

1 **Verfahrensweise zur Berücksichtigung des thermo-** 2 **viskoelastischen Materialverhaltens im Rahmen der** 3 **rechnerischen Dimensionierung von Asphalt-** 4 **befestigungen in Deutschland – Teil 1**

5 *Autoren: G. Canon Falla¹, A. Picht¹, E. Kamratowsky¹, L. Tolsdorf¹, P. G. Bolz², U. Reinhardt¹,*
6 *A. Zeißler¹ und S. Leischner¹*

7 *¹Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden*

8 *²Technische Hochschule Deggendorf, Dieter-Görlitz-Platz 1, 94469 Deggendorf*

9 **Zusammenfassung**

10 Die deutschen Richtlinien zur rechnerischen Dimensionierung von Asphaltbefestigungen, RDO
11 Asphalt, ermöglichen eine materialoptimierende Dimensionierung auf Grundlage mechanistisch,
12 empirischer Verfahren. Die Genauigkeit des Verfahrens hängt jedoch maßgeblich von der
13 präzisen Erfassung und Modellierung der Belastungen und der Materialeigenschaften ab. Ziel ist
14 eine zuverlässige Dimensionierung von Asphaltbefestigungen. Die Veröffentlichung fokussiert
15 sich daher auf die Verbesserung der Berücksichtigung des thermo-viskoelastischen
16 Materialverhaltens von Asphalt im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung.

17 **Stichwörter:** Asphaltbefestigungen, rechnerische Dimensionierung, thermo-viskoelastisches
18 Materialverhalten

20 **Abstract**

21 The German guidelines for the mechanistic design of asphalt pavements, RDO Asphalt, enable
22 material-optimized design based on mechanistic, empirical methods. However, the accuracy of
23 the method depends largely on the precise recording and modeling of loads and material
24 properties. For this reason, the paper focuses on improving the consideration of the thermo-
25 viscoelastic material behavior of asphalt mixtures in the context of the German mechanistic
26 design procedure for asphalt pavements.

28 1 Einleitung

29 Deutschland hat im Jahr 2009 die Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von
30 Asphaltbefestigungen, RDO Asphalt [1], eingeführt. Asphaltstärkungen können so präzise
31 bestimmt und die verwendeten Materialien optimiert ausgewählt werden [2]. Das Mechanistisch-
32 Empirische (ME) Dimensionierungsverfahren nach RDO-Asphalt besteht aus zwei Teilen:
33 einem mechanistischen Teil (Berechnung der Spannungen und Dehnungen mit einem
34 numerischen Modell), und einem empirischen Teil, in dem die berechneten Beanspruchungen
35 empirisch mit der erwarteten Nutzungsdauer der Straßenbefestigung in Beziehung gesetzt
36 werden. Die Genauigkeit dieser Methode hängt entscheidend davon ab, wie präzise die
37 Ergebnisse der numerischen Modelle sind, um die tatsächlichen Belastungsbedingungen und
38 Materialeigenschaften abzubilden.

39 Die vorliegende Veröffentlichung konzentriert sich auf die Verbesserung der Präzision des
40 mechanistischen Teils der Dimensionierung. Eine verbesserte rechnerische Genauigkeit soll eine
41 solidere Grundlage für die empirischen Korrelationen schaffen. In dieser Veröffentlichung
42 werden ein thermisches Modell und ein mechanisches Modell vorgestellt. Das thermische
43 Modell ermöglicht eine genaue Berechnung der Temperatur innerhalb der Asphaltstärken
44 unter Berücksichtigung der Geometrie der Struktur, der thermischen Eigenschaften der
45 Materialien und der lokalen klimatischen Bedingungen. Die mechanischen Eigenschaften von
46 Asphalt sind stark temperaturabhängig. Daher ist eine genaue Kenntnis der genauen
47 Temperaturverteilung in den Asphaltstärken von entscheidender Bedeutung, da sie das
48 Gesamtverhalten der Befestigung maßgeblich beeinflusst. Die Ergebnisse des thermischen
49 Modells dienen als Eingangswerte für ein verbessertes mechanisches Modell, das die
50 viskoelastischen Effekte des Asphaltmaterials berücksichtigt. Durch präzisere
51 Temperaturberechnungen und deren Integration in fortschrittliche viskoelastische Modelle soll
52 diese Studie eine verbesserte und zuverlässigere numerische Basis für die rechnerische
53 Dimensionierung von Asphaltbefestigungen liefern. Diese Veröffentlichung ist in zwei Teile
54 gegliedert. Teil 1 beinhaltet eine detaillierte Beschreibung der Modelle einschließlich ihrer
55 mathematischen Grundlagen und Teil 2 umfasst die Auswirkungen der verbesserten Modelle auf
56 die berechneten Nutzungsdauern von Asphaltbefestigungen.

57 Die in dieser Veröffentlichung vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des von der DFG
58 geförderten Sonderforschungsbereichs/Transregio 339 „Digitaler Zwilling Straße“ [3] sowie des

59 von der AIF geförderten Projektes „Neuartige opto-akustische Messtechnologie für die fahrende,
60 zerstörungsfreie Bestimmung des strukturellen Zustands von Asphaltfahrbahnen“ erarbeitet.

61

62 **2 Thermisches Modell**

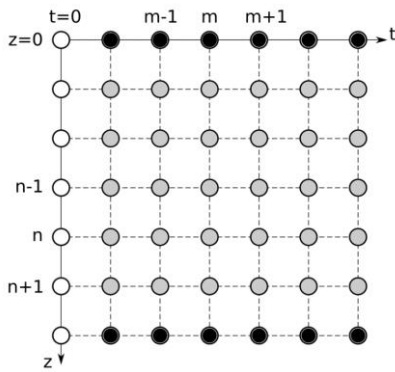
63 Modelle zur Bestimmung der Temperaturverteilung in Asphaltbefestigungen lassen sich in
64 empirische, analytische und numerische Modelle unterteilen [4, 5]. Empirische Modelle beruhen
65 auf Temperaturschätzungen, die mithilfe einer Regressionsfunktion erstellt werden, welche an
66 Temperaturmessungen und Klimadaten angepasst sind. Der größte Nachteil jedes empirischen
67 Modells liegt darin, dass die Genauigkeit der Regressionsgleichung nur für den ursprünglichen
68 Datensatz gewährleistet ist. Numerische Methoden sollen die Grenzen der empirischen
69 Methoden überwinden, indem sie eine Lösung für die partielle Differentialgleichung (PDG) der
70 Wärmeübertragung liefern und Temperaturänderungen in Straßenbefestigungen präzise
71 vorhersagen. Allerdings ist es schwierig, diese Methoden in die ME Dimensionierung zu
72 integrieren. Numerische Modelle bieten eine Näherungslösung der
73 Wärmeübertragungsgleichung, indem sie ein diskretisiertes Berechnungsgebiet verwenden. Je
74 nach Art der Diskretisierung werden numerische Methoden in Finite Differenzen (FD), Finite
75 Elemente (FE) und Finite Kontrollvolumen Methoden unterteilt. Der FD Ansatz ist die meist
76 genutzte numerische Methode zur Bestimmung der Temperaturverteilung und approximiert die
77 Lösung der Wärmeübertragungsgleichung durch Differenzen, die auf
78 Taylorreihenerweiterungen basieren. Aufgrund dieser Überlegungen wurde die FD Methode für
79 das thermische Modell gewählt.

80 **2.1 Mathematische Formulierung**

81 Das thermische Modell für eine mehrschichtige Straßenbefestigung kann auf ein
82 eindimensionales Wärmeleitungsmodell zurückgeführt werden, das durch eine Energiebilanz an
83 der Oberfläche und an den Grenzflächen zwischen den Schichten integriert wird. Dieser
84 Modellierungsansatz beruht auf einem reduzierten Satz von Eingabeparametern, einschließlich
85 der Dicke der Schichten, der Wärmeübertragungseigenschaften und den klimatischen
86 Bedingungen. Das mathematische Modell reduziert sich somit auf die Lösung der partiellen
87 Fourier-Differentialgleichung ohne Wärmeentwicklung (Gleichung (1)):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \rho \cdot \frac{c}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

88 In der Gleichung steht T für die Temperatur (in K), z für die Tiefe der Straßenbefestigung (in m),
89 t für die Zeit (in s), k für die Wärmeleitfähigkeit (in $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$), ρ für die Dichte (in kg
90 $\cdot m^{-3}$) und c für die spezifische Wärmekapazität (in $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$). Die Lösung von
91 Gleichung (1) wird numerisch mit Hilfe der Methode der FD ermittelt. Die FD-Methode liefert
92 eine diskrete Annäherung an die geschlossene Lösung in einer finiten Anzahl von Punkten. Für
93 das Wärmeübertragungsproblem können die Punkte, wie in **Bild 1** dargestellt, durch ein Netz
94 von Knoten abgebildet werden. Das Netz wird durch zwei Hauptparameter charakterisiert: Δt (in
95 s), dem Zeitschritt zwischen zwei benachbarten Punkten, und Δz (in m), der das räumliche
96 Inkrement innerhalb der Befestigung darstellt.



97
98 **Bild 1: Knotennetz (schwarze Knoten - Randbedingungen, weiße Knoten -**
99 **Anfangsbedingungen, graue Knoten - Berechnungspunkte für die Temperatur).**

100 Häufig wird das explizite Forward in Time, Central in Space Schema (FTCS) verwendet, um
101 die partielle Differentialgleichung des Wärmeübergangs numerisch mit FD zu lösen [6, 7].
102 Obwohl das FTCS-Schema bedingt stabil ist, hat die Stabilitätsbedingung eine unpraktische
103 Einschränkung [8]. Eine Verdopplung der räumlichen Auflösung Δz erfordert eine gleichzeitige
104 Verringerung des Zeitschritts Δt um den Faktor vier, um numerische Stabilität zu erhalten. Diese
105 Eigenschaft schränkt das Schema auf sehr kleine Zeitschritte bei Berechnungen mit hoher
106 Auflösung ein. Um diese Einschränkung zu überwinden, wurde eine implizite Methode, das
107 BTCS-Schema (Backward in Time, Central in Space), zur Lösung von Gleichung (1) verwendet.
108 Bei diesem Schema werden die zeitlichen und räumlichen Ableitungen der Wärmegleichung
109 durch FD Näherungen ersetzt [9]. Konkret wird die zeitliche Ableitung durch eine Backward-
110 Differenz wie folgt approximiert:

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} \approx \frac{T(z, t) - T(z, t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (2)$$

111 Die räumliche Ableitung wird durch eine zentrale Differenz wie folgt angenähert:

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \approx \frac{T(\Delta z, t) - T(-\Delta z, t)}{2\Delta z} \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2} \approx \frac{T(z + \Delta z, t) - 2T(z, t) + T(z - \Delta z, t)}{\Delta z^2} \quad (4)$$

112 2.2 Rand- und Anfangsbedingungen

113 Um Gleichung (1) mit der BTCS-FD-Methode zu lösen, müssen vier Bedingungen festgelegt
114 werden: zwei Randbedingungen, ein Initialisierungsschritt und eine Kontinuitätsbedingung. Die
115 Randbedingungen umfassen die Temperatur am unteren Rand des Berechnungsbereichs
116 (dargestellt durch die unteren schwarzen Punkte in Bild 1) sowie die Oberflächentemperatur
117 (obere schwarze Punkte in Bild 1). Der Initialisierungsschritt legt die Befestigungstemperatur
118 bei $t = 0$ s fest, während die Kontinuitätsbedingung das thermische Gleichgewicht an der
119 Schnittstelle zwischen den Schichten sicherstellt.

120 2.2.1 Temperatur am unteren Rand des Berechnungsbereichs

121 Ein mehrschichtiger Straßenaufbau kann als halbumendliches Medium betrachtet werden, das
122 sich von der Oberfläche ($z = 0$ m) bis zu einer Tiefe $z = z_e$ erstreckt, in der die
123 Temperaturänderung gegen Null geht ($\Delta T(z_e, t) \approx 0$). In der Praxis bleibt die Temperatur ab einer
124 bestimmten Tiefe aufgrund der hohen thermischen Masse weitgehend konstant und wird kaum
125 von den Heiz- und Kühlzyklen an der Straßenoberfläche beeinflusst. Daher ist die erste
126 Randbedingung für die Lösung von Gleichung (1) die festgelegte Temperatur in dieser Tiefe z_e .

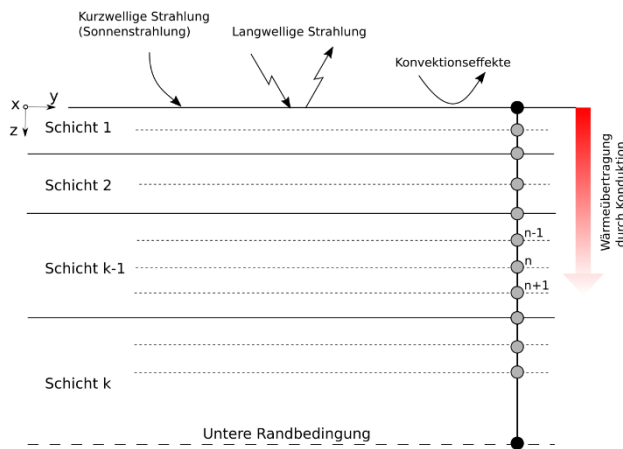
$$T(z_e, t) = T_e = \textit{konstant} \quad (5)$$

127 In dieser Studie wurden T_e auf 10°C und z_e auf 12 m festgelegt [10].

128 2.2.2 Oberflächentemperatur

129 Es gibt zwei Hauptmethoden zur Bestimmung der Temperatur an der Asphaltoberfläche. Zum
130 einen kann die Temperatur direkt mit Wärmebildgeräten gemessen werden. Alternativ kann sie
131 durch numerische Berechnungen bestimmt werden, bei denen die
132 Wärmeübertragungsmechanismen zwischen der Asphaltoberfläche und der Atmosphäre
133 modelliert werden. Dieser zweite Ansatz erfordert ein genaues Verständnis der thermischen
134 Eigenschaften der Materialien sowie der klimatischen Bedingungen, um den
135 Wärmeaustauschprozess genau abzubilden. Die Oberflächentemperatur kann durch eine

136 Energiebilanz an der Oberfläche ($z = 0$) berechnet werden. Dabei wird nur die
 137 Wärmeübertragung durch Konvektion sowie kurz- und langwellige Strahlung berücksichtigt
 138 **(Bild 2)**.



139
 140 **Bild 2: Art der Berücksichtigung der Konvektion und der kurz- sowie langwelligen**
 141 **Strahlung.**

142 Konvektionseffekte zwischen der Straßenoberfläche und der Umgebungsluft können unter
 143 Verwendung des Newton'schen Wärmeübergangsgesetzes berechnet werden (Gleichung (6)).

$$q_k = h_c(T_a - T_0) \quad (6)$$

144 Dabei steht q_k (in $W \cdot m^{-2}$) für den konvektiv übertragenen Wärmestrom, T_0 für die Temperatur
 145 (in $^{\circ}C$) an der der Straßenoberfläche, T_a für die Lufttemperatur (in $^{\circ}C$) und h_c für den konvektiven
 146 Wärmeübergangskoeffizienten (in $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$). Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient
 147 wird üblicherweise mit empirischen Formeln bestimmt [4]. In der Literatur gibt es mehrere
 148 Gleichungen, die diesen Koeffizienten mit der Windgeschwindigkeit V_v und der Temperatur in
 149 Beziehung setzen. Zu den am häufigsten verwendeten Gleichungen gehören zum einen
 150 Gleichung (7) [11–13] sowie Gleichung (8) [14].

$$h_c = 698,24(0,00144 \cdot T_m^{0,3} \cdot V_v^{0,7} + 0,00097 \cdot |T_0 - T_a|^{0,3}) \quad (7)$$

$$T_m = \frac{(T_0 + T_a)}{2} + 273,15$$

$$h_c = \begin{cases} 5,6 + 4,0V_v & \text{wenn } V_v \leq 5 \text{ m/s} \\ 7,3V_v^{0,78} & \text{wenn } V_v > 5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (8)$$

151 Der kurzwellige Wärmestrom q_{ks} (in $W \cdot m^{-2}$), der von der Straßenoberfläche absorbiert wird,
 152 kann mit Gleichung (9) bestimmt werden [14, 15]:

$$q_{ks} = (1 - \alpha)Q_s \quad (9)$$

153 wobei α der Albedo-Koeffizient ($\alpha = 0.1$ für Asphalt) und Q_s die kurzwellige Sonnenstrahlung
154 (in $W \cdot m^{-2}$) ist. Die langwellige Gesamtstrahlung q_{ls} (in $W \cdot m^{-2}$) folgt dem Stefan-Boltzmann-
155 Gesetz [15]:

$$q_s = \sigma \epsilon (T_0 + 273,15)^4 - \sigma \epsilon_s (T_a + 273,15)^4 \cdot k(N) \quad (10)$$

156 wobei σ die Stefan-Boltzmann-Konstante ($5,670 \times 10^{-8}$, in $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$) darstellt, ϵ
157 (dimensionslos) den Emissionsgrad der Straßenoberfläche ($\epsilon = 0,98$ für Asphalt), ϵ_s
158 (dimensionslos) den langwelligen Emissionsgrad des Himmels und $k(N)$ ein Korrekturfaktor
159 aufgrund der Wolkenbedeckung ist. ϵ_s und $k(N)$ können mit Gleichung (11) bzw. Gleichung (12)
160 bestimmt werden [10].

$$\epsilon_s = 0,70 + 5,95 \cdot 10^{-5} \cdot f_d \cdot e^{\frac{1500}{T_a + 273,15}} \quad (11)$$

$$k(N) = \left(1 + 0,20 \cdot \left(\frac{N}{8} \right)^2 \right) \quad (12)$$

161 wobei f_d der Dampfdruck (in hPa) und N die Wolkenbedeckung (in Achteln) ist.

162 Schließlich wird die Oberflächentemperatur der Asphaltbefestigung mit einer Wärmebilanz nach
163 Gleichung (13) bestimmt. Die linke Seite der Gleichung beschreibt den Wärmestrom aufgrund
164 der Wärmeleitung zwischen der oberen Oberfläche und den unteren Schichten der
165 Asphaltbefestigung, während die rechte Seite den oben beschriebenen Wärmeströmen entspricht.

$$-k_1 \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_k + q_{ks} + q_{ls} \quad (13)$$

166 wobei k_1 die Wärmeleitfähigkeit (in $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) der Asphaltdeckschicht ist.

167 2.2.3 Anfangstemperaturprofil

168 Zur Initialisierung des thermischen Modells wird eine geschätzte Temperaturverteilung in der
169 Straßenbefestigung benötigt. In der Studie wird die nichtlineare Temperaturverteilung nach
170 Gleichung (14) in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur verwendet, um die Temperatur
171 in der Straßenoberfläche bei $t = 0$ s zu bestimmen.

$$T(z, 0) = a \cdot \ln(0,01 \cdot z + 1) + T_a \quad (14)$$

172
173 wobei T die Temperatur in der Tiefe z (in $^{\circ}C$), T_a die Umgebungstemperatur (in $^{\circ}C$), z die Tiefe
174 in der Befestigung (in mm) und a ein Materialparameter (nach Tabelle 1) ist.

175

Umgebungstemperatur T_a [°C]												
< -10	< -5	< 0	< 5	< 10	< 15	< 20	< 25	< 30	< 35	< 40	< 45	> 45
6,5	4,5	2,5	0,7	0,1	0,3	0,4	-1,6	-4,0	-6,2	-8,5	-10,5	-12,0

Tabelle 1: Materialparameter a in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur.

177 2.2.4 Thermisches Gleichgewicht an der Schnittstelle zwischen den Schichten

178 Die Lösung von Gleichung (1) an den Grenzen der Schichten erfordert aufgrund der Änderung
179 der thermischen Eigenschaften der Materialien besondere Aufmerksamkeit. Um dieses
180 Phänomen zu berücksichtigen, ist es notwendig, eine Kontinuität des Wärmestroms zwischen
181 den Schichten wie folgt zu definieren [16]:

$$k_i = \frac{\partial T_i}{\partial z} = k_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z} \quad (15)$$

182 wobei der tiefgestellte Index i die Nummer der Schicht angibt.

183 2.3 Validierung des Thermischen Modells

184 Die Validierung des Wärmeübertragungsmodells wurde anhand von in-situ Temperaturdaten
185 einer Teststrecke in Mülsen durchgeführt (**Bild 3**). Die gemessenen Temperaturen an der
186 Unterseite der Asphalttragschicht (ATS) wurden mit den vom thermischen Modell berechneten
187 Werten über einen Zeitraum von einem Jahr verglichen.



Bild 3: Temperatursensoren (links) und Wärmeübertragungsanalysator Isomet 2114

(rechts).

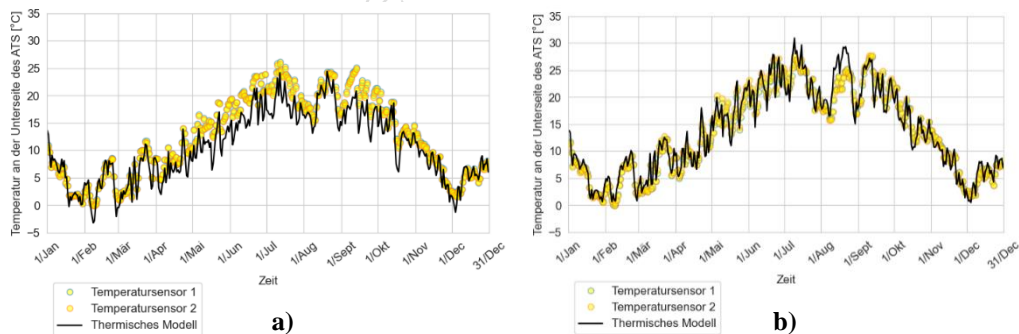
193 Die Teststrecke besteht aus drei Asphaltsschichten und einer 300 mm dicken Schottertragschicht
194 (STS). Die Asphaltdeckschicht (ADS) ist ein Splittmastixasphalt mit einer Dicke von 40 mm.
195 Die Asphaltbinderschicht (ABS) und die Asphalttragschicht (ATS) bestehen beide aus
196 Asphaltbeton mit Dicken von 60 mm bzw. 160 mm. Zwei Temperatursensoren wurden an der
197 Unterseite der ATS in einer Tiefe von $z = 260$ mm installiert. Die Wärmeleitfähigkeit k und die
198 spezifische Wärmekapazität c der Asphalte wurden mithilfe eines
199 Wärmeübertragungsanalysators an Probekörpern gemessen. Für jedes Material wurden 10

200 Messungen an zwei Proben durchgeführt. Die Durchschnittswerte μ und Standardabweichungen
 201 σ sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die Dichte ρ wurde für alle Probekörper gravimetrisch bestimmt.
 202 Die thermischen Eigenschaften und die Dichte der STS wurden aus der Literatur entnommen
 203 [15].

	$k \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$		$c \left[\frac{J}{m^3 \cdot K} \right]$		$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$
	μ	σ	μ	σ	μ
ADS	1,86	0,0041	736,8	0,0029	2.396
ABS	2,10	0,0025	629,8	0,0040	2.549
ATS	2,05	0,0025	796,8	0,0037	2.235
STS [15]	0,7	-	900	-	1.700

204 **Tabelle 2: Durchschnittswerte μ und Standardabweichungen σ der Wärmeleitfähigkeit k ,**
 205 **der spezifischen Wärmekapazität c und der Dichte ρ der Asphaltmaterialien.**

206 Die Energiebilanz des thermischen Modells wurde mithilfe meteorologischer Daten der
 207 Wetterstation Lichtentanne, 15 km von der Teststrecke entfernt, berechnet. Da die
 208 oberflächennahen Temperaturen der Straßenbefestigung sowohl im Tagesverlauf als auch von
 209 Tag zu Tag schwanken, wurden Vergleiche zwischen den theoretischen und den gemessenen
 210 Temperaturen jeweils um 6:00 Uhr und um 15:00 Uhr durchgeführt.



**Bild 4: Vergleich der gemessenen und berechneten Temperaturen an der Unterseite der
 ATS, Messzeitpunkt 6:00 Uhr (a) und 15:00 Uhr (b).**

211 **Bild 4** zeigt einen Vergleich der gemessenen und der berechneten Temperaturen. Die
 212 durchschnittliche absolute Abweichung zwischen den gemessenen und den ermittelten
 213 Temperaturen beträgt 1,21 K für 6:00 Uhr bzw. 2,15 K für 15:00 Uhr. Es zeigt sich, dass die mit
 214 dem thermischen Modell berechnete Temperatur mit der gemessenen Temperatur nahezu
 215 identisch ist. Eine mögliche Ursache für die beobachteten Abweichungen könnte darin liegen,

216 dass die meteorologischen Messdaten nicht unmittelbar am Standort der Teststrecke, sondern in
217 einer Entfernung von 15 km erfasst wurden.

218 **3 Mechanisches Modell**

219 Die RDO-Asphalt verwendet ein Berechnungsmodell, das auf der Multilayer Elastic Theory
220 (MLET) basiert. Aus mathematischer Sicht wird die Lösung der statischen Gleichungen der
221 Kontinuumsmechanik durch MLET unter Verwendung von Hankel-Transformationen erreicht.
222 Dieser Ansatz basiert auf der Lösung eines achsensymmetrischen Problems mit einer konstanten
223 Kreislast, die in Form von Hankel-Koeffizienten formuliert wird. Die MLET wird auf der
224 Grundlage mehrerer vereinfachender Annahmen formuliert: linear elastische Materialien,
225 gleichmäßige kreisförmige Belastung, masselose Schichten und statische
226 Belastungsbedingungen. In den letzten 40 Jahren wurden viele Computerprogramme auf der
227 Grundlage von MLET entwickelt. Zu den bekanntesten Programmen gehören Bisar [17],
228 MnLayer [18], KenLayer [19], Julea [20], Alize [21] und AdtoPave [22].

229 Diese Annahmen erleichtern die mathematische Modellierung, bringen jedoch erhebliche
230 Einschränkungen hinsichtlich der Genauigkeit mit sich. Durch die Annahme linear elastischen
231 Materialverhaltens wird beispielsweise das viskoelastische Verhalten von Asphalt vernachlässigt.
232 Darüber hinaus werden dynamische Belastungseffekte sowie die Auswirkungen der
233 Fahrzeuggeschwindigkeit und -bewegung vernachlässigt. Aus diesem Grund wurden in den
234 letzten Jahren genauere Methoden zur Analyse der Beanspruchung von Asphaltbefestigungen
235 wie zum Beispiel die FE Methode angewendet. Mit der FE Methode ist es möglich, das
236 viskoelastische Verhalten von Asphaltmaterialien, dynamische Radlasten sowie die Masse und
237 Trägheit der Schichten des Befestigungsaufbaus zu berücksichtigen. Die Verwendung von FE
238 erfordert jedoch erhebliche Rechenressourcen. Die hohe Anzahl an zu lösenden Gleichungen
239 bedingt einen hohen zeitlichen Aufwand für den Berechnungsprozess. Dies stellt eine
240 Herausforderung für die Verwendung der FE Methode bei der rechnerischen Dimensionierung
241 von Straßenbefestigungen dar, da für jede Temperaturfunktion und Achslastgruppe eine separate
242 mechanische Berechnung erforderlich ist. Wenn eine probabilistische Analyse unter
243 Verwendung der Monte-Carlo-Methode zur Zuverlässigkeitsvorhersage durchgeführt wird, sind
244 zudem mehrere tausend Rechenläufe erforderlich. Folglich ist es zwingend erforderlich, dass die
245 Ergebnisse der Berechnungen für die Straßenbefestigung innerhalb von Sekunden zur Verfügung
246 stehen.

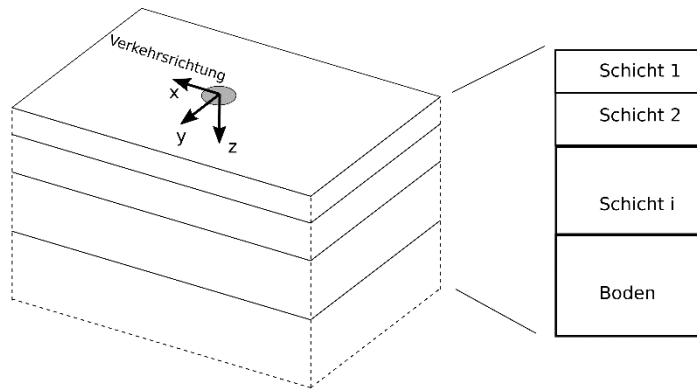
247 Die Lösung der Wellengleichung in mehrschichtigen Befestigungen mithilfe der Fourier-
248 Transformation (FT) bietet einen alternativen zeiteffizienten Ansatz zur Berechnung der
249 Beanspruchungen in Straßenbefestigungen. Diese Methode kann zur Analyse eines breiten
250 Spektrums von Straßenbefestigungen verwendet werden, wobei die Auswirkungen der
251 Viskoelastizität des Materials und dynamischer Belastungsbedingungen berücksichtigt werden
252 können. Darüber hinaus erfordert die Lösung der Wellenausbreitungsgleichungen mit der FT im
253 Vergleich zur FE Methode einen deutlich geringeren Rechenaufwand, was die Methode zu einer
254 effizienteren Wahl für die Modellierung von Straßenbefestigungen im Rahmen von ME-
255 Dimensionierungsverfahren macht.

256 Aus diesem Grund wurde in dieser Studie die Wellengleichung in mehrschichtigen Medien mit
257 FT als mechanisches Modell gewählt. Zur programmtechnischen Umsetzung wurde Fortran
258 genutzt. Das entwickelte Programm kombiniert die Stärken der Fourier-basierten Methode zur
259 Lösung der Wellengleichung mit den Rechenfähigkeiten von Fortran und stellt damit eine
260 effiziente und leistungsfähige Software für die Dimensionierung von Straßenbefestigungen dar.

261 **3.1 Mathematische Formulierung**

262 Aufbauend auf den Prinzipien von MLET beinhaltet diese Methode den Einsatz von Multilayer
263 Fourier Transformationen (MLFT). Dadurch ist eine komplexere und detailliertere Analyse der
264 Oberflächenbelastungen und ihrer Auswirkungen auf die Straßenbefestigung möglich. Das
265 MLFT Verfahren besteht aus einer zweidimensionalen FT der Oberflächenbelastung und der
266 Lösung der Cauchy'schen Impulsgleichung im Frequenzbereich für jede Fourier Analyse, die
267 zur Beschreibung der Belastung verwendet wird. Zu diesem Zweck wird der Befestigungsaufbau
268 als ein halbunendliches Mehrschichtensystem betrachtet, das aus n horizontalen Schichten
269 besteht (**Bild 5**). Das Rechenmodell basiert auf der Annahme, dass die Verkehrslast mit
270 konstanter Geschwindigkeit V in Richtung der x-Achse bewegt wird. Unter dieser Annahme
271 kann das stationäre Koordinatensystem (x, y, z) in ein bewegtes Koordinatensystem (X, Y, Z)
272 umgewandelt werden:

$$(x, y, z) \rightarrow (X + V_t, Y, Z) \quad (16)$$



273

274 **Bild 5: Schematische Darstellung des Befestigungsaufbaus bei der MLFT Methode**

275 Mit dieser Variablenänderung reduziert sich das Problem auf die Lösung der elasto-dynamischen

276 Cauchy'schen Impulsgleichung ohne Körperkräfte im bewegten Koordinatensystem (X, Y, Z)

277 für jede Schicht i:

$$\operatorname{div}(\sigma_i(X, Y, Z)) = \rho_i V^2 \frac{\partial^2 u_i(X, Y, Z)}{\partial X^2} \quad (17)$$

278 wobei σ der Spannungstensor, u das Verschiebungsfeld und ρ die Dichte jeder Schicht ist.

279 Um eine semi-analytische Lösung der Gleichung (17) zu erhalten, wird die FT Technik

280 verwendet. Dabei werden die Längskoordinate X und die Querkoordinate Y aus dem räumlichen

281 Bereich in den Frequenzbereich transformiert. Dies geschieht, indem die FT des

282 Verschiebungsfeldes in den Richtungen X und Y durchgeführt wird und die

283 Differentialgleichung im Frequenzbereich unter Berücksichtigung der Randbedingungen gelöst

284 wird. Die FT des Verschiebungsfeldes wird durch die Gleichung (18) dargestellt.

$$\hat{u}(k_1, k_2, Z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u(X, Y, Z) e^{-jk_1 X} e^{-jk_2 Y} dX dY \quad (18)$$

285 wobei k_1 und k_2 die Wellenzahlen sind und j die komplexe Zahl ($\sqrt{j} = -1$) ist. Unter der

286 Annahme einer konstanten Geschwindigkeit in Richtung X ist die Frequenz ω mit der

287 Wellenzahl k_1 durch die Gleichung $\omega = k_1 \cdot V$ verbunden.

288 Der Spannungstensor wird im Fourier-Raum unter Verwendung des konstitutiven Gesetzes

289 viskoelastischer Materialien im Frequenzbereich ausgedrückt:

$$\hat{\sigma}(k_1, k_2, Z) = 2\hat{\mu}(\omega)\hat{\epsilon}(k_1, k_2, Z) + \hat{\lambda}(\omega) \operatorname{tr}(\hat{\epsilon}(k_1, k_2, Z))I \quad (19)$$

290 wobei $\hat{\mu}(\omega)$ und $\hat{\lambda}(\omega)$ die komplexen Lamé-Koeffizienten in Abhängigkeit von der Frequenz

291 sind. $\hat{\sigma}$ und $\hat{\epsilon}$ sind der Spannungs- und Dehnungstensoren im Frequenzbereich, und I der

292 Identitätstensor. Mit den Gleichungen (18) und (19) ist es möglich, die Cauchy'sche
 293 Impulsgleichung im Frequenzbereich neu zu formulieren:

$$A_i \frac{\partial^2 \hat{u}(k_1, k_2, Z)}{\partial Z^2} + jB_i \frac{\partial \hat{u}(k_1, k_2, Z)}{\partial Z^2} - C_i \hat{u}(k_1, k_2, Z) = 0 \quad (20)$$

294 wobei,

$$A_i = \begin{pmatrix} c_{si}^2 & 0 & 0 \\ 0 & c_{si}^2 & 0 \\ 0 & 0 & c_{pi}^2 \end{pmatrix}$$

$$B_i = \begin{pmatrix} 0 & 0 & k_1(c_{pi}^2 - c_{si}^2) \\ 0 & 0 & k_2(c_{pi}^2 - c_{si}^2) \\ k_1(c_{pi}^2 - c_{si}^2) & k_2(c_{pi}^2 - c_{si}^2) & 0 \end{pmatrix}$$

$$C_i = \begin{pmatrix} k_1^2(c_{pi}^2 - V^2) + k_2^2 c_{si}^2 & k_1 k_2 (c_{pi}^2 - c_{si}^2) & 0 \\ k_1 k_2 (c_{pi}^2 - c_{si}^2) & k_1^2(c_{si}^2 - V^2) + k_2^2 c_{pi}^2 & 0 \\ 0 & 0 & k_1^2(c_{si}^2 - V^2) + k_2^2 c_{si}^2 \end{pmatrix} \quad (21)$$

295 Dabei sind die Dilatations- und Scherwellengeschwindigkeiten c_{si} und c_{pi} :

$$c_{si} = \sqrt{\frac{\lambda_i^* + 2\mu_i^*}{\rho_i}}, c_{pi} = \sqrt{\frac{\mu_i^*}{\rho_i}} \quad (22)$$

296 Eine Lösung der Gleichung (20) wird unter Verwendung der folgenden Randbedingungen in Z-
 297 Richtung gesucht. Randbedingungen in Längs- und Querrichtung sind nicht erforderlich, da
 298 angenommen wird, dass die Straßenbefestigung unendlich in der X - Y -Ebene ist.

299 Folgende Randbedingungen gelten für die Z-Ebene:

$$\hat{\sigma} \cdot e_z = \hat{f}(k_1, k_2) \quad (23)$$

300 wobei e_z der Normalenvektor und $\hat{f}(k_1, k_2)$ die FT der Last ist. Für eine konstante Last der Größe
 301 f_0 über einem rechteckigen Bereich $[-a, a] \times [-b, b]$ wird die FT gemäß Gleichung (24)
 302 ausgedrückt. Für eine konstante Last der Größe f_0 über einem kreisförmigen Bereich mit Radius
 303 r wird die FT gemäß Gleichung (25) ausgedrückt.

$$\hat{f}(k_1, k_2) = f_0 \cdot \frac{4 \sin(k_1 a) \sin(k_2 b)}{k_1 k_2} \quad (24)$$

$$\hat{f}(k_1, k_2) = f_0 \cdot J_1 \left(r \sqrt{k_1^2 + k_2^2} \right) \cdot \frac{2\pi r}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} \quad (25)$$

304 An der Grenzfläche zwischen den Schichten n und $n + 1$ (Interlayer-Randbedingung): Diese
 305 Randbedingung bezieht sich auf die Verbindung an den Schnittstellen zwischen den einzelnen
 306 Schichten. Die Straßenbefestigung, die sich monolithisch verhält, kann die Verkehrslasten
 307 effektiv von der oberen Schicht auf die untere Schicht übertragen; in einem solchen Fall gilt

308 Gleichung (26). Obwohl die Schichten in den meisten Fällen als monolithische Elemente
309 entworfen werden, sind die Asphaltsschichten in der Realität nicht vollständig miteinander
310 verbunden. Im Fall eines vollständigen Schichtenverbundes tritt die maximale Zugspannung an
311 der Unterseite der Asphaltbefestigung auf. Wird dieser Verbund zwischen den Schichten gestört,
312 verhält sich das System wie ein System, das lediglich aus einzelnen Schichten besteht. In diesem
313 Szenario entwickeln sich Zugspannungen an der Unterseite jeder einzelnen Schicht, während
314 Druckspannungen an der Oberseite der jeweiligen Schicht auftreten. Für den Fall, dass der
315 Schichtenverbund gestört ist, gilt Gleichung (27).

$$\begin{bmatrix} \hat{u} \\ \hat{\sigma} \cdot e_z \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} \hat{u} \\ \hat{\sigma} \cdot e_z \end{bmatrix}_{n+1} \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{u}_z \\ \hat{\sigma}_{xz} \\ \hat{\sigma}_{yz} \\ 0 \\ 0 \\ \hat{\sigma}_{zz} \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} \hat{u}_z \\ 0 \\ 0 \\ \hat{\sigma}_{xz} \\ \hat{\sigma}_{yz} \\ \hat{\sigma}_{zz} \end{bmatrix}_{n+1} \quad (27)$$

316 An der unteren Grenze, $Z = \infty$:

$$\hat{u} = 0, \hat{\sigma} = 0 \quad (28)$$

317 Gleichung (20) wird im Frequenzbereich unter Verwendung der oben beschriebenen
318 Randbedingungen für alle harmonischen Kombinationen (k_1, k_2) gelöst, die zur Darstellung der
319 Last verwendet werden. Dieser Prozess erfordert eine erhebliche Menge an Datenspeicherung
320 und Rechenaufwand, der mit der Anzahl der harmonischen Oberwellen in der Fourier-Reihe
321 zunimmt. Daher muss ein Kompromiss zwischen Rechengeschwindigkeit und Genauigkeit der
322 Lastdarstellung gefunden werden. Eine detaillierte Beschreibung des Lösungsverfahrens für die
323 Gleichung (20) ist in [23] und [24] zu finden. Sobald die Lösung im Frequenzbereich verfügbar
324 ist, wird eine doppelte inverse FT durchgeführt, um die Verschiebungen, Dehnungen und
325 Spannungen im Zeitbereich zu berechnen.

3.2 Viskoelastisches Materialmodell für Asphalt

327 Asphalt verhält sich inhärent thermo-viskoelastisch. Die Vernachlässigung der viskoelastischen
328 Eigenschaften von Asphalt kann zu erheblichen Ungenauigkeiten bei der Dimensionierung von
329 Straßenbefestigungen führen. Wie in Gleichung (19) dargestellt, reduziert sich die konstitutive
330 Gleichung für viskoelastische Materialien im Frequenzbereich auf eine Multiplikation des
331 Dehnungstensors mit den komplexen Lamé-Koeffizienten. Die komplexen Lamé-Koeffizienten

332 stehen in direktem Zusammenhang mit dem komplexen Elastizitätsmodul, $E^*(\omega)$, weshalb
 333 Gleichung (19) wie folgt formuliert werden kann:

$$\hat{\sigma}(k_1, k_2, Z) = E^*(\omega) \hat{\epsilon}(k_1, k_2, Z) \quad (29)$$

334 Angesichts dieser linearen Beziehung wurde das viskoelastische 2S2P1D-Modell [6] ausgewählt,
 335 um den komplexen E-Modul von Asphalt im Frequenzbereich darzustellen.

336 3.3 Vergleich des mechanischen Modells mit Benchmark Ergebnissen

337 Die Ergebnisse des mechanischen Modells werden mit den Resultaten eines Benchmark-
 338 Beispiels verglichen, wie in [25] dokumentiert, wobei die Software Viscoroute [24] zum Einsatz
 339 kommt. Viscoroute ist eine Dimensionierungssoftware, welche in Frankreich entwickelt wurde
 340 und deren Ergebnisse an in-situ Messungen validiert wurden. Bei Viscoroute wird ebenfalls das
 341 viskoelastische Verhalten von Asphalt berücksichtigt. Da Viscoroute aus lizenzrechtlichen
 342 Gründen nicht in das deutsche Dimensionierungsverfahren von Asphaltbefestigungen
 343 eingebunden werden kann, war es erforderlich eine eigene Software für Deutschland unter
 344 Berücksichtigung des viskoelastischen Materialverhaltens von Asphalt zu entwickeln. Die
 345 untersuchte Straßenbefestigung besteht insgesamt aus 3 Schichten: einer Asphaltdecke, einer
 346 ATS und einer Tragschicht mit hydraulischem Bindemittel (HGT). Es werden zwei Szenarien
 347 betrachtet: vollständiger und kein Schichtenverbund zwischen der Asphaltdecke und der ATS.
 348 In beiden Szenarien wird zwischen der ATS und HGT sowie zwischen der HGT und dem
 349 Untergrund vollständiger Schichtenverbund angenommen. Die HGT und der Untergrund wurden
 350 als linear elastische Materialien modelliert (Tabelle 3).

Schicht	Dicke	Materialmodell	Modellparameter
Asphaltdecke	80 mm	Viskoelastisch: 2S2P1D	$E_0 = 11 \text{ MPa}$; $E_\infty = 32.665 \text{ MPa}$; $\delta = 2,24$; $k = 0,19$; $h = 0,59$; $\beta = 0$; $\tau(T=30^\circ\text{C}) = 0,0007284$, $\nu = 0,35$
ATS	120 mm	Viskoelastisch: 2S2P1D	$E_0 = 13 \text{ MPa}$; $E_\infty = 43.934 \text{ MPa}$; $\delta = 2,10$; $k = 0,17$; $h = 0,53$; $\beta = 0$; $\tau(T=30^\circ\text{C}) = 0,0006214$, $\nu = 0,35$
HGT	200 mm	Linear Elastisch	$E = 23000 \text{ MPa}$; $\nu = 0,25$
Unterbau	∞	Linear Elastisch	$E = 120 \text{ MPa}$; $\nu = 0,35$

351 **Tabelle 3: Schichtdicken, Materialmodelle und Modellparameter [25].**

352 Eine konstante kreisförmige Last mit einem Radius von 0,125 m, zentriert bei ($X = 0$, $Y = 0$, Z
 353 $= 0$), wird in Z-Richtung auf die freie Oberfläche der Straßenbefestigung aufgebracht. Die
 354 Druckbelastung wurde auf 0,662 MPa festgelegt [25]. **Bild 6** zeigt den Vergleich zwischen den

355 mit dem mechanischen Modell erzielten Ergebnissen und den Ergebnissen aus [25]. Es ist
356 festzustellen, dass die von beiden Programmen berechneten Dehnungen fast übereinstimmen.
357 Dies zeigt die Konsistenz und Genauigkeit des mechanischen Modells und der in der
358 Referenzsoftware verwendeten Modelle. Geringe Abweichungen sind jedoch bei den
359 Maximalwerten der Dehnungen zu beobachten, die in erster Linie auf Trägheitseffekte
360 zurückzuführen sind. In der Dehnungsverteilung entlang der X-Koordinate zeigt sich das
361 viskoelastische Verhalten der Asphalt-schichten, da die maximale Dehnung nicht mehr unter der
362 Radlastachse auftritt.

363

364

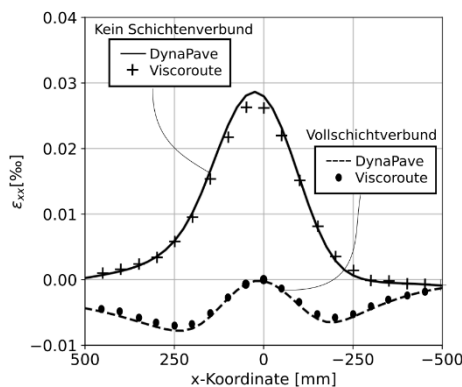
365

366

367

368

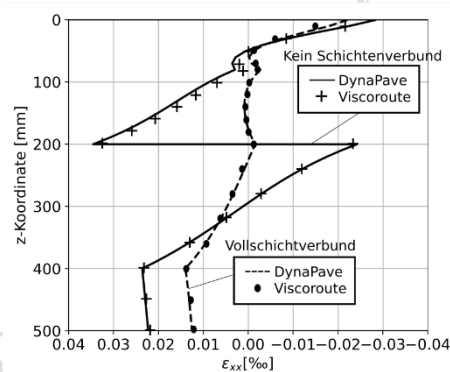
369



370

a) Horizontale Dehnung ϵ_{xx} entlang der X-Richtung in einer Tiefe von 180 mm.

371



b) Horizontale Dehnung entlang der Z-Richtung unter der Radachse ($x=0, y=0$)

Bild 6: Vergleich der Ergebnisse des mechanischen Modells mit jenen von Viscoroute

[24], $T = 30^\circ\text{C}$, $v = 72 \text{ km/h}$.

372 4 Zusammenfassung

373 Die vorliegende Publikation beschäftigt sich mit der Berücksichtigung des thermo-
374 viskoelastischen Materialverhaltens von Asphalt im Rahmen der ME Dimensionierung von
375 Straßenbefestigungen, um eine solidere Grundlage für die empirischen Korrelationen zu
376 schaffen. Zwei numerische Modelle wurden vorgestellt: ein thermisches Modell zur genaueren
377 Bestimmung der Temperaturverteilung in den Asphalt-schichten (unter Berücksichtigung der
378 Geometrie, Materialeigenschaften und des Klimas) und ein mechanisches Modell, das aufgrund
379 temperaturabhängiger viskoelastischer Eigenschaften des Asphalts genauer das Verhalten der
380 Asphalt-schichten beschreibt. Die aus dem thermischen Modell gewonnenen Eingaben fließen in
381 das verbesserte mechanische Modell ein. Ziel ist eine zuverlässigere numerische Basis für die
382 Dimensionierung. Abschließend wurden die Ergebnisse mit einem Benchmark-Beispiel unter
383 Verwendung des Programms Viscoroute verglichen. Die Auswertung zeigt eine nahezu

384 übereinstimmende horizontale Dehnung und Dehnung unter der Radachse bei vollständigem
385 Schichtenverbund, wobei geringe Abweichungen durch Trägheitseffekte erklärt werden. Somit
386 kann davon ausgegangen werden, dass die hier vorgestellten Modelle zuverlässigere
387 Berechnungsergebnisse als Grundlage für die Dimensionierung von Asphaltbefestigungen
388 liefern im Vergleich zu den derzeitigen Ansätzen nach den RDO Asphalt.

389

390 **5 Literatur**

- 391 [1] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsausschuss*
392 *Dimensionierung: Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von*
393 *Verkehrsflächen in Asphaltbauweise RDO Asphalt 09/24. FGSV, Der Verlag, Köln,*
394 *2024.*
- 395 [2] *Alexander Zeißler: Untersuchungen zum spannungsabhängigen Materialverhalten von*
396 *Asphalt. Dresden, Germany, Technische Universität Dresden, PhD Thesis, 2014.*
- 397 [3] *Kaliske, M.; Oeser, M.; Wollny, I. et al.: Welchen Weg nimmt die „Straße der Zukunft“?*
398 *– Digitalisierung der Straße im Sonderforschungsbereich/Transregio 339 „Digitaler*
399 *Zwilling Straße“. In: Bauingenieur 97 (2022), 01-02, S. 29-37.*
400 <https://doi.org/10.37544/0005-6650-2022-01-02-61>.
- 401 [4] *Jiaqi Chen; Hao Wang; Pengyu Xie: Pavement temperature prediction: Theoretical*
402 *models and critical affecting factors. In: Applied Thermal Engineering 158 (2019), S.*
403 *113755.*
- 404 [5] *Adwan, I.; Milad, A.; Memon, Z.A. et al.: Asphalt Pavement Temperature Prediction*
405 *Models: A Review. In: Applied Sciences 11 (2021), Heft 9.*
- 406 [6] *Suhas V. Patankar: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Publishing*
407 *Corporation, New York, USA, 1980.*
- 408 [7] *G. D. Smith: Numerical Solution of Partial Differential Equations: Finite Difference*
409 *Methods. Oxford University Press, Oxford, UK, 1985.*
- 410 [8] *A. R. Mitchell; D. F. Griffiths: The Finite Difference Method in Partial Differential*
411 *Equations. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 1980.*
- 412 [9] *J. W. Thomas: Numerical Partial Differential Equations: Finite Difference Methods.*
413 *Springer, New York, USA, 1995.*

- 414 [10] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsgruppe*
415 *Infrastrukturmanagement: Arbeitspapier Eingangsgrößen für die Dimensionierung und*
416 *Bewertung der strukturellen Substanz AP EDS: Teil 2, Klima. FGSV, Köln, 2022-.*
- 417 [11] *M. Solaimanian; T. W. Kennedy: Predicting maximum pavement surface temperature*
418 *using maximum air temperature and hourly solar radiation. In: Transportation Research*
419 *Record 1417 (1993), S. 1-11.*
- 420 [12] *A. Hermansson: Simulation model for calculating pavement temperatures including*
421 *maximum temperature. In: Transportation Research Record 1699 (2000), S. 134-141.*
- 422 [13] *B. J. Dempsey; M. R. Thompson: A heat transfer model for evaluating frost action and*
423 *temperature related effects in multilayered pavement systems. In: Highway Research*
424 *Record 342 (1970), S. 39-56.*
- 425 [14] *Quentin Félix Adam; Eyal Levenberg; Thomas Ingeman-Nielsen et al.: Modeling the use*
426 *of an electrical heating system to actively protect asphalt pavements against low-*
427 *temperature cracking. In: Cold Regions Science and Technology 205 (2023), S. 103681.*
- 428 [15] *Denis Saliko; Abubeker Ahmed; Sigurdur Erlingsson: Development and validation of a*
429 *pavement temperature profile prediction model in a mechanistic-empirical design*
430 *framework. In: Transportation Geotechnics 40 (2023), S. 100976.*
- 431 [16] *D. M. Mrawira; J. Luca: Thermal properties and transient temperature response of full-*
432 *depth asphalt pavements. In: Transportation Research Record 1809 (2002), Heft 1, S.*
433 *160-171.*
- 434 [17] *Jong, D.L. de; Peutz, M.G.F.; Korswagen, A.R.: Computer Program BISAR, Layered*
435 *Systems Under Normal and Tangential Surface Loads, 1979.*
- 436 [18] *Khazanovich, L.; Wang, Q.: MnLayer: High-Performance Layered Elastic Analysis*
437 *Program. In: Transportation Research Record 2037 (2007), S. 63-75.*
438 <https://doi.org/10.3141/2037-06>.
- 439 [19] *Huang, Y.H.: Pavement Analysis and Design. Pearson Education, Upper Saddle River,*
440 *N.J., 2004.*
- 441 [20] *Uzan, J.: Advanced Backcalculation Techniques. In: : Proc., 2nd International*
442 *Symposium on NDT of Pavements and Backcalculation of Moduli. ASTM, Special*
443 *Technical Publications, 1994, S. 3-37.*

- 444 [21] *Autret, P.; Baucheron de Boissoudy, A.; Marchand, J.-P.*: ALIZÉ III Practice. In: : Proc.
445 5th Int. Conf. Structural Design of Asphalt Pavements, 1982, S. 174-191.
- 446 [22] *IDAV GmbH*: ADtoPave – Analysing and Design Tool for Pavements,
447 <https://www.adtopave.de/deutsch/adtopave/adtopave.html> [Zugriff am: 03.11.2023].
- 448 [23] *V.H. Nguyen*: Comportement dynamique de structures non-linéaires soumises à des
449 charges mobiles, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France, 2021.
- 450 [24] *Armelle Chabot, Olivier Chupin, Lydie Deloffre; Denis Duhamel*: ViscoRoute 2.0 A. In:
451 Road Materials and Pavement Design 11 (2010), Heft 2, S. 227-250.
- 452 [25] *O. Chupin; A. Chabot; J.-M. Piau et al.*: Influence of sliding interfaces on the response of
453 a layered viscoelastic medium under a moving load. In: International Journal of Solids
454 and Structures 47 (2010), Heft 25, S. 3435-3446.

455 Danksagung

456 Die Autorinnen und Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung bei der DFG
457 SFB/TRR 339, Projekt ID 45359608 sowie bei der AIF, Projekt ID KK5007701DF0.

458 Autorenangaben

459 Dr.-Ing. Gustavo Canon Falla
460 TU Dresden – Professur für Straßenbau
461 Georg-Schumann-Straße 7
462 01187 Dresden
463 gustavo_adolfo.canon_falla@tu-dresden.de

464
465 Dipl.-Ing. Artur Picht
466 TU Dresden – Professur für Straßenbau
467 Georg-Schumann-Straße 7
468 01187 Dresden
469 artur.picht@tu-dresden.de

470
471 Dipl.-Ing. Erik Kamratowsky
472 TU Dresden – Professur für Straßenbau
473 Georg-Schumann-Straße 7
474 01187 Dresden
475 erik.kamratowsky@tu-dresden.de

476
477 Dipl.-Ing. Lisa Tolsdorf
478 TU Dresden – Professur für Straßenbau
479 Georg-Schumann-Straße 7
480 01187 Dresden
481 lisa.tolsdorf@mailbox.tu-dresden.de

482
483 Prof. Dr.-Ing. Paul Gustav Bolz
484 TH Deggendorf – Professur Verkehrswegebau
485 Dieter-Görlitzer-Platz 1
486 94469 Deggendorf
487 paul.bolz@th-deg.de

488

489 Dipl.-Inf. Uwe Reinhardt
490 TU Dresden – Professur für Straßenbau
491 Georg-Schumann-Straße 7
492 01187 Dresden
493 uwe.reinhardt@tu-dresden.de

494
495 Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Zeißler
496 TU Dresden – Professur für Straßenbau
497 Georg-Schumann-Straße 7
498 01187 Dresden
499 Alexander.zeissler@tu-dresden.de

500
501 Dr.-Ing. habil. Sabine Leischner
502 TU Dresden – Professur für Straßenbau
503 Georg-Schumann-Straße 7
504 01187 Dresden
505 sabine.leischner@tu-dresden.de

507 **Bild und Tabellenunterschriften**

508 **Bild 1. Knotennetz (schwarze Knoten - Randbedingungen, weiße Knoten -**
509 **Anfangsbedingungen, graue Knoten - Berechnungspunkte für die Temperatur).**

510 Fig. 1.: Network representation (black knots - boundary conditions, white knots - initial
511 conditions, gray knots - calculation points for temperature).

512

513 **Bild 2: Art der Berücksichtigung der Konvektion und der kurz- sowie langwelligen**
514 **Strahlung.**

515 Fig. 2: Type of consideration of convection and short- and long-wave radiation.

516

517 **Bild 5: Temperatursensoren (links) und Wärmeübertragungsanalysator (rechts).**

518 Fig. 3.: Temperature sensors (left) and heat transfer analyzer (right).

519

520 **Bild 4: Vergleich der gemessenen und berechneten Temperaturen an der Unterseite der**
521 **ATS, Messzeitpunkt 6:00 Uhr (a) und 15:00 Uhr (b).**

522 Fig. 4.: Comparison of measured and calculated temperatures on the bottom of the ATS,
523 measurement times 6:00 a.m. (a) and 3:00 p.m. (b).

524

525 **Bild 5: Schematische Darstellung des Befestigungsaufbaus bei der MLFT Methode**

526 Fig. 5.: Schematic representation of the pavement structure in the MLFT method

527

528 **Bild 6: Vergleich der mit dem mechanischen Modell erzielten Ergebnisse und der in [25]**
529 **berichteten Ergebnisse bei einer Temperatur von 30°C und einer Geschwindigkeit von 72**
530 **km/h.**

531 Fig. 6.: Comparison of the results achieved with the mechanical model and the results reported
532 in [25] at a temperature of 30°C and a speed of 72 km/h.

Under Review at "Bauingenieur"