

# Wiennese Aging Procedure (VAPro) – Effiziente und realitätsnahe Laboralterung von Asphaltprobekörpern zur Simulation der Langzeitalterung

Alterungsvorgänge im Bitumen führen zu erhöhter Steifigkeit und Sprödigkeit und somit zu schnellerem Versagen der bitumengebundenen Aufbauten. Daher hat das Alterungsverhalten des Bitumens einen entscheidenden Einfluss sowohl auf die Dauerhaftigkeit als auch auf die Rezyklierbarkeit von Straßenbelägen. Dieser Beitrag präsentiert eine Studie über das Potential einer Verwendung von hochoxidierendem Gas, um die oxidative Langzeitalterung von Asphaltmischgut im Labor zu simulieren. Basierend auf den Ergebnissen wird ein Alterungsverfahren (Wiennese Aging Procedure – VAPro) für verdichtete Probekörper entwickelt, um schon beim Mix-Design nicht nur hinsichtlich der kurzzeitigen Leistungsfähigkeit zu optimieren, sondern auch Effekte der langfristigen oxidativen Alterung während der Nutzungsdauer zu berücksichtigen. VAPro basiert auf einer einfachen Druckzelle, in der ein Probekörper mit ozon- und stickoxidangereicherter Druckluft durchströmt wird. Mittels mechanischer Prüfungen am Asphalt (IT-CY), wie auch am rückgewonnenen Bitumen (DSR) werden die Veränderungen der Eigenschaften aufgrund von VAPro gezeigt. Erste Ergebnisse zeigen, dass Asphaltmischungen durch Anwendung von VAPro bei moderaten Temperaturen (+ 60 °C) innerhalb von 4 Tagen und bei einer Durchströmung von 1 l/min ein Langzeitalterungsniveau vergleichbar mit PAV erreichen.

Ageing of bitumen leads to increased stiffness and brittleness. Thus, the ageing behaviour of bitumen has a crucial impact on durability of pavements. To assess ageing of bitumen, RTFOT and PAV are standardized methods for short-term and long-term ageing in the lab. For lab-ageing of hot mix asphalt (HMA), various methods have been developed in the last decades. This paper presents an optimized lab-ageing procedure (Wiennese Ageing Procedure – VAPro) for compacted HMA specimens to assess mix performance of long-term lab-aged specimens. Thus, it is possible to optimize mix design not only for short-term performance but to take into account effects of oxidative aging during its in-service life. VAPro is based on a triaxial cell with forced flow of a gaseous oxidant agent through the specimen. The oxidant agent is enriched in ozone and nitric oxides to increase the rate of oxidation. It is shown by stiffness tests of unaged and lab-aged specimens, as well as by DSR tests of recovered binder from aged specimens that asphalt mixes can be long-term aged at moderate temperatures (+ 60° C) and within 4 days and a flow rate of 1 l/min by applying VAPro. Thus, VAPro can simulate long-term ageing at conditions that are representative of conditions that occur in the field within an efficient amount of time.

## 1 Einleitung und Hintergründe

Da Bitumen ein organisches Material ist, ändert sich während seines Lebenszyklus' sein mechanisches Verhalten aufgrund thermischer und oxidativer Alterung. Im Straßenbau unterscheidet man die Alterung von Bitumen und bitumengebundener Materialien in Kurzzeitalterung und Langzeitalterung. Die Kurzzeitalterung wird bei

der Mischgutherstellung sowohl durch schnelle Oxidation aufgrund hoher Temperaturen und hoher spezifischer Oberfläche als auch durch Abspaltung flüchtiger Komponenten des Bitumens ausgelöst [3, 18]. Die Langzeitalterung wird durch die langsame Oxidation insbesondere der Deckschichten durch atmosphärischen Sauerstoff und andere in der Luft vorkommende hochoxidative Gase (z. B. Ozon, Stickoxide) verursacht [17]. Das Bitumen wird steifer und spröder, weshalb Deckschichten dazu neigen, nach längerer Liegedauer bei niedrigen Temperaturen oder aufgrund von Ermüdung zu versagen [21]. Da Bitumenalterung die Dauerhaftigkeit und die Eignung zum Recycling von Asphaltmischgut entscheidend beeinflusst, ist es wichtig, das Alterungsverhalten und die -beständigkeit von Bitumen und Mischgut im Zuge der Mischgutkonzeption einzuschätzen, um kostengünstigere, also wenig instandhaltungsbedürftige und energieeffiziente Auf-

bauten zu erhalten, die zudem eine lange Nutzungsdauer und ein hohes Recyclingpotenzial besitzen.

Um die Bitumenalterung im Labor innerhalb einer zumutbaren Zeitspanne abschätzen zu können, dienen die standardisierten und weitverbreiteten Verfahren Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) [1, 5] und Pressure Ageing Vessel (PAV) [2, 9] dazu, ungelalterte Bindemittel in die Zustände der Kurzzeitalterung (RTFOT) und der Langzeitalterung (RTFOT+PAV) zu versetzen [12, 16].

Die mineralischen Komponenten und die Gestaltung des Mischguts können einen Einfluss auf die Alterung des Materials haben. Daher scheint es von Vorteil zu sein, im Labor standardisierte Methoden für die Langzeitalterung von Asphalten anzuwenden. Folglich könnten diese Verfahren helfen, die Veränderungen aufgrund der Alterung zu analysieren. In den letzten Jahrzehnten wurden über 30 Laboralterungsver-

### ■ Verfasser

**Dipl.-Ing. Daniel Steiner,**  
daniel.steiner@tuwien.ac.at;

**Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Bernhard Hofko,**  
bernhard.hofko@tuwien.ac.at;

**Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Ronald Blab,**  
rolald.blab@tuwien.ac.at,

Technische Universität Wien,  
Institut für Verkehrswissenschaften,  
Forschungsbereich für Straßenwesen,  
GuBhausstraße 28/E230/3,  
A-1040 Wien

fahren für loses oder verdichtetes Asphaltmischgut entwickelt [4, 11, 19]. Die meisten dieser Methoden müssen aufgrund folgender Gründe kritisch besehen werden:

- Bei allen Verfahren, die das Altern von losem Mischgut beinhalten, ist es fraglich, wie die Bindemittelalterung die Kompatibilität und die Qualität der Kohäsion und der Adhäsion des verdichteten Materials beeinflusst. Daher kann bei nachfolgenden mechanischen Prüfungen nicht festgestellt werden, ob Unterschiede in den Ergebnissen zwischen ungealterten und gealterten Proben von oxidativer Alterung oder von der Verdichtung herrühren.
- Bei Verfahren, die hohe Temperaturen (+ 100 °C und höher) anwenden, werden typische Umgebungstemperaturen im Feld überschritten. Thermische Effekte (z. B. Abspaltung von flüchtigen Bindemittelbestandteilen), die im Verwendungszustand der Straße nicht auftreten können, könnten dadurch ausgelöst werden. Außerdem könnten die hohen Temperaturen zu anderen chemischen Reaktionen als im Feld führen, wie beispielsweise zu verstärkter Oligomerisation und Polymerisation mit weniger Zersetzungsreaktionen.
- Die Dauer mancher existierender Verfahren zur Alterungssimulation von verdichteten Probekörpern ist relativ zeitaufwendig (bis zu einigen Wochen). Daher ist es fraglich, ob diese Methoden zukünftig als effiziente Routineverfahren eingesetzt werden können.
- Um die Oxidationsrate zu erhöhen, sehen manche Verfahren für verdichtete Probekörper hohe Drücke vor (vergleichbar mit Drücken im PAV). Auch hier könnten diese Bedingungen zu anderen chemischen Reaktionen führen als jene, die im Feld auftreten.

Daher war das Hauptziel der in diesem Beitrag präsentierten Studie die Neuentwicklung oder Optimierung eines existierenden Verfahrens zur Alterung von verdichteten Asphaltproben im Labor. Um ein effizientes Verfahren zu entwickeln, welches realistische, im Labor gealterte Proben zur weiteren mechanischen Prüfung im Labor generiert, wurde das Augenmerk auf folgende Sachverhalte gelegt:

- Temperatur und Druck sollten Werte, die regelmäßig in einer Deckschicht auftreten, nicht überschreiten, um chemische Reaktionen im Labor zu vermeiden, die im Feld nicht auftreten können.

Kennwerte	70/100
Penetration [1/10 mm]	91
Erweichungspunkt Ring & Kugel [°C]	46,8
SHRP Performance Grade [°C]	58-22

Tabelle 1:  
Bitumen-  
kenngrößen

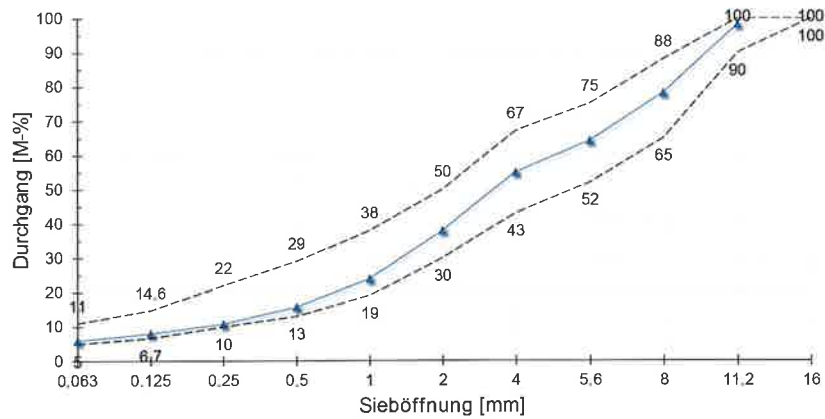


Bild 1: Sieblinie

- Verstärkte Oxidation sollte dadurch erreicht werden, dass hohe Konzentrationen von hochreaktiven gasförmigen Medien eingesetzt werden, die im Feld in geringerer Konzentration auftreten.
- Damit das Verfahren auch für zukünftige Verwendungen anwendbar ist, ist es wichtig, dass das Verfahren innerhalb einer vernünftigen Zeitspanne abgeschlossen werden kann.
- eine vorläufige Analyse der Wiederholbarkeit der Methode und
- eine Festlegung von Parametern für dieses Verfahren, basierend auf einem Alterungsniveau von RTFOT+PAV-gealterten Bitumenproben.

## 2 Materialien und experimentelle Methoden

### 2.1 Materialien

Für diese Versuchsreihe wurde ein Asphalt des Typs AC 11 deck 70/100, A1, G1 verwendet. Die Gesteinskomponente bildeten Porphyrit bzw. Kalksteinmehl als Füller, wobei die Sieblinie in Bild 1 dargestellt ist. Als Bindemittel wurde ein Straßenbaubitumen des Typs 70/100 eingesetzt, dessen Kenngrößen in Tabelle 1 aufgelistet sind.

Der Bindemittelgehalt wurde mit 5,2 M.-%, bei einem Zielhohlraumgehalt von 8 Vol.-%,

Das in diesem Beitrag vorgestellte Verfahren kann als Erweiterung eines Verfahrens angesehen werden, das in SHRP-A-384 benutzt wurde [4]. Dieser Beitrag enthält

- die Prinzipien des entwickelten Alterungsverfahrens,
- eine tiefgehende Parameteruntersuchung der Auswirkungen von Temperatur und Alterungsdauer auf das viskoelastische Verhalten eines typischen Deckschicht-Mischguts sowie auf zurückgewonnenes Bitumen aus laborgealterten Proben,

## TEPE SYSTEMHALLEN

**Pulldachhalle Typ PD4 (Breite: 15,00m, Länge: 8,00m)**

- Höhe 4,00m, Dachneigung ca. 3°
- mit Trapezblech, Farbe: AluZink
- Schiebetor 5,00m breit, 3,30m hoch
- feuerverzinkte Stahlkonstruktion
- incl. prüffähiger Baustatik

Mehr Infos

**Aktionspreis**

**€ 12.990,-**

ab Werk Bldern; exd. MwSt.

Schnellstrasse 2, 3 und Anfrage

www.tepe-systemhallen.de · Tel. 0 25 90 - 93 96 40

Bild 2:  
Versuchsaufbau

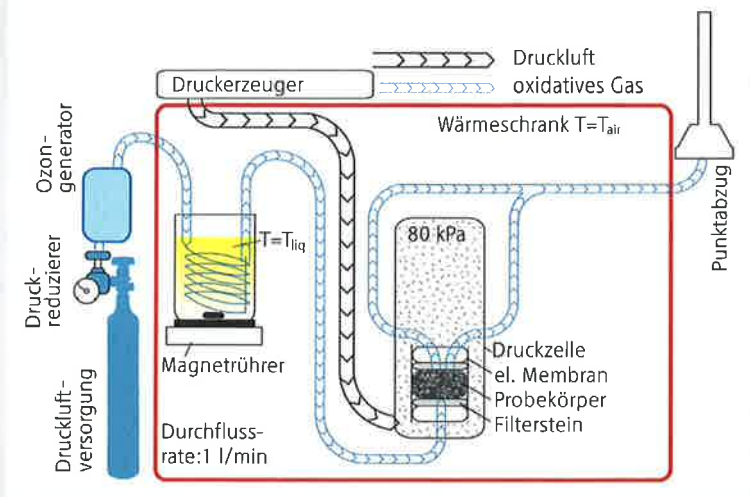


Tabelle 2:  
Prüfbedingungen  
IT-CY | + 10 °C

Frequenz [Hz]	0.1	1	5	10	20
Unterspannung [kPa]	35	35	35	35	35
Oberspannung [kPa]	210	240	300	360	390
Lastwechsel [-]	9	15	50	100	100

gewählt. Dieser Hohlraumgehalt ist notwendig, um eine ausreichende Durchströmung garantieren zu können.

### 2.2 Probekörpervorbereitung

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Versuchsreihe wurden Platten (50 x 26 x 4 cm) hergestellt, deren Mischgut in einem Gegenlaufzwangsmischer nach EN 12697-35 [8] bei 165 °C gemischt wurde. Anschließend wurden diese mittels Walzseg-

mentverdichter nach EN 12697-33 [7] verdichtet und jeweils 8 Probekörper (DN = 100 mm ; H = 40 mm) ausgebohrt. Die Hohlraumgehalte der Probekörper befinden sich in der Spannweite von 6,8 bis 8,7 Vol.-%.

Um die Bitumenversuche durchführen zu können, wurde das Bindemittel aus allen Probekörpern nach EN 12697-3 [6] mit dem Lösungsmittel Tetrachlorethylen (C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub>) rückgewonnen. Die anschließende Vakuumdestillation wurde nach EN 12697-3 [6]

durchgeführt, um das Lösungsmittel wieder vom Bitumen zu trennen.

### 2.3 Alterung mit gasförmigen Oxidationsmittel – Viennese Aging Procedure – VAPro

Bild 2 zeigt den Aufbau und das verwendete Equipment der neu entwickelten Alterungsmethode. Druckluft mit Umgebungstemperatur aus der laboreigenen Druckluftversorgung gelangt zunächst in einen Druckregler, der einen konstanten Gasdruck gewährleistet. Der nachfolgende Ozongenerator reichert mittels einer Hochspannungs-Entladungsröhre die Druckluft mit Ozon und Stickoxiden an [15]. Dieses Gasgemisch fließt durch eine Kupfer-Nickel-Spirale, wo dieses angewärmt wird. Dies passiert in einem Becherglas, welches mit Pflanzenöl (T<sub>liq</sub> = + 70 °C) gefüllt ist und sich auf einem beheizbaren Magnetrührer befindet.

### 2.4 Ermittlung des dynamischen Moduls [E\*] des Asphaltes

Spaltzug-Schwellversuche (IT-CY) wurden an allen Probekörpern vor und nach der Alterung bei einer Temperatur von + 10 °C und Frequenzen zwischen 0,1 und 20 Hz unter Verwendung sinusförmiger Belastung durchgeführt. Zur Beschreibung des viskoelastischen Verhaltens können aus den Testergebnissen der dynamische Modul [E\*] und der Phasenwinkel  $\phi$  ermittelt werden.

In einer Reihe von Vorversuchen wurden die notwendigen Oberspannungen der sinusfö-

Tabelle 3: Prüfprogramm der Laboralterung

	IT-CY +10 °C 0.1–20 Hz				DSR SHRP 1,6 Hz 46–82 °C		
	Temperatur T <sub>air</sub> [°C]				Temperatur T <sub>air</sub> [°C]		
	45	60	75		45	60	75
Alterungsdauer [d]	1	V / N	V / N	V / N	x	x	x
	2	V / N	V / N	V / N	x	x	x
	3	V / N	V / N	V / N	VAPro	x	x
	4					3x	
	6	2x V / N	V / N			2x	x
	4		V / N				x
				N <sub>2</sub> Lagerung			
				RTFOT +PAV		x	
				Kontrollprobekörper V&R		x	
				RTFOT		x	
				Ungealtertes Bitumen		x	

V – vor der Alterung geprüft  
N – nach der Alterung geprüft  
V&R -- verdichtet und rückgewonnen

migen Belastung (Tabelle 2) so ermittelt, dass die anfängliche elastische horizontale Dehnung  $\epsilon_{el,anf}$  sich nahe der unteren Grenze von 0,05 ‰ befindet, sodass permanente Deformationen auf ein Minimum reduziert werden. Zusätzlich wurde in weiteren Vorversuchen nachgewiesen, dass eine mehrmalige Prüfung desselben Probekörpers bei schonenden Prüfbedingungen zu vergleichbaren Ergebnissen führte. Dies ist eine notwendige Bedingung, um den Einfluss der Alterung auf das Materialverhalten mittels zweimaliger Prüfung (vor und nach Alterung) darstellen zu können [19, 20].

### 2.5 Ermittlung des dynamischen Schub-Moduls $|G^*|$ des Bitumens

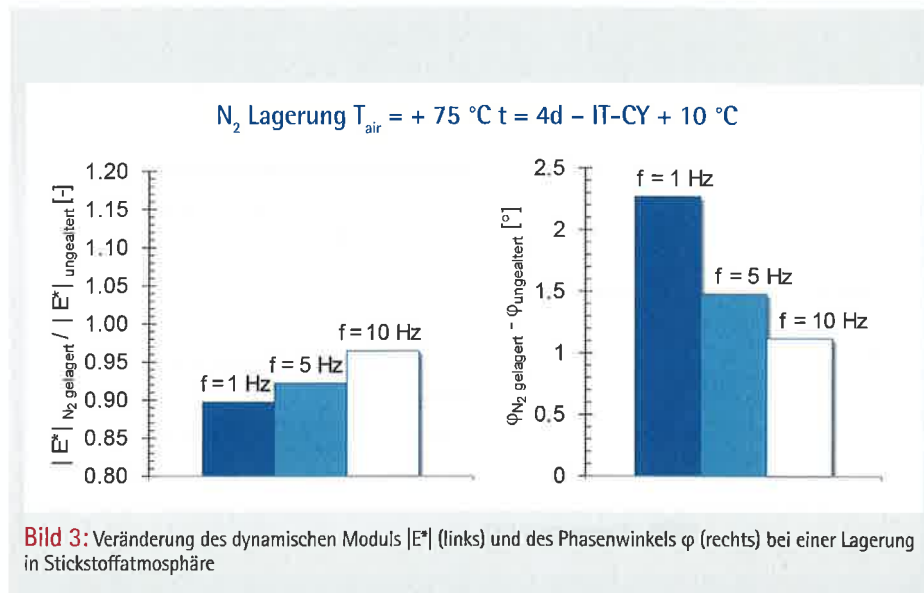
An den Bitumenproben, welche aus allen laborgealterten Asphaltprobekörpern rückgewonnen wurden, wurden Versuche mit dem Dynamischen Scher-Rheometer (DSR) durchgeführt. Die Versuchsbedingungen wurden gemäß SHRP-Bedingungen [18] und gemäß EN 14770 [10] festgelegt. Bei Temperaturen von + 46 bis + 82 °C und einer Frequenz von 1,59 Hz werden die Versuche unter Verwendung der großen Platte (Durchmesser: 25 mm) und einem 1-mm-Spalt durchgeführt. Mittels der aus den Tests gewonnenen Daten können der dynamische Schubmodul  $|G^*|$  und der Phasenwinkel  $\phi$  für die geprüften Frequenzen ermittelt werden.

### 2.6 Untersuchung der thermischen Alterung in VAPro

Um das vorgestellte Alterungsverfahren zu validieren, ist es nötig, die oxidativen und thermischen Auswirkungen auf die Alterung zu analysieren und isoliert voneinander zu betrachten. Dafür wurde ein Asphaltprobekörper in die Triaxialzelle eingebaut. Anstelle des gasförmigen Oxidationsmittels wurden sowohl der Probekörper als auch die Triaxialzelle mit Stickstoff geflutet, um jegliche Oxidation zu verhindern. Nach 4 Tagen bei + 75 °C im Wärmeschrank wurden sowohl am Asphalt als auch am rückgewonnenen Bitumen Steifigkeitstests durchgeführt.

## 3 Prüfprogramm

Tabelle 3 gibt einen Überblick des Prüfprogramms der Asphaltprobekörper auf der linken Seite bzw. der rückgewonnenen Bindemittelproben auf der rechten Seite. Der



erste Teil der Untersuchung betrachtete die Auswirkung der Temperatur  $T_{air}$  und der Alterungszeit. Daher wurden drei verschiedene Temperaturen  $T_{air} = + 45/+ 60/+ 75$  °C mit Alterungszeiten von 1, 2, 3 und 6 Tagen kombiniert.

Die Ergebnisse dieser ersten Phase sollen einen Überblick über die Zunahme des dynamischen Moduls  $|E^*|$  und des dynamischen Schubmoduls  $|G^*|$  geben.

Im zweiten Teil des Prüfprogramms wurde der dynamische Schubmodul  $|G^*|$  eines RTFOT+PAV-gealterten Bindemittels als Benchmark gesetzt und ermittelt, welche Bedingungen (Alterungszeit,  $T_{air}$ ) der Parameterstudie diesem Alterungsniveau des Bitumens entsprechen. Damit ist es möglich, vorläufige Bedingungen für die VAPro-Alterung festzulegen. Die festgesetzten Alterungsparameter wurden durch eine 3-fache Versuchswiederholung validiert.

Die genannte RTFOT+PAV-Benchmark, welche die vorläufigen Alterungsbedingungen für VAPro bestimmt, wird in Zukunft durch

Daten von tatsächlich feldgealterten Proben ersetzt werden. Diese Daten werden aus einem Probefeld der TU Wien, bei der die Feldalterung von Asphaltmischgut über mehrere Jahre detailliert beobachtet wird, gewonnen [14].

## 4 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

### 4.1 Auswirkung der Temperatur auf VAPro

#### 4.1.1 Asphaltprobekörper

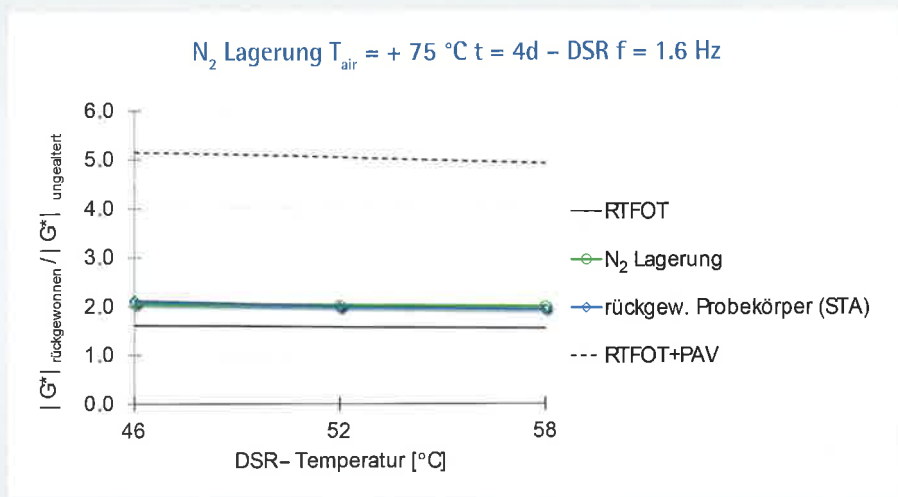
Um die Methode auf nicht-oxidative Alterungseffekte, z. B. thermische Alterungseffekte aufgrund erhöhter Temperaturen, zu überprüfen, wurde ein Probekörper in der Druckzelle in Stickstoffatmosphäre für 4 Tage bei + 75 °C gelagert. Vor und nach der Lagerung wurden Steifigkeitsuntersuchungen an den Proben durchgeführt, um Veränderungen im Materialverhalten aufgrund der Lagerung unter Stickstoff zu analysieren.

**HUCK**

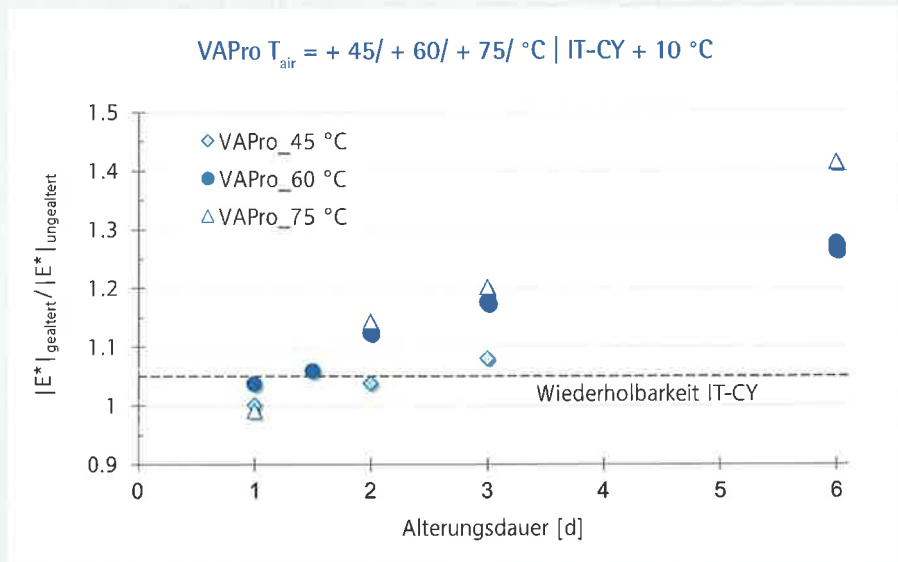
- ▶ schnell aufstellbar
- ▶ besonders leicht (17 kg bei 50m Länge)
- ▶ einfaches Umsetzen
- ▶ keine Stabmontage nötig
- ▶ UV-stabilisiert

Sächsische Netzwerke  
Huck GmbH  
Dresdner Straße 107  
01809 Heidenau  
snh@huck.net  
Tel. 03529-5607-0

**Schneefangzäune von HUCK** [www.huck.net](http://www.huck.net)



**Bild 4:** Veränderung des komplexen Schubmoduls  $|G^*|$  des rückgewonnen Bitumens. Stickstoffatmosphäre relativ zum ungealterten Bitummenniveau



**Bild 5:** Veränderung des dynamischen Moduls  $|E^*|$ . VAPro relativ zum ungealterten Zustand

ren. Bild 3 zeigt die relative Veränderung des dynamischen Moduls  $|E^*|$  nach Stickstoff-Lagerung im Vergleich zu vor der Lagerung für drei verschiedene Frequenzen im linken Diagramm. Das rechte Diagramm zeigt die Veränderung der Phasenverschiebung. Beide Diagramme deuten darauf hin, dass keine signifikanten Veränderungen im Materialverhalten aufgrund thermischer Effekte auftreten. Der dynamische Modul wird um 5 bis 10 % reduziert, der Phasenwinkel steigt um 1,0 bis 2,2 °. Daher kann festgehalten werden, dass bei VAPro keine wesentlichen Effekte durch thermische Alterung induziert werden.

#### 4.1.2 Bitumen

Eine zweite Überprüfung potenzieller thermischer Effekte wurde am Bindemittel

durchgeführt. Bitumen wurde sowohl von den mit Stickstoff gelagerten Probekörpern als auch von einem Kontrollprobekörper rückgewonnen. Der Kontrollprobekörper wurde ausschließlich aufgrund der Laborherstellung einer Kurzzeitalterung unterzogen, ohne weitere Langzeit-Laboralterung. An beiden Proben wurden DSR-Versuche durchgeführt.

Die Ergebnisse des dynamischen Schubmoduls  $|G^*|$ , relativ bezogen auf ein ungealtertes Bitumen, sind in Bild 4 zu sehen. Sowohl der Kontrollprobekörper als auch die unter Stickstoff gelagerte Probe liefern sehr ähnliche Ergebnisse, welche nahe an jenen der RTFOT-gealterten Bindemittelprobe sind. Somit kann auch aus der Bitumenanalyse kein thermischer Effekt abgeleitet werden.

## 4.2 Variation von Temperatur und Alterungsdauer

### 4.2.1 Asphaltprobekörper

Im Zuge der Parameterstudie wurden die Temperaturen zwischen + 45 und + 75 °C und Versuchsdauern von 1 bis 6 Tagen variiert. Jeder Probekörper wurde auf sein viskoelastisches Verhalten (dynamischer Modul  $|E^*|$  und Phasenwinkel  $\phi$ ) mittels Spaltzug-Schwellversuch (+ 10 °C | 0,1/1/5/10/20 Hz) vor und nach der Alterung untersucht. Die Ergebnisse des dynamischen Moduls  $|E^*|$  sind in Bild 5 dargestellt. Die im Diagramm dargestellten Daten stellen einen Mittelwert der Zuwachsraten bei den Prüffrequenzen 1/5/10 Hz dar.

Bei allen Temperaturen kann eine mit zunehmender Alterungszeit einhergehende Zunahme der Steifigkeit beobachtet werden. Bei + 45 °C gibt es bei Alterungszeiträumen zwischen 1 und 3 Tagen keine signifikanten Veränderungen der Steifigkeit der gealterten Proben. Hier befinden sich die Ergebnisse innerhalb der Wiederholbarkeit der Prüfmethode [19, 20]. Bei + 60 °C und + 75 °C treten signifikante Änderungen der Steifigkeit nach 2 Tagen Alterung auf, obwohl kein Unterschied zwischen + 60 °C und + 75 °C bis zu einer Alterungszeit von 3 Tagen festgestellt werden kann. Nach 6 Tagen Alterung zeigen die Ergebnisse der Alterungen bei + 60 und + 75 °C klare Unterschiede. Während die Proben, die bei + 60 °C 6 Tage lang gealtert wurden, einen Zuwachs der Steifigkeit von ungefähr 30 % aufweisen, beträgt der Anstieg der Steifigkeit bei + 75 °C und 6 Tagen Alterung mehr als 40 %.

### 4.2.2 Bitumen

Für alle VAPro-gealterten Probekörper wurde das Bindemittel rückgewonnen und mittels dynamischem Scher-Rheometer (DSR) geprüft. Zusätzlich wurde das ungealterte Bitumen der Labor-Kurzzeitalterungsmethode RTFOT und der Labor-Langzeitalterungsmethode RTFOT+PAV unterzogen, um die entwickelte Methode mit standardisierten Verfahren vergleichen zu können.

Analog zu den in Bild 5 gezeigten Versuchsergebnissen der Asphaltprobekörper zeigt das Diagramm in Bild 6 die relative Veränderung des dynamischen Schubmoduls  $|G^*|$  des gealterten Bitumens zu ungealterten Bitumen über die Dauer der Alterung. Die Prüfbedingungen entsprachen den SHRP-Bedingungen von 1,59 Hz und + 46 bis 82

°C, wobei in diesem Vergleich die Daten der + 46 °C Bedingungen herangezogen wurden. Die strich-punktierte Linie entspricht dem RTFOT-, die strichlierte Linie dem RTFOT+PAV-Alterungsniveau. In ähnlicher Weise wie die Daten aus den Untersuchungen am Asphalt zeigen sich keine signifikanten Veränderungen im Bindemittel bei 1-3 Tagen Alterungsdauer. Unabhängig von der Alterungstemperatur zeigen alle rückgewonnenen Bitumenproben Steifigkeiten ähnlich des RTFOT-gealterten Bindemittels. Nach 4 Tagen VAPro-Alterung bei + 60 °C ist das Bindemittel im Zustand eines RTFOT+PAV-gealterten Bitumens. Nach 6 Tagen Alterung nach VAPro bei + 60 °C ist das extrahierte Bindemittel 2- bis 3-mal steifer als RTFOT+PAV-gealtertes Bitumen. Aus den Ergebnissen der + 60 °C gealterten Proben geht offensichtlich hervor, dass im Unterschied zur Entwicklung der Asphalt-Steifigkeit mit der Alterungsdauer (Bild 5) die Steifigkeit der extrahierten Bindemittelproben eine nicht-lineare, exponentielle Zunahme bei zunehmender Alterungsdauer aufweist.

#### 4.3 VAPro – Wiederholbarkeit

Zum Zwecke einer vorläufigen Analyse der Wiederholbarkeit von VAPro wurden drei einzelne Asphaltprobekörper bei + 60 °C 4 Tage lang bei einer Durchströmung von 1 l/min gealtert. Der Grund für diese Festlegung der Parameter ist, dass sich die Parameterstudie zeigte, dass das extrahierte Bindemittel bei diesen Bedingungen ähnlich verhält wie ein RTFOT+PAV-gealtertes Bitumen. Dieses Alterungsniveau wurde als vorläufige Benchmark gewählt. Nach Alterung der Probekörper wurde das Bindemittel bei jeder einzelnen Probe getrennt extrahiert und rückgewonnen und es wurden daran DSR-Versuche nach SHRP bei 1,59 Hz und Temperaturen von + 46 °C bis + 82 °C durchgeführt. Bild 7 zeigt die Ergebnisse in 2 Diagrammen. Das linke Diagramm beinhaltet die relative Veränderung des dynamischen Schubmoduls  $|G^*|$  über die Versuchstemperatur von + 46 °C bis + 58 °C. Die rechte Abbildung zeigt die Veränderung des Phasenwinkels  $\phi$  über die Versuchstemperatur. Das dargestellte Ergebnis des extrahierten Bindemittels ist ein Mittelwert aus drei Proben inkl. 95-%-Konfidenzintervall. Die schwarze Linie stellt die Ergebnisse des RTFOT+PAV-gealterten Bindemittels dar. Wie man in beiden Diagrammen erkennen kann, führen die gewählten Alterungsbedin-

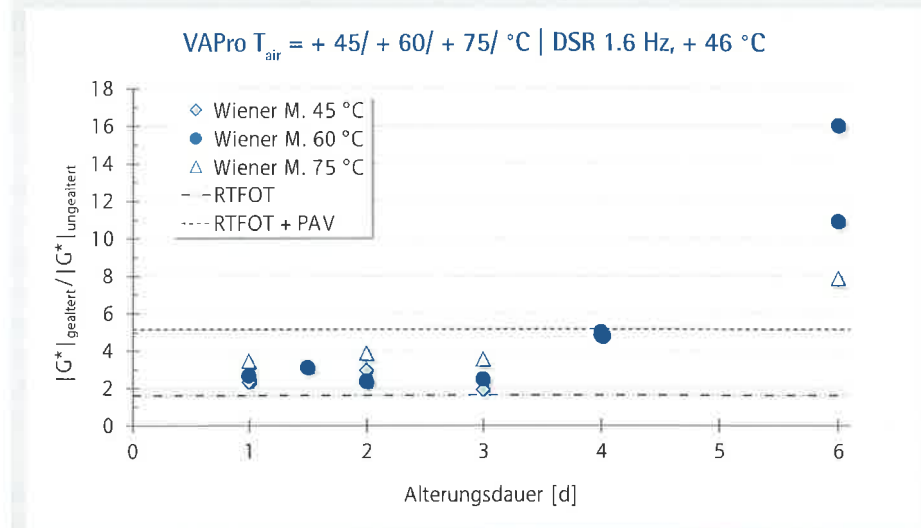


Bild 6: Veränderung des komplexen Schubmoduls  $|G^*|$  des rückgewonnenen Bitumens. VAPro relativ zum ungealterten Bitumenniveau

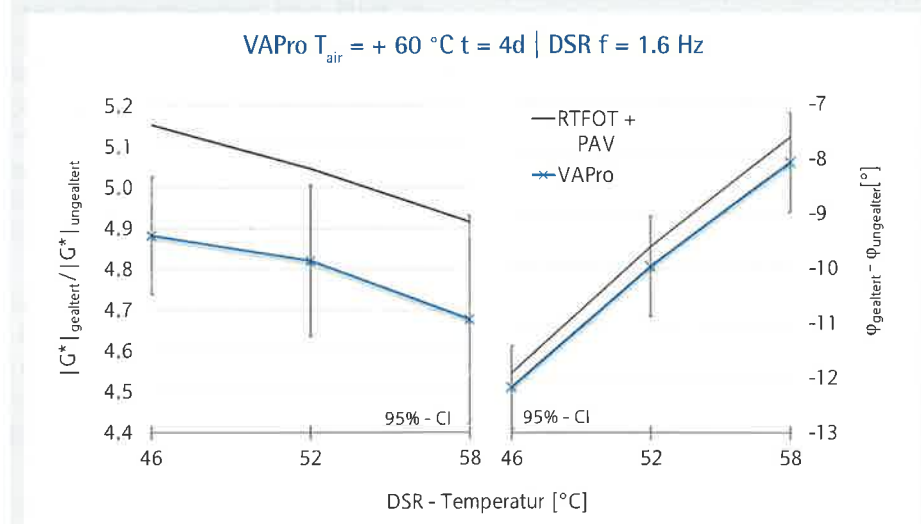


Bild 7: Veränderung des komplexen Schubmoduls  $|G^*|$  (links) und des Phasenwinkels  $\phi$  (rechts) des rückgewonnenen Bitumens. VAPro (3 Probekörper) relativ zum ungealterten Bitumenniveau

gungen (+ 60 °C, 4 Tage) zu einem Alterungsniveau, welches sich ähnlich verhält wie mittels RTFOT+PAV gealterte Proben. Das Bitumen nach VAPro ist zwischen 4,7- und 4,9-mal steifer als das ungealterte Bitumen, während hingegen die RTFOT+PAV-Probe zwischen 4,9- und 5,15-mal steifer ist. Betreffend die Veränderung des Phasenwinkels  $\phi$  zeigen sowohl die mit VAPro, als auch die mit RTFOT+PAV gealterten Proben eine Abnahme zwischen 8 und 12°.

#### 5 Schlussfolgerungen und zukünftige Untersuchungen

Die Hauptmotivation der Studie war es, eine effiziente Labor-Alterungsmethode für verdichtete Asphaltprobekörper zu entwickeln,

die die Langzeitalterung abbildet, um Mischgutoptimierungen in Bezug auf langfristige Materialveränderungen durchführen zu können.

Die vorgestellte Alterungsmethode, die VAPro (Viennese Ageing Procedure), ist eine Erweiterung eines Verfahrens, welches in SHRP-A-383 beschrieben wird [4]. VAPro basiert auf einer Druckzelle, in der ein Probekörper bei erhöhter Temperatur mit einem hochoxidativen Alterungsgas durchströmt wird. Im Gegensatz zu herkömmlichen Alterungsmethoden für loses oder verdichtetes Mischgut arbeitet VAPro mit Temperaturen, die den gewöhnlichen Bedingungen im Sommer auf Deckschichten entsprechen (+ 45 bis + 75 °C). Dadurch wird sichergestellt, dass die hervorgerufenen chemischen Reaktionen in VAPro je-

nen, die im Feld auftreten können, möglichst nahekomen. Nichtsdestotrotz wird zur Simulation eine Beschleunigung der Reaktionen benötigt, die durch die Verwendung von mit Ozon und Stickoxiden angereicherter Druckluft erzielt wird. Beide Gase treten zwar auch im Feld auf, jedoch in geringeren Konzentrationen.

Um die Veränderungen des viskoelastischen Materialverhaltens am Asphalt zu untersuchen, wurden dynamische Spaltzug-Schwellversuche (Steifigkeit) [13] an ungealterten und gealterten Probekörpern durchgeführt. Dabei wurden die Veränderungen des dynamischen Moduls  $|E^*|$  verglichen. Zusätzlich wurden aus allen laborgealterten Probekörpern Bitumen rückgewonnen und DSR-Versuche durchgeführt, um auch die Veränderungen der mechanischen Kennwerte im Bitumen zu analysieren und mit ungealterten Bitumen zu vergleichen.

In einer Nebenfragestellung wurde durch die Verwendung von Stickstoff anstatt der Oxidationsgase nachgewiesen, dass keine thermische Alterung bei VAPro auftritt.

VAPro wurde an Asphaltprobekörpern bei + 45 °C, + 60 und + 75 °C und einer Alterungsdauer von 1 bis 6 Tagen durchgeführt, um eine Abschätzung der Auswirkungen dieser Parameter auf die Alterung zu untersuchen.

Anhand der Steifigkeitsprüfungen zeigt sich, dass Alterungszeiträume von 3 Tagen und weniger zu keiner signifikanten Alterung bei + 45 °C führten. Bei + 60 °C und + 75 °C tritt nach 2 Tagen eine signifikante Alterung auf, wobei Unterschiede zwischen beiden Temperaturen nur nach 6 Tagen Alterung erkennbar sind. Im Allgemeinen besteht bei VAPro ein Zusammenhang zwischen der Zunahme an Steifigkeit und der Alterungszeit.

Betreffend die extrahierten Bindemittelproben, ist es offensichtlich, dass die Steifigkeit im Sinne des dynamischen Schubmoduls  $|G^*|$  auf eine nicht-lineare, exponentielle Weise mit der Alterungsdauer zunimmt. Bei einer Alterungsdauer von 3 oder weniger Tagen kann bei keiner der drei angewandten Alterungstemperaturen eine signifikante Auswirkung auf das Bitumenverhalten festgestellt werden. Vier Tage Alterung bei + 60 °C entspricht einem Alterungsniveau nach RTFOT+PAV; 6 Tage Alterung führt zu einer 2- bis 3-mal höheren Bitumensteifigkeit als nach RTFOT+PAV gealterten Proben.

In einer ersten Untersuchung zur Wiederholbarkeit mit drei Asphaltprobekörpern, die

nacheinander bei + 60 °C für 4 Tage gealtert wurden, wurde eine ausgezeichnete Wiederholbarkeit festgestellt.

Da die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse den Erwartungen der Studie entsprechen, wird die Forschung an VAPro wie folgt fortgesetzt werden:

- Eine detaillierte Analyse der Oxidationsgase mittels eines Gasanalyse-Systems (Massenspektrometer) wird durchgeführt werden, um das Gasgemisch hinsichtlich der Konzentration der oxidierenden Gase, der Temperatur und des Durchflusses zu optimieren.
- Ein Probefeld, das im Sommer 2012 am Gelände der TU Wien errichtet und bei dem gleiches Mischgut wie in der vorliegenden Studie verwendet wurde (Hofko et al. 2014), wird regelmäßig beprobt werden, um eine Datengrundlage zur Feldalterung von Asphaltmischgut und Bitumen aufzubauen. Diese Daten dienen in Zukunft dazu, VAPro-Parameter so festzulegen, dass die VAPro-Alterung ähnliche Auswirkung auf Asphaltmischgut und Bitumen hat, wie nach mehreren Jahren im Feld.
- Das Alterungssystem wird für andere Probekörperabmessungen adaptiert werden, damit auch Tieftemperatur- und Ermüdungs-Versuche von im Labor gealterten Probekörpern durchgeführt werden können.
- Die Auswirkungen verschiedener Parameter in der Mischgutzusammensetzung, wie beispielsweise der Hohlraum- und der Bindemittelgehalt oder die Herkunft des Gesteins, auf das Alterungsverhalten werden untersucht werden.

#### Literaturverzeichnis

[1] ASTM, ASTM D2872-12e1: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). West Conshohocken, PA, 2012

[2] ASTM, ASTM D6521-13: Standard Practice for Accelerated Ageing of Asphalt Binder Using a Pressurized Ageing Vessel (PAV). West Conshohocken, PA, 2013

[3] Baek, C.; Underwood, B. S.; Kim, Y. R.: Effects of Oxidative Aging on Asphalt Mixture Properties. Transportation Research Record, 2012 (2296)

[4] Bell, C. A.; et al.: Selection of Laboratory Ageing Procedures for Asphalt Aggregate Mixtures (SHRP-A-383), in Strategic Highway Research Program. National Research Council: Washington, D. C., 1994

[5] CEN, EN 12607-1: Bitumen and bituminous binders – Determination of the resistance to

hardening under the influence of heat and air – Part 1: RTFOT method. Brussels, 2007

[6] CEN, EN 12697-3: Asphalt – Prüfverfahren für Heiasphalt – Teil 3: Rckgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer. Brussels, 2013

[7] CEN, EN 12697-33: Asphalt – Prüfverfahren für Heiasphalt – Teil 33: Probestckvorbereitung mit einem Rollenverdichtungsgert. Brussels, 2013

[8] CEN, EN 12697-35: Asphalt – Prüfverfahren für Heiasphalt – Teil 35: Labormischung. Brussels, 2007

[9] CEN, EN 14769: Bitumen and bituminous binders – Accelerated long-term ageing conditioning by a Pressure Ageing Vessel (PAV). Brussels, 2012

[10] CEN, EN 14770: Bitumen and bituminous binders – Determination of complex shear modulus and phase angle – Dynamic Shear Rheometer (DSR). Brussels, 2005

[11] etinkaya, R.: Bewertung der Einflussgren auf die thermisch-oxidative Alterung von Bitumen im Asphalt. Schriftenreihe Lehrstuhl fr Verkehrswegebau. Bochum; Germany, 2011: Europ. Univ.-Verl. ISBN: 978-3-89966-623-6

[12] da Costa, M. S. et al.: Chemical and Thermal Characterization of Road Bitumen Ageing. Advanced Materials Forum V, Pt 1 and 2, 2010. 636-637

[13] Forschungsgesellschaft fr Straen- und Verkehrswesen e. V.: AL Sp-Asphalt 09. Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgre in die Dimensionierung. 2009. FGSV Verlag, Kln

[14] Hofko, B. et al.: Impact of Field Ageing on Low-Temperature Performance of Binder and Hot Mix Asphalt. in Proceedings of the 12th ISAP Conference on Asphalt Pavements. 2014. Raleigh, NC

[15] Kogelschatz, U.: Dielectric-Barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2003. 23b (1)

[16] Lu, X. H. Isacson, U.: Chemical and rheological evaluation of ageing properties of SBS polymer modified bitumens. Fuel, 1998. 77 (9-10)

[17] Morian, N. et al.: Oxidative Ageing of Asphalt Binders in Hot-Mix Asphalt Mixtures. Transportation Research Record, 2011 (2207)

[18] Petersen, J. C. et al.: Binder Characterization and Evaluation Volume 4: Test Methods (SHRP-A-370), in Strategic Highway Research Program. National Research Council: Washington, D. C., 1994

[19] Steiner, D.: Entwicklung und Optimierung einer Labor-Alterungsmethode fr Asphaltprobekrper zur Simulation der Langzeitalterung und Bewertung der Alterungsbestndigkeit, in: Institut fr Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich fr Straenwesen. Technische Universitt Wien: Wien, Austria, 2014

[20] Steiner, D.; Hofko, B.; Blab, R.: Effect of Air Void Content and Repeated Testing on Stiffness of Asphalt Mix Specimen. in CIVIL ENGINEERING CONFERENCE IN THE ASIAN REGION CECAR 7. 2016. Waikiki, USA

[21] Teshale, E. Z. et al.: Pressure Ageing Vessel and Low-Temperature Properties of Asphalt Binders. Transport Research Record: Journal of the Transport Research Board, 2011 (2207)