

Mechanisches Verhalten von Tragschichten ohne Bindemittel

FA 4.184

Forschungsstelle: Technische Universität Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau (Prof. Dr.-Ing. F. Wellner)

Bearbeiter: Numrich, R. / Gleitz, T.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: August 2002

Ziel vorliegender Arbeit ist die Erweiterung der Kenntnisse über das mechanische Verformungsverhalten ungebundener Gesteinskornmische bzw. die Optimierung vorhandener elastischer Stoffmodelle zur Beschreibung des Verhaltens von ToB im Gebrauchslastbereich der Straße. Mit diesen Stoffgesetzen sollen das Spannungs-Verformungsverhalten wirklichkeitsnah beschrieben und eine Grundlage für eine rechnerische Bemessung zur Verfügung gestellt werden. Die vorliegende Arbeit soll dabei helfen, die Eigenschaften ungebundener Gesteinskornmische so weit zu beschreiben, dass mit den Ergebnissen dieser Untersuchungen künftig bei Beanspruchungsberechnungen die ToB realistischer erfasst werden können.

1. Aufgabenstellung

Fahrbahnkonstruktionen unterliegen vielfältigen Beanspruchungen, vornehmlich Belastungen durch den Verkehr sowie Beanspruchungen aus den klimatischen Bedingungen. Diese Beanspruchungen müssen so aufgenommen werden können, dass der Aufbau während des Nutzungszeitraumes den Anforderungen der Verkehrsteilnehmer genügt und zusätzlich die Aufwendungen aus Bau, Betrieb und evtl. erforderlichen Erhaltungsmaßnahmen auf ein Minimum beschränkt werden. Um diesen Forderungen zu genügen, sind Straßenbefestigungen ausreichend zu bemessen. Hierfür sind analytische Bemessungsverfahren bzw. -modelle erforderlich, welche sowohl das Verhalten der verwendeten Baustoffe als auch die Beanspruchungen hinreichend exakt beschreiben. Bei einer solchen analytischen Bemessung wird auf der Grundlage von Berechnungseingangswerten (u.a. Verkehrsbelastung, Materialkennwerte der einzelnen Schichten) mit Hilfe eines Berechnungsverfahrens (Mehrschichtentheorie, Finite-Elemente-Methode (FEM)) die Beanspruchung der Befestigung ermittelt. Der Nachweis zur Festlegung der Schichtdicken erfolgt durch den Vergleich der berechneten (vorhandenen) Beanspruchungen mit zulässigen Werten unter Berücksichtigung bestimmter Sicherheitsniveaus. Voraussetzung ist jedoch die Kenntnis des Spannungs-Verformungsverhaltens der einzubauenden Schichten. Vor allem bei flexiblen Bauweisen beeinflussen die Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) die Tragfähigkeit der gesamten Konstruktion.

Im Gegensatz zu fast allen europäischen Ländern hat sich aber in Deutschland ein rechnerisches Bemessungsverfahren bisher nicht durchgesetzt. Als ein wesentlicher Grund dafür ist anzunehmen, dass das Verformungsverhalten der Straßenbaustoffe rechnerisch sehr schwierig zu erfassen ist. Kriterien für eine rechnerische Bemessung sind die Einhaltung von zulässigen Spannungen bzw. Dehnungen in den Schichten und an den Schichtgrenzen der Befestigungen.

Tragschichtmaterialien verhalten sich in unterschiedlichen Beanspruchungsbereichen nach unterschiedlichen Gesetzmäßigkeiten. In der Literatur werden die Grenzwerte an den Übergängen der einzelnen Bereiche als "SHAKEDOWN-Limits" bezeichnet. Die Größe dieser Grenzbeanspruchung kann derzeit noch nicht exakt angegeben werden, sie könnte jedoch als Gültigkeitsgrenze für die Anwendung elastischer Stoffgesetze und als Bemessungskriterium dienen.

Die Auswertung verschiedener Forschungsarbeiten zeigt, dass bei Anwendung von nichtlinear-elastischen Stoffgesetzen ein wesentlich anderer Beanspruchungszustand in Straßenbefestigungen berechnet wird, als bei Annahme konstanter Verformungskennwerte (lineare Elastizität). Die Differenzen können bis zu 400% betragen, was zu vollständig anderen Aussagen bezüglich des Langzeit- und Ermüdungsverhaltens der Befestigungen und auch der Entstehung von Spurrinnen führen kann.

2. Untersuchungsmethodik

Zur Untersuchung der o. g. Zielstellung sind folgende Schritte bearbeitet worden:

1. Eine umfangreiche Literaturrecherche zum aktuellen Kenntnisstand über das mechanische Verhalten von ToB wurde durchgeführt. Die aus der Literatur bekannten Stoffmodelle sind zusammenfassend dargestellt worden. Weiterhin konnten anhand der Literaturlauswertung Erkenntnisse zu allen wesentlichen Einflussfaktoren auf das Spannungs-Verformungsverhalten von ToB zusammengestellt werden.
2. Zur Ermittlung der Bereichsgrenzen nach der SHAKEDOWN-Theorie wurden in einem parallel laufenden Projekt, finanziert durch die DFG, dynamische Triaxialversuche an vier verschiedenen Gesteinskornmischen (Kiessand, Diabas, Granodiorit, Recycling-Betonschotter) mit unterschiedlichen Hauptspannungsverhältnissen σ_1/σ_3 bei vier Zellspannungen durchgeführt. Auf der Grundlage dieser Versuchsergebnisse kann das elastische bzw. plastische Verformungsverhalten von Gesteinskornmischen in drei verschiedene Bereiche unterteilt werden, in denen ein unterschiedliches Materialverhalten zu beobachten ist.
3. Um eine Vorstellung über realistische Spannungszustände in Straßenoberbauten nach den RStO 01 zu erhalten, wurden mit dem Mehrschichtenprogramm BISAR auf der Grundlage der Annahme linearer Elastizität Beanspruchungsberechnungen für verschiedene Befestigungen nach Tafel 1 der RStO 01 durchgeführt und Spannungen, Dehnungen sowie Einsenkungen an verschiedenen Positionen des Systems in der Lastachse ermittelt. Außerdem sollten die so ermittelten Spannungen mit den zuvor bestimmten Bereichsgrenzen für unterschiedliches Materialverhalten (SHAKEDOWN-Limits) verglichen werden, um Aussagen zu bekommen, ob die im Straßenkörper in den ToB vorhandenen Spannungen dem Bereich A (elastisches SHAKEDOWN-Verhalten) zugeordnet werden können. Die Asphalttschichten wurden vereinfachend zu einem Modellasphaltpaket zusammengefasst, d.h. die unterschiedliche Asphaltzusammensetzung für Deck-, Binder- und Tragschichten blieb für die Ermittlung der Steifigkeit unberücksichtigt.
4. Es wurden anschließend dynamische Triaxialversuche durchgeführt, um aus den Ergebnissen die für nichtlinear-elastische Stoffgesetze nötigen Kennwerte zu ermitteln. Die Versuche wurden an verschiedenen Gesteinskornmischen mit einem Größtkorn von 32 mm durchgeführt. Die Festlegung des Versuchsprogramms erfolgte auf der Grundlage der Erkenntnisse der Literaturrecherche und der ermittelten SHAKEDOWN-Grenzen sowie vorangegangener Forschungsarbeiten. Es

konnten pro Material vier verschiedene Wassergehalte getestet werden, sodass insgesamt ca. 30 Versuchsserien ausgewertet wurden.

- Da die BISAR-Berechnungen unter vereinfachenden Annahmen (Modellasphalt, linear-elastisches Verformungsverhalten) durchgeführt wurden, erfolgten weitere Berechnungen auf der Grundlage der Finite-Elemente-Methode (FEM) zur wirklichkeitsnäheren Erfassung der Beanspruchungen. Dabei wurde das temperaturabhängige Verhalten der einzelnen Asphalt-schichten sowie das nichtlinear-elastische Verhalten der ToB berücksichtigt. Ziel dieser Berechnungen war es, verschiedene Bauweisen nach RStO 01 hinsichtlich ihrer Gleichwertigkeit zu beurteilen.

3. Untersuchungsergebnisse

Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass übereinstimmende Ergebnisse zu einzelnen Einflussfaktoren ermittelt wurden, andererseits stehen aber auch viele Untersuchungsergebnisse in starkem Widerspruch zueinander. Das Materialverhalten wird i.d.R. mit dem Triaxialversuch untersucht. Die Versuchseinrichtungen unterscheiden sich jedoch teilweise grundlegend voneinander, sodass ein Vergleich der Ergebnisse nicht in jedem Falle sinnvoll ist. Anhand der Ergebnisse der durchgeführten Literaturrecherche wurden die Bedingungen für die im Anschluss durchgeführten Triaxialversuche zur Untersuchung des elastischen Spannungs-Verformungsverhaltens von Gesteinskornmischungen festgelegt. Für die Triaxialversuche konnte die Versuchsanlage des Instituts für Straßenbau und Geotechnik der Universität Nottingham genutzt werden.

Die Untersuchungen zur Anwendbarkeit der SHAKEDOWN-Theorie im Straßenbau haben deutlich gemacht, dass bei einem bestimmten Hauptspannungsverhältnis σ_1/σ_3 eine Veränderung im Materialverhalten eintritt. Dabei muss beachtet werden, dass es sich bei den Übergängen zwischen den einzelnen Verhaltensbereichen nicht um "scharfe" Grenzen handelt, sondern um Übergangsbereiche. Interessant ist die Tatsache, dass der Übergang von einem Bereich zum anderen unabhängig vom Betrag der Zellspannung σ_3 bei gleich großen Dehnungen erfolgt. Diese Dehnung scheint ein charakteristischer Materialkennwert zu sein. Für die vier untersuchten Gesteinskornmischungen konnten diese Grenzdehnungen ermittelt werden (materialabhängig zwischen 0,3 und 0,55 %). Die unterschiedlichen Größenordnungen lassen sich durch unterschiedliche granulometrische Eigenschaften der Gesteinskornmischungen begründen. Z. B. ergaben sich die Grenzen zwischen dem Bereich A und B bei den geringsten Spannungen bei diesen Untersuchungen für RC-Betonschotter, d.h. dass das Recyclingmaterial den geringsten Beanspruchungen ausgesetzt werden darf.

Weiterhin lässt sich aus den Ergebnissen entnehmen, dass Stoffgesetze zur Beschreibung des elastischen Spannungs-Verformungsverhaltens von Gesteinskornmischungen auch bereichsweise verschieden formuliert werden müssen. Inwieweit zusätzlich zu Bereich A auch der Bereich B zumindest lokal begrenzt für ToB in Straßenbefestigungen zugelassen werden kann, ist künftig zu untersuchen. Bis gesicherte Kenntnisse zu dieser Problematik vorliegen, sollten in Labor- und Feldversuchen zur Ermittlung der Parameter elastischer Stoffgesetze nur Spannungsverhältnisse angewendet werden, welche im Bereich A liegen. Dementsprechend wurden das Versuchsprogramm und die Spannungswege für die Untersuchungen im Rahmen dieses Projektes festgelegt.

Die Ergebnisse der BISAR-Berechnungen haben gezeigt, dass sich die mit der Mehrschichtentheorie berechneten Spannungsverhältnisse prinzipiell im Bereich A (elastisches SHAKEDOWN-Verhalten) befinden und somit keine Gefahr zu großer plastischer Verformungen besteht. Es ist auch zu erkennen, dass aus dem Vergleich zwischen den vorhandenen Beanspruchungen

und den ermittelten Bereichsgrenzen nur geringe Sicherheitsreserven abzuleiten sind. Die Berechnungen wurden unter Zugrundelegung der zurzeit maximal zugelassenen Achslast von 11,5 t durchgeführt. Berücksichtigt man beispielsweise festgestellte Überschreitungen der zulässigen Achslasten (teilweise bis zu 50 %), so liegen die Beanspruchungen in den ToB der Straßenbefestigungen bereits jetzt oberhalb des SHAKEDOWN-Limits für elastisches Verhalten (Bereich A zu Bereich B). Hier verhalten sich die ToB nicht mehr vorwiegend elastisch, vielmehr können mit steigender Lastwechselzahl die plastischen Verformungen deutlich zunehmen. Die erwartete Lebensdauer der Straßenkonstruktion kann dadurch reduziert werden. Schäden können vorzeitig entstehen, es sei denn, die überbauenden gebundenen Schichten verhindern bleibende Verformungen in den ToB durch Überbrückung der Bereiche mit den kritischen Beanspruchungen. Das muss jedoch bei der Dimensionierung der gebundenen Schichten berücksichtigt werden.

Aus den Ergebnissen der Triaxialversuche lässt sich schlussfolgern, dass der Einfluss des Wassergehaltes auf die deviatorischen Dehnungen generell größer ist als auf die Gesamtdehnungen. Der RC-Beton reagiert am wenigsten anfällig auf Schwankungen des Wassergehaltes. Bei den anderen Gesteinskornmischungen (Brech- oder Rundkorn) kann diesbezüglich keine Reihung vorgenommen werden. Trotzdem kann festgehalten werden, dass eine Erhöhung des Wassergehaltes in ToB um 2 % gegenüber dem natürlichen Wassergehalt (hier angenommen mit w_{opt-3} %) bereits eine Verdoppelung der vertikalen Dehnungen (bzw. Verformungen) bewirken kann. Daraus lässt sich folgern, dass die Entwässerungsmöglichkeiten einer Straßenbefestigung erheblichen Einfluss auf das Verformungsverhalten der ToB und damit der Befestigung haben. Noch größer ist der Einfluss des Wassergehaltes bei Gesteinskornmischungen mit hohem Feinkornanteil. Die Ergebnisse für einen Diabas mit 7 % Anteil an abschlämmbaren Bestandteilen haben bei einer Erhöhung des Wassergehaltes um 0,6 % bereits einen Anstieg der Dehnungen um über 40 % ergeben. Anhand der Untersuchungen ist deutlich geworden, dass Verformungen von ungebundenen Gesteinskornmischungen mit zunehmendem Wassergehalt (von w_{opt-3} bis w_{opt-1}) um bis zu 45 % anwachsen können.

Im Rahmen dieses Projektes wurden aus der Vielzahl bekannter Stoffmodelle nur das anisotrope Boyce-Modell sowie das Dresdner Modell als Erfolg versprechend ausgewählt und weiterverwendet. Damit erfolgten Beanspruchungsberechnungen mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) mit dem Programm FENLAP. An einem Kontinuumsausschnitt konnten mit den Stoffmodellen Vergleichsberechnungen zu gemessenen Verformungen an der Oberfläche von ToB bei Plattendruckversuchen nach dem Wechsellastverfahren durchgeführt werden. Die Triaxialversuche und die Plattendruckversuche wurden an den gleichen Gesteinskornmischungen durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass sich die beste Annäherung der gemessenen und berechneten Verformungen bei Anwendung des Dresdner Modells ergibt. Die Anwendung des Boyce-Modells bzw. des anisotropen Boyce-Modells hat sich als schwierig herausgestellt, da unterschiedliche numerische Methoden zur Parameterbestimmung unterschiedliche Ergebnisse lieferten. Die Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Verformungen konnte bei Anwendung keiner Variante des Boyce-Modells befriedigen.

In einem weiteren Schritt wurden E_{v2} -Werte auf ToB unter der Voraussetzung ermittelt, dass sich darunter ein Boden (Kontinuum) mit einem Elastizitätsmodul $E = 45 \text{ N/mm}^2$ befindet. Bei Anwendung des Dresdner Modells konnte die nach ZTV T-StB 95/98 geforderten E_{v2} -Werte auf den Tragschichten bei Annahme entsprechender Schichtdicken der ToB nachgerechnet werden. Demgegenüber traten bei diesen Berechnungen mit dem Boyce-Modell mit vielen Parametersätzen Konvergenzprobleme während der Berechnung auf. Lediglich mit einigen wenigen Parametersätzen für das Stoffmodell brachten die Berechnungen verwertbare Ergebnisse. Die Berechnung der Beanspruchung einer Befestigung nach den RStO 01 (Zeile 1, Bauklasse SV)

ergab bei Anwendung des Dresdner Modells für die ToB bei hohen Temperaturen auf der Asphaltoberfläche (Sommer-Tag) mehr als doppelt so hohe Vertikalspannungen auf der Frostschutzschicht (FSS) wie die gleiche Berechnung unter Anwendung des Boyce-Modells für die ToB. In Anbetracht dieser und der zuvor angesprochenen Konvergenzprobleme bei den Berechnungen mit dem Boyce-Modell wurde daher festgelegt, dieses Modell im gegenwärtigen Entwicklungsstand für folgende Beanspruchungsberechnungen nicht weiter zu verwenden.

Weiterhin durchgeführte Vergleichsrechnungen für verschiedene Befestigungen nach den RStO 01 bei Annahme linearer und nichtlinearer Elastizität der ToB haben ergeben, dass die Vertikalspannungen auf der ToB bei Anwendung des Dresdner Modells (Nichtlinearität) je nach Temperatur zwischen 53 und 67 % der Ergebnisse bei Annahme linearer Elastizität betragen. Eine pauschale Korrektur der Ergebnisse z. B. mit Faktoren ist jedoch nicht möglich. Die Abweichungen der Ergebnisse treten in unterschiedlicher Größe auf, wie die Auswertung der Ergebnisse von Berechnungen für vier Bauklassen (SV, I, III, VI) gezeigt hat. Daraus ist zu schließen, dass Berechnungen zukünftig nur noch mit der Methode der finiten Elemente unter Zugrundelegung möglichst exakter Stoffmodelle durchgeführt werden sollten.

Eine Gegenüberstellung der Spannungen der Bereichsgrenzen zwischen dem elastischen SHAKEDOWN-Verhalten (Bereich A) und dem plastischen SHAKEDOWN-Verhalten (Bereich B) mit den berechneten Spannungen einer konkreten Asphaltbefestigung nach den RStO 01 für den Temperaturfall Sommer-Tag hat ergeben, dass die berechneten Spannungsverhältnisse in den Bauklassen SV bis II im Bereich A liegen. Ursache hierfür sind die großen Asphaltstärken. Bei diesen Bauweisen ist keine Überbeanspruchung der ToB verbunden mit dem Auftreten plastischer Verformungen zu erwarten. In den unteren Bauklassen ergeben sich jedoch höhere Spannungen. Ab Bauklasse III überschreiten die Spannungen in den ToB die ermittelte Grenze zwischen Bereich A und B. Die Spannungen gehen in einen Bereich über, in dem sich z. B. der getestete Granodiorit nicht mehr rein elastisch verhält. Schäden (Verformungen) können hier bei entsprechend hohen Lastwechselzahlen nicht ausgeschlossen werden.

Die vorgestellten Beanspruchungsberechnungen an Oberbauten nach den RStO 01 wurden mit Materialparametern des Dresdner Stoffgesetzes für die ToB durchgeführt, welche aus den Triaxialversuchen mit natürlichem Wassergehalt ermittelt wurden. Außerdem sind Parametersätze verwendet worden, welche die nach ZTV T-StB 95/98 bzw. ZTV E-StB 94/97 geforderten Verformungsmoduln E_{v2} auf den jeweiligen Schichtoberseiten garantierten. Bereits bei diesen (gleichwertigen) Bedingungen zeigten sich teilweise erhebliche Differenzen in den Beanspruchungen der Befestigungsschichten der verschiedenen Bauweisen (Zeilen) nach Tafel 1 der RStO 01. Es kann davon ausgegangen werden, dass in der Praxis die Unterschiede noch

viel größer ausfallen werden, da nicht immer Gesteinskörnungsmische verwendet werden, welche die Tragfähigkeitsforderungen in gleicher Weise erfüllen.

4. Folgerungen für die Praxis

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit haben deutlich gemacht, dass bei Berechnungen der Beanspruchungen von Straßenbefestigungen bei Annahme konstanter Materialkennwerte (E-Modul, Querdehnzahl) für ToB keine realitätsnahen Berechnungsergebnisse erhalten werden. Für eine rechnerische Bemessung einer Straßenbefestigung ist die genaue Kenntnis und die exakte Beschreibung des Spannungs-Verformungsverhaltens aller Befestigungsschichten zwingend erforderlich.

Es konnten mit den durchgeführten Berechnungen Differenzen in den Beanspruchungen von unterschiedlichen Bauweisen der Tafel 1 nach den RStO 01 aufgezeigt werden, wobei sich die Beanspruchungen der Bauweisen nach den Zeilen 3 und 4 wesentlich von der Bauweise nach Zeile 1 unterscheiden. Durch die größere Asphaltstärke werden die ToB der Bauweise nach Zeile 1 weniger stark beansprucht.

Die vorgestellte Forschungsarbeit kann dabei helfen, die Eigenschaften ungebundener Gesteinskörnungsmische so weit zu beschreiben, dass mit den Ergebnissen dieser Untersuchungen künftig bei Beanspruchungsberechnungen die ungebundenen Tragschichten realistischer erfasst werden können. Es konnte gezeigt werden, dass sich nur bei Annahme nichtlinear-elastischen Verhaltens von Gesteinskörnungsmischen eine gute Übereinstimmung zu den Ergebnissen von Labor- und Feldversuchen ergibt. Linear-elastische Ansätze führen zu unrealistischen Ergebnissen, sodass künftig bei Beanspruchungsberechnungen nur noch Berechnungsverfahren verwendet werden sollten, mit welchen nichtlinear-elastisches Verhalten der verwendeten Materialien berücksichtigt werden kann (z. B. FEM).

Mit Hilfe der dargestellten Zusammenhänge zur SHAKEDOWN-Theorie ist es möglich, Gültigkeitsgrenzen für nichtlinear elastische und plastische Stoffgesetze festzulegen sowie daraus zulässige Grenzen der Beanspruchung für eine Bemessung der Straßenbefestigungen abzuleiten.

Mit der vorgestellten Berechnungsweise nach der Methode der finiten Elemente lassen sich – bei Kenntnis des Materialverhaltens aller Schichten – die Beanspruchungszustände von beliebigen Fahrbahnoberbauten berechnen. Im Hinblick auf künftig vermehrt auf Funktionsbauverträgen basierenden Baumaßnahmen ergibt sich damit eine Möglichkeit, alternative Bauweisen und Standardbefestigungen nach RStO 01 vergleichend gegenüberzustellen. Somit stellen die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen einen weiteren Schritt auf dem Weg zu einer freien Bemessung von Fahrbahnkonstruktionen dar. □