



SCHRIFTENREIHE

Institut für Straßenwesen

Technische Universität Braunschweig

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Arand

STRASSENWESEN

Peter Pohlmann

**Simulation von
Temperaturverteilungen und
thermisch induzierten
Zugspannungen in Asphaltstraßen**

Heft 9

Braunschweig, 1989

Inhaltsverzeichnis

	Seite	
1	Einleitung und Aufgabenstellung	1
2	Behandlung des Problems in der Literatur	4
2.1	Verhalten von Asphalten bei tiefen Temperaturen	4
2.2	Ermittlung von Fahrbahntemperaturen	16
2.3	Berechnung von thermisch bedingten Zugspannungen	24
3	Ermittlung von Jahresganglinien für meteorologische Meßgrößen	33
3.1	Fremdentwicklungen	34
3.2	Eigenentwicklungen	38
3.2.1	Vorüberlegungen	38
3.2.2	Datenbeschaffung und Auswertung	43
3.2.3	Relative Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit	52
3.2.4	Globalstrahlung und Lufttemperatur	54
4	Berechnung von Oberflächentemperaturganglinien von Asphaltbefestigungen aus meteorologischen Einflußgrößen	58
4.1	Wärmehaushalt an der Straßenoberfläche	58
4.2	Differenzenverfahren	62
4.3	Eingangsgrößen für die Rechnung	66
4.4	Darstellung der Ergebnisse und Prüfung auf Plausibilität	79
5	Berechnung von Temperaturganglinien in Asphaltbefestigungen bei bekanntem Oberflächentemperaturgang	88
6	Ermittlung von thermisch induzierten Zugspannungen in Asphaltbefestigungen in Abhängigkeit von der Temperatur und dem zeitlichen Temperaturgradienten sowie der Viskosität des Bindemittels	95
6.1	Vorüberlegungen	95
6.2	Vorgehensweise bei der Ermittlung kryogener Spannungen für vier Laborasphalte	98
6.3	Vorgehensweise bei der Ermittlung kryogener Spannungen für Modellasphalte in Abhängigkeit von der Viskosität der eingesetzten Bindemittel	111
6.4	Darstellung kryogener Spannungen für Labor- und Modellasphalte auf der Grundlage simulierter Asphaltkörpertemperaturen	123
6.5	Darstellung repräsentativer kryogener Spannungen für den Bereich der Asphaltoberfläche	134
7	Zusammenfassung	143
8	Literaturverzeichnis	149

7. Zusammenfassung

Das Gebrauchsverhalten von Asphaltstraßen wird unter anderem durch die Größe und Häufigkeit des Auftretens von thermisch induzierten Spannungen beeinflusst. Diese sogenannten kryogenen Spannungen sind in erster Linie von der Härte des eingesetzten Bindemittels abhängig. Des Weiteren ist ein Einfluß der örtlichen Klimaverhältnisse auf die Entwicklung von kryogenen Spannungen nachweisbar.

Gegenstand dieser Arbeit sind die Erarbeitung von Grundlagen zur Ermittlung von Temperaturganglinien - Bemessungstemperaturganglinien - für gegenüber der Sonneneinstrahlung ungeschirmte asphaltierte Außerortsstraßen und von Ganglinien kryogener Spannungen in Abhängigkeit von der Bindemittelhärte für verschiedene Klimazonen der Bundesrepublik Deutschland.

Die Ermittlung von Oberflächentemperaturganglinien am Asphaltkörper wurde auf der Grundlage des aus der Thermodynamik stammenden Differenzenverfahrens vorgenommen, da numerische Verfahren dieser Art die Berücksichtigung der mehr oder weniger komplizierten Konvektions- und Strahlungsrandbedingungen auch unter Verkehr liegender Asphaltstraßen ermöglichen und zudem Rechenergebnisse von hoher Genauigkeit liefern. Der Einsatz des Differenzenverfahrens erforderte zunächst die Erarbeitung von Jahresganglinien für die meteorologischen Standardmeßgrößen Globalstrahlung, Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und relative Luftfeuchte.

Diese Jahresganglinien wurden jeweils für die drei in den RStO 86 aufgeführten Frosteinwirkungszonen erstellt, die in zusammengefaßter Form den Gebieten gleicher Frostindizes des Winters 1962/63 entsprechen und somit auch als Klimazonen bezeichnet werden können. Für jede der drei Klimazonen wurden über einen Zeitraum von mehreren Jahren stündlich beziehungsweise in Stundensummen aufgezeichnete Standardmeßgrößen von drei meteorologischen Stationen durch den Deutschen Wetterdienst bezogen und

ausgewertet. Parallel dazu wurden auch die sogenannten Test-Referenz-Jahre, die der Deutsche Wetterdienst zur Verfügung stellt, angefordert und für die weitere Verarbeitung aufbereitet.

Zur Ermittlung der Jahresganglinien der meteorologischen Meßgrößen wurden zunächst die arithmetischen Mittelwerte und die Standardabweichungen der für jede Klimazone bezogenen Datensätze in Form von 52 wochencharakteristischen Tagesganglinien berechnet. Im Anschluß daran wurde auf der Grundlage dieser Tagesganglinien für jeden Meßwert ein entsprechender standardisierter meteorologischer Meßwert ermittelt. Die Summenkurve dieser standardisierten Meßwerte wurde dann unter Zuhilfenahme eines Zufallsgenerators herangezogen, um die eingangs analysierten meteorologischen Standardmeßgrößen proportional zu der Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens über beliebige Zeiträume simulieren zu können. Die Rekonstruktion der relativen Feuchte und der Windgeschwindigkeit erfolgte dabei unabhängig voneinander, während die Globalstrahlung und die Lufttemperatur in Abhängigkeit voneinander simuliert wurden.

Bei der folgenden Berechnung der Oberflächentemperaturen am Straßenkörper aus den simulierten meteorologischen Meßgrößen wurde für den Sommerzeitraum ein ausgeprägter Einfluß des kurzwelligen Absorptionskoeffizienten ϵ_K und der Verkehrsstärke auf die Temperaturentwicklung an der Asphaltoberfläche festgestellt. Andere Einflußgrößen wie die Wärmeleitfähigkeit λ , die spezifische Wärmekapazität c , die Raumdichte ρ und der langwellige Absorptionskoeffizient ϵ_L treten in ihrer Wirkung so stark zurück, daß sie ohne großen Fehler unberücksichtigt bleiben können. Für den Winterzeitraum zeigte sich, daß Streuungen in allen sechs für die Differenzenrechnung verwendeten Eingangsgrößen ohnehin nur mit einer geringen Beeinflussung der Fahrbahntemperaturen einhergehen. Aus diesem Grund konnte im Rahmen dieser Arbeit ein Modellasphalt mit konstanten Werten für die Raumdichte, die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität vorgegeben werden, für den Fahrbahntemperaturen ermittelt wurden.

Eine einen Zeitraum von zwanzig Jahren umfassende Häufigkeitsverteilung von stündlich auftretenden Fahrbahntemperaturen und Temperaturgradienten an der Asphaltoberfläche hat erkennen lassen, daß sowohl die Anzahl der Stunden mit negativen Oberflächentemperaturen als auch diejenige mit negativen Temperaturgradienten im Temperaturbereich unter 0 °C von der Klimazone I zur Klimazone III in jeder Klasse zunehmen. Die tiefsten absoluten Oberflächentemperaturen traten mit etwa - 22 °C in der Klimazone II auf, während die extremsten negativen Gradienten im Temperaturbereich unter 0 °C mit etwa - 4,5 K/h in der Klimazone III ermittelt wurden. Die Auswertung der in den Klimazonen auftretenden Fahrbahntemperaturen hat bereits angedeutet, daß die thermisch induzierten Spannungen von der Klimazone I zur Klimazone III in ihrer Größe und in der Häufigkeit ihres Auftretens ansteigen müssen.

Eine parallel durchgeführte Berechnung von Oberflächentemperaturen auf der Grundlage der Test-Referenz-Jahre hat ergeben, daß diese den Zufallseinfluß im Wetterlauf nicht in einem wünschenswerten Maß erfassen und zu gemäßigeren Fahrbahntemperaturen führen.

Im Bereich unterhalb der Fahrbahnoberfläche ist es zweckmäßig, die Asphaltkörpertemperaturen mit der Finite-Elemente-Methode zu ermitteln. Die FEM ist im Vergleich zum Differenzenverfahren bei bekanntem Oberflächentemperaturgang flexibler anzuwenden und kann exaktere Rechenergebnisse liefern. Die Analyse der Asphaltkörpertemperaturen mit der FEM hat, wie zu erwarten war, unter anderem ergeben, daß die mittleren Schichttemperaturen im Bereich tiefer Temperaturen von der Straßenoberfläche zur -unterseite zunehmen und die Temperaturgradienten abnehmen. Die größten kryogenen Spannungen müssen also an der Asphaltoberfläche auftreten.

Die Berechnung der kryogenen Spannungen wurde auf der Grundlage der aus dem Maxwell-Modell hervorgegangenen Exponentialfunktion durchgeführt, da durch diesen Ansatz der thermisch induzierte Spannungsaufbau unter Berücksichtigung des Relaxa-

tionsvermögens der Asphalte ermittelt werden kann. Bei bekannten Fahrbahntemperaturen und Vorgabe eines konstanten Elastizitätsmoduls ist unter der Annahme eines ebenfalls konstanten Wärmedehnbeiwertes die Relaxationszeit beziehungsweise die Zugviskosität die einzige unbekannt Variable der Exponentialfunktion.

Der Bestimmung der Zugviskosität von Asphalten, die nach neuesten Erkenntnissen nicht nur von der Temperatur, sondern auch von der Belastungszeit abhängig ist, kommt eine Schlüsselrolle bei der Ermittlung der kryogenen Spannungen zu. Um die Temperatur- und die Spannungsabhängigkeit der Zugviskosität zu berücksichtigen, wurde diese auf der Grundlage der Exponentialfunktion aus experimentell ermittelten kryogenen Spannungsverläufen von vier Laborasphalten zurückgerechnet. In einem Diagramm mit einfach- beziehungsweise doppeltlogarithmischem Maßstab der Achsen zeigte sich unter anderem ein linearer Zusammenhang zwischen Zugviskosität und Temperatur, der funktional beschrieben wurde und zu guten Ergebnissen bei der rechnerischen Rekonstruktion der ursprünglich experimentell ermittelten kryogenen Spannungsverläufe der Laborasphalte führte. Um kryogene Spannungen für eine Vielzahl von Modellasphalten unterschiedlicher Steifigkeit berechnen zu können, wurden zwei Funktionen erstellt, mit deren Hilfe der Zugviskositätsverlauf von Modellasphalten in Abhängigkeit von beliebigen Erweichungspunkten Ring und Kugel der eingesetzten Bindemittel aus dem mittleren Zugviskositätsverlauf von vier Laborasphalten ermittelt werden kann.

Die Berechnung der unter wirklichkeitsgetreuen Temperaturverhältnissen generierten kryogenen Spannungen hat deutlich gemacht, daß selbst steife Asphaltvarianten an extrem kalten Tagen im Winter im Bereich der Mittagsstunden offenbar zu einer vollständigen Spannungsrelaxation an der Asphaltoberfläche in der Lage sind. Der thermisch bedingte Spannungsaufbau und die Relaxationsvorgänge stehen grundsätzlich deutlich in Konkurrenz zueinander. Des weiteren wurde festgestellt, daß sich möglicherweise zum Zeitpunkt des Sonnenaufgangs und des -untergangs kryogene Spannungsspitzen an der Asphaltoberfläche ausbilden.

In tieferen Positionen unterhalb der Fahrbahnoberfläche weisen nur steife Asphaltvarianten thermisch bedingte Spannungen von nennenswerter Größe auf.

Eine Auswertung von kryogenen Spannungen, die im Laufe eines Zeitraums von zwanzig Jahren stündlich an der Asphaltoberfläche auftreten, hat schließlich unter ausreichender Berücksichtigung des Zufallseinflusses im Wetterverlauf aufeinanderfolgender Jahre erstmals Richtwerte geliefert, in welcher Größe und Häufigkeit thermisch induzierte Spannungen in Abhängigkeit von der Bindemittelhärte in den Asphaltstraßen der Bundesrepublik Deutschland im Mittel zu erwarten sind. Es zeigte sich, daß Asphaltvarianten mit stark verhärteten Bindemitteln ab Erweichungspunkten von etwa 70 °C thermisch verursachte Zugspannungen aufweisen können, die die Zugfestigkeit der Asphalte erreichen. Asphaltvarianten mit Bindemitteln mit Erweichungspunkten von 40 °C und weniger werden demhingegen kaum noch durch kryogene Spannungen beansprucht.

Zusammenfassend ist hervorzuheben, daß kryogene Spannungen einen Beitrag zum Auftreten kumulativer Ermüdungsschäden leisten können. Die Gefahr des Auftretens vorzeitiger Ermüdungsschäden wächst dabei mit zunehmender Asphaltsteifigkeit von der Klimazone I zu den Klimazonen II und III deutlich an.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Modell zur Ermittlung von Asphaltkörpertemperaturen und kryogenen Spannungen in Asphaltbefestigungen kann durch Einbeziehung in ein modernes theoretisches Bemessungsverfahren einen Beitrag zur Verhinderung des Auftretens vorzeitiger Ermüdungsrisse und damit zur Verlängerung der Instandsetzungsintervalle leisten. Eine näherungsweise Berechnung repräsentativer kryogener Spannungen kann unter Zuhilfenahme des Test-Referenz-Jahres 11 des Deutschen Wetterdienstes erfolgen, wobei die Rechenergebnisse im Vergleich zu dem in dieser Arbeit vorgestellten Simulationsmodell auf der unsicheren Seite liegen. Neben einer Abschätzung möglicher kryogener Spannungen in den vorgestellten Klimazonen wurde auch eine Grundlage geschaffen, um verkehrslastbedingte Spannungen

temperaturabhängig berechnen zu können, indem der für die elastischen Mehrschichtenprogramme als Eingangsgröße erforderliche dynamische Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von zufallsbedingten Temperaturverläufen angesetzt wird - zum Beispiel mittels eines Rechenprogramms von Francken und Verstraeten (Lit 31, 32).