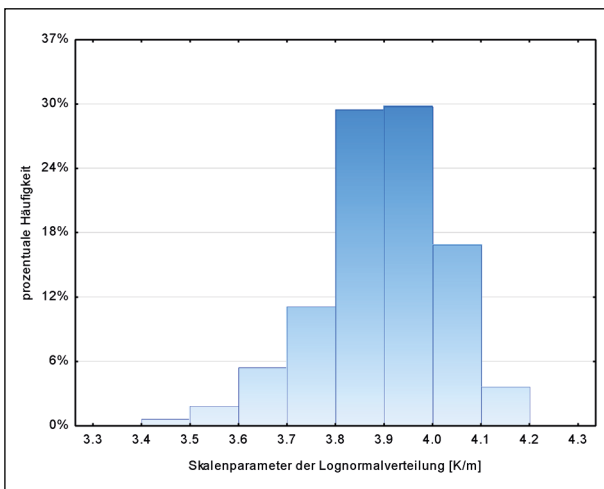


Bild 10.16: Häufigkeitsverteilung der 328 Standortwerte des Skalenparameters der Lognormalverteilung

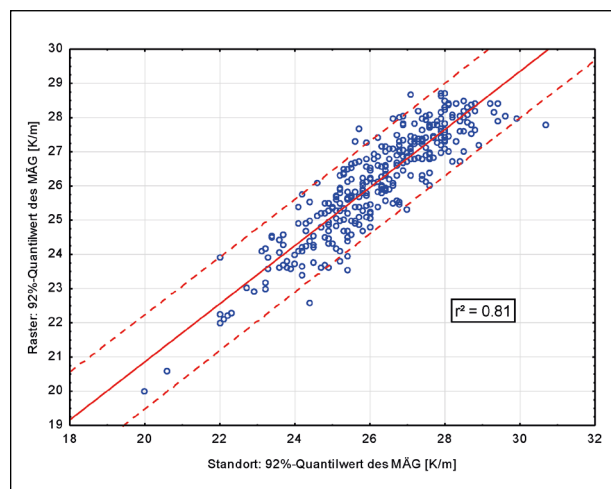


Bild 10.18: Korrelation des 92%-Quantilwertes des MÄG, berechnet aus den Stationsdaten, mit dem 92%-Quantilwert des MÄG der zugehörigen Rasterfläche

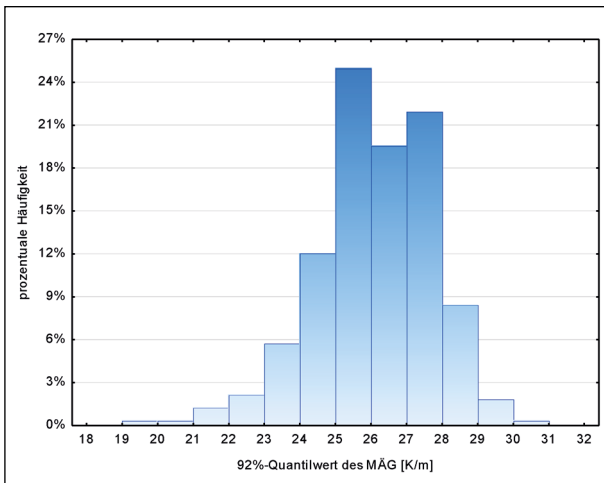


Bild 10.17: Häufigkeitsverteilung der 328 Standortwerte des 92%-Quantilwertes

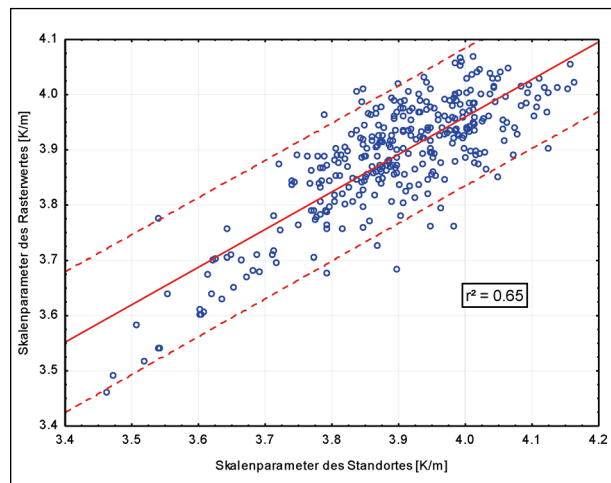


Bild 10.19: Korrelation des Skalenparameters, berechnet aus den Stationsdaten, mit dem Skalenparameter der zugehörigen Rasterfläche

geparameter dieser Verteilung. Er ist also besser zur Berechnung der Rasterdaten geeignet und sollte daher für die Zonenbildung der Parameter der Lognormalverteilung benutzt werden. Interessant ist, dass sich der Quantilwert, der für das semiprobabilistische Verfahren benötigt wird, besser regionalisieren lässt als die drei Parameter der Lognormalverteilung, aus denen er berechnet wird. Zu-

sammen sind sie offenbar stärker klimainduziert als jeder für sich allein.

Allerdings ist die Güte der Abbildung der Stationswerte auf die Rasterwerte für die beiden Größen, für die KiST-Zonen ausgewiesen werden sollen, nicht allzu hoch: In Bild 10.18 und Bild 10.19 ist je-

weils der Stationswert mit dem Wert der Rasterfläche, in der die Station liegt, korreliert worden. Die beiden rot-gestrichelten Linien beschreiben den Bereich, in dem 95 % der Datenpaare liegen. Seine Breite entspricht dem ± 1.96 -fachen des Standardfehlers, der in der Tabelle 10.2 angegeben ist. Dies sollte die Mindestbreite für den Abstand zweier Zonengrenzen sein.

10.4.2 92%-Quantil der Lognormalverteilung

Semiprobabilistische Dimensionierung

Eine sinnvolle Einteilung der KiST-Zonen ist gegeben, wenn beim Übergang von einer Zone zur nächsten eine Änderung des Dimensionierungsergebnisses erfolgt, welche nicht zu groß ist. Da das Dimensionierungsergebnis in der Regel auf 0,5 cm-Genauigkeit gerundet wird, ist eine Differenz von 0,5 cm anzustreben.

Im Dimensionierungsalgorithmus der RDO Beton werden die temperaturbedingten Spannungen mit einem geschlossenen Formelwerk (Eisenmann-Formeln) berechnet. Der Einfluss des Temperaturzustandes auf die Wirkung der Verkehrslasten findet keine Berücksichtigung. Um die Wirkung des Temperaturgradienten auf die Biegespannungen im Plattenquerschnitt zu analysieren, genügt also zunächst eine Betrachtung der Struktur der Eisenmannformeln. Diese lauten wie folgt:

$$\sigma_T = \frac{M_{ET}}{W_P} \quad (10-1)$$

$$M_{ET} = \alpha_{cT} \cdot E_{ctm} \cdot \gamma_{tot} \cdot z^3 \cdot m_{T2} \cdot \delta_T \cdot \frac{1}{12} \quad (10-2)$$

$$\begin{aligned} m_{T2} &= \left(\frac{L_{P,red}}{0,9 \cdot l_{krit}} \right)^2 && \frac{L_{P,red}}{l_{krit}} < 0,9 \\ &= \frac{2 \cdot L_{P,red}}{l_{krit}} - 0,8 && 0,9 \leq \frac{L_{P,red}}{l_{krit}} \leq 1 \\ &= \frac{-2 \cdot L_{P,red}}{l_{krit}} + 3,2 && 1 < \frac{L_{P,red}}{l_{krit}} \leq 1,1 \\ &= 1 && 1,1 < \frac{L_{P,red}}{l_{krit}} \end{aligned} \quad (10-3)$$

$$\begin{aligned} l_{krit} &= 228 \cdot z \cdot \sqrt{\alpha_{cT} \cdot E_{ctm} \cdot \gamma_{tot} \cdot \delta_T} && 0,8 \leq \frac{B_P}{L_P} \leq 1,25 \\ &= 200 \cdot z \cdot \sqrt{\alpha_{cT} \cdot E_{ctm} \cdot \gamma_{tot} \cdot \delta_T} && 0,8 > \frac{B_P}{L_P} \vee \frac{B_P}{L_P} > 1,25 \end{aligned} \quad (10-4)$$

$$L_{P,red} = m_{bA} \cdot L_P \quad (10-5)$$

mit

σ_T durch den Temperaturgradienten erzeugte Biegespannung [N/mm]

M_{ET} durch den Temperaturgradienten erzeugtes Biegemoment pro mm Plattenbreite [Nmm/mm]

W_P Widerstandsmoment des Plattenquerschnittes [mm³/mm]

α_{cT} Wärmedehnzahl Beton [1/K]

E_{ctm} E-Modul Beton [N/mm²]

γ_{tot} Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung des langsamen Spannungsaufbaus

z Deckendicke [mm]

m_{T2} Anpassungsfaktor für die Temperaturbeanspruchung aus der Überlagerung mit hohen Lasten

δ_T maßgebender Temperaturgradient [K/mm]

$L_{P,red}$ Plattenlänge [mm]

l_{krit} kritische Breite zur Berücksichtigung des aufliegenden Randbereichs [mm]

B_P Plattenbreite [mm]

m_{bA} Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung der Steife der Unterlage

L_P Plattenlänge [mm]

Es fällt auf, dass Gleichung (10-3) aus vier Anteilen besteht. Diese entsprechenden vier Verformungsfiguren der Platte unter Temperaturbeanspruchung (siehe Bild 10.20 bis Bild 10.23).

Welche Verformungsfigur sich jeweils einstellt, ist, wie aus den Formeln ersichtlich, in starkem Maße von der Plattendicke abhängig. Entsprechend ändert sich die Spannung. Bild 10.24 zeigt die Spannung in Abhängigkeit von der Plattendicke für einen bestimmten Temperaturgradienten. Für die Berech-

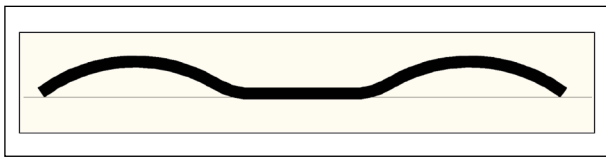


Bild 10.20: Verformungsfigur A1

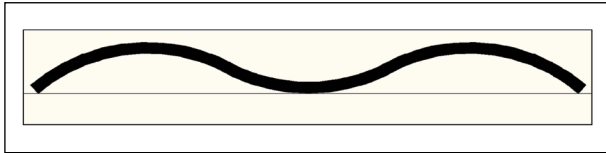


Bild 10.21: Verformungsfigur A2

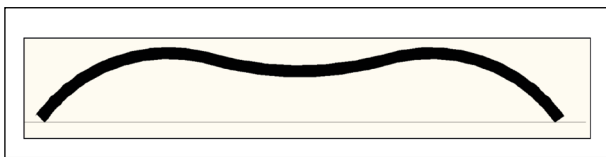


Bild 10.22: Verformungsfigur A3

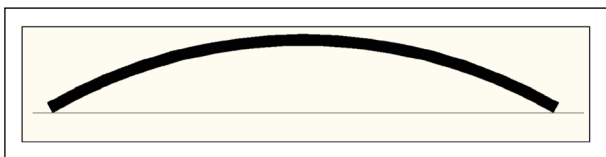


Bild 10.23: Verformungsfigur A4

nung der roten Kurve wurden häufig vorkommende Parameterwerte benutzt.

Die den Verformungsfiguren zugeordneten Abschnitte sind deutlich erkennbar. Bemerkenswert ist, dass eine Steigerung der Deckendicke zunächst zu einer Vergrößerung der Spannungen führt. Besonders markant ist der Spannungsanstieg im zweiten Abschnitt (A2).

Werden die Temperaturspannungen für eine feststehende Deckendicke in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten dargestellt (Bild 10.25), so treten die einzelnen Abschnitte ebenfalls deutlich hervor. In Bild 10.25 sind außerdem die Gradientenbereiche eingetragen, welche für die Dimensionierung relevant sind. Zwischen den magentafarbenen gestrichelten Linien liegen die Gradientenwerte, welche sich nach Gleichung (9-20) für die quasi-dynamischen Lastfälle (97,5%-Quantil) ergeben. Zwischen den blauen Linien liegen die Gradientenwerte für die Ermüdungslastfälle (84%-Quantil).

Es wird deutlich, dass die relevanten Gradientenwerte fast alle in dem Bereich liegen, in dem eine Veränderung des Gradientenwertes keinen Einfluss

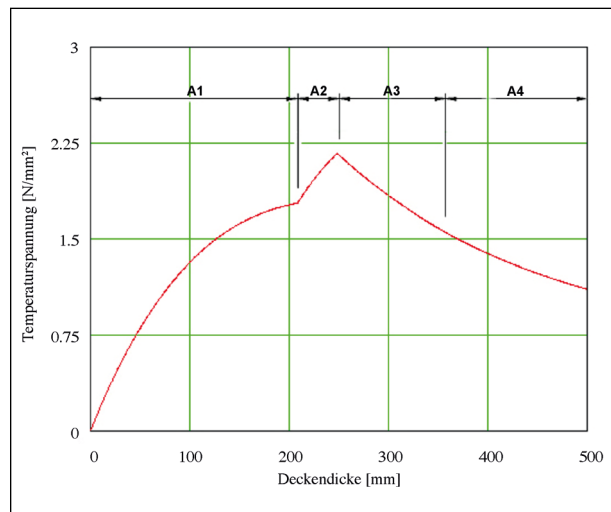


Bild 10.24: Spannungen in Abhängigkeit von der Deckendicke (Bild aus [Heft 1050])

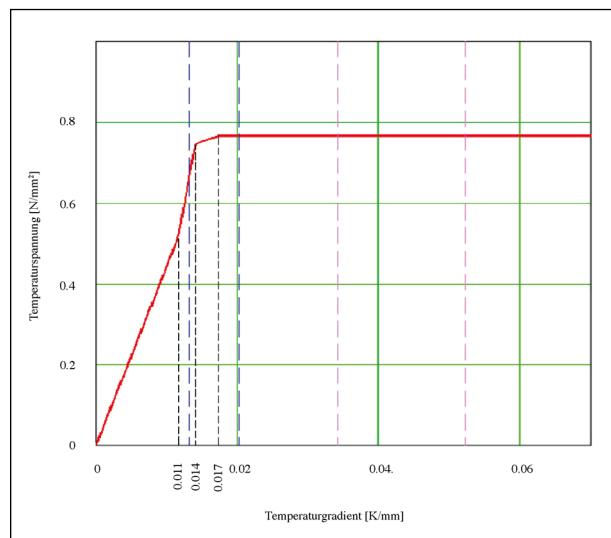


Bild 10.25: Spannungen in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten

auf die temperaturbedingten Spannungen hat. Das bedeutet, dass in dem dargestellten Beispiel ab einem Gradientenwert von ca. 0,017 K/mm keine Veränderung des Dimensionierungsergebnisses bei einer weiteren Steigerung zu verzeichnen ist. Bereits ab ca. 0,014 K/mm ist der Einfluss gering, weil die Kurve bereits sehr flach verläuft. Praktisch bedeutet dies, dass für das dargestellte Beispiel allenfalls beim Übergang von der ersten Temperaturzone zur zweiten eine relevante Veränderung im Dimensionierungsergebnis zu erwarten ist. Da die dargestellte Spannungskurve für eine häufig vorkommende Parameterkombination steht, ist zu konstatieren, dass es praxisrelevante Dimensionierungsfälle gibt, für die die Einteilung der Temperaturzonen ohne Bedeutung ist. Diese Tatsache ist allerdings lange

bekannt und die zugrundeliegenden Zusammenhänge wurden bereits in [Heft 1050] analysiert.

Weiter ist auffällig, dass es einen eng begrenzten Bereich (ca. zwischen 0,011 und 0,014 K/mm) gibt, in dem die Kurve sehr steil verläuft. Dies entspricht dem Abschnitt A2 aus Bild 10.24, d. h. in diesem Abschnitt gilt jeweils der dritte Teilbereich aus Gleichung (10-3).

Für die Festlegung einer sinnvollen Zoneneinteilung ist es also notwendig, Dimensionierungsfälle zu analysieren, für die ein deutlicher Einfluss des Temperaturgradienten gegeben ist. Dabei handelt es sich um Parameterkombinationen, für welche die Berechnung des temperaturinduzierten Biegemomentes nach dem dritten Teilbereich aus Gleichung (10-3) berechnet wird. Damit dies zutrifft, muss offensichtlich die Bedingung:

$$L_{P,red} > l_{krit} \quad (10-6)$$

erfüllt sein.

Unter Beachtung von Formel (10-4) ergibt sich die Forderung:

$$L_{P,red} > 228 \cdot z \cdot \sqrt{\alpha_{cT} \cdot E_{ctm} \cdot \gamma_{tot} \cdot \delta_T} \quad 0,8 \leq \frac{B_P}{L_P} \leq 1,25 \quad (10-7)$$

bzw.

$$L_{P,red} > 200 \cdot z \cdot \sqrt{\alpha_{cT} \cdot E_{ctm} \cdot \gamma_{tot} \cdot \delta_T} \quad 0,8 > \frac{B_P}{L_P} \vee \frac{B_P}{L_P} > 1,25 \quad (10-8)$$

Diese Bedingung wird offensichtlich von langen Platten mit geringer Dicke erfüllt. Für die entsprechende Begrenzung der Deckendicke ist die Wahl einer hohen Betonfestigkeitsklasse notwendig.

In diesem Sinne wurden vier Dimensionierungsfälle definiert. Die betreffenden Parameter sind in Tabelle 10.3 zusammengestellt.

Während die Dimensionierungsfälle 1 bis 3 noch als praxisrelevant bezeichnet werden können, wurde der Dimensionierungsfall 4 so konstruiert, dass ein möglichst extremer Einfluss des Temperaturgradienten entsteht. Ein entsprechender Fall dürfte in der Praxis kaum vorkommen. Die Dimensionierung nach RDO Beton ist aber zulässig.

In Bild 10.26 bis Bild 10.29 sind die berechneten Deckendicken für die verschiedenen Dimensionierungsfälle in Abhängigkeit vom maßgebenden Temperaturgradienten $\delta_{T;30;8}$ (siehe Kapitel 9.3.2) dargestellt. Die zugehörigen Zahlenwerte sind in Tabelle 10.4 bis Tabelle 10.7 zusammengestellt.

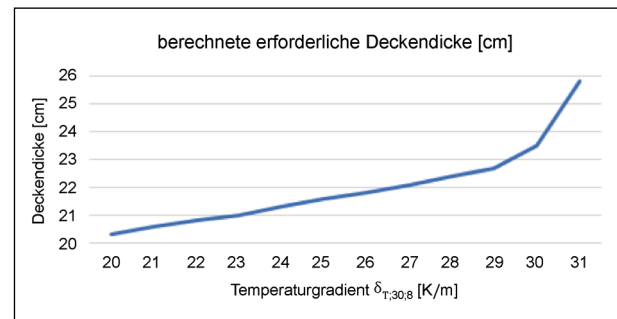


Bild 10.26: Berechnete Deckendicke in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten für den Dimensionierungsfall 1

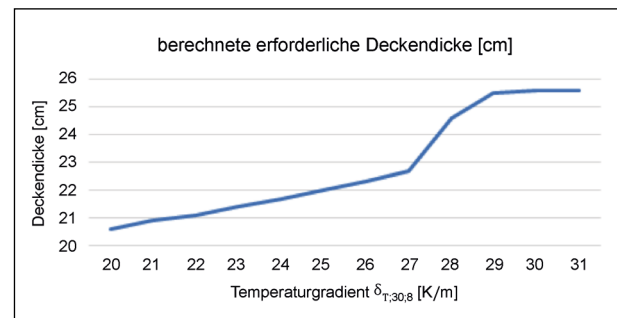


Bild 10.27: Berechnete Deckendicke in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten für den Dimensionierungsfall 2

	Dim.-Fall 1	Dim.-Fall 2	Dim.-Fall 3	Dim.-Fall 4
Plattenlänge	5,0 m	5,0 m	5,0 m	7,5 m
Plattenbreite	5,0 m	4,8 m	4,25 m	4,25 m
Betonklasse entspr. RDO Beton 09 [FGSV09]	StC40/50-4,3	StC35/45-4,0	StC35/45-3,7	StC40/50-4,6
Wärmedehnzahl	$11,5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$11,5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$11 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$13 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$
Unterlage	HGT	HGT	HGT	HGT
Fugen	verank./verdüb.	verank./verdüb.	verank./verdüb.	verank./verdüb.
B-Zahl	100 Mio.	100 Mio.	100 Mio.	0,8 Mio.

Tab. 10.3: Parameter der untersuchten Dimensionierungsfälle

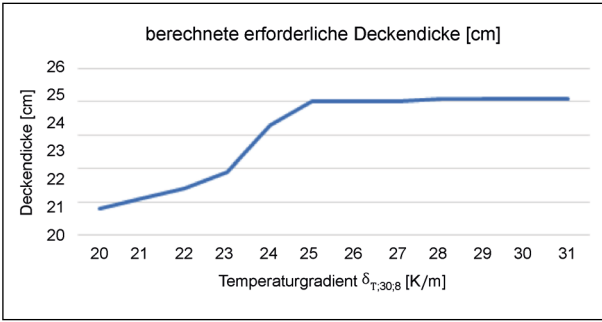


Bild 10.28: Berechnete Deckendicke in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten für den Dimensionierungsfall 3

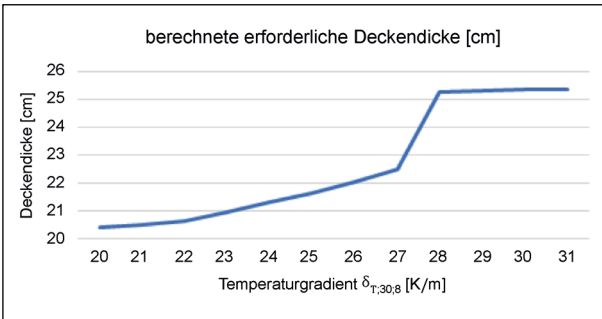


Bild 10.29: Berechnete Deckendicke in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten für den Dimensionierungsfall 4

Dimensionierungsfall 1		
Gradient $\delta_{T,30,8}$	berechnete erforderliche Dicke [cm]	Differenz [cm]
20	20,3	
21	20,6	0,3
22	20,8	0,2
23	21	0,2
24	21,3	0,3
25	21,6	0,3
26	21,8	0,2
27	22,1	0,3
28	22,4	0,3
29	22,7	0,3
30	23,5	0,8
31	25,8	2,3

Tab. 10.4: Dimensionierungsergebnisse für den Dimensionierungsfall 1

Dimensionierungsfall 2		
Gradient $\delta_{T,30,8}$	berechnete erforderliche Dicke [cm]	Differenz [cm]
20	21,6	
21	21,9	0,3
22	22,1	0,2
23	22,4	0,3
24	22,7	0,3
25	23	0,3
26	23,3	0,3
27	23,7	0,4
28	25,6	1,9
29	26,5	0,9
30	26,6	0,1
31	26,6	0

Tab. 10.5: Dimensionierungsergebnisse für den Dimensionierungsfall 2

Dimensionierungsfall 3		
Gradient $\delta_{T,30,8}$	berechnete erforderliche Dicke [cm]	Differenz [cm]
20	22,8	
21	23,1	0,3
22	23,4	0,3
23	23,9	0,5
24	25,3	1,4
25	26	0,7
26	26	0
27	26	0
28	26,1	0,1
29	26,1	0
30	26,1	0
31	26,1	

Tab. 10.6: Dimensionierungsergebnisse für den Dimensionierungsfall 3

Dimensionierungsfall 4		
Gradient $\delta_{T;30;8}$	berechnete erforderliche Dicke [cm]	Differenz [cm]
20	19,8	
21	20	0,2
22	20,3	0,3
23	20,9	0,6
24	21,6	0,7
25	22,3	0,7
26	23,1	0,8
27	24	0,9
28	29,5	5,5
29	29,6	0,1
30	29,7	0,1
31	29,7	0

Tab. 10.7: Dimensionierungsergebnisse für den Dimensionierungsfall 4

Deutlich erkennbar ist, dass in jedem Dimensionierungsfall ein scharfer Anstieg in einem begrenzten Wertebereich auftritt. Dieser Bereich ist identisch mit dem Abschnitt A2 aus Bild 10.24. Hier werden die Temperaturspannungen unter Verwendung des dritten Teilbereiches aus Formel (10-3) berechnet. Wenn sich der Dimensionierungsalgorithmus in diesem Wertebereich abspielt, dann gibt es einen besonders starken Spannungsanstieg bei einer Erhöhung des Temperaturgradienten. Dem wird durch eine Erhöhung der Deckendicke entgegengewirkt. Dies führt aber zu einer weiteren Erhöhung der Temperaturspannungen (siehe Bild 10.24, Kurvenabschnitt A2). Die aus den Verkehrslasten resultierenden Spannungen werden aber durch die Erhöhung der Deckendicke in jedem Fall reduziert. So gibt es in diesem Bereich eine sehr langsame Abnahme der Gesamtspannungen infolge Erhöhung der Deckendicke. Im Zuge der Dimensionierung muss also eine relativ starke Vergrößerung der Deckendicke erfolgen, um die erhöhten Spannungen bei steigendem Temperaturgradienten auszugleichen. Im Ergebnis entsteht der in Bild 10.26 bis Bild 10.29 erkennbare scharfe Anstieg in einem eng begrenzten Bereich.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der scharfe Anstieg der Deckendicke infolge einer Vergrößerung des Temperaturgradienten in jedem Fall auftritt und in Abhängigkeit von den weiteren Parameter-

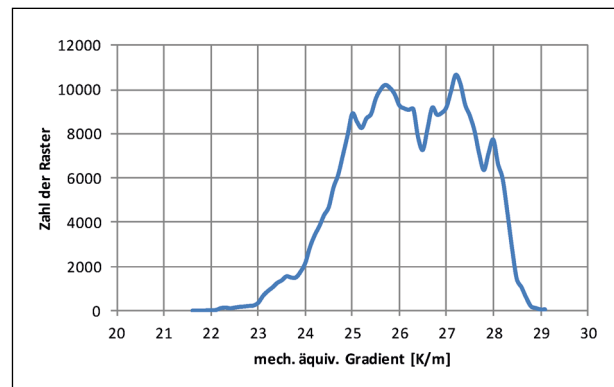


Bild 10.30: Absolute Häufigkeitsverteilung der Rasterwerte des mech. äquivalenten Temperaturgradienten (92%-Quantilwert)

werten an jeder Stelle des Wertebereiches liegen kann. Da der Anstieg im extremen Fall bis zu 5 cm Deckendicke pro 1 K/m Gradientendifferenz betragen kann (siehe Tabelle 10.7), wäre eine Zoneneinteilung von ca. 0,1 K/m vorzunehmen, um der oben formulierten Zielstellung (0,5 cm Deckendickendifferenz pro Zone) gerecht zu werden. Damit würden sich über 100 Zonen ergeben. Dies ist offensichtlich nicht praktikabel. Es erscheint auch nicht ratsam, in einem Wertebereich, welcher so sensibel auf Gradientendifferenzen reagiert, eine derartig zielgenaue Dimensionierung vorzunehmen. Vielmehr ist es angebracht, im Hinblick auf den Idealisierungsgrad der dem Dimensionierungsverfahren zugrunde liegenden Modellierung hier eine gewisse Sicherheit zu implementieren. Es wird deshalb folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

Es werden aufgrund statistischer Überlegungen Temperaturzonen gebildet. Um der Gefahr der Unterdimensionierung im besonders temperatursensitiven Bereich entgegenzuwirken, werden in jedem Fall die oberen Grenzwerte der KiST-Zonen für die Dimensionierung angesetzt.

KiST-Zonen

Die Vorgaben aus den Dimensionierungsrechnungen sind in drei Karten umgesetzt worden, die sich hinsichtlich der Anzahl der Zonen und damit hinsichtlich der räumlichen Detaillierung unterscheiden (Bild 10.31 bis Bild 10.33).

In dem Bild 10.30 ist die absolute Häufigkeitsverteilung der Rasterwerte des 92%-Quantilwertes des MÄG zu sehen. Man kann gut erkennen, dass nur wenige Werte unterhalb von 24 K/m liegen. Daher ergibt es keinen Sinn, eine Zone zu bilden, die eine

Obergrenze < 24 K/m hat. Dasselbe gilt für Werte oberhalb von 28 K/m – auch Zonen mit einer Untergrenze > 28 K/m ergeben wenig Sinn. Beides trifft

allerdings nur zu, wenn die entsprechenden MÄG-Werte keine besondere Rolle bei der Dimensionierung spielen – und das ist hier nicht der Fall.

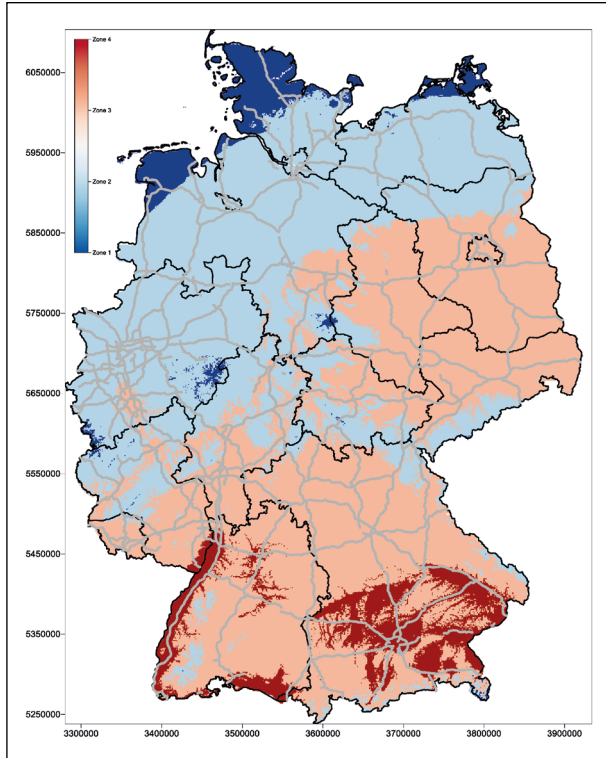


Bild 10.31: KiST-Zonen-Karte mit 4 Zonen für den 92%-Quantilwert des MÄG

Die 4 Zonen und die 6 Zonen sind ausgehend von dieser Überlegung gebildet worden: Die Obergrenze der 1. Zone ist jeweils 24 K/m, die Breite der Zonen beträgt 2 bzw. 1 K/m. Bei der Einteilung in 5 Zonen ist das 1,96-fache des Standardfehlers (siehe Tabelle 10.2, Zeile „QLNV92“, Spalte „STE“) als Zonenbreite benutzt worden. Er sollte eigentlich die Mindestbreite markieren, führt aber (siehe Tabelle 10.8) zu etwas krummen maßgebenden MÄG-Werten, die sich ggf. nur schlecht begründen lassen.

Die 4-Zonen-Karte (Bild 10.31) zeigt ganz generell den Einfluss der Klimafaktoren Abstand zur Küste, Höhe über NN und geografische Breite. Lediglich in der Zone 4, die im stärker gegliederten Süden liegt, sind orografische Strukturen wie einzelne Täler gut zu erkennen.

Die 6-Zonen-Karte (Bild 10.32) unterteilt die beiden großen Zonen der 4-Zonen-Karte in jeweils 2 Zonen. Dadurch werden jetzt die Mittelgebirge und die Tallagen in ganz Deutschland sichtbar.

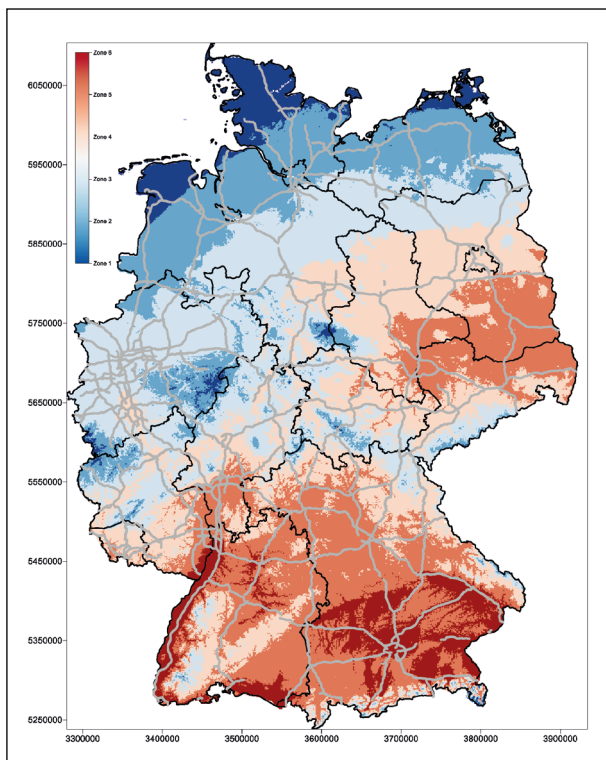


Bild 10.32: KiST-Zonen-Karte mit 6 Zonen für den 92%-Quantilwert des MÄG

Die 5-Zonen-Karte (Bild 10.33) zeigt im Prinzip dieselben Strukturen wie die Karte mit 6 Zonen. Dennoch macht sich die leichte Verschiebung der Zonengrenzen deutlich bemerkbar. So nimmt die Zone 5, die für Gradienten ab 8,1 K/m gilt, jetzt weniger Raum ein als die Zone 6, deren Untergrenze nur 0,1 K/m niedriger liegt.

Es wird empfohlen, die 5-Zonen-Karte für die RDO und RSO Beton künftig zu verwenden. Hier entsprechen die Abstände zwischen den Zonen dem doppelten Standardfehler der Regression von Stations- und Rasterwert (siehe dazu Kapitel 10.4.1). Damit ist sie so detailliert, wie es die Güte der Berechnung der Rasterwerte erlaubt und entspricht

Zone	4 Zonen	5 Zonen	6 Zonen
1	24	24,5	24
2	26	25,7	25
3	28	26,9	26
4	31	28,1	27
5	-	31,0	28
6	-	-	31

Tab. 10.8: Maßgebende mechanisch äquivalente Temperaturgradienten [K/m] für die Zonen

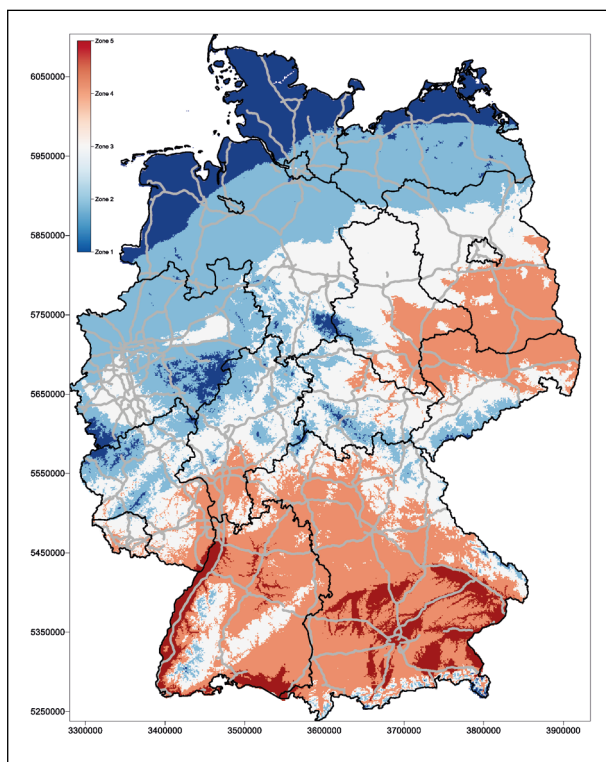


Bild 10.33: KiSt-Zonen-Karte mit 5 Zonen für den 92%-Quantilwert des MÄG

auch den Anforderungen, die sich aus den Dimensionierungsrechnungen ergeben haben.

10.4.3 Skalen-Parameter der Lognormalverteilung

Probabilistische Dimensionierung

Wie in Kapitel 10.3 gezeigt wurde, ist es möglich, eine Beziehung zwischen den drei Parametern der hier verwendeten Lognormalverteilungen herzustellen. Es genügt deshalb, KiSt-Zonen für einen einzigen Parameter zu definieren. Am besten geeignet ist hier der Skalenparameter (siehe Kapitel 10.4.1).

In der Karte dargestellt werden also Werte für den Skalenparameter der logarithmischen Normalverteilung für eine 30 cm dicke Betondecke ($\mu_{l;30}$, siehe Kapitel 9.3.2). Mit den Formeln aus Kapitel 10.3 können daraus die weiteren Parameterwerte für die Verteilungsfunktion ($\sigma_{l;30}$, $x_{0;30}$) bestimmt werden. Die Anpassung für die jeweilige Deckendicke erfolgt über die Formeln (9-12) bis (9-14) (siehe Kapitel 9.3.2).

Für die probabilistische Dimensionierung wird das gleiche Formelwerk zur Beschreibung der thermisch-mechanischen Zusammenhänge verwendet wie bei der semi-probabilistischen Verfahrenswei-

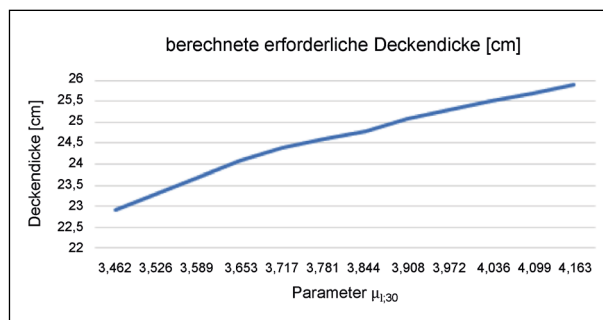


Bild 10.34: Dimensionierungsergebnisse für den Dimensionierungsfall 1

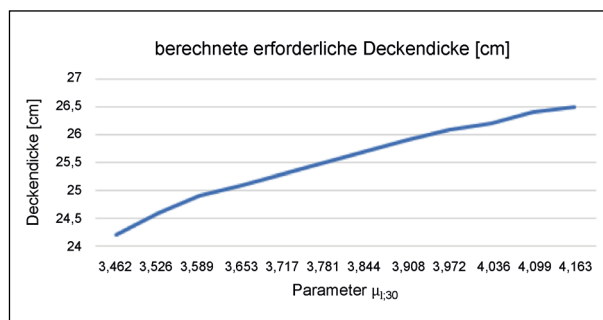


Bild 10.35: Dimensionierungsergebnisse für den Dimensionierungsfall 2

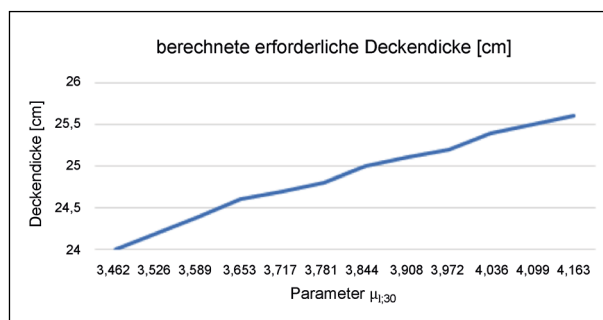


Bild 10.36: Dimensionierungsergebnisse für den Dimensionierungsfall 3

se. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass die maßgebenden Dimensionierungsfälle ebenfalls die gleichen sind. Damit können für die Festlegung der auf die Verteilungsparameter bezogenen KiSt-Zonen die schon definierten Dimensionierungsfälle (Tabelle 10.3) wieder herangezogen werden.

In Bild 10.34 bis Bild 10.36 sind die entsprechenden Dimensionierungsergebnisse zusammengestellt. Wegen des enormen Rechenaufwandes wurde auf eine Untersuchung des nicht praxisrelevanten Dimensionierungsfalls 4 verzichtet.

Für die Berechnungen wurden neben der Streuung des mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten-

Dimensionierungsfall 1		
Gradient $\mu_{i,30}$	berechnete erforderliche Dicke [cm]	Differenz [cm]
3,462	22,9	
3,526	23,3	0,4
3,589	23,7	0,4
3,653	24,1	0,4
3,717	24,4	0,3
3,781	24,6	0,2
3,844	24,8	0,2
3,908	25,1	0,3
3,972	25,3	0,2
4,036	25,5	0,2
4,099	25,7	0,2
4,163	25,9	0,2

Tab. 10.9: Dimensionierungsergebnisse für den Dimensionierungsfall 1

Dimensionierungsfall 3		
Gradient $\mu_{i,30}$	berechnete erforderliche Dicke [cm]	Differenz [cm]
3,462	24	
3,526	24,2	0,2
3,589	24,4	0,2
3,653	24,6	0,2
3,717	24,7	0,1
3,781	24,8	0,1
3,844	25	0,2
3,908	25,1	0,1
3,972	25,2	0,1
4,036	25,4	0,2
4,099	25,5	0,1
4,163	25,6	0,1

Tab. 10.11: Dimensionierungsergebnisse für den Dimensionierungsfall 3

Dimensionierungsfall 2		
Gradient $\mu_{i,30}$	berechnete erforderliche Dicke [cm]	Differenz [cm]
3,462	24,2	
3,526	24,6	0,4
3,589	24,9	0,3
3,653	25,1	0,2
3,717	25,3	0,2
3,781	25,5	0,2
3,844	25,7	0,2
3,908	25,9	0,2
3,972	26,1	0,2
4,036	26,2	0,1
4,099	26,4	0,2
4,163	26,5	0,1

Tab. 10.10: Dimensionierungsergebnisse für den Dimensionierungsfall 2

ten die Streuungen der Deckendicke, der Betonfestigkeit und der Radlasten berücksichtigt. Für die Deckendicke und die Betonfestigkeit wurden die Verteilungsfunktionen verwendet, welche in [Heft 1072] definiert wurden. Für die Beschreibung der Streuung der Radlasten wurden die im Forschungsprojekt [FE 04.0285/2014/ORB] (Aktualisierung und Anpassung der Straßenbelastungsdaten für die Di-

mensionierung) neu definierten Verteilungen benutzt. Es wurde der Fall „Fernverkehr“ angesetzt.

Die zugeordneten Zahlenwerte sind Tabelle 10.9 bis Tabelle 10.11 zu entnehmen.

Erwartungsgemäß ist bei der probabilistischen Dimensionierung der scharfe Anstieg im Kurvenverlauf nicht zu verzeichnen. Insgesamt ergibt sich eine relativ geringe Spreizung der errechneten Deckendicken über den gesamten Wertebereich der Verteilungsparameter.

Ein direkter Vergleich mit den Dimensionierungsergebnissen aus dem semiprobabilistischen Verfahren ist nicht möglich, weil eine entsprechende Kalibrierung fehlt.

KiST-Zonen

Die Rasterwerte des Skalenparameters liegen im Bereich von 3,47 bis 4,07 K/m.

Ihre Summenhäufigkeitsverteilung (Bild 10.37) zeigt, dass der Bereich von 3,47 K/m bis 3,8 K/m – das entspricht 55 % des gesamten Bereichs des Skalenparameters – auf nur 10 % der Rasterwerte und damit der Fläche der Bundesrepublik entfallen. Dadurch ist es kaum möglich, eine Zoneneinteilung zu finden, bei der sich alle Zonen deutlich hinsichtlich der für sie maßgebenden Lognormalverteilung unterscheiden.

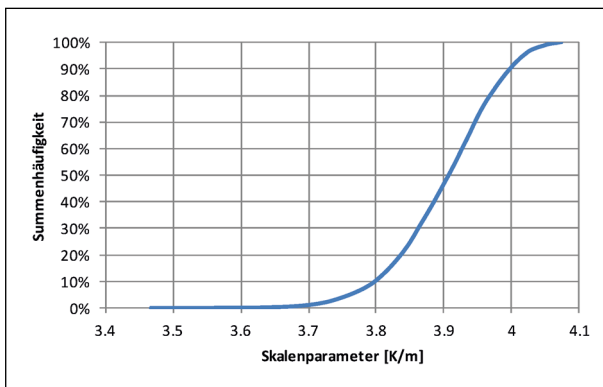


Bild 10.37: Summenhäufigkeitsverteilung der Rasterwerte des Skalenparameters der Lognormalverteilungen, angepasst an die Stundenwerte des mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten

Unter Berücksichtigung ihrer Verteilung siedelt man die Obergrenze der 1. Zone zwischen 3,75 und 3,8 K/m an. Die Zonenbreite sollte wegen der Güte der Abbildung nicht kleiner als 0,12 K/m sein (dieser Wert entspricht dem 1,96-fachen des zugehörigen Standardfehlers, siehe Tabelle 10.2). Mit diesen sind vier unterschiedliche Einteilungen vorgenommen worden:

- Variante 1

Die Ergebnisse der Dimensionierung haben Änderungen der Deckendicke von 2 bis 3 cm ergeben. Demnach wäre die Einteilung in 2 bis 3 Zonen sinnvoll. Wenn man 2 Zonen einrichtet, dann stellt sich die Frage, wo die Grenze zwischen den beiden Zonen verlaufen soll. Man könnte den Skalenparameter wählen, bei dem die Hälfte des gesamten Zuwachses auftritt. Der liegt aber für die drei betrachteten Dimensionierungsfälle bei 3,72 K/m (Dimensionierungsfall 1 und 2) bzw. 3,78 K/m (Dimensionierungsfall 3) und damit würde die eine der beiden Zonen weniger als 10 % der Fläche beanspruchen. Das ergibt keinen Sinn. Aus klimatologischer Sicht ergibt es allenfalls Sinn, den Medianwert der Rasterwerte zu benutzen. Er beträgt 3,91 K/m. Die so entstehende Karte ist in Bild 10.38 zu sehen. Die zugehörigen Lognormalverteilungen, die sich aus den maßgebenden Skalenwerten von 3,90 und 4,02 K/m errechnen, sind in Bild 10.39 dargestellt.

- Variante 2

Bei der Einrichtung von 3 Zonen kann man sich an den Ergebnissen der Dimensionierung orientieren: Sie haben nur eine maximale Dickenänderung von 3 cm über die gesamte Variationsbreite des Skalenparameters ergeben (Tabelle 10.9). Wenn man das

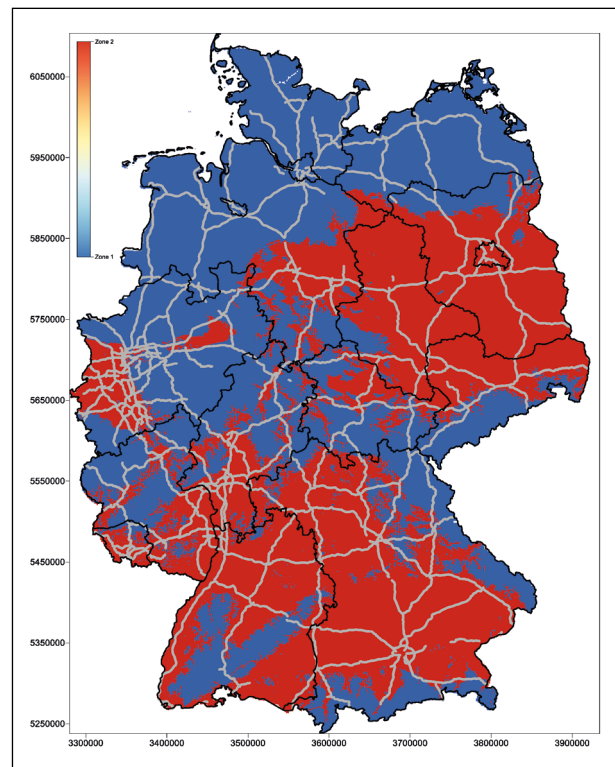


Bild 10.38: Variante 1 – KiST-Zonen-Karte für den Skalenparameter der Lognormalverteilung mit zwei Zonen gleicher Fläche

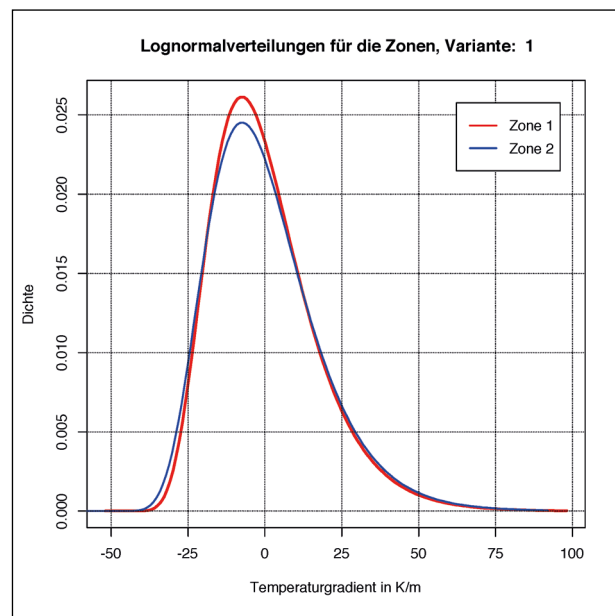


Bild 10.39: Lognormalverteilungen für die zwei Zonen aus Bild 10.38

Ergebnis etwas generalisiert und einen linearen Zusammenhang zwischen der Änderung der erforderlichen Deckendicke und der Änderung des Skalenparameters annimmt (siehe dazu Bild 10.34), dann ergibt sich eine Änderung der Deckendicke um 1 cm bei einer Zunahme des Skalenparameters um ~

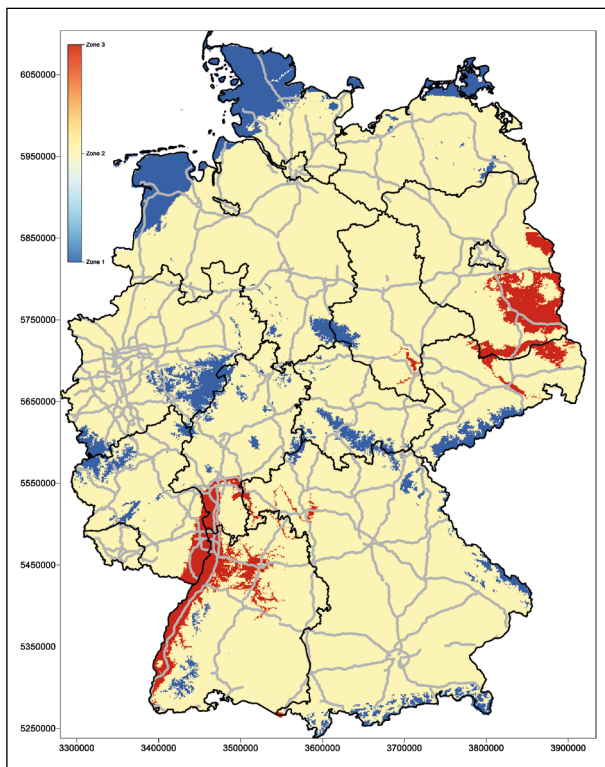


Bild 10.40: Variante 2 – KiST-Zonen-Karte mit drei Zonen für den Skalenparameter der Lognormalverteilung

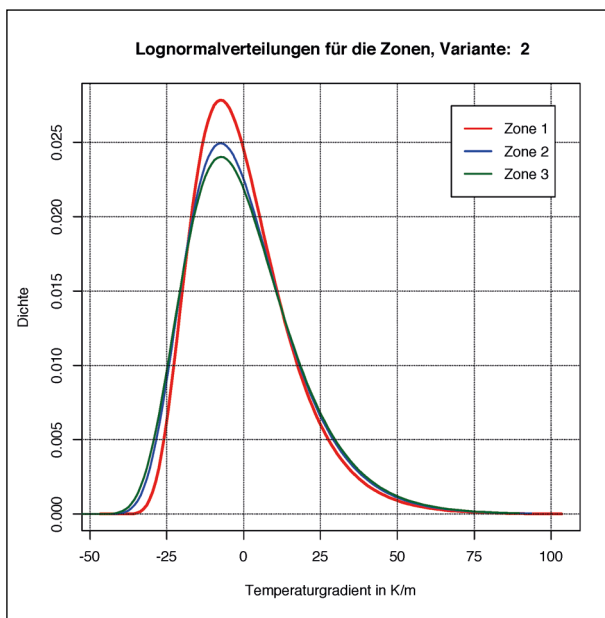


Bild 10.41: Lognormalverteilungen für die drei Zonen aus dem Bild 10.40

0,24 K/m für den Dimensionierungsfall 1 mit dem größten Zuwachs an Deckendicke. Dieser Wert liegt deutlich über dem, der aus Sicht der Güte der Abbildung der Standortergebnisse auf das Raster einzuhalten ist. Er ist auch so groß, dass es nur eine Möglichkeit gibt, drei Zonen einzurichten, wenn

man eine sehr kleine Zone vermeiden will: Die Zonengrenzen werden wieder ausgehend von dem Medianwert der Verteilung der Rasterwerte berechnet. Dieser Medianwert ist 3,91 K/m. Die beiden Zonengrenzen, die man für drei Zonen benötigt, liegen dann bei 3,79 K/m und 4,02 K/m. Die entsprechende Karte ist in Bild 10.40 zu sehen, die zugehörigen Lognormalverteilungen, die sich aus den maßgebenden Skalenparametern, die in diesem Fall 3.79 [K/m], 3.99 [K/m] und 4.06 [K/m] betragen, berechnen, sind in Bild 10.41 dargestellt.

Erwartungsgemäß zeigt diese Variante einer KiST-Zonen-Karte eine sehr große Zone, von der sich nur die Küstenregion, höher gelegene Gebiete sowie die wärmsten Gegenden Deutschlands abheben. Zudem sind die Verteilungen für die Zone 2 und die Zone 3 sehr ähnlich. Diese Karte spiegelt zwar die Ergebnisse der probabilistischen Dimensionierung richtig wieder, aber dieses Verfahren wird noch nicht operativ angewandt. Es ist damit zu rechnen, dass sich seine Ergebnisse mit der geplanten Einführung der FEM-Berechnung ändern und dann mehr vom MÄG abhängen. Dann wäre diese Zoneneinteilung hinfällig. Deshalb werden noch zwei Karten mit KiST-Zonen vorgestellt, bei denen die Zonengrenzen gleiche Abstände haben – allerdings bleibt der Skalenbereich der 1. Zone breiter.

Die Zonenbreite wird vom Ergebnis der Dimensionierungsrechnungen bestimmt.

- Variante 3

Diese Variante ist wieder eine Einteilung in drei Zonen, jetzt aber mit einer Zonenbreite (Differenz der Ober- und der Untergrenze einer Zone) von 1,5 K/m. Gegenüber der Variante 2 hat sich hier der Flächenanteil der Zone 3 deutlich und der der Zone 1 etwas vergrößert und die Unterschiede zwischen den Zonen hinsichtlich der Lognormalverteilung (Bild 10.43) fallen gleichmäßiger aus.

- Variante 4

Bei dieser Variante wird der doppelte Standardfehler als Zonenbreite (0,12 K/m) benutzt. Sie ist damit die Variante mit der größten Differenzierung hinsichtlich der Lognormalverteilung (Bild 10.45) – allerdings auf Kosten der Größe der 1. Zone (Bild 10.44).

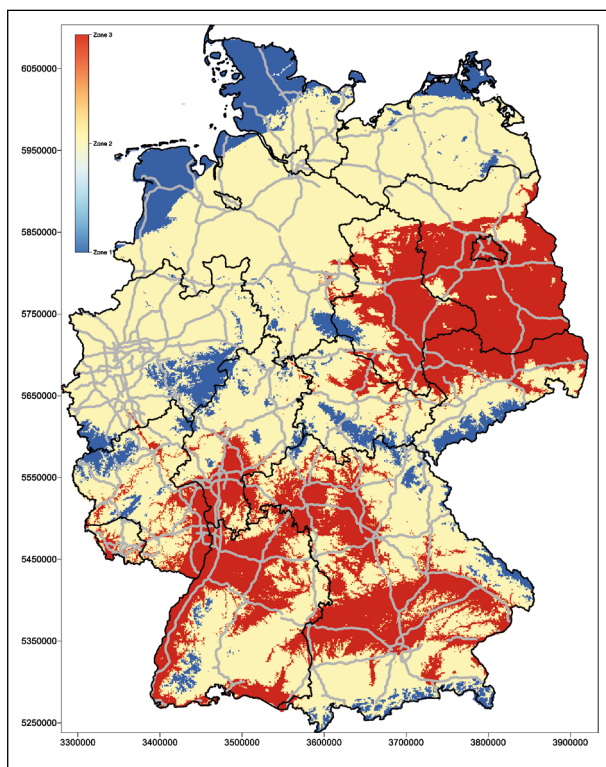


Bild 10.42: Variante 3 – KiSt-Zonen-Karte mit drei Zonen, deren Breite 1,5 K/m beträgt

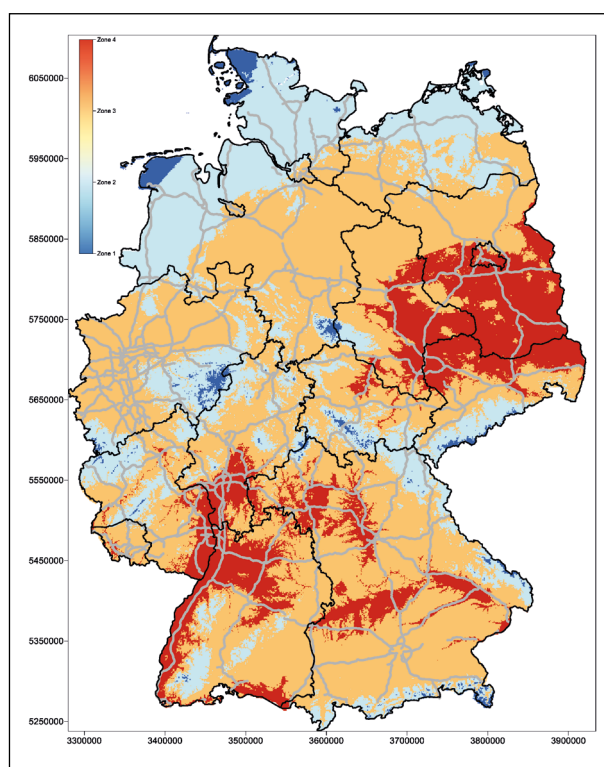


Bild 10.44: Variante 4 – KiSt-Zonen-Karte mit vier Zonen, deren Breite dem in Bild 10.19 dargestellten Bereich entspricht

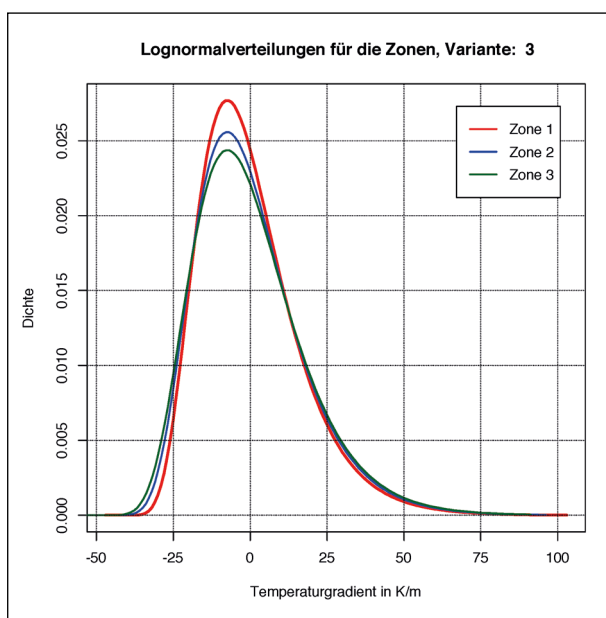


Bild 10.43: Lognormalverteilungen für die drei Zonen aus dem Bild 10.42

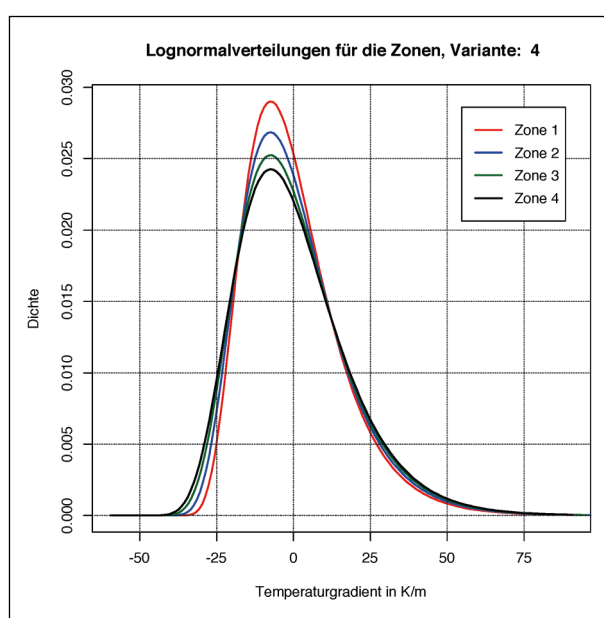


Bild 10.45: Lognormalverteilungen für die vier Zonen aus dem Bild 10.44

Empfehlung für die Wahl der Zoneneinteilung

Nach dem derzeitigen Erkenntnisstand ist es nicht möglich, eine eindeutige Auswahl auf der Basis gesicherter Ergebnisse zu treffen.

Die derzeit mögliche und hier praktizierte Anwendung der Probabilistik besteht darin, die probabilistische Dimensionierung in Kombination mit den analytischen Formeln zur Spannungsberechnung nach WESTERGAARD und EISENMANN durchzuführen. Es ist nicht vorgesehen, diese Berechnungsmethodik in die Dimensionierungspraxis zu überführen. Folglich fehlt auch eine verbindliche Kalibrierung. Die hier generierten Berechnungsergebnisse zeigen damit den Einfluss der Probabilistik auf die berechnete Deckendicke, sie stellen aber keine echten Dimensionierungsergebnisse dar. Es ist deshalb wenig sinnvoll, eine Festlegung der Kartendarstellung allein von diesen Ergebnissen abhängig zu machen.

Es ist vorgesehen, die rechnerische Dimensionierung so weiterzuentwickeln, dass die Probabilistik mit der Finite-Elemente-Methode für die Spannungsberechnung kombiniert wird. Die Erfahrungen, welche bisher bezüglich der Anwendung der Finite-Elemente-Methode vorliegen, besagen, dass der Temperatureinfluss auf das Dimensionierungsergebnis deutlich höher liegt als beim gegenwärtig praktizierten Verfahren. Es ist also zu erwarten, dass der unterschiedliche Ansatz der Temperaturgradienten auch zu einer größeren Spreizung der Dimensionierungsergebnisse führen wird. Damit wäre eine größere Differenzierung der Gradientenwerte sinnvoll.

Es wird vorgeschlagen, die Entscheidung für eine der dargestellten KiST-Zonen-Karten (Bild 10.38, Bild 10.40, Bild 10.42 und Bild 10.44) zu treffen, sobald Berechnungsergebnisse aus dem neuen Verfahren (Probabilistik + FEM) vorliegen.

10.4.4 Parameter der Gumbelverteilung

Bei einer probabilistischen Dimensionierung ist es notwendig, die Ausfallrate durch Integration über den Versagensbereich zu berechnen. Dabei wird auch die Streuung der Deckendicke berücksichtigt. Das bedeutet, dass im Zuge der Integration die Werte für die Deckendicke variieren. Da die Verteilungsfunktion für die Temperaturgradienten von der Deckendicke abhängt, muss auch diese entsprechend angepasst werden. Dies ist über die hier abgeleiteten Formeln (siehe Kapitel 9.3.2) auch pro-

blemlos realisierbar. Da die Verteilung der Extremwerte (Gumbelverteilung) wiederum von der Verteilung der zufälligen Werte abhängt, ist es notwendig, auch diese im Zuge der Integration jeweils neu zu bestimmen. Dies wurde auch in den bisher entwickelten Verfahren für die probabilistische Dimensionierung so realisiert (siehe [Heft 1072]).

Im Zuge der Bearbeitung des vorliegenden Projektes wurde aber festgestellt, dass die bisher praktizierte direkte Berechnung der Parameter der Gumbelverteilung aus den Parametern der logarithmischen Normalverteilung zu wenig befriedigenden Ergebnissen führt. Hier wäre also eine Weiterentwicklung des probabilistischen Dimensionierungsverfahrens notwendig.

Unabhängig davon ist festzustellen, dass der Nachweisfall, bei dem die Extremwertverteilung für die Temperaturgradienten zur Anwendung kommt, nur äußerst selten maßgebend wird. Dies kann nur bei Strecken mit sehr geringer Verkehrsbelastung vorkommen. Mit der Einführung der FEM-Berechnung in das Dimensionierungsverfahren wird sich dies wahrscheinlich anders darstellen. Eine genauere Analyse der Sensitivität der Gumbelparameter bezüglich der mit FEM-Modellen gewonnenen Dimensionierungsergebnisse ist aber erst möglich, wenn das entsprechende Dimensionierungsverfahren zur Verfügung steht.

Aus verschiedenen Gründen gehen aber die konzeptionellen Überlegungen zum probabilistischen Dimensionierungsverfahren dahin, auf die Verwendung von Extremwertverteilungen komplett zu verzichten und stattdessen, ähnlich wie im Verfahren für den Asphalt, eine Schädigungshypothese zu verwenden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Definition von KiST-Zonen für die Gumbelverteilung nicht sinnvoll ist, weil keine praktische Anwendung erfolgen wird.

11 Empfehlungen und Ausblick

11.1 Empfehlungen zur Einbindung der Ergebnisse in die RDO Beton

Um die gewonnenen Ergebnisse praxiswirksam zu machen, ist es erforderlich, eine Überführung in das aktuelle Normenwerk zu realisieren. Konkret betrifft dies den Anhang 2 der aktuell gültigen RDO Beton

09 [FGSV09]. Es wird angestrebt, die notwendigen Modifikationen so zu gestalten, dass sich die formalen Änderungen im Regelwerk auf ein Minimum reduzieren.

Dazu wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

1. Gleichung A 2-1 wird ersetzt durch

$$\delta_T = C_1 \cdot 0,0245 \cdot \left[0,0005313 \cdot \left(\frac{h_d}{10}\right)^2 - 0,0619588 \cdot \frac{h_d}{10} + 2,380594 \right]$$

mit

- δ_T Temperaturgradient [K/mm]
- C_1 Faktor zur Ermittlung des Temperaturgradienten, häufigkeitsabhängig
- h_d Solldicke [mm] der Betondecke

2. Die Definition des Faktors C_1 wird ersetzt durch folgenden Text:

Der Faktor C_1 ist wie folgt definiert:

- Faktor $C_1 = 1,6$ für Gradienten, die in 2,5 % aller Fälle vorkommen
- Faktor $C_1 = 1,0$ für Gradienten, die in 8,0 % aller Fälle vorkommen
- Faktor $C_1 = 0,62$ für Gradienten, die in 16,0 % aller Fälle vorkommen

3. Am Ende von Anhang 2 wird eine neue Tabelle für den Faktor m_{T3} und ein Hinweis auf die KiST-Zonenkarte eingefügt:

Tabelle A 2.5: Temperaturfaktoren m_{T3} zur Anpassung an das Temperaturgebiet

Zone	m_{T3}
1	1
2	1,049
3	1,098
4	1,147
5	1,265

Die Zone ist Bild A 2.3 zu entnehmen.

4. Im Anschluss an den o. g. Hinweis wird die KiST-Zonenkarte aus Bild 10.33 eingefügt mit „Bild A 2.3: Zonen für die Festlegung der Temperaturgebiete“ zu bezeichnen.

5. In Kapitel 6.3 ist die Erläuterung für den Temperaturgradienten wie folgt zu ändern:

δ_T Temperaturgradient, der für die zu führenden Nachweise mit 97,5 %; 92 %; 84 % Wahrscheinlichkeit nicht überschritten wird [K/mm] (siehe Kapitel 6.3.3)

6. Im Variablenverzeichnis wird beim Faktor m_{T3} die Erläuterung „...zur Zeit noch in Bearbeitung“ gestrichen.

Für die neue, redaktionell überarbeitete Ausgabe der RDO Beton ergeben sich, bei analoger Vorgehensweise folgende Änderungsschritte:

1. In Tabelle 6-13 werden die Zahlenwerte ersetzt:

Nachweisfall	Häufigkeit des Auftretens	Faktor C_1
Quasidynamisch im GZT	2,5 %	1,6
Quasidynamisch im GZG	8,0 %	1,0
Ermüdung im GZT	16,0 %	0,62

2. Gleichung 6-16 wird ersetzt durch:

$$\delta_T = C_1 \cdot 0,0245 \cdot \left[0,0005313 \cdot \left(\frac{h_d}{10}\right)^2 - 0,0619588 \cdot \frac{h_d}{10} + 2,380594 \right]$$

mit

- δ_T Temperaturgradient [K/mm]
- C_1 Faktor zur Ermittlung des Temperaturgradienten, häufigkeitsabhängig
- h_d Solldicke [mm] der Betondecke

3. Kapitel 6.3.5 ist wie folgt zu ersetzen:

Der jeweilige Temperaturgradient muss mithilfe eines Temperaturfaktors (m_{T3}) an das Temperaturgebiet angepasst werden (siehe Tabelle 6-15).

Die Zone ist Bild A 2.3 zu entnehmen.

Tabelle 6-15: Temperaturfaktoren m_{T3} zur Anpassung an das Temperaturgebiet

Zone	m_{T3}
1	1
2	1,049
3	1,098
4	1,147
5	1,265

4. Im Anschluss an den o. g. Hinweis wird die KiST-Zonenkarte aus Bild 10.33 eingefügt mit „Bild 6.3: Zonen für die Festlegung der Temperaturgebiete“ zu bezeichnen.

5. In Kapitel 6.3 ist die Erläuterung für den Temperaturgradienten wie folgt zu ändern:

δ_T Temperaturgradient, der für die zu führenden Nachweise mit 97,5 %; 92 %; 84 % Wahrscheinlichkeit nicht überschritten wird [K/mm] (siehe Kapitel 6.3.3)

6. Im Variablenverzeichnis wird beim Faktor m_{T3} die Erläuterung „...Tabelle 6-15“ ergänzt.

7. Die Tabellen 6-15 und 6-16 sind in 6-16 bzw. 6-17 umzubenennen.

11.2 Ausblick

Die weitere Entwicklung des Dimensionierungsverfahrens wird mit dem Übergang zur probabilistischen Berechnung verbunden sein. Aus diesem Grunde wird hinsichtlich der klimabedingten Eingangsgrößen die Betrachtung der Verteilungsfunktionen für den mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten im Mittelpunkt stehen. Daneben wird die Nutzung der Finite-Elemente-Methode für die Spannungsberechnung dazu führen, dass sich die Sensitivität der Berechnungsergebnisse bezüglich der

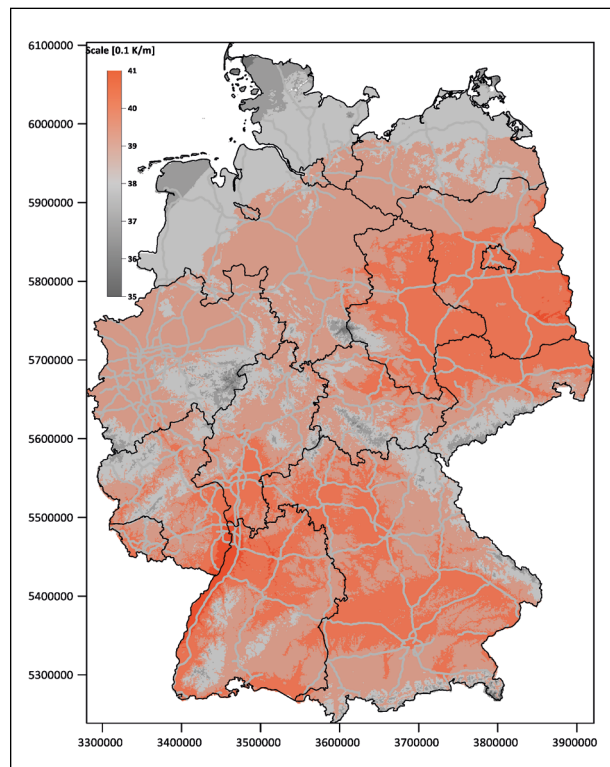


Bild 11.1: Rasterwerte des Skalenparameters der Lognormalverteilung

Temperatureinwirkungen erhöht. Es wird deshalb zu prüfen sein, ob eine Einteilung in KiST-Zonen sinnvoll ist. Alternativ wäre es möglich, durch die direkte Nutzung von Rasterdaten für die Festlegung des Skalenparameters der Lognormalverteilung eine angemessene Regionalisierung zu erreichen.

Bild 11.1 zeigt Rasterdaten des Skalenparameters der Lognormalverteilung, die – mit Rücksicht auf die Güte der Abbildung dieser Größe – auf 0,1 K/m genau berechnet wurden.

Die Eignung dieser Rasterwerte zur Berücksichtigung klimainduzierter Differenzen der erforderlichen Deckendicke ist nach Entwicklung des neuen Dimensionierungsverfahrens zu prüfen. Alternativ könnten in Zukunft auch synthetische Zeitreihen mit stündlichen meteorologischen Daten für die Berechnung der Temperaturverteilung in der Betonplatte herangezogen werden, die nicht von Messstationen stammen, sondern für Rasterflächen mit einer Fläche von 1 km² bestimmt wurden [DWD 2016]. Mit diesen Daten können nicht nur die klimatischen Verhältnisse am Standort eines Projekts zielgenau berücksichtigt, sondern auch die Materialparameter den jeweiligen Erfordernissen angepasst werden.

Literatur

- [ATV04] ATV-DVWK-Arbeitsgruppe ES-2.6: Anforderungen an Niederschlag-Abfluss-Berechnungen in der Siedlungsentwässerung. ATV-DVWK-M 165, 2004, ISBN 3-924063-93-1
- [BÄUM 2003] BÄUMER, D. 2003: Transport und chemische Umwandlung von Luftschadstoffen im Nahbereich von Autobahnen – numerische Simulationen; Wiss. Ber. Inst. f. Meteorol. u. Klimaforschung Univ. Karlsruhe Nr. 32
- [BLU 2001] BLÜMEL, E.; FINK, CH.; REISE, CH.: Luftdurchströmte Erdreichwärmetauscher – Handbuch zur Planung und Ausführung. 4. Rahmenprogramm CRAFT-JOUL, DG 12-GIGO, Gleisdorf 2001
- [COL 2001] COLES, S.: An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values, Springer Series in Statistics, 2001, 208 pp., ISBN 1852334592
- [DUB 1997] DUBBEL: Taschenbuch für Maschinenbau. Beitz W. und Küttner H., Springer Verlag, Berlin 1997
- [DWD 1995] BRADEN, H.: The Model AMBETI A Detailed Description of a Soil-Plant-Atmosphere Model, Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 195, Offenbach am Main, 1995
- [DWD 2016] Projektbericht: Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse Ein Projekt im Auftrag des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR), durchgeführt vom Deutschen Wetterdienst (DWD)
- [FGSV05] Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil Entwässerung (RAS EW)
- [FGSV09] Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen Ausgabe 2009 (RDO Beton 09)
- [FE 04.198/2004/ARB] KAYSER, S.: Grundlagen zur Erfassung der Temperaturbedingungen für eine analytische Bemessung von Asphaltbefestigungen, TU Dresden, 2007
- [FE 04.0285/2014/ORB] VILLARET, S.; KATHMANN, T.; OESER, M.; RIWE, A.; SCHROEDER S.; UECKERMANN, A.; VILLARET, K.: Aktualisierung und Anpassung der Straßenbelastungsdaten für die Dimensionierung, Entwurf des Schlussberichts Stand Dezember 2018
- [FE 89.0305/2015] AUGTER, G.; KAYSER, S.: Erweiterte grafische Darstellung der KiST-Zonen für die RSO, Forschungsprojekt FE 89.0305/2015, Bundesanstalt für Straßenwesen 2016
- [FOK 2008] FOKEN, T.: The Energy Balance Closure Problem: An Overview Ecological Applications, 18(6), 2008, pp. 1351–1367
- [GEI 2009] GEIGER, R.; ARON, RH.; TODHUNTER, P.: The Climate near the Ground. Rowman & Littlefield, Lanham, 2009
- [GLU 2007] Luftdurchströmter Schotterspeicher – Wärmetechnisches Simulationsmodell. Bericht zum BMWA – Verbundvorhaben LowEx, 2007 (<http://berndglueck.de/schotterspeicher.php>)
- [Heft 976] VILLARET, S.; KAYSER, S.; PFEIFER, U.; RIWE, A.; WELLNER, F.; PFEIFER, L.: Weiterentwicklung der Bemessungsmethoden für Verkehrsflächen – Teil Betonstraßen, FE 04.194/2004/ARB, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 976 (2007)
- [Heft 1050] VILLARET, S.; KAYSER, S.; KIEHNE, A.; PFEIFER, L.; RIWE, A.: Grundlagen zur Erfassung der Belastung für die analytische Dimensionierung von Straßenbefestigungen – Teil Betonstraßen, FE 04.197/2004/ARB, Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1050 (2010)
- [Heft 1072] VILLARET, S.; KIEHNE, A.; RIWE, A.: Probabilistische Verfahrensweise für die Dimensionierung von Fahrbahnbefestigungen – Teil Betondecken, FE 04.218/2008/ARB, Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1072 (2012)
- [IDSO 1981] IDSO, S.B. 1981: A set of equations for full spectrum and 8- to 14- μ m and 10.5- to 12.5- μ m thermal radiation from cloudless skies. Water Resour. Res., 17, pp. 295 – 304
- [IZ B 2018] InformationsZentrum Beton GmbH: „Umwelt-Produktdeklaration – Beton der Druckfestigkeitsklasse C 30/37“, https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Wissen/Nachhaltigkeit/EPD_IZB_2013411_C30_37_D.pdf, Abruf am 05.04.2018

- [JAE 1981] JÄGER, F. et al.: Überprüfung eines Erdwärmereimespeichers. Forschungsbericht T81-200, BmFT, Bonn 1981
- [JAN/SED 2001] JANSEN, W.; SETLADSCHEK, R.: Ablauf der Datenprüfung und -vervollständigung im Geschäftsfeld Landwirtschaft. – Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 2001. (Berichte des Deutschen Wetterdienstes ; 216)
- [KAY 2007] KAYSER, S.: Grundlagen zur Erfassung klimatischer Einflüsse für Dimensionierungsrechnungen von Asphaltbefestigungen. Dissertation, Technische Universität Dresden, Professur für Straßenbau, 2007
- [KRE/BÖL 1981] KREBS, H.G.; BÖLLINGER, G.: Temperaturberechnungen am bituminösen Straßenkörper Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 347, 1981
- [LERCH 1991] LERCH, G. (1991): Pflanzenoekologie. Akademie Verlag, Berlin (Germany).
- [LUM 2018] LUMITOS AG: https://www.chemie.de/lexikon/W%C3%A4rmeleitf%C3%A4higkeit.html#W.C3.A4rmeleitf.C3.A4higkeit_im_Bauwesen, Abruf am 05.04.2018
- [RINNE 2008] RINNE, H.: Taschenbuch der Statistik, Wissenschaftlicher Verlag Harry Deutsch GmbH, 2008
- [SCHW 2018] SCHWEIZER, A.: „Formelsammlungen und Berechnungsprogramme Anlagenbau“, https://www.schweizer-fn.de/stoff/wleit_isolierung/wleit_isolierung.php#wleitf_mauerwerk, Abruf am 05.04.2018
- [SPAETHE 1992] SPAETHE, G.: Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen, Springer-Verlag 1992
- [VILLARET 2014-1] Hitzeschäden auf südbayerischen Betonautobahnen, Teil 1: Datenanalyse und Streckenbeobachtung, 2014
- [VILLARET 2014-2] Hitzeschäden auf südbayerischen Betonautobahnen, Teil 2: FE-Modell zur Berücksichtigung von Imperfektionen, 2014
- [WEL 2008] WELLNER, F.; KAYSER, S.: Grundlagen zur Erfassung der Temperaturbedingungen für eine analytische Bemessung von Asphaltbefestigungen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 996, Bonn, 2008
- [WIL et al. 2002] WILSON, K. und 20 weitere Autoren/innen (2002): Energy balance closure at FLUXNET sites; Agricultural and Forest Meteorology 113, 223 – 243
- [WIL 2014] WILSON, R.; HANEK, J.; BRUCKNER, F.: Bestimmung des „Solar Reflectance Index“ von verschiedenen Betonsteinproben
- [WIN 2017] WINDISCH, H.: Thermodynamik 6., durchgesehene und bibliografisch ergänzte Auflage 2017, 380 S., Gruyter, Walter de Gruyter GmbH. ISBN 978-3-11-053368-2

Bilder

- Bild 4.1: Standorte (DWD-Stationen) mit lückenlosen Daten im Zeitraum 2001 bis 2015
- Bild 6.1: Vergleich der mittleren atmosphärischen Gegenstrahlung, berechnet nach dem bisherigen (EPM alt) und dem neuen Ansatz (EPM neu)
- Bild 6.2: Mittlerer Tagesgang der Energiebilanzkomponenten über Mais während des Experiments LITFASS-2003 [FOK 2008]
- Bild 6.3: Mittlere Tagesgänge der Lufttemperatur, Juli 2017 blau gemessen über Beton (Fa. Villaret, Autobahnkreuz Vulkaneifel) rot gemessen über Gras (DWD-Station Büchel) grün gemessen neben der Autobahn (GMA Kelberg an der A1)
- Bild 6.4: Mittlerer stündlicher Tagesgang des Bodenwärmestroms (QG), des Nettostrahlungsflusses (QR, Vorzeichen wurde umgedreht) und des turbulenten Flusses fühlbarer Wärme (QH), Rostock-Laage, April bis September, 2015 – 2016
- Bild 6.5: Mittlere Tagesgänge des fühlbaren Wärmestroms (QH), der Differenz der Fahrbahnoberflächentemperatur (TFO) und der Lufttemperatur (TL) sowie des Wärmeübergangskoeffizienten (QH/(TFO-TL)), Rostock-Laage, April bis September, 2015 – 2016
- Bild 6.6: Mittlere Tagesgänge der Temperatur; blau: Fahrbahnoberfläche, grün: Lufttemperatur an der GMA, rot: Lufttemperatur an der DWD-Station Rostock-Laage, April bis September, 2015 – 2016

- Bild 6.7: Mittlere Tagesgänge des Wärmeübergangskoeffizienten für 10 Standorte; Zeitraum: 2015 bis 2017, April bis September
- Bild 6.8: Mittlere Tagesgänge des Wärmeübergangskoeffizienten für 10 Standorte; Zeitraum: 2015 bis 2017, Oktober bis März
- Bild 6.9: Mittlere Tagesgänge des Wärmeübergangskoeffizienten für die Berechnung des fühlbaren Wärmestroms mit dem EPM
- Bild 6.10: Vergleich des mittleren fühlbaren Wärmeflusses, berechnet nach dem bisherigen (EPM alt) und dem neuen Ansatz (EPM neu), Datengrundlage: 328 Standorte, 2001 bis 2015, April bis September
- Bild 6.11: Vergleich des mittleren latenten Wärmeflusses, berechnet nach dem bisherigen (EPM alt) und dem neuen Ansatz (EPM neu), Datengrundlage: 328 Standorte, 2001 bis 2015, April bis September
- Bild 6.12: Mittlerer Tagesgang der Fahrbahnoberflächentemperatur, gemessen an der GMA und berechnet mit dem EPM, 2015 bis 2017, Sommerhalbjahr
- Bild 6.13: Mittlerer Tagesgang der Fahrbahnoberflächentemperatur, gemessen an der GMA und berechnet mit dem EPM, 2015 bis 2017, Winterhalbjahr
- Bild 6.14: Mittlere Fahrbahnoberflächentemperatur der Monate April bis September, berechnet mit den originalen Ansätzen [KAY 2007]
- Bild 6.15: Mittlere Fahrbahnoberflächentemperatur der Monate April bis September, berechnet mit den modifizierten Ansätzen für die langwellige Gegenstrahlung (siehe 6.1), den fühlbaren Wärmefluss (siehe 6.2) und die zu verdunstende Niederschlagshöhe (siehe 6.3 und 6.4)
- Bild 7.1: Fotografische Darstellung der untersuchten neutralfarbigen Betonsteinproben [WIL 2014]
- Bild 8.1: Temperaturanteile
- Bild 8.2: Diskrete Temperaturwerte im Plattenquerschnitt
- Bild 9.1: Dichtefunktion und Histogramm der Stichprobe für den mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten an der Station 164
- Bild 9.2: Verteilungsfunktion und Histogramm der Stichprobe für den mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten an der Station 164
- Bild 9.3: Quantilplot Histogramm-Verteilungsfunktion
- Bild 9.4: Verteilung der 92%-Quantilwerte des Temperaturgradienten in Deutschland Klassenebreite: 2 K/m, beginnend bei 20 K/m schwarz eingekreist: Stationen zur Festlegung der Überschreitungshäufigkeiten (= Lernstichprobe für das Regressionsmodell)
- Bild 9.5: Lageparameter x_0 der 50 für die Regression ausgewählten Stationen (siehe Tabelle A.3) in Abhängigkeit der Betondeckendicke h
- Bild 9.6: Zusammenhang zwischen der Betondeckendicke h und dem betondeckendickenspezifischen Verhältniswerten des Verteilungsparameters x_0 (= Quotient des betondeckendickenspezifischen Verteilungsparameters x_0 bezogen auf die Verteilungsparameter x_0 bei $h = 30$ cm) der 50 für die Regression ausgewählten Stationen
- Bild 9.7: Zusammenhang zwischen Betondeckendicke h und den betondeckendickenspezifischen Verhältniswerten der Verteilungsparameter (= Quotient des betondeckendickenspezifischen Verteilungsparameter ($x_0(h)$, $\sigma_1(h)$ bzw. $\mu_1(h)$) bezogen auf die Verteilungsparameter ($x_{0;30}$, $\sigma_{1;30}$ bzw. $\mu_{1;30}$) bei $h = 30$ cm) der 50 für die Regression ausgewählten Stationen
- Bild 9.8: Häufigkeitsverteilung der relativen Abweichungen zwischen den Temperaturgradienten, die aus den Verteilungsfunktionen direkt ermittelt werden und den Temperaturgradienten, die aus dem Regressionsansatzes resultieren
- Bild 9.9: Gegenüberstellungen der 97,5%-Quantilwerte (Temperaturgradienten der Überschreitungshäufigkeit = 2,5 %) aus den

stationsindividuellen Verteilungsfunktionen (Gradienten gemäß Tabelle A.6) sowie aus dem Regressionsmodell für unterschiedliche Betondeckendicken h

- Bild 9.10: Gegenüberstellungen der 92%-Quantilwerte (Temperaturgradienten der Überschreitungshäufigkeit = 8 %) aus den stationsindividuellen Verteilungsfunktionen (Gradienten gemäß Tabelle A.7) sowie aus dem Regressionsmodell für unterschiedliche Betondeckendicken h
- Bild 9.11: Gegenüberstellungen der 84%-Quantilwerte (Temperaturgradienten der Überschreitungshäufigkeit = 16 %) aus den stationsindividuellen Verteilungsfunktionen (Gradienten gemäß Tabelle A.8) sowie aus dem Regressionsmodell für unterschiedliche Betondeckendicken h
- Bild 9.12: Zusammenhang zwischen der Betondeckendicke h und den betondeckendickenspezifischen Verhältniswerten des MÄG (= Quotienten der betondeckendickenspezifischen MÄG $\delta T(h)$ bezogen auf die $\delta T;30$ (MÄG-Werte bei $h = 30$ cm))
- Bild 9.13: Mittlere Verhältniswerte (= Umrechnungsfaktor UF_{1-p}) zwischen dem MÄG der Überschreitungswahrscheinlichkeit $1-p = 2,5$ % (Quantil: $p = 97,5$ %) und dem MÄG der Überschreitungswahrscheinlichkeit $1-p = 8$ % (Quantil: $p = 92$ %) sowie zwischen den MÄG der Überschreitungswahrscheinlichkeit $1-p = 16$ % (Quantil: $p = 84$ %) und dem MÄG der Überschreitungswahrscheinlichkeit $1-p = 8$ % (Quantil: $p = 92$ %); der Fehlerindikator beschreibt +/- Standardabweichung
- Bild 9.14: Häufigkeitsverteilung der relativen Abweichungen zwischen den Temperaturgradienten, die aus den Verteilungsfunktionen direkt ermittelt werden und den Temperaturgradienten, die aus dem Regressionsansatzes (der Gradientenfunktion) resultieren
- Bild 9.15: Dichteverteilung (links) und Wiederkehrwerte (rechts) für GEV mit Lageparameter = 70 und Skalenparameter = 0.3 (schwarz: Formparameter = 0 Gumbel,

Typ I; grün: Formparameter = 0,5 Fréchet, Typ II; rot: Formparameter = -0,5 Weibull, Typ III)

- Bild 9.16: Tagesmaxima (oben) und unabhängige Tagesmaxima (unten) des mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten die schwarzen Felder unten repräsentieren die abhängigen Tagesmaxima
- Bild 9.17: Standorte für die Extremwertanalyse
- Bild 9.18: Die fünf größten mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten eines Jahres; Zeitraum: 2001 bis 2015, Standort: Angermünde
- Bild 9.19: Anpassung einer GEV an die Jahresmaxima des MÄG; Zeitraum: 2001 bis 2015, Standort: Fehmarn
- Bild 9.20: Änderung der Verteilungsparameter mit Änderung der Schwelle (vertikale schwarze Balken: 95%-Konfidenzbereich der Parameter, die farbigen Balken grenzen den Bereich konstanter Parameter ein)
- Bild 9.21: Anpassung einer GPV an unabhängige Tagesmaxima > 55 K/m des MÄG; Zeitraum: 2001 bis 2015, Standort: Angermünde
- Bild 9.22: Anpassung einer GPV an unabhängige Tagesmaxima > 61 K/m des MÄG; Zeitraum: 2001 bis 2015, Standort: Angermünde
- Bild 9.23: Die fünf größten mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten eines Jahres; Zeitraum: 2001 bis 2015, Standort: Fehmarn
- Bild 9.24: Änderung der Verteilungsparameter in Abhängigkeit vom Schwellenwert; Zeitraum: 2001 bis 2015, Standort: Fehmarn (vertikale schwarze Balken: 95%-Konfidenzbereich der Parameter, die farbigen Balken grenzen den Bereich konstanter Parameter ein)
- Bild 9.25: Anpassung einer GPV an unabhängige Tagesmaxima $> 53,8$ K/m des MÄG; Zeitraum: 2001 bis 2015, Standort: Fehmarn

- Bild 9.26: Extremwertverteilungen für Bremerhaven und Straubing (schwarz: Gumbel, grün: GEV für Jahresmaxima, rot: GEV für POT)
- Bild 9.27: Dichteverteilungen für Wittenberg blau: Gumbelparameter aus der Lognormalverteilung (schwarz: Gumbelverteilung aus den Jahresmaxima, rot: GEV aus den Werten oberhalb von 64,8 K/m)
- Bild 9.28: Wiederkehrwerte für Wittenberg
- Bild 9.29: Extremwertverteilung (rot) und angepasste Gumbelverteilung (blau) für einen 15-Jahres-Zeitraum an der Station Angermünde
- Bild 9.30: Wirkung der infolge temperaturbedingter Ausdehnung im Plattenquerschnitt entstehenden Druckspannungen
- Bild 9.31: Streuung der Stichprobe für die mittlere Plattentemperatur (Station Angermünde)
- Bild 9.32: Streuung der Stichprobe für die mittlere Plattentemperatur (Station Lahr)
- Bild 9.33: Streuung der Stichprobe für die mittlere Plattentemperatur (Station Fehmarn)
- Bild 9.34: Streuung der Stichprobe und die angepasste Dichtefunktion für die mittlere Plattentemperatur (Station Angermünde)
- Bild 9.35: Verteilung der gleichzeitig auftretenden Werte der mittleren Plattentemperatur und der mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten (Station Angermünde)
- Bild 9.36: Verteilung der gleichzeitig auftretenden Werte der mittleren Plattentemperatur und der mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten bei Voraussetzung gegenseitiger Unabhängigkeit (Station Angermünde)
- Bild 9.37: Zweidimensionale Verteilungsfunktion für den mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten und der mittleren Plattentemperatur unter der Voraussetzung der gegenseitigen Unabhängigkeit
- Bild 9.38: Zweidimensionale Verteilungsfunktion (blau) für den mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten und der mittleren Plattentemperatur unter der Voraussetzung der gegenseitigen Unabhängigkeit und Histogramm der Stichprobe
- Bild 9.39: Zweidimensionale Verteilungsfunktion (blau) für den mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten und der mittleren Plattentemperatur unter der Voraussetzung der gegenseitigen Unabhängigkeit und Histogramm der Stichprobe, welche die vorhandene Abhängigkeit berücksichtigt
- Bild 10.1: Mittlere Tagesgänge des mechanisch äquivalenten Gradienten (MÄG) sowie unterschiedlicher Temperaturen der Betonplatte; TFO: Temperatur an der Oberseite, TFU: Temperatur an der Unterseite, TPL: mittlere Plattentemperatur, Standort: Weihestephan, Zeitraum: 2001 bis 2015
- Bild 10.2: Mittlere Tagesgänge der mittleren Plattentemperatur (TPL) und des mechanisch äquivalenten Gradienten (MÄG); Plattendicke: 30 cm, Standort: Weihestephan, Zeitraum: 2001 bis 2015
- Bild 10.3: Mittlere monatliche Jahresgänge der mittleren Plattentemperatur (TPL) und des mechanisch äquivalenten Gradienten (MÄG); Plattendicke: 30 cm, Standort: Weihestephan, Zeitraum: 2001 bis 2015
- Bild 10.4: Räumliche Verteilung von Quantilwerten der mittleren Plattentemperatur; Dicke: 30 cm, Zeitraum: 2001 bis 2015
- Bild 10.5: Räumliche Verteilung von Quantilwerten des MÄG; Dicke: 30 cm, Zeitraum: 2001 bis 2015
- Bild 10.6: Vergleich der Standortwerte und der zugehörigen Rasterwerte; dargestellte Größe: 75%-Quantilwerte (3. Quartil) des MÄG, berechnet aus den Stundenwerten
- Bild 10.7: Vergleich der Standortwerte und der zugehörigen Rasterwerte; dargestellte Größe: 75%-Quantilwerte (3. Quartil) des MÄG, berechnet aus den Stundenwerten
- Bild 10.8: Räumliche Verteilungen der Quantilwerte für die Nachweise im semiprobabilistischen Verfahren

- Bild 10.9: Verhältnis des 92%- und des 84%-Quantilwertes für alle 328 Stationen. Verhältniswert ermittelt aus 50 Stationen ergibt sich zu 0,62
- Bild 10.10: Verhältnis des 92%- und des 97,5%-Quantilwertes für alle 328 Stationen. Verhältniswert ermittelt aus 50 Stationen ergibt sich zu 1,60
- Bild 10.11: Zusammenhang zwischen dem Skalen- und dem Lageparameter der Lognormalverteilung. Grundlage: Verteilungen für 328 Standorte mit Stundenwerten aus dem Zeitraum 2001 bis 2015
- Bild 10.12: Zusammenhang zwischen dem Skalen- und dem Formparameter der Lognormalverteilung. Grundlage: Verteilungen für 328 Standorte mit Stundenwerten aus dem Zeitraum 2001 bis 2015
- Bild 10.13: Räumliche Verteilungen der Parameter der Lognormalverteilung
- Bild 10.14: Räumliche Verteilung der Differenzen regionalisierter Formparameter und aus dem Skalenparameter berechneter Formparameter der Lognormalverteilung
- Bild 10.15: Differenzen von Quantilwerten des MÄG für Standorte ganz im Norden und am Alpenrand
- Bild 10.16: Häufigkeitsverteilung der 328 Standortwerte des Skalenparameters der Lognormalverteilung
- Bild 10.17: Häufigkeitsverteilung der 328 Standortwerte des 92%-Quantilwertes
- Bild 10.18: Korrelation des 92%-Quantilwertes des MÄG, berechnet aus den Stationsdaten, mit dem 92%-Quantilwert des MÄG der zugehörigen Rasterfläche
- Bild 10.19: Korrelation des Skalenparameters, berechnet aus den Stationsdaten, mit dem Skalenparameter der zugehörigen Rasterfläche
- Bild 10.20: Verformungsfigur A1
- Bild 10.21: Verformungsfigur A2
- Bild 10.22: Verformungsfigur A3
- Bild 10.23: Verformungsfigur A4
- Bild 10.24: Spannungen in Abhängigkeit von der Deckendicke (Bild aus [Heft 1050])
- Bild 10.25: Spannungen in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten
- Bild 10.26: Berechnete Deckendicke in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten für den Dimensionierungsfall 1
- Bild 10.27: Berechnete Deckendicke in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten für den Dimensionierungsfall 2
- Bild 10.28: Berechnete Deckendicke in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten für den Dimensionierungsfall 3
- Bild 10.29: Berechnete Deckendicke in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten für den Dimensionierungsfall 4
- Bild 10.30: Absolute Häufigkeitsverteilung der Rasterwerte des mech. äquivalenten Temperaturgradienten (92%-Quantilwert)
- Bild 10.31: KiST-Zonen-Karte mit 4 Zonen für den 92%-Quantilwert des MÄG
- Bild 10.32: KiST-Zonen-Karte mit 6 Zonen für den 92%-Quantilwert des MÄG
- Bild 10.33: KiST-Zonen-Karte mit 5 Zonen für den 92%-Quantilwert des MÄG
- Bild 10.34: Dimensionierungsergebnisse für den Dimensionierungsfall 1
- Bild 10.35: Dimensionierungsergebnisse für den Dimensionierungsfall 2
- Bild 10.36: Dimensionierungsergebnisse für den Dimensionierungsfall 3
- Bild 10.37: Summenhäufigkeitsverteilung der Rasterwerte des Skalenparameters der Lognormalverteilungen, angepasst an die Stundenwerte des mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten
- Bild 10.38: Variante 1 – KiST-Zonen-Karte für den Skalenparameter der Lognormalverteilung mit zwei Zonen gleicher Fläche
- Bild 10.39: Lognormalverteilungen für die zwei Zonen aus Bild 10.38

Bild 10.40: Variante 2 – KiSt-Zonen-Karte mit drei Zonen für den Skalenparameter der Lognormalverteilung Die Zonenbreite wird vom Ergebnis der Dimensionierungsrechnungen bestimmt

Bild 10.41: Lognormalverteilungen für die drei Zonen aus Bild 10.40

Bild 10.42: Variante 3 – KiSt-Zonen-Karte mit drei Zonen, deren Breite 1,5 K/m beträgt

Bild 10.43: Lognormalverteilungen für die drei Zonen aus Bild 10.42

Bild 10.44: Variante 4 – KiSt-Zonen-Karte mit vier Zonen, deren Breite dem in Bild 10.19 dargestellten Bereich entspricht

Bild 10.45: Lognormalverteilungen für die vier Zonen aus Bild 10.44

Bild 11.1: Rasterwerte des Skalenparameters der Lognormalverteilung

Anhang

Bild A.1: Mittlerer Tagesgang der Fahrbahnoberflächentemperatur für die Monate April bis September, berechnet mit den Modellen von KAYSER und AUGTER; Zeitraum: 2015, Standort: Heede

Bild A.2: Mittlerer Jahresgang der Fahrbahnoberflächentemperatur, berechnet mit den Modellen von KAYSER und AUGTER; Zeitraum: 2015, Standort: Heede

Bild A.3: Mittlerer Tagesgang des MÄG und der TFO, Oktober bis März; Zeitraum: 2001 bis 2015, Standort: Weihenstephan

Bild A.4: Mittlerer Tagesgang des MÄG und der TFO, April bis September; Zeitraum: 2001 bis 2015, Standort: Weihenstephan

Bild A.5: Jahresgang des MÄG, der TFU und der TFO: 2001 bis 2015, Standort: Weihenstephan, TFU: Temperatur an der Unterseite der Betonplatte

Bild A.6: Zeitreihen der Jahresmittelwerte; Zeitraum: 2001 bis 2015, Standort: Weihenstephan

Bild A.7: Gegenüberstellung des Lageparameters Loc x0

Bild A.8: Gegenüberstellung des Skalenparameters

Bild A.9: Gegenüberstellung des Formparameters

Bild A.10: Gegenüberstellung der Quantilwerte

Bild A.11: Darstellung der Wiederkehrwerte des MÄG für 13 Standorte und die Ergebnisse der Extremwertanalyse

Tabellen

Tab. 4.1: Vom DWD gelieferte Beobachtungselemente; die kursiv angegebenen Elemente sind nicht weiter verwendet worden

Tab. 4.2: Bedeutung der Angaben zur Herkunft der Beobachtungselemente (Quelle: DWD)

Tab. 4.3: Anteil der verschiedenen Herkünfte an den vom DWD gelieferten Daten

Tab. 6.1: Materialparameter für die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten

Tab. 6.2: Standorte, deren Daten zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten benutzt wurden

Tab. 6.3: GMA- und DWD-Standorte für den Vergleich der Modellergebnisse

Tab. 6.4: Materialparameter der Asphaltdecke

Tab. 6.5: Gemessene und berechnete mittlere Fahrbahnoberflächentemperaturen in °C

Tab. 7.1: Gewählter Befestigungsaufbau

Tab. 7.2: Modifizierte Befestigungsaufbauten

Tab. 7.3: Thermische Materialeigenschaften unterschiedlicher Stoffe

Tab. 7.4: Wertebereiche der thermischen Materialeigenschaften unterschiedlicher Stoffe 45

Tab. 7.5: Solarer Strahlungsreflexionsgrad unterschiedlicher Betonsteinproben [WIL 2014]

Tab. 7.6: Thermischer Emissionsgrad unterschiedlicher Betonsteinproben [WIL 2014]

- Tab. 7.7: Stündliche Werte (Zeitangabe: UTC) des Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK in $W/(m^2K)$)
- Tab. 9.1: Auszug aus den Ergebnisdateien
- Tab. 9.2: Nachweisspezifische Überschreitungshäufigkeiten und Temperaturgradienten (für eine 30 cm dicke Betondecke) gemäß den RDO Beton 09 [FGSV09]
- Tab. 9.3: Angepasste nachweisabhängige Überschreitungswahrscheinlichkeiten und Temperaturgradienten einer 30 cm dicken Betondecke
- Tab. 9.4: Maßgebende Temperaturgradienten, berechnet für 328 Standorte
- Tab. 9.5: Genauigkeit des Regressionsmodells in Abhängigkeit vom Quantil
- Tab. 9.6: Lognormalverteilungs-Parameter und Extremwerte des MÄG für die untersuchten Standorte
- Tab. 9.7: Parameter der Gumbelverteilung
- Tab. 9.8: Parameter der GEV für die jährlichen Maxima des MÄG STE: Standardfehler
- Tab. 9.9: Ergebnisse der Anpassung einer GPV an unabhängige MÄG > 55 und 61 K/m; ZdÜ: Zahl der Überschreitungen, STE: Standardfehler
- Tab. 9.10: Ergebnisse der Anpassung einer GPV bei unterschiedlichen Schwellenwerten; Zeitraum: 2001 bis 2015, Standort: Fehmarn, STE: Standardfehler
- Tab. 9.11: Parameter der GEV für POT+PP rot hinterlegt: Wert ist nicht mit Sicherheit < 0 ; ZdÜ: Zahl der Überschreitungen (Freiheitsgrade), STE: Standardfehler
- Tab. 9.12: Rechenannahmen für die Berechnung der Ausfallrate unter Verwendung von Extremwertverteilungen
- Tab. 9.13: Parameter der Extremwertverteilungen für den Standort Straubing
- Tab. 9.14: 1-Jahres-Extremwerte der Gradienten für die Station 164
- Tab. 9.15: Gumbelparameter für den 30-Jahres-Zeitraum
- Tab. 9.16: Parameter für die Verteilungsfunktion für die mittlere Plattentemperatur
- Tab. 9.17: Parameter für die logarithmische Normalverteilung zur Beschreibung der Streuung des MÄG
- Tab. 9.18: Rechenannahmen für die Berechnung der Ausfallrate
- Tab. 9.19: Parameter für die zweidimensionale Verteilungsfunktion für den mechanisch äquivalenten Temperaturgradienten und die mittlere Plattentemperatur (Formel (9-51))
- Tab. 10.1: Quantile der Summenhäufigkeitsverteilung des MÄG für unterschiedliche Nachweise
- Tab. 10.2: Kennwerte zur Beschreibung der Güte der Rasterwerte
- Tab. 10.3: Parameter der untersuchten Dimensionierungsfälle
- Tab. 10.4: Dimensionierungsergebnisse für den Dimensionierungsfall 1
- Tab. 10.5: Dimensionierungsergebnisse für den Dimensionierungsfall 2
- Tab. 10.6: Dimensionierungsergebnisse für den Dimensionierungsfall 3
- Tab. 10.7: Dimensionierungsergebnisse für den Dimensionierungsfall 4
- Tab. 10.8: Maßgebende mechanisch äquivalente Temperaturgradienten [K/m] für die Zonen
- Tab. 10.9: Dimensionierungsergebnisse für den Dimensionierungsfall 1
- Tab. 10.10: Dimensionierungsergebnisse für den Dimensionierungsfall 2
- Tab. 10.11: Dimensionierungsergebnisse für den Dimensionierungsfall 3

Anhang

- Tab. A.1: Liste der DWD-Stationen Bedeutung der Spalte Bemerkung: wenig Originalwerte, verlegt und aufgelöst: Standort wird nicht für Berechnungen mit dem EPM heran-

gezogen für Regr.: Daten dieses Standortes werden auch für die Überprüfung des Ansatzes zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Temperaturgradient und Betondeckendicke benutzt

- Tab. A.2: Stündliche Werte des Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK)
- Tab. A.3: Lageparameter (Loc x0) der Lognormalverteilung
- Tab. A.4: Skalenparameter (μ) der Lognormalverteilung
- Tab. A.5: Formparameter (σ) der Lognormalverteilung
- Tab. A.6: Maßgebende Temperaturgradienten, ermittelt aus allen Temperaturgradienten für unterschiedliche Betondeckendicken – quasidynamischer Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit (QNGT)
- Tab. A.7: Maßgebende Temperaturgradienten ermittelt aus allen Temperaturgradienten für unterschiedliche Betondeckendicken – quasidynamischer Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (QNGG)
- Tab. A.8: Maßgebende Temperaturgradienten ermittelt aus allen Temperaturgradienten für unterschiedliche Betondeckendicken – Ermüdungsnachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ENGT)
- Tab. A.9: Maßgebende Temperaturgradienten, ermittelt aus den positiven sowie aus allen Temperaturgradienten für eine Betondeckendicke von 30 cm
- Tab. A.10: Gumbelparameter für eine Betondeckendicke von 30 cm
- Tab. A.11: Parameter der Lognormalverteilung
- Tab. A.12: Quantilwerte [K/m], berechnet aus den Stundenwerten
- Tab. A.13: Quantilwerte, berechnet aus den Verteilungsparametern
- Tab. A.14: Parameter der Lognormalverteilung
- Tab. A.15: Quantilwerte der Lognormalverteilung

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2018

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

Wistuba, Isailović

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

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

Radenberg, Nytus, Boetcher, Diedel, Miehlung

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

S 117: Bauzeitenverkürzung durch optimierten Asphaltbau

Böhm, Tiemann, Ulrich, Verges, Muschalla

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

S 118: Untersuchung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Asphaltbinderkonzepte

Renken, Wistuba

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

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

Durner

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

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

Wacker, Scherkenbach, Jansen

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

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

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

Schröter, Zumsande, Wörner, Kazakova, Patzak

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

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

Möller, Bundschuh, Birle, Heyer

€ 18,50

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

Stephan, Weigel

€ 19,00

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

Müller, Schulte-Schrepping, Benra, Ludwig, Breitenbücher

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

S 125: Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie

Radenberg, Manke, Steeb, Jänicke

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

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

Freudenstein, Neudert

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

S 127: Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton

Villaret, Kiehne, Riwe, Villaret

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

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

Breitenbücher, Penttilä, Schulte-Schrepping

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

2019

S 129: Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt

Hase, Beyersdorf, Hase, Rademacher

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

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

Radenberg, Holzwarth

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

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

Radenberg, Gehrke

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

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

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

Al-Sibai, Hess, Gouya, zu Dohna, Steins

€ 15,50

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

Wolf, Uhlig

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

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

Skakuj, Balck, Beckedahl, Schrödter, Koppers, Ramadan

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

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

Botor, Tost

€ 15,50

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

Augter, Kayser

€ 16,50

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

Cudmani, Heyer, Engel, Schoenherr

€ 22,50

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

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

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

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

S 140: Erfahrungssammlung Bitumendaten – Frischbitumen

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

S 141: Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummimodifiziertem Bindemittel

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

2020

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

Beckedahl, Koppers, Schrödter € 15,50

S 143: s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch

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

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

Radenberg, Staschkiewicz € 17,50

S 145: Schadenskategorie-spezifische Bewertung von AKR-Prüfverfahren

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

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

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

2021

S 147: Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST

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

S 148: Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken

Freudenstein, Eger, Pichottka, Riwe, K. Villaret, S. Villaret, Frohböse
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

S 154: Prozessoptimierung der Asphaltextraktion mit Oktansäuremethylester (OME)

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

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

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

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

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

www.schuenemann-verlag.de

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