

Entwicklung einer Prüfmethode zur Ermittlung der Dauerhaftigkeit von Asphaltmastix

M. Hospodka, B. Hofko, R. Blab

Technische Universität Wien, IVWS - Institut für Verkehrswissenschaften

In den letzten Jahren treten in Österreich vermehrt frühzeitige Schäden, wie Korn- und Schollenausbrüche, bei bituminösen Deckschichten auf. Diese Schäden können systematisch weder einer klimatischen noch einer verkehrlichen Belastung zugeordnet werden. Eine Möglichkeit für diese Schäden ist mangelndes Gebrauchsverhalten der Asphaltmastix, ausgedrückt als Haftung am Gestein bzw. Ermüdungsbeständigkeit (gemäß EN 12697 24: „Dauerhaltbarkeit“ [1]) der Auslöser für diese Schäden sind. Asphaltmastix definiert sich als die Mischung von Bitumen und mineralischen Feinteilen. Dies kann an mangelnder Qualität einer der beiden Komponenten, Bitumen und/oder Feinteile liegen. Während mit dem 4-Punkt Biegebalken [1] bereits ein entwickeltes Verfahren zur Ermüdungsprüfung von Asphaltmischgut verfügbar ist, fehlt aktuell ein geeignetes Prüfverfahren, welches gezielt die Qualität der Mastix hinsichtlich der Ermüdungsbeständigkeit beschreibt. Ziel einer aktuell laufenden Forschungsarbeit an der TU Wien ist die Entwicklung einer standardisierten Prüfmethode zur Bewertung der Mastixqualität in Abhängigkeit der Einflussgrößen Bindemittleigenschaften, mineralische Zusammensetzung und Feinteilgehalt, sowie die Ausarbeitung von geeigneten Anforderungswerten. Als Prüfgerät hat sich das Dynamische Scherrheometer (DSR) als geeignet erwiesen. Aufgrund der zunehmenden Verfügbarkeit von DSR-Prüfgeräten in den Straßenbaulabors, kann die entwickelte Ermüdungsprüfung mit geringen Adaptionen und damit ohne kostenintensive Neuanschaffungen durchgeführt werden. Dieser Artikel umfasst die eigentliche Entwicklung des Prüfverfahrens am DSR.

1 DEFINITION VON FÜLLER UND HERSTELLEN GEEIGNETER MASTIX-MISCHUNGEN

Füller definiert sich als jener Teil der Gesteinskörnung, dessen überwiegender Teil durch ein 0,063 mm Sieb hindurchgeht.[2] Damit bildet Füller den Feinanteil in Asphaltmischgut und gemischt mit dem Bindemittel Bitumen, sorgt er für den Zusammenhalt der groben Gesteinskörnungen im Asphalt. Die Mischung aus Füller und Bitumen wird als Mastix bezeichnet. Während sowohl für die Einzelkomponenten Bitumen und Gestein als auch für das Endprodukt, dem Asphalt, gebrauchsvorhaltensorientierte (performance-orientierte) Prüfverfahren verfügbar sind, gibt es für das Zwischenprodukt „Mastix“ keine ausgereifte Bewertungsgrundlage. Die Mastix spielt dabei nicht nur beim klassischen Walzasphalt, sondern auch bei Gussasphalt eine wortwörtlich tragende Rolle.

Der erste Schritt im Zuge der Entwicklung des Prüfverfahrens war die Definition der Maximalkorngröße, mit welcher die Mastix hergestellt wird. Da sich die Prüfung nicht nur auf den reinen Füller (max. 0,063 mm), sondern auf jenen Teil der Gesteinskörnung beziehen soll, der in der Mastix wirksam ist, wurde die Korngröße mit 0,125 mm festgelegt (im weiteren Verlauf bezeichnet als „Füller“).

Um dem gebrauchsvorhaltensorientierten Ansatz zu entsprechen hat sich ein Mischungsverhältnis von 1 Massenteil Bitumen mit 1,5 Massenteile Füller als optimal erwiesen. Dies entspricht etwa dem Bitumen-Füller-Verhältnis von klassischen Walzasphalten. Vorversuche mit Mischungsverhältnissen

von 1:0,5 bis 1:2 (Bitumen:Füller) haben gezeigt, dass die Wiederholbarkeit mit zunehmenden Füllergehalt sinkt und insbesondere bei einem Mischungsverhältnis von 1:2 die Wiederholbarkeit für eine sinnvolle Versuchsdurchführung nicht mehr gegeben ist.

Zur Herstellung der Mastix wird neben dem Füller auch Bitumen als Bindemittel benötigt. Die Wahl fiel dabei auf ein Bitumen 70/100 (PG 58-28) [3], einerseits da diese Sorte in Österreich sehr weit verbreitet ist und andererseits um die rheologische Komplexität modifizierter Produkte vorerst nicht zu berücksichtigen. Für die Herstellung einer Mastixprobe im Labor wird zuerst der Füller in einer Metalldose abgewogen und danach für mindestens eine Stunde im Trockenschrank bei 180 °C erhitzt. Die abgewogene Menge richtet sich dabei nach der benötigten Menge an Mastix und kann dementsprechend gewählt werden. Das Abwiegen des Füllers erleichtert das anschließende Mischen, da das Bitumen einfacher zu dosieren ist, als der Füller. Das Bitumen wird ebenfalls auf 180 °C erhitzt, vor dem Eingießen mithilfe eines Glas- oder Metallstabs homogenisiert und dem Füller beigegeben. Ebenso mit einem Glas- oder Metallstab werden Bitumen und Füller solange gemischt, bis eine homogene Masse erreicht ist. Um ein zu rasches Abkühlen zu verhindern, kann ein vorgeheiztes Sandbad oder eine Heißluftpistole als Unterstützung verwendet werden. Unmittelbar nach dem Mischen wird die Mastixprobe im Kühlschrank bei etwa 5 °C gelagert um ein Absinken des Füllers zu verhindern. Ein modifizierter Versuch auf Lagerungsstabilität (Tubentest nach Zenke) [4] hat gezeigt, dass es bei dem oben genannten Bitumen und Mischungsverhältnis auch beim Auskühlen und längerem Lagern bei Raumtemperatur zu keinem Absinken kommt. Die Modifizierung bezieht sich auf die Lagerungstemperatur, -dauer und anschließende Prüfung (DSR Oszillationsversuch statt Erweichungspunkt Ring & Kugel). Dennoch ist es empfehlenswert Mastixproben im Kühlschrank zu lagern.

2 DSR PRÜFPARAMETER UND PROBEKÖRPERGEOMETRIE

Dynamische Scherrheometer werden bereits seit vielen Jahren zur rheologischen Charakterisierung von Bitumen eingesetzt.[5] Dabei kommt ein sogenanntes Platte-Platte System zum Einsatz. Während die obere Platte mit bestimmter Frequenz oszilliert (Rotor, auch als Prüfgeometrie bezeichnet), steht die untere Platte still (Stator). Zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften sieht das SUPERPAVE-Protokoll zwei unterschiedlich große Platten vor: 8 mm und 25 mm, auch als PP08 und PP25 bezeichnet.[3, 5, 6] Der Einsatz von zwei Platten mit unterschiedlichem Durchmesser ist der thermoviskosen Eigenschaften von Bitumen bzw. dem verfügbaren Drehmoment seitens der Rheometer geschuldet. Je tiefer die Temperatur, desto höher die Viskosität und desto höher das erforderliche Drehmoment um eine gewisse Mindestdeformation zu erreichen. Aufgrund der zunehmend höheren Genauigkeit von Rheometern auch bei geringsten Deformationen relativiert sich dieses Problem zusehends. Gemäß SUPERPAVE-Protokoll ist für den Temperaturbereich von 4 bis 40 °C PP08 und für 46 bis 82 °C PP25 zu verwenden. Zur Durchführung der Ermüdungsversuche wurde eine Temperatur von 10 °C gewählt. Dies entspricht einerseits dem gebrauchsvorhaltensorientierten Ansatz und andererseits erreicht die Mastix bei dieser Temperatur eine Steifigkeit, die ein Kriechen verhindert. Ein Kriechen muss zwingend unterbunden werden, da der Probekörper sonst dem Rheometer ausweicht [7]. Aufgrund der notwendigen Prüftemperatur von 10 °C, der daraus folgend hohen Steifigkeit der Mastix und der breiten Verfügbarkeit in den Straßenbaulabors, hat sich die Prüfgeometrie PP08 als geeignet erwiesen. Eine Prüfung auf Ermüdung bedeutet das wiederholte Aufbringen einer Belastung, bis das Versagen eintritt. Um die Prüfdauer auf ein praxisgerechnetes Niveau zu halten, wurde eine Prüffrequenz von 30 Hz gewählt. Damit können innerhalb einer Stunde 108.000 Lastzyklen aufgebracht werden. In der Literatur sind ebenfalls mehrere Quellen zu nennen, die aus den gleichen Gründen eine Prüftemperatur von 10 °C und Prüffrequenzen zwischen 10 und 30 Hz verwenden [8-15].

Als nächster Schritt galt die Wahl einer passenden Probekörpergeometrie. Standardmäßig wird bei der Prüfgeometrie PP08 ein Prüfspalt von 1 mm verwendet.[5] Das heißt, der Probekörper ist ein Zylinder mit 8 mm Durchmesser und 1 mm Höhe. Obwohl sehr häufig in der Literatur verwendet, hat sich diese Form als ungeeignet erweisen. Der Grund dafür liegt im Bruchverhalten. Bei Vorversuchen sind alle Probekörper entweder am unteren (Stator-Mastix) oder oberen Interface (Mastix-Rotor) gebrochen bzw. abgerissen. Zum Teil innerhalb der Mastix (Kohäsionsbruch) oder ein glattes Abreißen von der Titanoberfläche der Prüfgeometrie (Adhäsionsbruch). Die Abbildung 1 veranschaulicht dieses Problem.



Abbildung 1: Abreißen der Mastixprobekörper

Im Zuge eines Ermüdungsversuchs soll jedoch ausschließlich das Material selbst und nicht der Verbund zum Gerät geprüft werden. Daher wurde eine Variation der Probekörpergeometrie notwendig. Die einfache Erhöhung der Probekörper von 1 auf 2 und 3 mm stellte sich als Fehlschlag heraus, denn auch hier fand der Bruch am Interface statt. Die Lösung war der Einbau einer Einschnürung in der Mitte des Probekörpers. FE Simulationen wurden mit unterschiedlichen Einschnürungsvarianten durchgeführt, wobei sich in der Praxis die Einschnürung auf 6 mm mit einer Probekörperhöhe von 3 mm als optimal erwiesen hat. Die Einschnürung hat eine Schubspannungsspitze zur Folge und der Probekörper bricht exakt in der Mitte, ein reiner Kohäsions- oder Ermüdungsbruch. Die Abbildung 2 zeigt die CAD-Zeichnung der Probekörperform und deren FE-Modellierung.

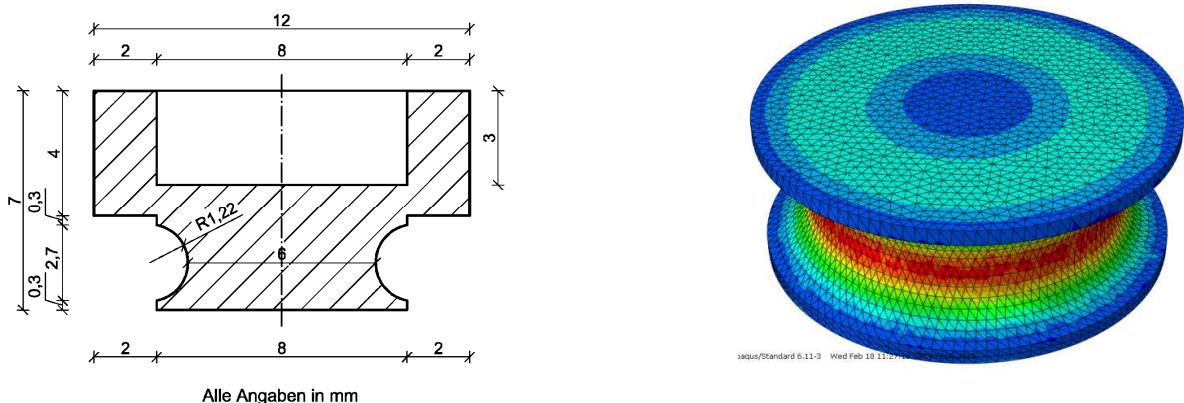


Abbildung 2: Probekörperform, FE-Simulation, Edelstahl-Positivform

Die Höhe des Probekörpers wurde nur bis maximal 3 mm erhöht, da dies die Grenze einer sinnvollen Temperierung ist. Durch die geringe Kontaktfläche zum Stator und schlechten Wärmeleitfähigkeit von Bitumen (mit Füller höher) können kühlchwache Rheometer keine konstante Temperatur von 10 °C am oberen Interface bereitstellen. Vielmehr stellt sich ein Temperaturgradient von Stator zu Rotor ein. Es ist zu beachten, dass selbst aktive Kühlhauben nur als Unterstützung dienen und die primäre Kühlung durch das Peltier im Stator erfolgt.

Mit Hilfe einer Edelstahl-Positivform (Abbildung 3) und gießbarem 2-Komponenten-Silikon konnte eine Silikonform hergestellt werden. Diese ist notwendig, da der Probekörper nicht durch einfaches Trimmen hergestellt werden kann. Die Positivform besteht aus der eigentlichen Probekörperform in der unteren Hälfte und einer Aufnahme für die Prüfgeometrie PP08 in der oberen Hälfte. Letzteres dient als Zentrierhilfe für den Gießvorgang. Die Abbildung 3 zeigt sowohl die Positivform, als auch den gießbereiten Aufbau im DSR und die fertige Silikonform. Die abgebildete Silikonform wurde bereits nachbearbeitet, da das Silikon nicht exakt 3 mm hoch eingefüllt werden kann. Ohne Nachbearbeitung wären die Ränder zu hoch und kein Entfernen der überschüssigen Mastix möglich.

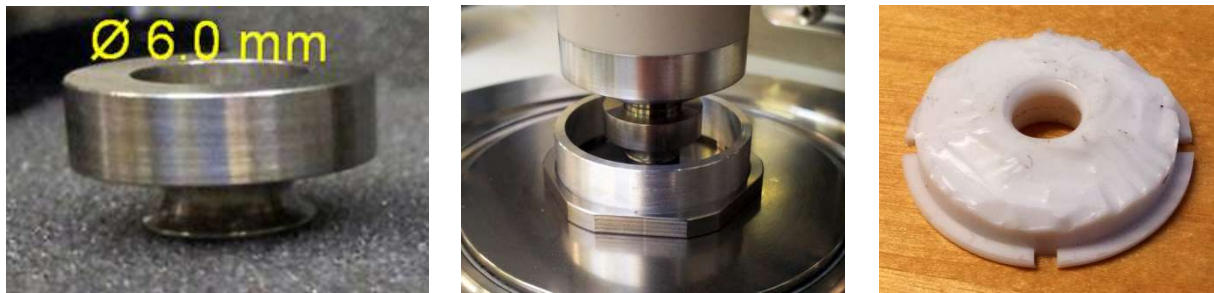


Abbildung 3: Edelstahl-Positivform, Gießereiter Aufbau im DSR, Silikonform

Die Silikonform ist kurzfristig bis 180 °C belastbar, wodurch die Mastix schmelzflüssig eingebracht werden kann. Sobald die Probe in das Rheometer eingebracht und auf 10 °C abgekühlt ist, kann der Überstand entfernt werden. Der Überstand ist wesentlich weniger kritisch als bei klassischen Bitumenversuchen, da er keinerlei Einfluss auf den Probekörper selbst und damit auf die Versuchsergebnisse hat. Die Abbildung 4 zeigt einen versuchsfertigen Probekörper, eingebaut im Rheometer.

3 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG – ERMITTLUNG DER PASSENDEN SCHUBSPANNUNG

Bevor mit einem Ermüdungsversuch begonnen werden kann, muss eine passende Schubspannung gewählt werden. Die Schubspannung sollte einerseits nicht zu gering gewählt werden, um eine praxisgerechte Prüfdauer zu erhalten und andererseits nicht zu hoch gewählt werden, da die Ermüdungsprüfung sonst nicht mehr im linear-viskoelastischen Bereich durchgeführt wird. Dies ist jedoch zwingend erforderlich, da die Prüfung sonst nicht mehr dem gebrauchsverhaltensorientierten Ansatz entspricht und unkontrollierbare, nicht lineare Effekte auftreten können [16]. Zur Ermittlung der Linearitätsgrenze werden sogenannte Amplitudensweeps durchgeführt. Dabei wird der Probekörper mit zunehmender Schubspannung geprüft und der Verlauf des komplexen Schubmoduls $|G^*|$ aufgezeichnet. Der Schubmodul verläuft dabei solange nahezu konstant, bis die Linearitätsgrenze erreicht ist. In der Literatur sehr weit verbreitet ist dabei das 95 % Kriterium [17, 18]. Also bei jener Schubspannung, wo der Schubmodul nur noch 95 % seines ursprünglichen Wertes erreicht, definiert sich als die Linearitätsgrenze. Dies hat sich als praktikabel erwiesen und wurde daher angewandt.



Abbildung 4: Edelstahl-Positivform, Gießereiter Aufbau im DSR, Silikonform

4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG – DER EIGENTLICHE ERMÜDUNGSVERSUCH

Mit der zuvor ermittelten Schubspannung wird an einem neuen Probekörper der Ermüdungsversuch durchgeführt. Die Abbildung 5 zeigt den Verlauf des komplexen Schubmoduls $|G^*|$ und des Phasenwinkels δ bis hin zum Kohäsionsbruch des Probekörpers, wie er in Abbildung 4 zu sehen ist.

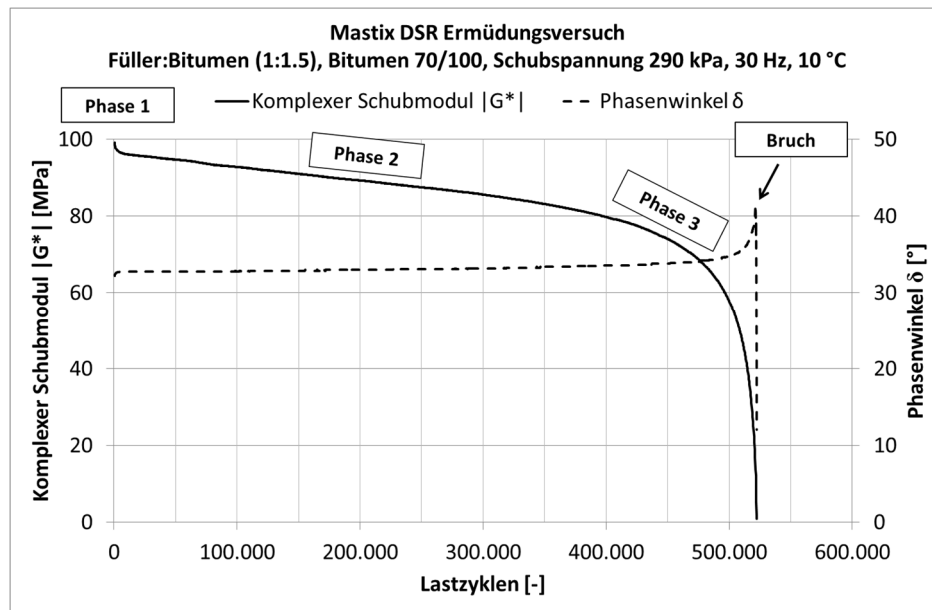


Abbildung 5: Ermüdungsversuch

Der Kurvenverlauf ist dabei durch 3 Phasen geprägt: Phase 1 ist durch einen besonders starken Abfall des komplexen Schubmoduls charakterisiert. Dieser schnelle Verlust des Verformungswiderstandes ist nicht nur durch Ermüdung zu erklären, sondern es handelt sich um Thixotropie [9, 19, 20]. Thixotropie ist der Abfall der Viskosität wenn eine Schubbelastung auf eine Probe aufgebracht wird. Dieser Vorgang ist zumindest teilweise reversibel. Das heißt, während die Belastung pausiert kann die Viskosität zeitabhängig wiederhergestellt werden. In Phase 2 nimmt der komplexe Schubmodul nahezu linear ab und kennzeichnet damit die Phase der Mikrorissbildung. Phase 3 entspricht dem Zusammenschluss und der Ausbreitung der Mikrorisse zu Makrorissen bis zum vollständigen Bruch des Probekörpers [8, 21].

Der Bruch des Probekörpers ist sowohl am Schubmodul als auch etwas früher am Verlauf des Phasenwinkels zu erkennen. Der Phasenwinkel erfasst den Bruch zeitlich gesehen exakter als der Schubmodul, da ab dem abrupten Abfall des Phasenwinkels das Rheometer mit der Reduzierung der Schubspannung beginnt, um ein schnelles Durchdrehen der Prüfgeometrie zu verhindern. Dies kann abhängig vom verwendeten Rheometer steuerungstechnisch auch anderweitig gelöst sein. Die Zeitdifferenz zwischen Abfall des Phasenwinkels und das Erreichen eines Schubmoduls von nahezu Null, ist vernachlässigbar klein. Für sämtliche Versuche wurde ein Anton Paar MCR300 SP Rheometer verwendet.

5 QUELLEN

1. CEN, EN 12697-24: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung. 2012: Brussels.
2. CEN, EN 13043: Gesteinskörnungen für Asphalt und Oberflächenbehandlungen für Straßen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen. 2002: Brussels.
3. ASTM, Specification for Performance Graded Asphalt Binder. 2007, ASTM International.
4. CEN, EN 13399: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Lagerbeständigkeit von modifiziertem Bitumen. 2010: Brussels.
5. CEN, EN 14770: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels - Dynamisches Scherrheometer (DSR). 2012: Brussels.
6. ASTM, ASTM D7175-08: Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. 2008, ASTM International: West Conshohocken, PA.

7. Anderson, D.A., et al., Evaluation of fatigue criteria for asphalt binders. *Asphalt Binders 2001*, 2001(1766): p. 48-56.
8. Kim, Y.R., D.N. Little, and I.J. Song, Effect of mineral fillers on fatigue resistance and fundamental material characteristics - Mechanistic evaluation. *Bituminous Paving Mixtures 2003*, 2003(1832): p. 1-8.
9. Kim, Y.R., D.N. Little, and R.L. Lytton, Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2003. 15(1): p. 75-83.
10. Van Rompu, J., et al., New fatigue test on bituminous binders and mastics using an annular shear rheometer prototype and waves propagation. *Advanced Testing and Characterisation of Bituminous Materials, Vols 1 and 2*, 2009: p. 69-79.
11. Mo, L.T., et al., Research of Bituminous Mortar Fatigue Test Method Based on Dynamic Shear Rheometer. *Journal of Testing and Evaluation*, 2012. 40(1): p. 84-90.
12. Liao, M.C., J.S. Chen, and K.W. Tsou, Fatigue Characteristics of Bitumen-Filler Mastics and Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012. 24(7): p. 916-923.
13. Ortiz, O.J.R. and F.E.P. Jimenez, Studying asphalt binder fatigue pattern by using a dynamic shear rheometer. *Ingenieria E Investigacion*, 2011. 31(1): p. 47-55.
14. Shen, S.H., H.M. Chiu, and H. Huang, Characterization of Fatigue and Healing in Asphalt Binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010. 22(9): p. 846-852.
15. Hintz, C. and H. Bahia, Understanding mechanisms leading to asphalt binder fatigue in the dynamic shear rheometer. *Road Materials and Pavement Design*, 2013. 14: p. 231-251.
16. Bahia, H.U., et al., Non-linear viscoelastic and fatigue properties of asphalt binders. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technology*, Vol 68, 1999, 1999: p. 1-34.
17. Airey, G.D., B. Rahimzadeh, and A.C. Collop, Linear viscoelastic limits of bituminous binders. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol 71, 2002: p. 89-115.
18. Airey, G.D., B. Rahimzadeh, and A.C. Collop, Viscoelastic linearity limits for bituminous materials. *Materials and Structures*, 2003. 36(264): p. 643-647.
19. Shan, L.Y., et al., Separation of Thixotropy from Fatigue Process of Asphalt Binder. *Transportation Research Record*, 2011(2207): p. 89-98.
20. Perez-Jimenez, F.E., R. Botella, and R. Miro, Differentiating between damage and thixotropy in asphalt binder's fatigue tests. *Construction and Building Materials*, 2012. 31: p. 212-219.
21. Delaporte, B., et al., New procedure to evaluate fatigue of bituminous mastics using an annular shear rheometer prototype. *Pavement Cracking: Mechanisms, Modeling, Detection, Testing and Case Histories*, 2008: p. 457-467.0