

Einfluss der Verdichtungsrichtung auf das mechanische Verhalten von Asphaltprobekörpern aus walzsegmentverdichteten Platten

Bernhard Hofko, Ronald Blab und Alexander Ringleb

Platten aus Asphaltmischgut, die mit einem Walzsegment-Verdichter hergestellt wurden, finden häufig weitere Verwendung, um daraus Probekörper für Laborprüfungen zu gewinnen. Bei diesen Prüfungen ist jedoch die Relation zwischen Verdichtungs- und Belastungsrichtung nicht dieselbe, wie sie bei der Belastung durch Klima und Verkehr in Straßenbelägen auftritt. Daher wurde in der Studie untersucht, wie sich die Verdichtungsrichtung auf die mechanischen Eigenschaften von walzsegmentverdichteten Probekörpern auswirkt. Dafür wurden gebrauchsvorhaltensorientierte (GVO) Prüfungen im Hochtemperaturbereich zur Ermittlung des Verformungswiderstands, im mittleren Temperaturbereich zur Ermittlung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens und im Tieftemperaturbereich zur Ermittlung der Rissbeständigkeit an einem Binderschichtmaterial durchgeführt. Die Relation zwischen Verdichtungs- und Beanspruchungsrichtung wurde dabei in allen drei Dimensionen systematisch variiert. Es zeigt sich aus den Ergebnissen, dass die mechanischen Eigenschaften signifikant von der Anisotropie des Materials aufgrund der Verdichtung abhängen. Im Hochtemperaturbereich wurden zusätzlich weg- und kraftgeregelt verdichtete Probekörper verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass die eingebrachte Verdichtungsarbeit einen deutlichen Einfluss auf den Verformungswiderstand hat, während die Verdichtungsart keine Änderung im Verformungsverhalten bewirkt. Die Verdichtungsqualität in Form der Streuung der Raumdichte von Probekörpern spiegelt sich in der Streuung der Prüfergebnisse wider.

Verfasserschriften:
Dipl.-Ing. Dr. B. Hofko,
bernhard.hofko@
tuwien.ac.at;
Univ. Prof. Dipl.-Ing.
Dr. R. Blab,
ronald.blab@tuwien.ac.at
Technische Universität
Wien, Institut für
Verkehrswissenschaften,
Forschungsbereich für
Straßenwesen,
GuBhausstraße 28/E 230/3,
1040 Wien,
Dipl.-Ing. A. Ringleb,
Technische Universität
Braunschweig, Institut
für Straßenwesen,
Beethovenstraße 51b,
38106 Braunschweig,
a.ringleb@tu-bs.de

HMA-slabs produced by roller compaction can be used to core and cut specimens for further testing. The relation between the direction of compaction and testing in the laboratory is not always the same relation as it is between the direction of compaction and actual loading in the field. The paper presents outcomes of a study analyzing the influence of the compaction direction on performance characteristics of roller compacted HMA specimens. Performance parameters of a base layer mix are obtained from performance based test methods, including high-temperature, stiffness, fatigue and low-temperature tests. The relation between direction of compaction and specimen testing is varied in all three dimensions to find relevant influences. From the results it can be concluded that all obtained performance parameters are sensitive to the anisotropy of the material due to compaction, especially for stiffness and fatigue performance. For the high temperature, performance specimens from path- and force-controlled compaction were compared. The applied compaction work rather than the compaction method is linked to the difference in the regarding results. The quality of the compaction in terms of the variation of bulk density of the specimens reflects on the scattering of test results superstructure can be estimated.

1 Einleitung

Für zuverlässige Korrelationen zwischen dem Verhalten von Asphaltmischgut in Laborprüfungen und dem Verhalten unter Verkehr und Klima in Straßenbelägen ist es unter anderem notwendig, die Laborverdichtung in Hinblick auf die Praxisrelevanz zu untersuchen und zu optimieren. Verschiedene in der Laborpraxis eingesetzte Verdichtungsverfahren mögen volumetrisch identische Probekörper erzeugen, die jedoch dennoch starke Streuung in Bezug auf das mechanische Verhalten aufweisen (Brown/Gibb 1999, Renken 2000, Iwama et al. 2007). Der Hauptgrund

für diese Unterschiede liegt darin, dass das Verdichtungsverfahren direkten Einfluss auf die Orientierung der Gesteinskörnung im Probekörper hat und damit auch das Verhalten des Mischguts selbst beeinflusst (Masad et al. 1999, Hunter et al. 2004). Airey et al. (2005) zeigen in einer umfassenden Untersuchung, dass walzsegmentverdichtete Platten die beste Korrelation zu Probekörpern aus Straßenbelägen aufweist. Dies gilt sowohl für die Orientierung der Körnung als auch für das mechanische Verhalten. Jedoch variiert das Verhalten von Probekörpern auch in Abhängigkeit vom Verhältnis zwischen Verdichtungs- und Belastungsrichtung

aufgrund von Anisotropie. So zeigen Massad et al. (2002) etwa, dass die Steifigkeit von Asphaltprobekörpern, die mit demselben Verdichtungsverfahren hergestellt wurden, in Abhängigkeit von der Prüfrichtung um bis zu 30 % variiert. Aus den genannten Erfahrungen wird im Folgenden eine Studie präsentiert, die den Einfluss von Verdichtung und Probekörperorientierung auf das mechanische Verhalten untersucht. Die Probekörper werden dabei aus walzsegmentverdichteten Platten durch Bohren und Schneiden gewonnen, wobei das Verhältnis zwischen Verdichtungs- und Belastungsrichtung systematisch variiert wird. Für die Ver-

dichtung kam sowohl ein kraft- als auch ein weggeregelter Verfahren zur Anwendung, wobei die Verdichtung stets gemäß EN 12697-33 durchgeführt wurde. Um das gesamte Spektrum des mechanischen Verhaltens zu untersuchen, wurden

- Hochtemperaturversuche (Triaxiale Druckschwellversuche [TCCT] nach EN 12697 25) zur Ermittlung des Widerstand gegen bleibende Verformungen,
- Steifigkeits- und Ermüdungsversuche (zyklische Spaltzugschwellversuche [IT-CY] nach FGSV AL Sp-Asphalt 09) und
- Tieftemperaturversuche (Abkühlversuche [TSRST] und Kältezugsversuche [UTST] nach EN 12697-46) zur Ermittlung des Widerstands gegen Rissbildung bei tiefen Temperaturen durchgeführt.

2 Material

Für die Untersuchungen wurde ein Binderschichtmaterial mit 22 mm Größtkorn gewählt, da bekannt ist, dass sich Effekte von Anisotropie mit steigendem Größtkorn verstärken. Gemäß EN 13108-1 ist das Mischgut als AC 22 binder 50/70 definiert. Details zum Mischgut sind in Tabelle 1 ersichtlich. Die Sieblinie ist in Bild 1 dargestellt.

3 Probekörpervorbereitung und Prüfprogramm

Das Mischgut wurde in einem Gegenlaufzwangsmischer gemäß EN 12697-35 hergestellt. Anschließend wurden daraus in zwei verschiedenen Walzsegment-Verdichtern gemäß EN 12697-33 Platten mit einer Grundfläche von 500 x 260 mm² für Hochtemperatur- und Steifigkeits-/Ermüdungsversuche, sowie mit einer Grundfläche von 320 x 260 mm² für Tieftemperaturversuche hergestellt. Grundsätzlich wurde die Plattenherstellung weggesteuert durchgeführt. Das weggeregelte Verdichtungsprogramm beinhaltet eine kraftgeregelte Vorverdichtungsphase und eine weggeregelte Hauptverdichtungsphase bis zur Zielhöhe der Platte. Dabei wird in der Hauptverdichtung eine Verdichtungsrate von 0,3 mm pro Übergang realisiert. Eine kleinere Anzahl an Platten wurde kraftgeregelt erzeugt, um beide Verdichtungsmethoden zu vergleichen. Bei der kraftgeregelt Verdichtung werden Platten durch einen konstanten Anstieg der Verdichtungskraft pro Übergang für eine

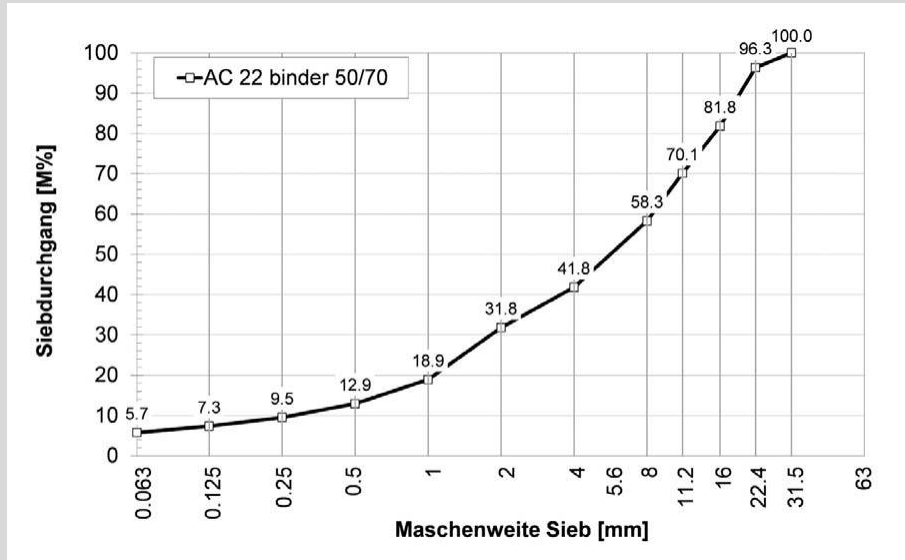


Bild 1: Sieblinie des Mischguts

Tabelle 1: Zusammensetzung des Mischguts

| Parameter | AC 22 binder 50/70 |
|--------------------|------------------------|
| Bitumen | 50/70 |
| Bitumengehalt | 4,5 M% |
| Rohdichte | 2616 kg/m ³ |
| Zielraumdicke | 2524 kg/m ³ |
| Zielhohlraumgehalt | 3,5 V% |
| Zuschlagsmaterial | Kalkstein |

Tabelle 2: Plattenabmessungen

| Abmessung (l x b x h) | Verdichtung | Prüfung |
|-----------------------|---------------|-------------|
| 320x260x60 | Weggeregelt | TSRST, UTST |
| 500x260x150 | Weggeregelt | IT-CY |
| 500x260x140 | Weggeregelt | TCCT |
| 500x260x220 | Weggeregelt | TCCT |
| 500x260x220 | Kraftgeregelt | TCCT |

festgelegte Anzahl an Übergängen verdichtet und anschließend durch einen konstanten Abfall an Verdichtungskraft pro Übergang nachverdichtet. Für das kraftgeregelte Verdichtungsverfahren muss mit einer Reihe von Vorprüfungen ermittelt werden, welche Änderung der Verdichtungskraft pro Übergang bei wie vielen Übergängen zu Platten führen, deren Raumdicke der Zielraumdicke entsprechen. Für das in dieser Untersuchung verwendete Material wurden diese Werte mit 1,3 kN/Übergang und 15 Übergängen festgelegt. Die Tabelle 2 zeigt eine Übersicht zu hergestellten Platten für die Untersuchungen.

Um Einflüsse der Verdichtungsrichtung auf das mechanische Verhalten systematisch untersuchen zu können, wurden Probekörper in unterschiedlicher Orientierung (d. h. unterschiedlichem Verhältnis zwischen Verdichtungs- und Belastungsrichtung) aus den Platten durch Schneiden und Bohren gewonnen. Dafür wurde ein Koordinatensystem eingeführt, das im Bild 2 dargestellt ist. Die y-Achse verläuft entlang des horizontalen Pfads des Walzsegments, die z-Achse repräsentiert die Richtung der Verdichtungskraft.

Zudem ist in der Abbildung auch ein Schema der Probekörper abgebildet, wie sie für die unterschiedlichen Versuchstypen verwendet werden. Dabei sind die Richtung der Belastung in der jeweiligen Prüfung und die Richtung der relevanten Reaktion des Probekörpers dargestellt. Die Tabelle 3 stellt das Prüfprogramm im Überblick dar. Für jeden Versuchstyp ist gezeigt, welche Probekörperorientierungen geprüft wurden; außerdem wird für jede Orientierung ein Akronym angegeben, das für die anschließende Auswertung zur Kurzbeschreibung herangezogen wird. F-Z-Y benennt dabei zum Beispiel einen IT-CY (Ermüdungsversuch = Fatigue), bei dem die Belastungsrichtung entlang der z-Achse verläuft und die relevante Probekörperreaktion in y-Richtung auftritt. Grundlage der Koordinaten ist das System, das für die Verdichtung eingeführt wurde und im Bild 2 dargestellt ist. Damit wird mit der Kurzbezeichnung ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Verdichtungs- und Belastungsrichtung hergestellt. Einige Zeilen in Tabelle 3 sind fett markiert; diese zeigen die Belastungs-

Tabelle 3: Probekörper- und Prüforientierung

| Prüfung | Belastungsrichtung | Richtung der relevanten Probekörperreaktion | Schema des Probekörpers in der Platte |
|------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------|
| | in Bezug auf das Koordinatensystem der Verdichtung | | |
| UTST/TSRST | X | X | L-X-X |
| UTST/TSRST | Y | Y | L-Y-Y |
| IT-CY | X | Y | F-X-Y |
| IT-CY | Z | Y | F-Z-Y |
| TCCT | Z | Z | H-Z-Z |
| TCCT | X | X | H-X-X |
| TCCT | Y | Y | H-Y-Y |

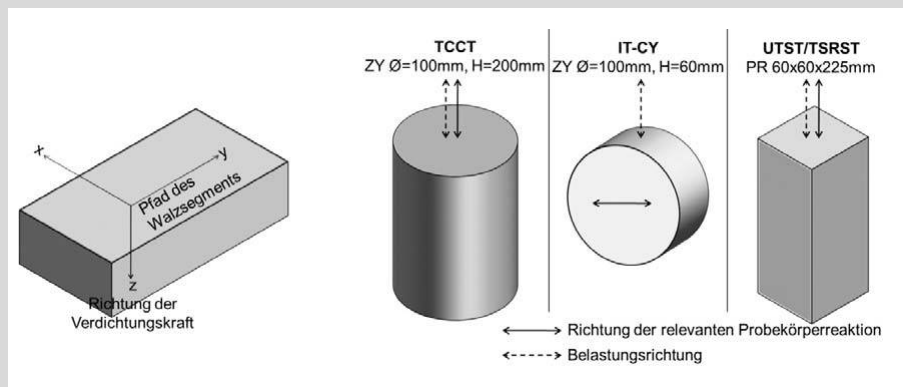


Bild 2: Koordinatensystem der Verdichtung (links) und Hauptrichtung von Belastung und Probekörperreaktion (rechts)

Verdichtungs-Situation, bei der die Orientierung im Labor mit der Orientierung unter Klima- und Verkehrsbelastung in der Praxis übereinstimmt.

In Bezug auf Variationsmöglichkeiten stehen bei Tieftemperaturversuchen theoretisch drei Orientierungen zur Wahl, ebenso bei Hochtemperaturversuchen. Bei IT-CY könnten sechs Variationen geprüft werden. Für das vorliegende Prüfprogramm wurden jedoch nur die Fälle herangezogen, bei denen die Laborsituation mit der Situation in der Straße übereinstimmt bzw. solche Orientierungen, die in der Laborpraxis Anwendung finden, um effiziente und ökonomische Probekörperherstellung im Labor zu gewährleisten.

4 Prüfdurchführung und Ergebnisdiskussion

Um den Einfluss der Verdichtungsrichtung auf das mechanische Verhalten eines Asphaltmischguts zu charakterisieren, wurden GVO-Prüfungen bei tiefen (TSRST und UTST), mittleren (IT-CY) und hohen (TCCT) Temperaturen durchgeführt. Die Prüfbedingungen und -ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten behandelt.

4.1 Verhalten bei tiefen Temperaturen

TSRST- und UTST-Prüfungen wurden in Anlehnung an die EN 12697-46 durchgeführt. Im TSRST wird ein prismatischer Probekörper (60 x 60 x 225 mm³) an zwei Adaptoren geklebt, die mit dem Lastge-

stänge der Prüfmaschine verschraubt werden. Während die Länge des Probekörpers konstant gehalten wird, wird die Temperatur von +10 °C an mit einer Rate von 10 K/h reduziert. Durch die Fixierung des Probekörpers entstehend dabei mit sinkenden Temperaturen kältebedingte (kryogene) Spannungen. Erreichen die kryogenen Spannungen die Zugfestigkeit des Materials, so versagt der Probekörper durch Bruch. Sowohl die Bruchtemperatur (T_{crack}) als auch die kryogene Spannung beim Bruch ($\sigma_{cryo,crack}$) sind Hauptergebnisse der Versuchs. Für die vorliegende Studie wurden je drei Einzelprüfungen zur Bestimmung dieser Kennwerte durchgeführt.

Der Versuch simuliert die Situation in einem Straßenaufbau im Winter, wenn nach Sonnenuntergang die Temperaturen rasch absinken können. Durch den Spannungszustand in longitudinaler und transversaler Richtung treten dabei kryogene Spannungen auf. Da die Relaxationsfähigkeit von flexiblen Straßenbelägen (d. h. die Relaxationsfähigkeit der Mastix) mit fallender Temperatur abnimmt, erreichen die kryogenen Spannungen bei einer bestimmten Temperatur die Zugfestigkeit des Materials. In diesem Fall kommt es zu (meist transversalen) Rissen.

Im UTST werden prismatische Probekörper (60 x 60 x 225 mm³) ebenso an zwei Adaptoren geklebt, die wiederum fix mit dem Lastgestänge verschraubt werden. Anschließend wird der Probekörper bis zur Prüftemperatur spannungsfrei abgekühlt und ein Zugversuch mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min durchgeführt. Als Hauptergebnis wird dabei die Zugfestigkeit (β_t) in Abhängigkeit von der Prüftemperatur festgestellt. Wiederum wird eine Dreifachbestimmung zur Ermittlung von β_t durchgeführt.

Kombiniert man die Ergebnisse aus UTST und TSRST in Abhängigkeit von der Prüftemperatur, so kann die Zugfestigkeitsreserve ($\Delta\beta_t$) ermittelt werden. Die Zugfestigkeitsreserve ist dabei die Spannungsdifferenz zwischen kryogener Spannung aus dem TSRST und Zugfestigkeit aus dem UTST bei derselben Temperatur. Diese Spannungsdifferenz ist die theoretische Festigkeitsreserve, die ein Straßenbelag zusätzlich zu temperaturinduzierter Spannung an Verkehrslast aufnehmen kann, bevor es zu Rissversagen kommt.

Ergebnisse

Beide Tieftemperaturversuche wurden an Probekörpern mit L-X-X- und L-Y-Y-Orientierung durchgeführt. Die Tabelle 4 und Bild 3 zeigen die Ergebnisse. Die L-X-X-Konfiguration ergibt niedrigere Bruchtemperaturen und niedrigere kryogene Spannungen im TSRST. Auch die kryogenen Spannungen bei 20 °C sind niedriger als bei der L-Y-Y-Konfiguration. Die Zugfestigkeit, bestimmt bei -20 °C, ist ebenso kleiner bei der L-X-X-Orientierung und für beide Versuchstypen ist die Streuung (Standardabweichung σ) größer für die L-X-X-Probekörper. Die Zugfestigkeitsreserve liegt bei einer Temperatur von 20 °C für L-X-X-Probekörper bei 2,5 N/mm² (Mittelwert [MW]) mit einer Spanne von 1,7 N/mm² bis 3,4 N/mm² unter Berücksichtigung der Standardabweichung. Für die L-Y-Y-Konfiguration liegt der Mittelwert bei 2,1 N/mm² mit einer Streuung von 1,6 N/mm² bis 2,7 N/mm².

Daraus wird ersichtlich, dass das Tieftemperaturverhalten signifikant durch die Anisotropie des Materials beeinflusst wird. In transversaler Richtung (L-X-X) zeigt das Mischgut günstigere Tieftemperatureigenschaften in Bezug auf temperaturinduzierte Spannungen (TSRST) sowie auch in Bezug auf die Zugfestigkeitsreserve, obwohl die Zugfestigkeit bei tiefen Temperaturen niedriger ist als in longitudinaler Richtung (L-Y-Y).

4.2 Steifigkeit und Ermüdungsverhalten

Um den Einfluss der Verdichtungsrichtung auf das Steifigkeits- und Ermüdungsverhalten zu untersuchen, wurden zyklische Spaltzugversuche (IT-CY) durchgeführt. Als Basis wurde die von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) herausgegebene Arbeitsanleitung für den Spaltzugversuch (AL Sp-Asphalt 09) herangezogen. Ein zylindrischer Probekörper wird dabei zwischen zwei Lastplatten situiert, sodass die eine sinusförmige Druckschwellbelastung auf die Mantelfläche des Zylinders aufgebracht werden kann. Diese Belastung führt zu Zugspannungen entlang der Vertikalachse, die für fortschreitende Ermüdung und schließlich Versagen des Probekörpers verantwortlich sind. Für eine Versuchsreihe wurden je neun Probekörper (drei Probekörper bei drei verschiedenen Laststufen) bei 20 °C und einer Frequenz von 10 Hz geprüft. Der kraftgesteuerte Versuch wurde bei einer Unterspannung von 35 kPa und drei

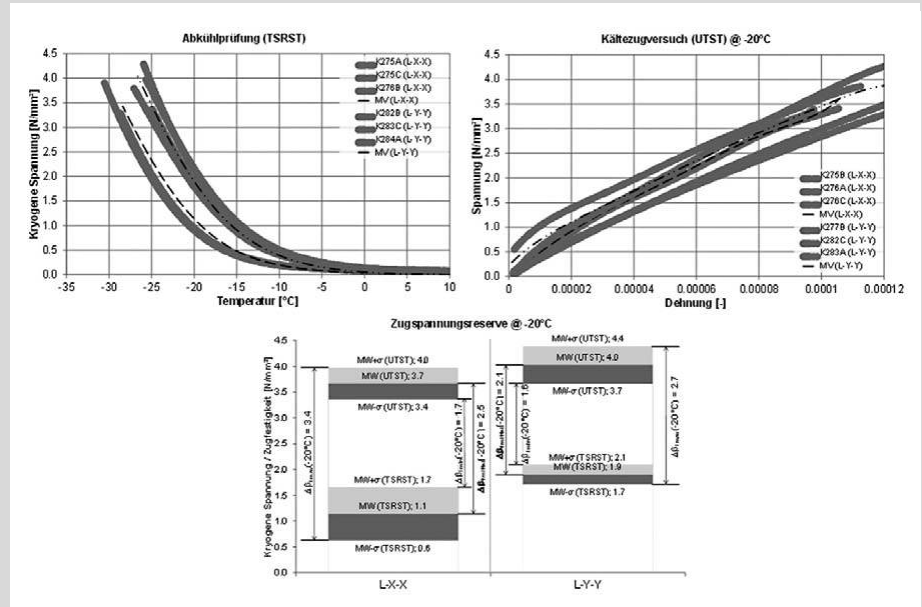


Bild 3: Ergebnisse des TSRST (links oben), des UTST (rechts oben) und Zugspannungsreserve (unten)

Tabelle 4: Ergebnisse der Tieftemperaturprüfungen

| | L-X-X | | L-Y-Y | | Δ_{X-Y-Y} [%] | |
|---------------------------------------------------------------|-------|----------|-------|----------|----------------------|----------|
| | MW | σ | MW | σ | MW | σ |
| T_{crack} [°C] (TSRST) | -28,5 | 2,9 | -26,7 | 0,8 | -6,3 | -72,4 |
| $\sigma_{cryo,crack}$ [N/mm ²] (TSRST) | 3,5 | 0,3 | 4,0 | 0,3 | 14,3 | 0,0 |
| $\sigma_{cryo @ -20 \text{ °C}}$ [N/mm ²] (TSRST) | 1,1 | 0,6 | 1,9 | 0,2 | 72,7 | -66,7 |
| $\beta_t @ -20 \text{ °C}$ [N/mm ²] (UTST) | 3,7 | 0,3 | 4,0 | 0,4 | 8,1 | 33,3 |
| $\Delta\beta_t @ -20 \text{ °C}$ [N/mm ²] | 2,5 | 0,9 | 2,1 | 0,6 | -16,0 | -33,3 |

Oberspannungen (100, 200 und 400 kPa) ausgeführt. Während des Versuchs werden die horizontalen Deformationen des Probekörpers durch induktive Wegaufnehmer (LVDTs) aufgezeichnet. Zur Auswertung gelangt der dynamische Modul $|E^*|$ in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl. Nach dem klassischen Ermüdungskriterium ist ein Probekörper dann ermüdet, wenn der dynamische Modul auf die Hälfte des Ausgangswerts (gemessen nach dem 100. Lastwechsel) abgesunken ist. Um das Ermüdungsverhalten verschiedener Konfigurationen vergleichen zu können, wird als Ergebnis die Anzahl der Lastwechsel bis zur Ermüdung (N_{fat})

gegen die elastische Dehnungsamplitude nach dem 100. Lastwechsel ($\epsilon_{el,100}$) dargestellt (Bild 4 links). Zum Vergleich des Steifigkeitsverhaltens wird der dynamische Modul nach dem 100. Lastwechsel herangezogen (Bild 4 rechts).

Ergebnisse

Untersucht wurden die F-X-Y- und F-Z-Y-Konfiguration in Bezug auf Ermüdungs- und Steifigkeitsverhalten. Die F-Z-Y-Konfiguration simuliert dabei die Lastsituation in einem Straßenaufbau, bei dem die Verkehrslast in dieselbe Richtung weist wie die Verdichtungskraft (z). Diese



Bild 4: Ergebnisse des IT-CY: Ermüdungsfunktion (links) und Steifigkeit bei 20°C und 10 Hz (rechts)

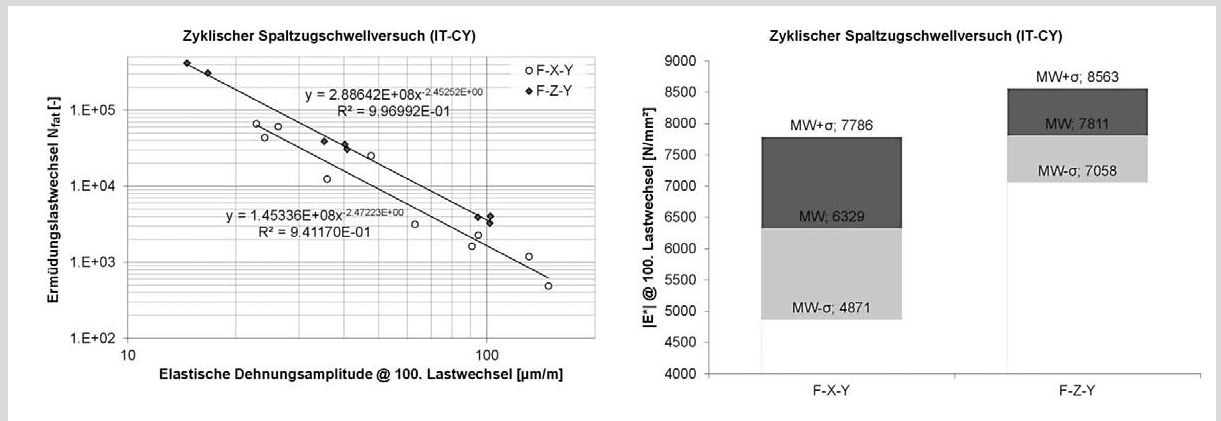


Tabelle 5: Ergebnisse des IT-CY: Ermüdungs- und Steifigkeitsverhalten

| | L-X-X | | L-Y-Y | | $\Delta_{X-X/Y-Y} [\%]$ | |
|---------------------------------------------------|-------|----------|-------|----------|-------------------------|----------|
| $\epsilon_{el,100} @ N_{fat} = 1.000 [\mu m/m]$ | 123 | | 168 | | 36,6 | |
| $\epsilon_{el,100} @ N_{fat} = 10.000 [\mu m/m]$ | 48 | | 66 | | 37,5 | |
| $\epsilon_{el,100} @ N_{fat} = 100.000 [\mu m/m]$ | 19 | | 26 | | 36,8 | |
| | MW | σ | MW | σ | MW | σ |
| $ E^* [MPa] @ 20^\circ C, 10 \text{ Hz}$ | 6329 | 1458 | 7811 | 752 | 23,4 | -48,4 |

Belastung führt zu Biegezugspannungen im Aufbau, die an der Unterseite der gebundenen Schichten am größten in longitudinaler Richtung (y) sind. Ergebnisse der Versuche sind in Bild 4 und Tabelle 5 dargestellt. Das linke Diagramm im Bild 4 zeigt die Ermüdungsfunktionen für beide Konfigurationen im log-log-Maßstab. Erkennbar ist, dass die F-Z-Y-Orientierung ein günstigeres Ermüdungsverhalten aufweist. Wie in Tabelle 5 ersichtlich, erreicht die F-Z-Y-Konfiguration um 37 % höhere Belastungen bei gleicher Ermüdungslastwechselzahl. Beide Ermüdungskurven verlaufen im log-log-Maßstab annähernd parallel. Das rechte Diagramm in Bild 4 vergleicht die dynamische Steifigkeit beider Konfigurationen. Wiederum führt die F-Z-Y-Orientierung zu höheren Ergebnissen bei geringerer Streuung. Im Mittel liefert die F-Z-Y-Orientierung um 23 % höhere $|E^*|$ als die F-X-Y-Orientierung.

Daraus kann geschlossen werden, dass Ermüdung und Steifigkeit sehr stark auf die Anisotropie des Materials reagieren, wobei die F-Z-Y-Konfiguration, die der Lastsituation auf der Straße entspricht, höhere Ermüdungsbeständigkeit und Steifigkeit liefert.

4.3 Verhalten bei hohen Temperaturen

Zur Ermittlung des Hochtemperaturverhaltens wurden triaxiale Druckschwell-

versuche (TCCT) nach EN 12697-25 durchgeführt. Damit kann der Widerstand gegen bleibende Verformungen untersucht werden. Dabei wird ein zylindrischer Probekörper zwischen zwei Lastplatten situiert und in axialer Richtung einer sinusförmigen Druckschwellbelastung unterzogen. Zusätzlich wird der Probekörper radial durch konstanten Seitendruck gestützt, wodurch der Spannungszustand im Straßenkörper simuliert wird. Der Versuch wird bei 50 °C und einer Frequenz von 3 Hz über 20.000 Lastwechsel ausgeführt. Die Axialspannung schwingt von 150 kPa bis 750 kPa mit einem konstanten Seitendruck von 150 kPa. Für eine Versuchsreihe werden drei Probekörper geprüft. Als Hauptergebnis des Versuchs ergibt sich eine Kriechkurve, die die bleibenden Axialstauchungen über die Anzahl an Lastwechsel darstellt. Die Kriechkurve wird in ihrem quasilinearen Bereich durch eine Lineare approximiert, wobei die Steigung dieser Linearen als Kriechrate f_c definiert wird. Je kleiner der Absolutwert dieser Kriechrate, desto günstiger ist der Widerstand gegen bleibende Verformungen.

Beim Hochtemperaturverhalten wurden nicht nur die unterschiedlichen Orientierungen in Bezug auf Verdichtungs- zu Belastungsrichtung untersucht, sondern auch unterschiedliche Verdichtungs-methoden (weg- und kraftgeregelt).

Ergebnisse - weggeregelt Verdichtung

Beim TCCT spiegelt die H-Z-Z-Orientierung die reale Lastsituation auf der Straße wider, bei der die Verkehrslast in die gleiche Richtung orientiert ist wie die Verdichtungskraft.

Die Ergebnisse der Probekörper aus weggeregelter Verdichtung sind in Bild 5 dargestellt. H-Y-Y- und H-Z-Z-Orientierung zeigen ähnliche Ergebnisse, wobei H-Z-Z leicht höheren Verformungswiderstand (+3 %) und deutlich geringere Streuung ergibt. Die H-X-X-Orientierung produziert die höchste Kriechrate, die um 35 % über der Kriechrate von H-Z-Z und 31 % über der Kriechrate von H-Y-Y liegt.

Im TCCT werden Probekörper ähnlich belastet wie während der Verdichtung. Daher wurde auch untersucht, ob die Unterschiede im Verformungswiderstand mit der aufgewendeten Verdichtungsarbeit zusammenhängen. Das Bild 6 zeigt dazu die Raumdichte der Probekörper und die zugehörige Streuung für die weggeregelt verdichteten Probekörper. Vergleicht man die Kriechraten (rechtes Diagramm im Bild 5) mit der Raumdichte, so ist erkennbar, dass kein Zusammenhang zwischen den mittleren Raumdichten und Kriechraten besteht. Es zeigt sich jedoch ein anderer, interessanter Zusammenhang. Je größer die Streuung der Raumdichte ist, desto größer ist auch die Variation der Kriechraten. Demnach hängen die Unterschiede der Kriechrate bei den drei Orientierungen offensichtlich mit der Anisotropie des Materials zusammen, während die Streuung der Versuchsergebnisse mit der Verdichtungsqualität in Verbindung gebracht werden kann.

Ergebnisse - kraftgeregelt Verdichtung

Analog zu den Ergebnissen der weggere-

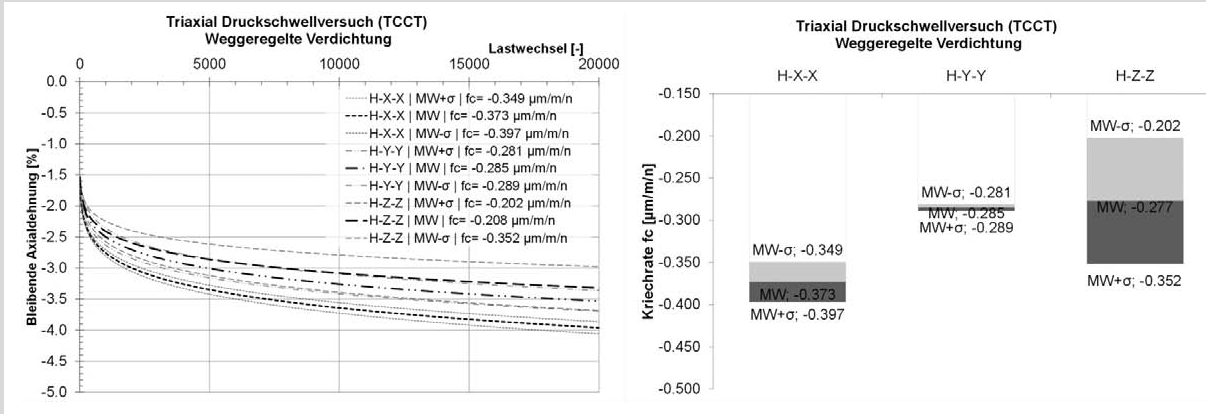


Bild 5: Ergebnisse des TCCT für weggeregelt verdichtete Probekörper: Kriechkurve (links) und Kriechrate (rechts)

Tabelle 6: Ergebnisse des TCCT für weggeregelt verdichtete Probekörper

| H-X-X | | H-Y-Y | | H-Z-Z | | $\Delta_{X-X/Y-Y}$ [%] | | $\Delta_{Y-Y/Z-Z}$ [%] | | $\Delta_{X-X/Z-Z}$ [%] | | |
|-------------------------------------------|----------|-------|----------|-------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|-------|
| MW | σ | MW | σ | MW | σ | MW | σ | MW | σ | MW | σ | |
| f_c [$\mu\text{m}/\text{m}/\text{n}$] | -0,373 | 0,024 | -0,285 | 0,004 | -0,277 | 0,075 | -23,6 | -83,3 | -2,8 | 1775 | -25,7 | 212,5 |

Tabelle 7: Ergebnisse des TCCT für kraftgeregelt verdichtete Probekörper

| H-X-X | | H-Y-Y | | H-Z-Z | | $\Delta_{X-X/Y-Y}$ [%] | | $\Delta_{Y-Y/Z-Z}$ [%] | | $\Delta_{X-X/Z-Z}$ [%] | | |
|-------------------------------------------|----------|-------|----------|-------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|-------|
| MW | σ | MW | σ | MW | σ | MW | σ | MW | σ | MW | σ | |
| f_c [$\mu\text{m}/\text{m}/\text{n}$] | -0,414 | 0,038 | -0,270 | 0,046 | -0,208 | 0,012 | -34,8 | 21,1 | -23,0 | -73,9 | -49,8 | -68,4 |

gelten Verdichtung können die Aussagen für die kraftgeregelt verdichtete Probekörper getroffen werden (Bild 7). H-X-X zeigt den geringsten Verformungswiderstand, das heißt die größte Kriechrate, gefolgt von H-Y-Y (-35 %) und H-Z-Z (-50 %). Die Streuung der Prüfergebnisse weist ähnliche Werte für die H-X-X-(Standardabweichung $\sigma = 0,038$) und die H-Y-Y-Konfiguration ($\sigma = 0,046$) auf und ist deutlich kleiner für die H-Z-Z-Orientierung ($\sigma = 0,012$). Dies stellt einen Unterschied zu Probekörpern dar, die weggeregelt verdichtet wurden.

Auch für die hier diskutierten kraftgeregelt verdichteten Probekörper ist die Verteilung der Raumdichte der geprüften Probekörper in Bild 8 dargestellt. Vergleicht man die Raumdichten dieser Probekörper mit denen der weggeregelt verdichteten Probekörper in Bild 6, so ist erkennbar, dass die kraftgeregelt verdichteten Probekörper eine wesentlich geringere Streuung der Raumdichte zeigen. Das liegt vor allem daran, dass bei den kraftgeregelt verdichteten Platten bei der Verdichtung die gleiche Verdichtungsarbeit für jede Platte eingebracht wird. Da die Unter-

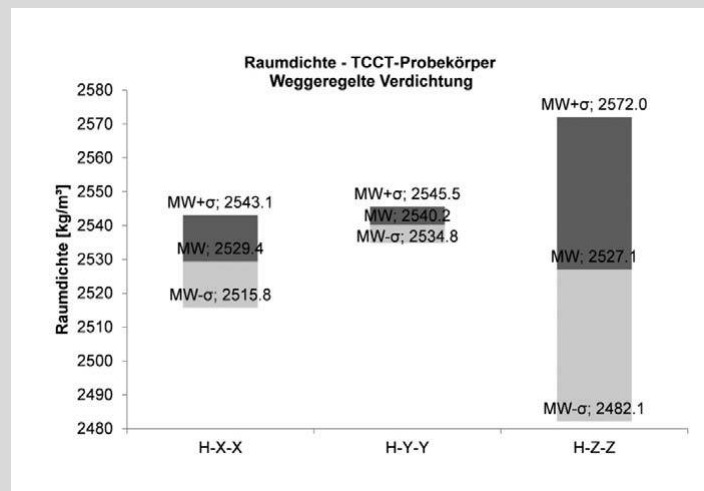


Bild 6: Raumdichte der weggeregelt verdichteten TCCT-Probekörper

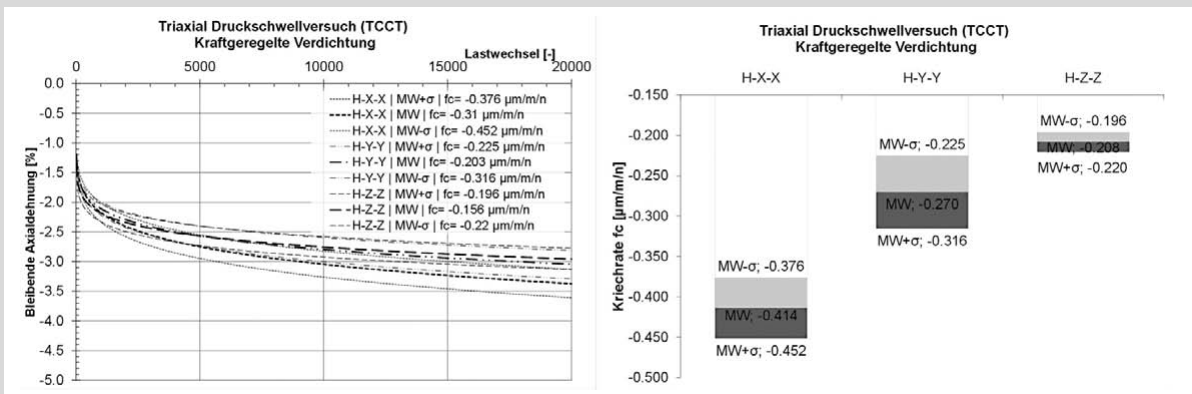
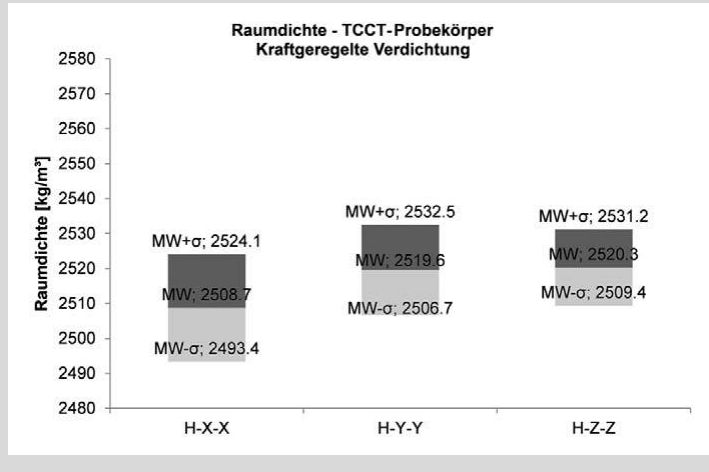


Bild 7: Ergebnisse des TCCT für kraftgeregelt verdichtete Probekörper: Kriechkurve (links) und Kriechrate (rechts)

Bild 8: Raumdichte der kraftgeregelt verdichteten TCCT-Probekörper



schiede der Raumdichte für die unterschiedlichen Orientierungen nicht signifikant sind, die Kriechraten sich jedoch deutlich voneinander unterscheiden, ist dies ein weiterer Beleg dafür, dass die Kriechraten und damit der Verformungswiderstand von der Anisotropie des Materials aufgrund der Verdichtung abhängen.

Ergebnisse – Vergleich von weg- und kraftgeregelter Verdichtung

Das Bild 9 vergleicht nun die weg- und kraftgeregelt Verdichtung. Nachdem die volumetrische Zusammensetzung aller Platten gleich ist, sollten die Unterschiede zwischen weg- und kraftverdichteten Platten mit der Verdichtungsart oder der eingebrachten Verdichtungsarbeit in Zusammenhang stehen. Daher wurde für jede Platte die spezifische Verdichtungsarbeit berechnet. Der Walzsegmentverdichter zeichnet die Verdichtungskraft für jeden Übergang auf. Integriert man nun die Verdichtungskraft [N] über den horizontalen Weg des Walzsegments beim Über-

gang [mm], dividiert diesen Wert anschließend durch die Länge des horizontalen Wegs des Verdichters beim Übergang [mm] und weiter durch die Höhe der verdichteten Platte [mm], kann daraus die spezifische Verdichtungsarbeit [Nmm/mm²] ermittelt werden. Dieser Parameter wird in Bild 10 verglichen. Für die H-Z-Orientierung ergibt eine höhere Verdichtungsarbeit auch einen höheren Widerstand gegen bleibende Verformungen. Die kraftgeregelt verdichtete Platte wurde mit einer 19 % höheren Verdichtungsarbeit hergestellt, dies führt zu einer 25 % niedrigeren Kriechrate. Für die H-X-X-Konfiguration führt eine höhere Verdichtungsarbeit zu höheren Kriechraten und damit geringerem Verformungswiderstand. Obwohl die kraftgeregelt verdichtete Platte mit 14 % mehr Verdichtungsarbeit hergestellt wurde, zeigt sie einen geringeren Verformungswiderstand durch eine um 11 % höhere Kriechrate. Für die H-Y-Y-Orientierung wiederum können keine signifikanten Aussagen getroffen werden, da die weggeregelt verdichtete Platte eine

um nur 3 % höhere Verdichtungsarbeit zeigt. Dies führt zu einer um 5% höheren Kriechrate.

Aus dem Vergleich zwischen Verdichtungsarbeit und Verformungswiderstand kann geschlossen werden, dass für Probekörper, die in Richtung der Verdichtungskraft (H-Z-Z) geprüft werden, eine höhere Verdichtungsarbeit auch zu höherem Verformungswiderstand führt. Für Probekörper, die in die beiden anderen Richtungen belastet werden, gilt das Gegenteil. Berücksichtigt man, dass ein höherer Verdichtungsgrad auch dazu führt, dass ein größerer Anteil von Zuschlagskörnern in der x-y-Ebene ausgerichtet, so ist erklärbar, warum eine höhere Verdichtungsarbeit auch zu schlechterem Verformungswiderstand in x- und y-Richtung führt. Durch die stärkere Ausrichtung der Körner in der x-y-Ebene können diese Zuschlagskörner einfacher in den beiden Richtungen aneinander vorbeigleiten, was zu höheren Verformungen führt. Dies gilt speziell bei höheren Temperaturen, bei denen die Mastix einen Großteil des Tragverhaltens bereits verloren haben.

5 Zusammenfassung

Die vorliegende Studie untersucht den Einfluss der Verdichtungsrichtung auf das mechanische Verhalten von Asphaltprobekörpern. Dazu wurden Probekörper aus walzsegmentverdichteten Platten gewonnen und anschließend mit folgenden Methoden geprüft:

- Hochtemperatur: Triaxialer Druckschwellversuch (TCCT) nach EN 12697 25
- Steifigkeit und Ermüdung: zyklischer Spaltzugschwellversuch (IT-CY) nach

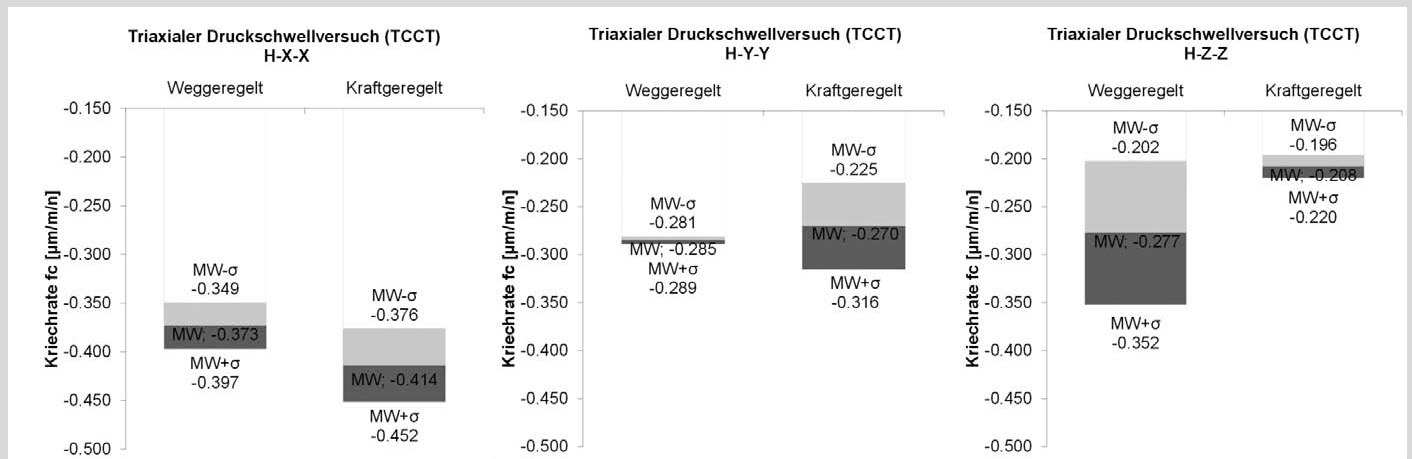


Bild 9: Ergebnisse der TCCT – Vergleich von weg- und kraftgeregelter Verdichtung in Bezug auf die Kriechrate

FGSV AL Sp-Asphalt 09.

- Tieftemperatur: Abkühlprüfungen (TSRST) und Kältezugsversuche (UTST) nach EN 12697-46.

Das Verhältnis zwischen Verdichtungs- und Belastungsrichtung der Probekörper wurde systematisch variiert. Für die Untersuchungen des Verhaltens bei tiefen Temperaturen bzw. das Steifigkeits- und Ermüdungsverhalten wurden nur wegge-regelt verdichtete Probekörper herange-zogen. Für den Widerstand gegen bleibende Verformungen bei hohen Tempera-turen wurde zusätzlich die weg- und kraftgeregelt Verdichtung miteinander verglichen. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Beständigkeit gegen Risse im Tief-temperaturbereich wird von der Anisotropie des Materials beeinflusst. Dabei verhalten sich Probekörper in x-Richtung (orthogonal zum Pfad des Walz-segments und zur Verdichtungskraft) günstiger als Probekörper, die in y-Richtung (in Richtung des Pfads des Walzsegments und orthogonal zur Ver-dichtungskraft) geprüft werden. Probe-körper in x-Richtung weisen tiefere Bruchtemperaturen (-7 %) und eine hö-here Zugfestigkeitsreserve (+19 %) auf.
- Das Steifigkeits- und Ermüdungsverhalten wird noch stärker durch Anisotropie beeinflusst. Die geprüfte F-Z-Y-Orientierung, die der Belastungssituati-on auf der Straße entspricht, verhält sich bei 20 °C und 10 Hz um 23 % steifer und zeigt eine um 36 % höhere Ermüdungsbeständigkeit als die F-X-Y-Orientierung.
- Der Widerstand gegen bleibende Verformungen bei hohen Temperaturen wurde in allen drei Orientierungen er-mittelt und dies sowohl für weg- als auch für kraftgeregelt verdichtete Plat-ten. Beide Verdichtungsarten zeigen, dass der Verformungswiderstand von der Anisotropie beeinflusst wird. Da das Verformungsverhalten unter anderem von der eingebrachten Verdichtungsar-beit selbst abhängt, wurde auch unter-sucht, ob ein Zusammenhang zwischen Raumdichte und Kriechrate als Maß für den Verformungswiderstand besteht. Dabei zeigte sich, dass die Unterschiede in den Kriechraten nicht mit der Ver-dichtungsqualität zusammenhängen, sondern von der Materialanisotropie beeinflusst werden. Jedoch spiegelt sich eine größere Streuung der Raumdichte der Probekörper in der Streuung der

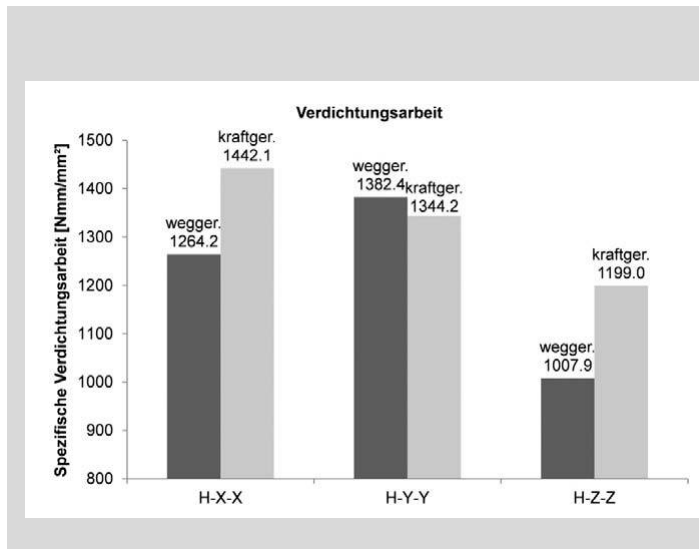


Bild 10: Vergleich der Verdichtungsarbeit der Asphaltplatten, aus denen TCCT-Probekörper gewonnen wurden

Prüfresultate wider. Den höchsten Verformungswiderstand erreichen Probekörper, die in Richtung der Verdichtungskraft (z) geprüft werden. Diese Belastung simuliert auch die Situation auf der Straße.

- Werden Ergebnisse aus weg- und kraftgeregelter Verdichtung im Hochtemperaturbereich miteinander verglichen, so zeigt sich, dass die eingebrachte Verdichtungsarbeit Einfluss auf das Verhalten hat und weniger die Verdichtungsart.
- In der z-Richtung führt eine höhere Verdichtungsarbeit zu besserem Verformungswiderstand. In x- und y-Richtung ist die Situation umgekehrt. Ein höherer Verdichtungsgrad führt dazu, dass die Zuschlagskörner stärker in x-y-Ebene ausgerichtet sind. Daher wird angenommen, dass stärker verdichtete Probekörper, die in x- oder y-Richtung geprüft werden, deswegen einen geringeren Verformungswiderstand aufweisen, weil die Körner leichter aneinander vorbeigleiten können. Speziell bei

höheren Temperaturen, bei denen die Mastix einen Großteil des Tragverhaltens verloren hat, führt dies zu geringerem Widerstand gegen Verformung.

Aus den Ergebnissen können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Die Probekörpervorbereitung und Prüf-richtung hat einen starken Einfluss auf das mechanische Verhalten von Asphaltprobekörpern. Die gebrauchsvorhaltenorientierten (GVO) Parameter im gesamten Temperaturspektrum werden von der Anisotropie des Materials beeinflusst.
- In der Regel werden Probekörper im Routinelaborbetrieb so aus Platten durch Bohren und Schneiden gewonnen, dass der Materialverbrauch möglichst gering ist und die Probekörperge-winnung möglichst einfach vonstattengeht. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass Probekörper möglichst in der Orientierung geprüft werden sollten, die der Belastungssituation auf der Straße entspricht, um realitätsnahe Ergebnisse zu produzieren. Dies gilt speziell für das

Tasdorf Süd 7
15562 Rüdersdorf
Telefon 03 36 38 / 7 10
Telefax 03 36 38 / 71 21
www.stralab.de


Baustoff- und Straßenprüfung

- Untersuchungslaboratorium für Boden, Beton, Asphalt, Mineral- und Recyclingbaustoffe
- Fremdüberwachung von Mineralstoffen nach DIN 4226
- Zugelassen nach RAPStra für Eignungs-, Fremdüberwachungs- und Kontrollprüfungen
- Durchführung von Baugrunduntersuchungen, Zustandserfassungen, Erarbeitung von Rekonstruktionsvorschlägen
- Betonprüfstelle E nach DIN 1045
- Mitglied im Verband der Straßenbaulaboratorien e.V.

Hochtemperaturverhalten sowie für das Steifigkeits- und Ermüdungsverhalten.

- Dieser Tatsache muss noch stärkere Bedeutung beigemessen werden, wenn die Materialparameter aus den Prüfungen in weiterer Folge für Modellierung und Simulation herangezogen werden (z. B. Hofko/Blab, 2009). Das anisotrope Materialverhalten muss für realitätsnahe Simulationsergebnisse Eingang in Modelle finden.
- Ein Einfluss der Verdichtungsart (weg- bzw. kraftgeregelt) auf das mechanische Verhalten konnte nicht festgestellt werden. Unterschiede in den Ergebnissen sind auf die Unterschiede in der eingebrachten Verdichtungsarbeit zurückzuführen. Dabei gilt, dass eine höhere Verdichtungsarbeit zu besserem Verformungswiderstand in z-Richtung und schlechterem Widerstand in x- und y-Richtung führt. Zudem spiegelt sich die Streuung der Raumdichte der einzelnen Probekörper in der Streuung der Prüfergebnisse wider.

Literaturverzeichnis

- Airey, G. D.; Collop, A. C.; Zoorob, S. (2005): The Influence of Laboratory Compaction Methods on the Performance of Asphalt Mixtures. Endbericht, Engineering and Physical Science Research Council.
- Brown, S. F.; Gibb, J. M. (1999): Effects of compaction on mechanical properties of asphalt mixtures. Proceedings of the 7th Conference on Asphalt Pavement for Southern Africa.
- EN 12697-24 (2007): Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung.
- EN 12697-25 (2006): Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 25: Druckschwellversuch.
- EN 12697-33 (2007): Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 33: Probstückvorbereitung mit einem Walzenverdichtungsgerät.
- EN 12697-35 (2007): Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 35: Labormischung.
- EN 12697-46 (2012): Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 46: Widerstand gegen Kälterisse und Tieftemperaturverhalten bei einachsigen Zugversuchen.
- EN 13108-1 (2006): Asphaltmischgut - Mischgut-anforderungen - Teil 1: Asphaltbeton.
- FGSV AL Sp-Asphalt 09 (2009): Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung.

Hofko, B.; Blab, R. (2009): Performance Based Lab Tests to Predict Pavement Fatigue. Proceedings of the Fifth International Conference on Construction in the 21st Century, Paper-Nr. 171, Istanbul, Türkei.

Hunter, E. A.; Airey, G. D.; Collop, A. C. (2004): Aggregate Orientation and Segregation in Laboratory-Compacted Asphalt Samples. Journal of the Transportation Research Board, Volume 1891, S. 8-15.

Iwama, M.; Airey, G. D. und Hunter, A. E. (2007): Influence of asphalt mixture compaction method and specimen size on internal structure and mechanical properties. Proceedings of the International Conference on Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials, Athen, S. 1063-1073.

Masad, E.; Muhunthan, B.; Shashidhar, N.; und Harman, T. (1999): Quantifying Laboratory Compaction Effects on the Internal Structure of Asphalt Concrete. Journal of the Transportation Research Board, Volume 1681, S. 179-185

Masad, E.; Tashman, L.; Samedavan, N.; Dallas L. (2002): Micromechanics-Based Analysis of Stiffness Anisotropy in Asphalt Mixtures. Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 14, Ausgabe 5, S. 374-383.

Renken, P. (2000): Influence of Specimen Preparation onto the Mechanical Behaviour of Asphalt Mixtures. Proceedings of the 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Session 1: Performance Testing and Specifications for Binders and Mixtures, S. 729-735, Barcelona, Spanien.

Der neue Schulungsfilm zur Sicherheitsbelehrung: Das kleine 1x1 der Baustellensicherheit

Jetzt als
DVD-Paket erhältlich!

Disc 1 :
Unterweisung gemäß § 12 Arbeitsschutzgesetz
Schulungsfilm mit praxisnahen Beispielen als
„Video-Sicherheitsbelehrung“

Disc 2 :
Arbeitshilfen

Nachweis der Sicherheitsbelehrung als PDF in den Sprachen Deutsch, Türkisch, Russisch und Polnisch zum Ausfüllen und Unterschreiben, Checkliste mit Stichpunkten der Unterweisung für die Mitarbeiter, Gesetzestext ArbSchG § 12 und § 13.

Der Schulungsfilm ersetzt nicht eine Schulung nach den Vorgaben des MVAS 99.



Nutzen Sie unsere **günstigen Staffelpreise:**

- 1 bis 4 DVD-Paket(e) à 69,- €*
- ab 5 DVD-Pakete à 65,50 €*
- ab 10 DVD-Pakete à 62,- €*

* Stückpreis inkl. MWSt. und Versand

Weitere Infos unter www.kirschbaum.de

KIRSCHBAUM KIRSCHBAUM VERLAG GmbH
Ihr Fachverlag für Verkehr und Technik Postfach 21 02 09
53157 Bonn