

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

5 *Autoren: E. Kamratowsky<sup>1</sup>, A. Picht<sup>1</sup>, L. Tolsdorf<sup>1</sup>, P. G. Bolz<sup>2</sup>, U. Reinhardt<sup>1</sup>, S. Leischner<sup>1</sup>, A.*

6 *Zeißler<sup>1</sup> und G. Canon Falla<sup>1</sup>*

7 *<sup>1</sup>Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden*

8 *<sup>2</sup>Technische Hochschule Deggendorf, Dieter-Görlitz-Platz 1, 94469 Deggendorf*

### 9 **Zusammenfassung**

10 Durch Klima- und Verkehrsbelastung steigt die Beanspruchung von Straßenbefestigungen. Die  
11 derzeitige rechnerische Dimensionierung in Deutschland nach den RDO Asphalt berücksichtigt  
12 diese Einflüsse nur unzureichend. An der TU Dresden wurde ein thermo-viskoelastisches Modell  
13 entwickelt, das das Verhalten von Asphalt realistischer berücksichtigt. Ergebnisse zeigen, dass  
14 die prognostizierte Nutzungsdauer hinsichtlich Ermüdungsrisssbildung oft deutlich geringer ist  
15 als bei RDO-Ansätzen, besonders bei niedrigeren Geschwindigkeiten der Fahrzeuge sowie bei  
16 präziserer Berücksichtigung des Temperaturverlaufs in den Asphaltsschichten. Es hat sich gezeigt,  
17 dass die Berücksichtigung des viskoelastischen Verhaltens von Asphalt bei Geschwindigkeiten  
18 unter 80 km/h die Lebensdauer der Asphaltbefestigungen hinsichtlich Ermüdungsrisssbildung  
19 erheblich verringert. Daher sollte zukünftig das thermo-viskoelastische Verhalten bei der  
20 rechnerischen Dimensionierung von Asphaltbefestigungen insbesondere mit hohem  
21 Verkehrsaufkommen und Staupotenzial berücksichtigt werden.

22 **Stichwörter:** Asphaltbauweise, rechnerische Dimensionierung, thermo-viskoelastisches Modell

### 23 **Thermo-viscoelastic material model for the mechanical**

### 24 **empirical design of asphalt pavements in Germany - Part 2**

#### 25 **Abstract**

26 It is evident that climate change and the increasing traffic volume are having a detrimental effect  
27 on pavements, resulting in elevated levels of thermal and mechanical stress. The current

28 mechanistic pavement design procedure in Germany according to the RDO Asphalt, accounts  
29 for these influences only incompletely. A thermo-viscoelastic model has been developed at TU  
30 Dresden that considers the behavior of asphalt more realistically. Results show that the service  
31 life of asphalt pavements regarding fatigue cracking is often significantly lower than calculated  
32 with RDO Asphalt approaches, especially at lower vehicle speeds and with a more precise  
33 consideration of the temperature profile in the asphalt layers. It has been shown that considering  
34 the viscoelastic behavior of asphalt leads to a substantial reduction in the pavement life with  
35 regard to fatigue cracking at speeds below 80 km/h. Therefore, in the future, the thermo-  
36 viscoelastic behavior should be taken into account in the mechanistic asphalt pavement design  
37 process, particularly for high traffic volumes and low traffic speed.

## 38 **1 Einleitung**

39 Aufgrund der prognostizierten Steigerung des Schwerverkehrsanteils sowie der Erhöhung der  
40 Achslasten wird die Beanspruchung der Straßenbefestigung durch den Verkehr in den nächsten  
41 Jahren weiter zunehmen [1]. Durch die Auswirkung des Klimawandels werden sich ebenfalls die  
42 klimatischen Beanspruchungen erhöhen [2]. Dementgegen werden Straßenbefestigung aus  
43 Asphalt in Deutschland hauptsächlich basierend auf empirischen Erkenntnissen dimensioniert.  
44 Die Festlegung der Schichtdicken der gebundenen und ungebunden Schichten erfolgt unter  
45 Anwendung der Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen - RStO  
46 12/24 [3]. Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit der eingesetzten Materialien erfolgt dabei  
47 nur indirekt über ihre Zusammensetzung und wenige limitierte Prüfverfahren. Für einen  
48 nachhaltigen und ressourcenschonenden Einsatz der Baustoffe sowie für die Sicherstellung eines  
49 dauerhaften und sicheren Verkehrsnetzes ist es notwendig die Asphaltsschichten entsprechend  
50 ihrer Beanspruchung in der Befestigung zu konzipieren und die Schichtdicken rechnerisch zu  
51 dimensionieren [4].

52 Bei den Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen in  
53 Asphaltbauweise - RDO Asphalt 09/24 werden materialtechnische und stochastisch abgesicherte  
54 Kennwerte für die Dimensionierung der Straßenbefestigung aus Asphalt verwendet [5]. So wird  
55 durch die Verwendung der Hauptkurve und der Ermüdungsfunktion der Asphaltgemische in der  
56 rechnerischen Dimensionierung das Materialverhalten berücksichtigt. Für die Eingangsdaten der  
57 thermischen Beanspruchung werden die Verteilung der Oberflächentemperatur und die  
58 normierten charakteristischen Temperaturprofile (ncT) verwendet. Diese ncT sind das Ergebnis

59 statistischer Auswertung und thermischer Simulationen, die die Temperaturen in den  
60 Asphaltsschichten über eine Näherungslösung abschätzt. Insbesondere durch die Auswirkungen  
61 des Klimawandels und der Entwicklung neuartiger und leistungsfähiger Materialien ist es von  
62 großer Bedeutung die realen thermischen Eigenschaften der Materialien und die spezifischen  
63 klimatischen Bedingungen bei der rechnerischen Dimensionierung zu berücksichtigen [6, 7].  
64 Eine weitere Vereinfachung des Verfahrens stellt die Verwendung der Multilayer Elastic Theory  
65 (MLET) dar. Dadurch werden u. a. das viskoelastische Materialverhalten von Asphalten oder  
66 dynamische Belastungseffekte resultierend aus der Fahrzeuggeschwindigkeit und -bewegung  
67 sowie die Wechselwirkung zwischen Reifen und Fahrbahn vernachlässigt [8].  
68 Aus diesen Gründen wurden an der TU Dresden Ansätze zur Berücksichtigung des  
69 viskoelastischen bzw. des thermo-viskoelastischen Materialverhaltens von Asphalt entwickelt.  
70 Das thermische Modell berücksichtigt die reale Temperaturverteilung in der Straßenbefestigung  
71 unter Einbeziehung der thermischen Eigenschaften der Asphaltgemische. Das mechanische  
72 Modell berücksichtigt die viskoelastischen Effekte der Asphaltgemische aufgrund der  
73 Verkehrsdynamik. Beide Modelle wurden im ersten Teil der Veröffentlichung ausführlich  
74 erläutert und diskutiert. Im vorliegenden zweiten Teil der Veröffentlichung werden  
75 Dimensionierungsbeispiele vorgestellt, um die Auswirkungen der neuen Ansätze auf die  
76 Nutzungsdauer der Straßenbefestigung zu bestimmen und die Ergebnisse zu vergleichen. Die  
77 hier dargestellten Forschungsergebnisse sind Teil des von der DFG finanzierten  
78 Sonderforschungsbereiches/Transregio 339 in welchem die TU Dresden in Zusammenarbeit mit  
79 der RWTH Aachen ein mehrdimensionales, digitales Abbild von Fahrzeug, Reifen und Fahrbahn  
80 als „Digitalen Zwilling Straße“ entwickelt [9].

## 81 **2 Dimensionierungsbeispiel**

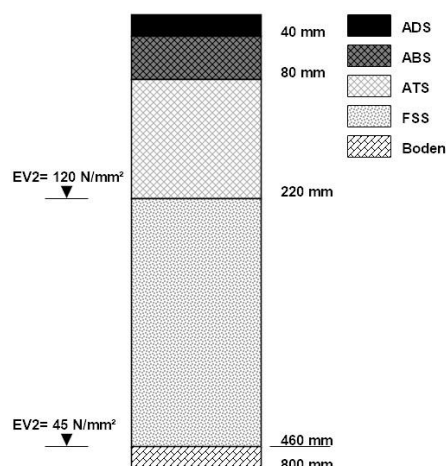
82 Zu dem Zweck der Bestimmung des Einflusses der beiden Modelle auf die prognostizierte  
83 Nutzungsdauer wird der Ermüdungszustand einer Referenz-Asphaltbefestigung, welcher gemäß  
84 den RDO Asphalt dimensioniert wurde, mit drei Szenarien verglichen. Im ersten Szenario wird  
85 der Einfluss der verwendeten Temperaturprofile (thermisches Modell und ncT) in der  
86 Straßenbefestigung auf die Nutzungsdauer verglichen. Das zweite Szenario untersucht, wie die  
87 Berücksichtigung des viskoelastischen Materialverhaltens die Ergebnisse im Vergleich zum  
88 traditionellen linear-elastischen Ansatz beeinflusst. Im dritten Szenario werden sowohl die  
89 tatsächliche Temperaturverteilung als auch der viskoelastische Effekt berücksichtigt (Tabelle 1).

Beispiel ID	Temperaturverteilung	Materialmodell
B: RDO-Asphalt	13 Oberflächentemperaturen x 12 ncT = 156	linear elastisch
B: Thermo	1 Temperaturverteilung pro Stunde x 24 Stunden pro Tag x 365 Tage pro Jahr = 8760	linear elastisch
B: Visco	13 Oberflächentemperaturen x 12 ncT = 156	Asphalt - linear viskoelastisch Boden, FSS - linear elastisch
B: Thermo-Visco	1 Temperaturverteilung pro Stunde x 24 Stunden pro Tag x 365 Tage pro Jahr = 8760	Asphalt - linear viskoelastisch Boden, FSS - linear elastisch

91 **Tabelle 1: Dimensionierungsbeispiele**

92 **2.1 Befestigungsaufbau**

93 Für alle Dimensionierungsbeispiele wurde ein frostsicherer Oberbau von 80 cm gewählt. Dieser  
 94 umfasst drei Asphalt-schichten und eine Frostschutzschicht (FSS) (**Bild 1**). Vollständiger  
 95 Schichtenverbund wird zwischen den Asphalt-schichten angenommen. Zwischen  
 96 Asphalttragschicht (ATS) und FSS sowie zwischen der FSS und dem Planum wird kein  
 97 Schichtenverbund modelliert.



98

99 **Bild 1: Referenzbefestigung für alle Dimensionierungsbeispiele.**

## 100 2.2 Berechnungsmodell

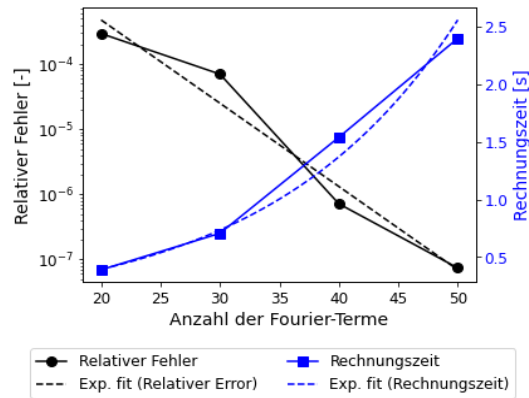
101 Die Berechnungen der Beanspruchungen aus Verkehr wurden für alle  
102 Dimensionierungsbeispiele mit dem mechanischen Modell durchgeführt. Dafür wurden  
103 zunächst die Schichten des Aufbaus in die tatsächliche Schichtdicke unterteilt. Zusätzlich  
104 wurden die einzelnen Asphaltsschichten in weitere Unterschichten unterteilt, um das  
105 Temperaturprofil innerhalb des Oberbaus orts- und zeitdiskret modellieren zu können. Für die  
106 hier vorgestellte Analyse wurden die Asphaltdeckschicht (ADS) und die Asphaltbinderschicht  
107 (ABS) in 1 cm dicke Subschichten unterteilt. Für die ATS wurde eine Subschichtdicke von 2 cm  
108 gewählt.

109 Das Modell besteht somit aus 25 Subschichten, 4 Schichten für die ADS, 8 Schichten für die  
110 ABS, 11 Schichten für die ATS, 1 Schicht für die FSS und 1 Schicht für den Untergrund. Diese  
111 Anzahl von Schichten erhöht die Rechenzeit erheblich. Daher ist es wichtig, ein optimales  
112 Verhältnis zwischen der Genauigkeit der Ergebnisse und der Rechenzeit zu finden.

113 Um diese Herausforderung zu bewältigen, wurde versucht, die Berechnungszeit durch  
114 Parallelisierung der einzelnen Berechnungsschritte zu verringern. Das mechanische Modell  
115 wurde in Fortran programmiert. Auf diese Weise konnte die Rechenlast auf mehrere Kerne  
116 verteilt werden, was die Effizienz erheblich steigerte. So konnte bei der Nutzung von vier Kernen  
117 eine Zeitersparnis von etwa 25 % erzielt werden. Die Genauigkeit der Ergebnisse des  
118 Mehrschichtenmodells hängt dabei eng mit der Anzahl der Fourier-Terme zusammen, die zur  
119 Beschreibung der Last verwendet werden. Im Allgemeinen führt die Verwendung von mehr  
120 Termen zu einer präziseren Darstellung der Belastung. Diese höhere Genauigkeit geht jedoch  
121 mit einem höheren Rechenaufwand und einer längeren Rechenzeit einher. Daher ist eine  
122 sorgfältige Auswahl der Anzahl der Fourier-Terme von entscheidender Bedeutung. Zu wenige  
123 Terme können zu einer unzureichenden Darstellung der Belastung führen, was fehlerhafte  
124 Spannungs- und Dehnungsberechnungen zur Folge hat. Andererseits kann die Verwendung zu  
125 vieler Terme zwar die Genauigkeit verbessern, aber das Gibbs'sche Phänomen verschärfen und  
126 die Berechnungszeit erheblich verlängern. Um das optimale Gleichgewicht zwischen der Anzahl  
127 der Fourier-Terme, der Genauigkeit und der Berechnungszeit zu finden, wurde eine Studie  
128 durchgeführt, die in **Bild 2** dargestellt ist. Der relative Fehler, definiert gemäß Gleichung (1),  
129 wurde zur dabei Quantifizierung der Genauigkeit verwendet.

$$\text{Relativer Fehler} = \frac{|\epsilon_N - \epsilon_{ref}|}{|\epsilon_{ref}|} \quad (1)$$

130 Dabei sind  $\epsilon_N$  die horizontale Dehnung an der Unterseite der ATS, die mit N Fourier-Termen  
 131 berechnet wird, und  $\epsilon_{ref}$  der Referenzwert, welcher mit 250 Fourier-Termen berechnet wird.



132

133 **Bild 2: Auswirkungen der Anzahl der Fourier-Terme auf die Genauigkeit und die**  
 134 **Berechnungszeit des mechanischen Modells.**

135 Auf der Grundlage dieser Analyse wurden 42 Fourier-Terme als Optimum gewählt, wobei der  
 136 relative Fehler unter dem gewählten Grenzwert von 1E-6 ist. Die Berechnungszeit beträgt für  
 137 diese Konfiguration etwa 1,52 Sekunden.

### 138 2.3 Materialien

139 In den Beispielen „B: RDO-Asphalt“ und „B: Thermo“ wird das Elastizitätsmodul der  
 140 Asphaltmaterialien als temperaturabhängig und linear elastisch angenommen, wie in Gleichung  
 141 (2) und Tabelle 2 dargestellt. In Übereinstimmung mit den RDO-Asphalt-09/24 wird das  
 142 Elastizitätsmodul für eine Frequenz von 10 Hz bestimmt. Die für diese Beispiele ausgewählten  
 143 Materialien entsprechen den in der RDO-Asphalt-09/24 definierten Kalibrierasphalten.

$$|E^*(f, T)| = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + e^{(b_1 \cdot x^* + b_0)}} \quad (2)$$

$$x^* = \log_{10} \left( e^{\left( m \cdot \left( \frac{1}{T+273,15} - \frac{1}{T_R+273,13} \right) \right)} \cdot f \right)$$

144 Dabei sind  $E_0$  das statische Elastizitätsmodul (in MPa),  $E_\infty$  das Glasmodul (in MPa),  $|E|$  steht für  
 145 den absoluten Elastizitätsmodul (in MPa),  $T_R$  ist die Referenztemperatur (in °C),  $T$  die  
 146 Temperatur (in °C),  $f$  die Frequenz (in Hz),  $m$  ein Parameter für den Temperaturshift und  $b_1$   
 147 sowie  $b_0$  Regressionsparameter.

148

Schicht	$E_{\infty}$ [MPa]	$E_0$ [MPa]	$b_0$ [-]	$b_1$ [-]	$m$ [-]	$f$ [Hz]	$T_r$ [°C]
ADS	27830	0	2,3571	-0,7476	25000	10	20
ABS	31608	0	1,8773	-0,7860	25000	10	20
ATS	29053	0	2,2713	-0,6706	25000	10	20

149 **Tabelle 2: Parameter der Gleichung (2) für die Beispiele RDO und Thermo.**

150 In den Beispielen „B: Visco“ und „B: Thermo-Visco“ werden die Asphaltmaterialien als linear  
 151 viskoelastisch betrachtet, wobei das 2S2P1D-Modell verwendet wird. Um die Vergleichbarkeit  
 152 mit den linearelastischen Beispielen zu gewährleisten wurden die Parameter des 2S2P1D-  
 153 Modells [10] so kalibriert, dass sie der in Gleichung (2) beschriebenen E-Modul-Beziehung  
 154 entsprechen. Damit das viskoelastische Verhalten genau erfasst werden konnte, war es außerdem  
 155 notwendig, eine Beziehung zwischen dem Elastizitätsmodul und dem Phasenwinkel,  
 156 herzustellen. Diese Beziehung wurde mit Hilfe von Gleichung (3) in das Modell integriert und  
 157 einheitlich auf alle Asphaltsschichten angewendet [11].

$$\phi(f, T) = -0,3990(-3,3674 + \log_{10}(|E^*(f, T)|))^2 + 0,5107 \quad (3)$$

158 Die Materialparameter des 2S2P1D-Modells wurden mithilfe eines Optimierungsalgorithmus  
 159 bestimmt, der die Werte des dynamischen Elastizitätsmoduls, nach Gleichung (2), und des  
 160 Phasenwinkels, nach Gleichung (3), berechnet sowie den entsprechenden Fehler zwischen dem  
 161 viskoelastischen Modell und den Werten der Gleichung minimiert. Die Methode des Least  
 162 Absolute Relative Error (LARE) wurde verwendet, um durch Minimierung der folgenden  
 163 Fehlerfunktion (Gleichung (4)) das bestmögliche Parameterset zu ermitteln:

$$\chi_{LARE}^2 = \sum_{j=1}^n \left( \left| \frac{|E^*| - |\overline{E^*}|}{|E^*|} \right| + \left| \frac{|E^*| - |\overline{E^*}|}{|\overline{E^*}|} \right| \right) + \sum_{j=1}^n \left( \left| \frac{\phi - \bar{\phi}}{\phi} \right| + \left| \frac{\phi - \bar{\phi}}{\bar{\phi}} \right| \right) \quad (4)$$

164 Dabei ist  $\chi_{LARE}^2$  der Least Absolute Relative Error (LARE), der verwendet wird, um die  
 165 Übereinstimmung des 2S2P1D-Modells mit den Gleichungen (2) und (3) zu bewerten. Die  
 166 Variable n bezeichnet die Gesamtzahl der verglichenen Datenpunkte.  $|E^*|$  bezieht sich auf das  
 167 mit Gleichung (2) bestimmten dynamischen Elastizitätsmodul an jedem Datenpunkt, während  
 168  $|\overline{E^*}|$  das dynamische Elastizitätsmodul des 2S2P1D-Modells darstellt. Ebenso ist  $\phi$  der mit  
 169 Gleichung (3) bestimmte Phasenwinkel an jedem Datenpunkt, und  $\bar{\phi}$  der mit dem 2S2P1D-  
 170 Modell erhaltene Phasenwinkel. Der Index j wird verwendet, um die spezifischen Datenpunkte  
 171 zu kennzeichnen, die von 1 bis n reichen.

172 Die optimalen Parameter des 2S2P1D-Modells sind für jede Asphalt­schicht in Tabelle 3  
173 angegeben.

Schicht	$E_{\infty}$ [MPa]	$E_0$ [MPa]	$\delta$ [-]	$k$ [-]	$h$ [-]	$\tau_0$ [-]	$\beta$ [-]	$C_1$ [-]	$C_2$ [°C]	$T_r$ [°C]
ADS	27876	331	2,2251	0,2945	0,4974	2,833E-3	247,0	27	230	20
ABS	31476	276	1,9866	0,2777	0,527	14,52E-3	557,5	27	230	20
ATS	28166	272	2,2251	0,2709	0,4925	2,80E-3	442,1	27	230	20

174 **Tabelle 3: Optimierte 2S2P1D-Modellparameter für die verschiedenen Asphalt­schichten.**

175 Die E-Moduln der FSS und des Untergrunds werden dagegen in allen Beispielen als  
176 temperaturunabhängig und linear elastisch angesehen. Die Werte sind in Tabelle 4 angegeben.  
177 Die Quer­dehnzahl werden für alle Asphalt­schichten entsprechend der Vorgaben den RDO  
178 Asphalt 09/24 auf 0,35 und für die FSS und den Boden auf 0,5 festgelegt.

Materialbezeichnung	E-Modul [MPa]
FSS	143
Boden	45

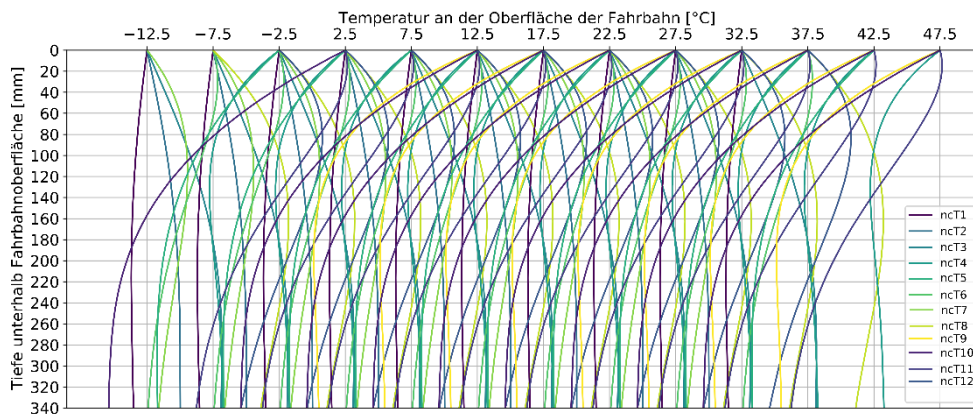
179 **Tabelle 4: Elastizitätsmodul der FSS und des Bodens**

## 180 2.4 Temperaturzustand

181 Bei den Beispielen „B: RDO-Asphalt“ und „B: Visco“ werden die  $n_cT$  zur Ermittlung der  
182 Temperaturverteilung in der Straßenbefestigung verwendet. Dieser Ansatz ist das  
183 Standardverfahren der RDO-Asphalt-09/24. Die  $n_cT$  können laut Kayser [12] theoretisch bei  
184 jeder Oberflächentemperatur auftreten. Aufgrund der angewandten Methode zur Bestimmung  
185 der  $n_cT$  stellt diese eine Vereinfachung zur Bestimmung der tatsächlichen Temperaturverläufe  
186 innerhalb des Straßenaufbaus dar.

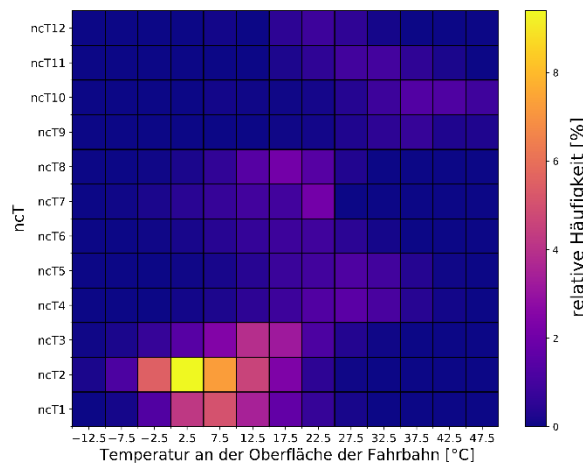
187 Den Dimensionierungsbeispielen wird eine Asphaltbefestigung in der Nähe von Dresden zu  
188 Grunde gelegt, die in die KiST-Zone Nr. 3 fällt [13]. Für diese KiST-Zone werden die  
189 Temperaturzustände innerhalb der Befestigung durch eine Kombination aller  $n_cT$  bestimmt, die  
190 bei Oberflächentemperaturen zwischen  $-12,5^{\circ}\text{C}$  und  $47,5^{\circ}\text{C}$  ausgewertet werden, wie in **Bild 3**  
191 zu sehen ist. **Bild 4** zeigt die zugehörige Häufigkeitsverteilung der einzelnen  $n_cT$  für alle  
192 Oberflächentemperaturen der KiST-Zone 3. Es ist weiterhin zu erkennen, dass nicht jedes  
193 Temperaturprofil bei jeder Oberflächentemperatur auftritt. Außerdem ist ersichtlich, dass die

194 Beiträge der ncT 1, 2 und 3 überwiegen, während die Auftrittswahrscheinlichkeiten der anderen  
195 ncT minimal sind.



196

197 **Bild 3: ncT-Verteilung innerhalb des Asphaltbefestigung [14].**



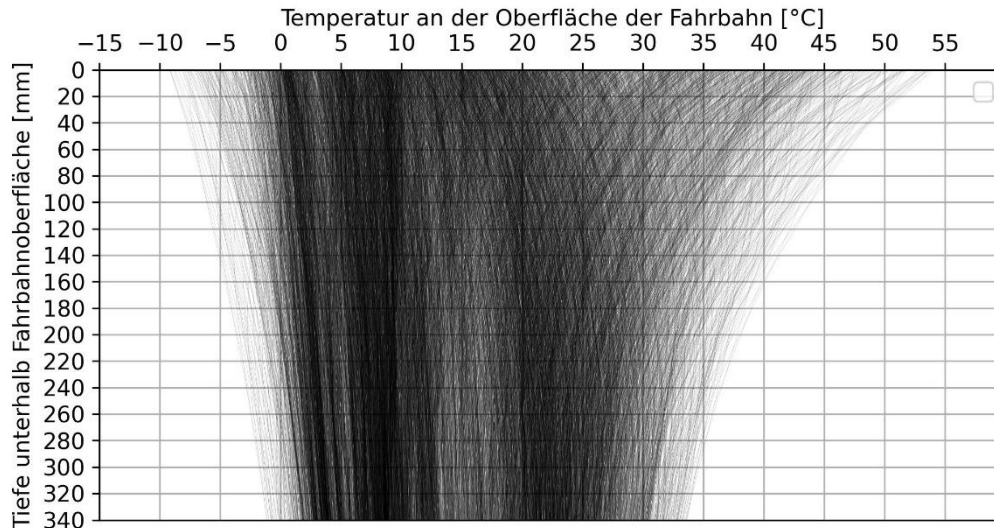
198

199 **Bild 4: Häufigkeitsverteilung der normierten charakteristischen Temperaturprofile für**  
200 **KiST-Zone Nr. 3 [13].**

201 In den Beispielen „B: Thermo“ und „B: Thermo-Visco“ wird die Temperaturverteilung innerhalb  
202 der Befestigung unter Berücksichtigung des Einflusses der klimatischen Bedingungen und der  
203 thermischen Eigenschaften der Materialien bestimmt. Das thermische Modell wurde eingesetzt,  
204 um die Temperatur in der Befestigung mit Hilfe von Klimadaten der Wetterstation Dresden  
205 Klotzsche zu berechnen. Diese Daten umfassen stündliche Messungen von Lufttemperatur,  
206 Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit, Bewölkung und Luftdruck für das Jahr 2023. Die zuvor  
207 bestimmten thermischen Materialparameter, die in Tabelle 2 aufgeführt sind, wurden ebenfalls  
208 in der weiteren Analyse verwendet.

209 Die Ergebnisse der thermischen Simulationen sind in **Bild 5** dargestellt, welches die  
210 Temperaturverteilungsfunktionen innerhalb der Befestigung für das gesamte Jahr 2023 zeigt.

211 Insgesamt sind 8,760 verschiedene Temperaturverläufe dargestellt, die jeweils einer Stunde des  
212 Jahres entsprechen. Im Vergleich zu den  $n_cT$  liefert das thermische Modell eine genauere  
213 Darstellung der Temperaturbedingungen innerhalb der Befestigung und ermöglicht ein klareres  
214 und detaillierteres Verständnis der Temperaturzustände unter realistischeren Bedingungen.

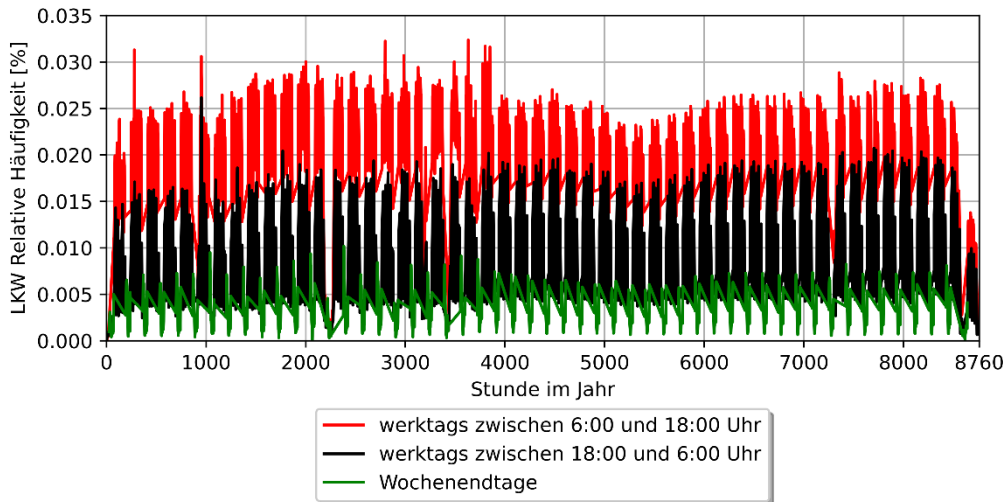


215  
216 **Bild 5: Stündliche Temperaturverteilungsfunktionen für das Jahr 2023 innerhalb der**  
217 **Straßenbefestigung unter Verwendung der Klimadaten einer Wetterstation in Dresden**  
218 **Klotzsche und der thermischen Materialparameter.**

219 Alle Temperaturfunktionen weisen die gleiche relative Häufigkeit auf, sie beträgt 0,011415%  
220 (=100%/8760). Die Berücksichtigung dieser Häufigkeit zur Prognose der Nutzungsdauer setzt  
221 voraus, dass das Verkehrsvolumen gleichmäßig über alle Stunden des Jahres verteilt ist. Es ist  
222 bekannt, dass das Verkehrsvolumen während der Nachtstunden geringer ist als zu den  
223 Hauptverkehrszeiten, ebenso tritt an Feiertagen und Wochenenden weniger Verkehr auf als an  
224 Werktagen. Um diese Diskrepanz zu beheben, wurde die stündliche Häufigkeitsverteilung für  
225 jede Temperaturfunktion durch die stündliche Verkehrsverteilung auf dem  
226 Hauptverkehrsstreifen entsprechend der Messung über ein Jahr ersetzt. Diese Verkehrsdaten  
227 wurden aus der Datenbank der Bundesanstalt für Straßenwesen entnommen.

228 **Bild 6** zeigt die relative stündliche Häufigkeit des Schwerverkehrs auf der Bundesautobahn A13,  
229 gemessen über das Jahr 2021 an einer automatischen Dauerzählstelle bei Radeburg. Diese  
230 Station wurde ausgewählt, weil die klimatischen Bedingungen an diesem Standort mit den  
231 klimatischen Bedingungen vergleichbar sind, die für die thermischen Berechnungen verwendet  
232 wurden und der gewählte Befestigungsaufbau für das Verkehrsvolumen einer Bundesautobahn  
233 geeignet ist. **Bild 6** lässt erkennen, dass das maximale Verkehrsvolumen während der

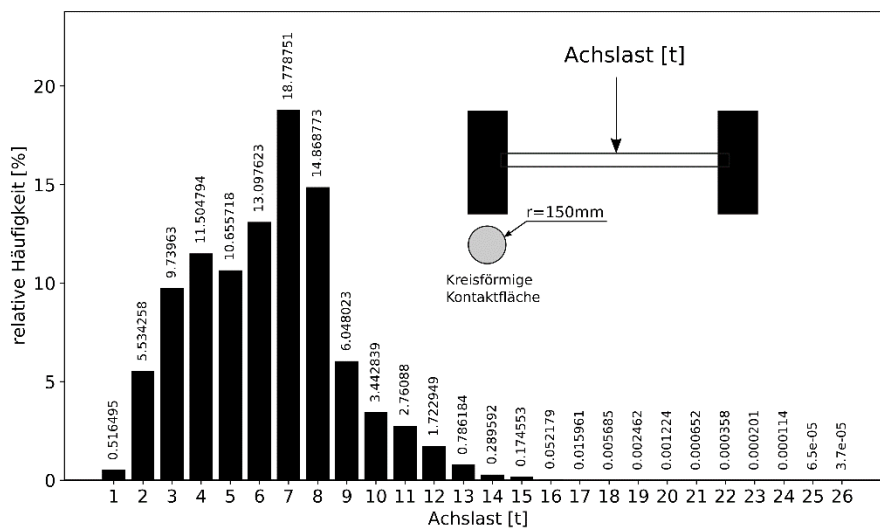
234 Tagesstunden an Wochentagen auftritt (rot), während es in den Nachtstunden deutlich abnimmt  
235 (schwarz). Außerdem wird das geringste Verkehrsaufkommen an den Wochenendtagen  
236 verzeichnet (grün).



237  
238 **Bild 6: Relative Häufigkeit von LKWs auf der Bundesautobahn A13 bei Radeburg,**  
239 **gemessen im Jahr 2021 [15].**

## 240 2.5 Verkehrsbelastung

241 Die Verkehrsbelastung wird durch, die in **Bild 7** dargestellte, repräsentative Achslastverteilung  
242 berücksichtigt. Diese Verteilung entspricht dem Fernverkehr auf deutschen Bundesautobahnen  
243 [14]. Die Radkontaktspannungsverteilung der Achslast wurde unter der Annahme einer  
244 Einzelachse mit Super-Single-Reifen ermittelt. Für eine solche Konfiguration kann die  
245 Radaufstandsfläche als kreisförmig mit einem Radius von 150 mm angenommen werden.



246  
247 **Bild 7: Repräsentative Achslastverteilung, die zur Berücksichtigung der Verkehrs-**  
248 **belastung verwendet wird.**

## 249 2.6 Transferfunktion

250 Im ME-Dimensionierungsverfahren für Straßenbefestigungen beschreibt die Transferfunktion  
251 eine mathematisch abgeleitete Beziehung, mit der berechnete strukturelle Kenngrößen wie  
252 Spannungen, Dehnungen oder Verformungen mit der Anzahl der Lastwechsel bis zum Versagen  
253 (bezeichnet als  $N_{zul}$ ) korreliert werden. Solche Transferfunktionen bilden die Grundlage vieler  
254 gängiger Dimensionierungsansätze, da sie eine Bewertung der strukturellen Nutzungsdauer in  
255 Bezug auf wiederkehrende Beanspruchungen ermöglichen – etwa die Ausbildung von  
256 Spurrinnen oder die ermüdungsbedingte Rissbildung an der Unterseite der Asphalttragschicht.  
257 Daher ist eine präzise Kalibrierung und Auswahl geeigneter Transferfunktionen ein wesentlicher  
258 Bestandteil der ME-basierten Dimensionierung. Ziel ist es, Schäden frühzeitig zu  
259 prognostizieren und durch eine angepasste Schichtdickenwahl sowie Materialauswahl präventiv  
260 zu minimieren.

261 Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Erweiterung der thermo-viskoelastischen Modelle für  
262 die rechnerische Dimensionierung. Daher wurden für die Berechnung die Materialparameter der  
263 Hauptkurve und Ermüdungsfunktion der Kalibrierasphalte verwendet [16]. Daraus leitet sich die  
264 Ermüdungsfunktion der ATS wie in Gleichung 5 ab:

$$N_{zul} = 1100 \cdot 2,8283 \cdot \epsilon_{VL}^{-4,195} \quad (5)$$

265 Dabei sind  $\epsilon_{VL}$  die Zugdehnung in der Belastungsachse an der Unterseite der ATS  
266 (Nachweispunkt in **Bild 1**), 2,8283 und 4,195 sind Materialparameter, die mit dem Spaltzug-  
267 Schwellversuch an kalibriertem Asphalt bestimmt wurden, und 1100 ein Anpassungsfaktor für  
268 den gewählten Oberbau.

269 Es ist wichtig zu beachten, dass die Transferfunktionen aufgrund ihrer empirischen Natur  
270 lediglich für bestimmte Randbedingungen gelten. Dies sind die Schichtdicken der  
271 Asphaltsschichten, die klimatischen Bedingungen sowie die verwendeten Materialien usw.  
272 Insbesondere wurde Gleichung (5) für kalibrierte Asphaltmaterialien unter den aus den ncT  
273 abgeleiteten Klimabedingungen entwickelt. Der Anpassungsfaktor von 1100 wurde festgelegt,  
274 um diesen spezifischen Bedingungen gerecht zu werden. Solche Einschränkungen müssen vor  
275 der Bewertung der Ergebnisse der vorliegenden Beispiele berücksichtigt werden, da die hier  
276 verwendeten klimatischen Bedingungen von denen abweichen, die zur Kalibrierung der  
277 Übertragungsfunktion verwendet wurden.

## 2.7 Ermüdungsstatus der Asphaltbefestigung

Um die Nutzungsdauer der Befestigung abzuschätzen, muss die inkrementelle Schädigung berechnet werden, der sogenannte Ermüdungsstatus (ES), welcher die Akkumulation der Ermüdungsschäden im Laufe der Zeit abbildet.

Der Ermüdungsstatus im Jahr  $n$  kann durch Gleichung (6) berechnet werden, welche die Summe einer geometrischen Progression über die Nutzungsdauer der Befestigung beschreibt. Der erste Term ist die Miner-Summe des ersten Jahres ( $\sum \text{MINER}$ ). Jeder nachfolgende Term wächst um eine konstante Rate  $r$ , die den jährlichen Anstieg des Verkehrsvolumens repräsentiert. Wenn der ES weniger als 100% beträgt, kann davon ausgegangen werden, dass die Straßenbefestigung die geplante Nutzungsdauer erreicht. Ist der ES-Wert jedoch größer als 100%, ist mit einem vorzeitigen Versagen der Befestigung aufgrund von Ermüdungsrissen in der ATS zu rechnen. Liegt dieser Wert deutlich unter 100%, wurde der Oberbau zu konservativ ausgelegt und eine Reduzierung der Schichtdicke ist möglich.

$$ES_n = \frac{\sum \text{MINER}}{r} \cdot ((1 + r)^n - 1) \cdot 100\% \quad (6)$$

Die Miner-Summe für das erste Jahr wird wie folgt berechnet: die Summe der erwarteten Achslasten wird für eine bestimmte Kombination von Verkehrs- und Temperaturbedingungen, durch die Anzahl der Lastzyklen bis zum Versagen für dieselbe Kombination von Verkehrs- und Temperaturbedingungen geteilt:

$$\sum \text{MINER} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \frac{N_{\text{vorh},i,j}}{N_{\text{zul},i,j}} \quad (7)$$

Dabei sind  $i$  die Nummer der Temperaturverteilung innerhalb der Straßenbefestigung: ( $i = 156$  für die Beispiele "B: RDO-Asphalt" und "B: Visco"; und  $i = 8760$  für die Beispiele "B: Thermo" und "B: Thermo-Visco"),  $j$  ist die Anzahl der Achslasten ( $j = 26$ , siehe Bild 7),  $N_{\text{zul},i,j}$  ist die mit Hilfe der Transferfunktion ermittelte Anzahl der Lastwechsel bis zum Versagen für die Kombination  $i, j$  aus Verkehrslast  $j$  und Klimabedingung  $i$  und  $N_{\text{vorh},i,j}$  ist die Anzahl der erwarteten Lastwechsel im ersten Jahr für eine gegebene Kombination von Verkehrslast  $j$  und klimatischen Bedingungen  $i$ .  $N_{\text{vorh},i,j}$  kann wie folgt bestimmt werden:

$$N_{\text{vorh},i,j} = A\ddot{U} \cdot H_i \cdot H_j \quad (8)$$

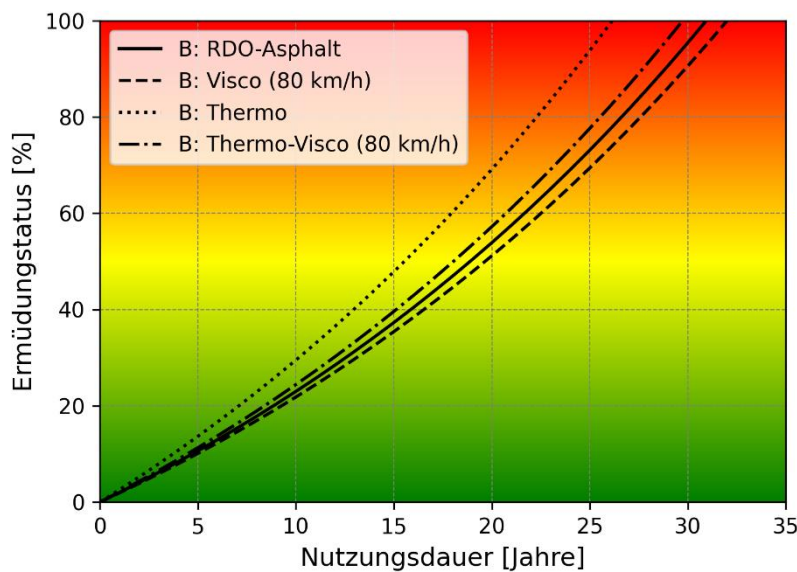
302 Dabei ist  $H_i$  die Häufigkeit jeder Temperaturbedingung (Bild 4 für die Beispiele "B:  
303 RDOAsphalt" und "B: Visco" und Bild 6 für die Beispiele "B: Thermo" und "B: Thermo-  
304 Visco").

305  $H_j$  ist die Frequenz der bewerteten Achslasten (Bild 7).  $A\ddot{U}$  stellt die erwarteten Achsübergänge  
306 für das erste Jahr dar. Für die betrachteten Beispiele wurde  $A\ddot{U}$  nach den Richtlinien der RStO  
307 12 [3] berechnet, wobei ein durchschnittlich täglicher Verkehr von 25000 Fahrzeugen, ein  
308 Schwerverkehrsanteil von 21%, ein Achszahlfaktor von 4,5 und ein Fahrstreifenfaktor von 0,45  
309 angenommen wurden. Diese Werte ergeben die folgende Anzahl an Achsübergängen:

$$310 A\ddot{U} = 25000 \times 0,21 \times 4,5 \times 0,45 \times 365 = 3.880.406 \text{ LKW/Jahr}$$

## 311 2.8 Ergebnisse

312 Die prognostizierte Nutzungsdauer der Straßenbefestigung für die vier Beispiele ist in Bild 8  
313 dargestellt. Der Ermüdungszustand wurde unter Verwendung von Gleichung (6) mit einer  
314 jährlichen Verkehrszuwachsrate von 3% ( $r = 0,03$ ) bestimmt. Für die beiden Beispiele, bei denen  
315 die Asphaltmaterialien als viskoelastisch modelliert wurden, wurde die  
316 Verkehrsgeschwindigkeit von 80 km/h angesetzt. Diese Geschwindigkeit wurde gewählt, um  
317 einen direkten Vergleich mit den linear-elastischen Beispielen zu ermöglichen, bei denen das  
318 Elastizitätsmodul mit einer Frequenz von 10 Hz bestimmt wurde. Nach den deutschen  
319 Richtlinien entspricht diese Frequenz einer Verkehrsgeschwindigkeit von etwa 80 km/h.



320

321 **Bild 8: Ermüdungszustand an der Unterseite der ATS in Abhängigkeit von der**  
322 **Nutzungsdauer für die vier Beispiele.**

323 Es ist zu erkennen, dass die berechnete Nutzungsdauer der Straßenbefestigung bis zum Versagen  
324 durch Ermüdung (d.h. ein Erreichen des Ermüdungszustandes von 100%) für Beispiel "B:  
325 Thermo" etwa 16% geringer als die für Beispiel "B: RDO-Asphalt" ist. Der berechnete  
326 Unterschied in der Nutzungsdauer der Befestigung zwischen diesen beiden Beispielen lässt sich  
327 auf mehrere Faktoren zurückführen. Erstens wurde in Beispiel "B: Thermo" die  
328 Temperaturverteilung innerhalb der Straßenbefestigung mit Hilfe des thermischen Modells  
329 berechnet, die sich von der mit dem ncT-Modell ermittelten Temperatur unterscheidet. Dieser  
330 Unterschied ist von Bedeutung, da die Temperatur in der Befestigung, insbesondere tagsüber,  
331 wenn die Temperaturen am höchsten sind, die Ermüdungsrate stark beeinflussen kann. Darüber  
332 hinaus wurde den Hauptverkehrszeiten in Beispiel "B: Thermo", die typischerweise tagsüber  
333 auftreten, wenn die Temperaturen in der Befestigung am höchsten sind, größere Bedeutung  
334 beigemessen. Diese stärkere Gewichtung während der kritischen Stunden könnte den  
335 Ermüdungsprozess beschleunigen. Ein weiterer möglicher Einflussfaktor ist der  
336 Anpassungsfaktor, der bei der Berechnung der zulässigen Anzahl von Lastzyklen Anwendung  
337 findet. Dieser wurde ursprünglich unter den Annahmen der ncT Bedingungen kalibriert und  
338 berücksichtigt daher nicht die realen thermomechanischen Belastungsbedingungen des Beispiels  
339 „B: Thermo“, was zu einer systematischen Unterschätzung bzw. Überschätzung der  
340 Ermüdungslebensdauer führen kann.

341 Der Vergleich zwischen Beispiel "B: Visco" bei 80 km/h und Beispiel "B: RDO-Asphalt" zeigt,  
342 dass beide Dimensionierungsmethoden ähnliche Ergebnisse liefern, mit nur 3% Unterschied in  
343 der Nutzungsdauer. Die Ergebnisse für das Beispiel „B: Visco" sollten mit Bedacht interpretiert  
344 werden, da sie möglicherweise durch unsichere oder unzureichend verlässliche Faktoren  
345 beeinflusst werden. Dies ist besonders wichtig, weil der Nachweispunkt in beiden Fällen direkt  
346 unter der Radachse gewählt wurde. Im linear-elastischen Fall treten die maximalen Dehnungen  
347 tatsächlich direkt unter der Belastungsachse auf. Im linear viskoelastischen Fall verschieben sich  
348 die maximalen Dehnungen jedoch in Richtung der Verkehrsbelastung. Infolgedessen kann die  
349 Lage der maximalen Dehnung im LVE-Fall nicht mit der im LE-Fall übereinstimmen, was zu  
350 möglichen Diskrepanzen in der Ermüdungsanalyse führt.

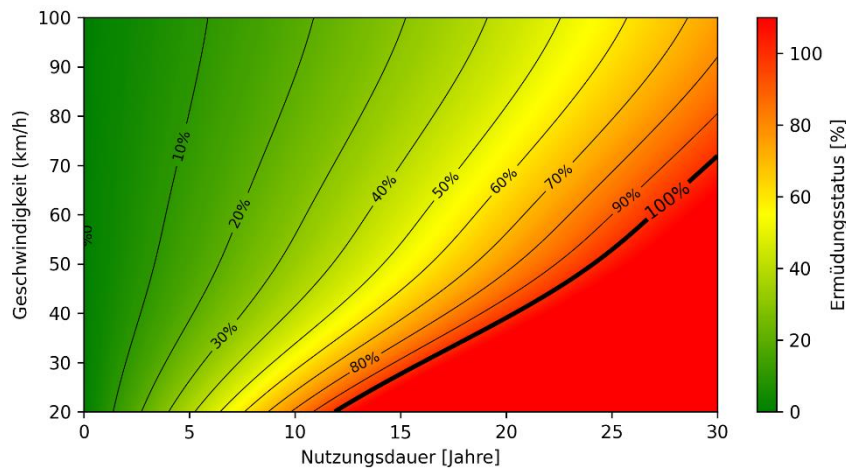
351 Die Verwendung der maximalen Dehnung zur Berechnung der Nutzungsdauer der  
352 Straßenbefestigung im LVE-Modell stellt jedoch eine große Herausforderung dar. Im LVE-  
353 Modell verschiebt sich der Ort der maximalen Dehnung im Laufe der Zeit aufgrund der

354 viskoelastischen Eigenschaften des Materials, die von der Verkehrsgeschwindigkeit und der  
355 Temperatur beeinflusst werden. Diese Variabilität bedeutet, dass die maximale Dehnung nur  
356 unzuverlässig mit einem Ermüdungsversagen in Verbindung gebracht werden kann. Die  
357 Ermüdung ist per Definition ein kumulativer Schädigungsprozess, der von der wiederholten  
358 Berücksichtigung von Spannung oder Dehnung an einem festen Punkt abhängt. Beim LVE-  
359 Modell tritt die maximale Dehnung jedoch nicht immer an derselben Stelle auf. Folglich stellt  
360 die variierende Position der maximalen Dehnung im LVE-Modell keinen geeigneten  
361 Referenzpunkt für die Ermüdungsanalyse dar, was die genaue Bewertung der Nutzungsdauer  
362 erschwert.

363 Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass die Prognose der Nutzungsdauer der Befestigung unter  
364 der Annahme einer konstanten Verkehrsgeschwindigkeit von 80 km/h durchgeführt wurde.  
365 Diese Annahme weicht erheblich von den realen Bedingungen ab. Die Verkehrsgeschwindigkeit  
366 kann aufgrund von Faktoren wie Stau, unterschiedlichen Geschwindigkeitsbegrenzungen und  
367 Fahrerverhalten stark schwanken. In der Realität halten die Fahrzeuge selten über längere  
368 Zeiträume eine konstante Geschwindigkeit ein. Diese Geschwindigkeitsschwankungen können  
369 die Beanspruchungen in der Straßenbefestigung verändern, was zu einem anderen  
370 Ermüdungsverhalten führen kann als bei einem Modell, das eine konstante Geschwindigkeit  
371 voraussetzt. Zur Berücksichtigung des Einflusses der Verkehrsgeschwindigkeit auf die  
372 Nutzungsdauer zeigt **Bild 9** die Ergebnisse für das Beispiel „B: Visco“, ausgewertet für  
373 Verkehrsgeschwindigkeiten im Bereich von 20 km/h bis 100 km/h. Die Analyse verdeutlicht,  
374 dass die Verkehrsgeschwindigkeit einen signifikanten Einfluss auf die prognostizierte  
375 Nutzungsdauer der Straßenbefestigung hat. So ergibt sich bei einer Geschwindigkeit von 20  
376 km/h eine rechnerische Nutzungsdauer von etwa 12 Jahren, während bei 80 km/h eine deutliche  
377 Erhöhung auf ca. 30 Jahre berechnet wird.

378 Die Ergebnisse, die unter der Annahme einer konstanten Verkehrsgeschwindigkeit von 80 km/h  
379 gewonnen wurden, liefern zwar wertvolle Erkenntnisse, doch ist dieser Ansatz mit  
380 Unsicherheiten behaftet. Prognosen, die unter dieser Annahme gemacht werden, können die  
381 dynamische Natur des realen Verkehrs nicht vollständig erfassen, was zu einer Über- oder  
382 Unterschätzung der tatsächlichen Nutzungsdauer der Straßenbefestigung führen kann. Obwohl  
383 die Annahme einer konstanten Geschwindigkeit das Modell vereinfacht, führt sie zu einem  
384 gewissen Grad an Unschärfe, welcher bei der Interpretation der Ergebnisse beachtet werden

385 muss. Um diese Unschärfen zu verringern, ist es unerlässlich, eine Reihe von  
386 Verkehrsgeschwindigkeiten zu berücksichtigen oder probabilistische Methoden einzubeziehen,  
387 die die Variabilität der Verkehrsgeschwindigkeit berücksichtigen.



388

389 **Bild 9: Auswirkung der Verkehrsgeschwindigkeit auf den Ermüdungszustand an der**  
390 **Unterseite der ATS, bewertet anhand des Beispiels B: Visco bei Geschwindigkeiten von 20**  
391 **km/h bis 100 km/h.**

### 3 Zusammenfassung

393 Aufgrund der klimatischen Veränderungen und der zunehmenden Verkehrsbelastungen steigen  
394 die thermischen und mechanischen Beanspruchungen in der Straßenbefestigung, wobei die  
395 derzeitige Verfahrensweise in Deutschland zur Dimensionierung von Asphaltbefestigungen nach  
396 den RDO Asphalt diese Einflüsse nur unzureichend berücksichtigen. An der TU Dresden wurde  
397 aus diesem Grund Verfahrensweisen entwickelt, welches das thermo-viskoelastische Verhalten  
398 von Asphalt in der rechnerischen Dimensionierung realistischer zu berücksichtigen. Die  
399 Ergebnisse zeigen, dass eine präzisere Berücksichtigung des Temperaturverlaufs in den  
400 Asphaltsschichten sowie niedrigere Verkehrsgeschwindigkeiten als 80 km/h bei Modellierung  
401 des viskoelastischen Materialverhaltens die Nutzungsdauer von Asphaltbefestigungen  
402 hinsichtlich Ermüdungsrisssbildung verringern können. Aus diesem Grund sollte das zukünftig  
403 das thermo-viskoelastische Verhalten bei der Dimensionierung von Asphaltbefestigungen  
404 insbesondere mit hoher Verkehrsbelastung und bei Staupotenzial berücksichtigt werden.

### 4 Literatur

406 [1] Bundesministerium für Verkehr: Verkehr in Zahlen 2024/2025, 53. Ausgabe 2024.

- 407 [2] *Jacob, D.*: REMO CLIMATE OF THE 20th CENTURY RUN, UBA PROJECT, 0.088  
408 DEGREE RESOLUTION, RUN NO. 006210, 1H DATA. World Data Center for Climate  
409 (WDCC) at DKRZ, 2005.
- 410 [3] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsausschuss*  
411 *Dimensionierung*: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von  
412 Verkehrsflächen RStO 12/24. FGSV, Der Verlag, Köln, 2024.
- 413 [4] *Masad, E.; Scarpas, A.*: Toward a Mechanistic Approach for Analysis and Design of  
414 Asphalt Pavements. *In: International Journal of Geomechanics* 7 (2007), Heft 2, S. 81-82.  
415 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2007\)7:2\(81\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2007)7:2(81)).
- 416 [5] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsgruppe*  
417 *Infrastrukturmanagement*: Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des  
418 Oberbaus von Verkehrsflächen in Asphaltbauweise – RDO Asphalt 09/24, FGSV R 1  
419 Heft 498, FGSV Der Verlag, Köln, 2024.
- 420 [6] *Zhang, C.; Tan, Y.; Gao, Y. et al.*: Resilience assessment of asphalt pavement rutting  
421 under climate change. *In: Transportation Research Part D: Transport and Environment*  
422 109 (2022), S. 103395. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103395>.
- 423 [7] *Meagher, W.; Daniel, J.S.; Jacobs, J. et al.*: Method for Evaluating Implications of  
424 Climate Change for Design and Performance of Flexible Pavements. *In: Transportation*  
425 *Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2305 (2012), Heft 1, S.  
426 111-120. <https://doi.org/10.3141/2305-12>.
- 427 [8] *Kleizienė, R.; Vaitkus, A.; Čygas, D.*: Influence of asphalt visco-elastic properties on  
428 flexible pavement performance. *In: The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*  
429 11 (2016), Heft 4, S. 313-323. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2016.36>.
- 430 [9] *Kaliske, M.; Oeser, M.; Wollny, I. et al.*: Welchen Weg nimmt die „Straße der Zukunft“?  
431 – Digitalisierung der Straße im Sonderforschungsbereich/Transregio 339 „Digitaler  
432 Zwilling Straße“. *In: Bauingenieur* 97 (2022), 01-02, S. 29-37.  
433 <https://doi.org/10.37544/0005-6650-2022-01-02-61>.
- 434 [10] *Md. Yusoff, N.I.; Mounier, D.; Marc-Stéphane, G. et al.*: Modelling the rheological  
435 properties of bituminous binders using the 2S2P1D Model. *In: Construction and Building*  
436 *Materials* 38 (2013), S. 395-406. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.038>.

- 437 [11] *Alexander Zeißler*: Untersuchungen zum spannungsabhängigen Materialverhalten von  
438 Asphalt. Dresden, Germany, Technische Universität Dresden, PhD Thesis, 2014.
- 439 [12] *Sascha Kayser*: Grundlagen zur Erfassung klimatischer Einflüsse für  
440 Dimensionierungsrechnungen von Asphaltbefestigungen. Dresden, Technische  
441 Universität Dresden, Dissertation, 2007.
- 442 [13] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsgruppe*  
443 *Infrastrukturmanagement*: Arbeitspapier Eingangsgrößen für die Dimensionierung und  
444 Bewertung der strukturellen Substanz AP EDS: Teil 2, Klima. FGSV, Köln, 2022-.
- 445 [14] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsgruppe*  
446 *Infrastrukturmanagement*: Arbeitspapier Eingangsgrößen für die Dimensionierung und  
447 Bewertung der strukturellen Substanz – AP EDS-1, FGSV W 2498, 2, FGSV Der Verlag,  
448 Köln, 2023.
- 449 [15] *Bundestanstalt für Straßen- und Verkehrswege*: BASt - Automatische  
450 Straßenverkehrszählung - Automatische Zählstelle 2021, 2021,  
451 [https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-](https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Daten/2021_1/Jawe2021.html?nn=1819490&cms_filter=true&cms_str=A13&cms_land=14&cms_map=0)  
452 [verkehrszaehlung/Daten/2021\\_1/Jawe2021.html?nn=1819490&cms\\_filter=true&cms\\_str](https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Daten/2021_1/Jawe2021.html?nn=1819490&cms_filter=true&cms_str=A13&cms_land=14&cms_map=0)  
453 [=A13&cms\\_land=14&cms\\_map=0](https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Daten/2021_1/Jawe2021.html?nn=1819490&cms_filter=true&cms_str=A13&cms_land=14&cms_map=0) [Zugriff am: 01.07.2025].
- 454 [16] *Alexander Zeißler*: Grundlagen zur Struktur- und Materialoptimierung von  
455 Asphaltbefestigungen. Dresden, Germany, Technische Universität Dresden, Habilitation,  
456 2021.

## 457 Danksagung

458 Die Autorinnen und Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung der DFG SFB/TRR  
459 339, Projekt ID 45359608.

## 460 Autorenangaben

461 Dipl.-Ing. Erik Kamratowsky  
462 TU Dresden – Professur für Straßenbau  
463 Georg-Schumann-Straße 7  
464 01187 Dresden  
465 erik.kamratowsky@tu-dresden.de  
466

467 Dr.-Ing. habil. Sabine Leischner  
468 TU Dresden – Professur für Straßenbau  
469 Georg-Schumann-Straße 7  
470 01187 Dresden

471 sabine.leischner@tu-dresden.de  
472  
473 Dipl.-Ing. Artur Picht  
474 TU Dresden – Professur für Straßenbau  
475 Georg-Schumann-Straße 7  
476 01187 Dresden  
477 artur.picht@tu-dresden.de  
478  
479 Dipl.-Ing. Lisa Tolsdorf  
480 TU Dresden – Professur für Straßenbau  
481 Georg-Schumann-Straße 7  
482 01187 Dresden  
483 lisa.tolsdorf@mailbox.tu-dresden.de  
484  
485 Prof. Dr.-Ing. Paul Gustav Bolz  
486 TH Deggendorf – Professur Verkehrswegebau  
487 Dieter-Görlitzer-Platz 1  
488 94469 Deggendorf  
489 paul.bolz@th-deg.de  
490  
491 Dipl.-Inf. Uwe Reinhardt  
492 TU Dresden – Professur für Straßenbau  
493 Georg-Schumann-Straße 7  
494 01187 Dresden  
495 uwe.reinhardt@tu-dresden.de  
496  
497 Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Zeißler  
498 TU Dresden – Professur für Straßenbau  
499 Georg-Schumann-Straße 7  
500 01187 Dresden  
501 Alexander.zeissler@tu-dresden.de  
502  
503 Dr.-Ing. Gustavo Canon Falla  
504 TU Dresden – Professur für Straßenbau  
505 Georg-Schumann-Straße 7  
506 01187 Dresden  
507 gustavo\_adolfo.canon\_falla@tu-dresden.de  
508  
509

## 510 **Bild und Tabellenunterschriften**

### 511 **Bild 1. Referenz-Asphaltbefestigung für alle Dimensionierungsbeispiele**

512 Fig. 1. Reference asphalt pavement for all design examples

### 513 **Bild 2. Auswirkungen der Anzahl der Fourier-Terme auf die Genauigkeit und die**

### 514 **Berechnungszeit des mechanischen Modells**

515 Fig. 2. Effects of the number of Fourier terms on the accuracy and calculation time in the  
516 mechanical model

517 **Bild 3. ncT-Verteilung innerhalb des Asphaltbefestigung**

518 Fig. 3. ncT distribution within the road pavement

519 **Bild 4. Häufigkeitsverteilung der normierten charakteristischen Temperaturprofile für**

520 **KiST-Zone Nr. 3 [13]**

521 Fig. 4. Distribution of normalized characteristic temperature profiles for KiST zone no. 3 [3]

522 **Bild 5. Relative Temperaturverteilungsfunktionen für das Jahr 2023 innerhalb der**

523 **Straßenbefestigung unter Verwendung der Klimadaten einer Wetterstation in Dresden**

524 **Klotzsche und der thermischen Materialparameter**

525 Fig. 6. Hourly temperature distribution functions for the year 2023 within the road pavement

526 using climate data from a weather station in Dresden Klotzsche and the material thermal

527 parameters

528 **Bild 6. Stündliche Häufigkeit von LKWs auf der Bundesautobahn A13 bei Radeburg,**

529 **gemessen im Jahr 2021**

530 Fig. 6. Hourly frequency of trucks on the A13 federal highway near Radeburg, measured in

531 2021

532 **Bild 7. Repräsentative Achslastverteilung, die zur Berücksichtigung der Verkehrs-**

533 **belastung verwendet wird**

534 Fig. 7. Representative axle load distribution used to take traffic load into account

535 **Bild 8. Ermüdungszustand an der Unterseite der ATS in Abhängigkeit von der**

536 **Nutzungsdauer für die vier Beispiele**

537 Fig. 8. Fatigue status on the bottom of the asphalt base layer as a function of the service life for

538 the four examples

539 **Bild 9. Auswirkung der Verkehrsgeschwindigkeit auf den Ermüdungszustand an der**

540 **Unterseite der ATS, bewertet anhand der Beispiele B: Visco bei Geschwindigkeiten von**

541 **20 km/h bis 100 km/h**

542 Fig. 9. Effect of traffic speed on the fatigue condition on the bottom of the asphalt base layer,

543 evaluated using examples B: Visco at speeds from 20 km/h to 100 km/h

544

545 **Tabelle 1. Übersicht über die Dimensionierungsbeispiele**

546 Table 1. Overview of the design examples

547 **Tabelle 2. Parameter der Gleichung (2) für die Beispiele RDO und Thermo**

548 Table 2. Parameters of equation 2 for the examples RDO and Thermo

549 **Tabelle 3. Optimierte 2S2P1D-Modellparameter für die verschiedenen Asphaltsschichten**

550 Table 3. Optimal 2S2P1D model parameters for the different asphalt layers

551 **Tabelle 4. Elastizitätsmodul der FSS und des Bodens**

552 Table 1. E-Modulus of the frost protection layer and the subsoil

Under Review at "Bauingenieur"