



Bundesamt für Strassen ASTRA

Optimales AsphaltmischgutAlterungsverfahren zur Berücksichtigung in der rechnerischen Dimensionierung OptiMAI

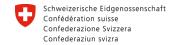
Ein Projekt finanziert im Rahmen der D-A-CH Kooperation
Verkehrsinfrastrukturforschung 2017

DACH 2017

Mai 2020









Bundesamt für Strassen ASTRA

Impressum:

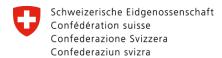
Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) Invalidenstraße 44 10115 Berlin Deutschland



Bundesministerium für Klimaschutz (BMK) Radetzkystraße 2 1030 Wien Österreich Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

Bundesamt für Strassen (ASTRA) Mühlestrasse 2, Ittigen 3003 Bern Schweiz



Bundesamt für Strassen ASTRA

Für den Inhalt verantwortlich:

Technische Universität Wien Institut für Verkehrswissenschaften (IVWS) Gusshausstraße 28/230/3 1040 Wien Österreich





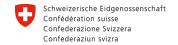
Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH Thematische Programme Sensengasse 1 1090 Wien Österreich



OptiMAI







Bundesamt für Strassen ASTRA

Optimales AsphaltmischgutAlterungsverfahren zur Berücksichtigung in der rechnerischen Dimensionierung OptiMAI

Forschungsprojekt finanziert im Rahmen der
D-A-CH Kooperation
Verkehrsinfrastrukturforschung 2017
D-A-CH 2017

AutorInnen:

Daniel Maschauer Michael P. Wistuba

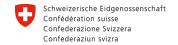
Bernhard Hofko Johannes Büchner

Lukas Eberhardsteiner

Hinrich Grothe Jörg Patzak

Ayse Nur Koyun Christiane Weise







Bundesamt für Strassen ASTRA

Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Deutschland Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Österreich Bundesamt für Strassen, Schweiz

Auftragnehmer:

Technische Universität Wien
Institut für Verkehrswissenschaften (IVWS)
Gusshausstraße 28/230/3
1040 Wien
Österreich

Technische Universität Wien Institut für Materialchemie (IMC) Getreidemarkt 9/E165

Technische Universität Braunschweig Institut für Straßenwesen (ISBS) Beethovenstraße 51 b 38106 Braunschweig Deutschland

Technische Universität Dresden
Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau (ISS)
Helmholtzstraße 10
01069 Dresden
Deutschland





Bundesamt für Strassen ASTRA

INHALTSVERZEICHNIS

1		/issens und Zielsetzung des Forschungsprojekts OptiMAI eines	
	3	gsverfahren	
	1.3 Rechne	rische Dimensionierung	. 10
2	J	eise	
3		icht ines	
		rsuchungsmethodik	
	3.1.1.1	Bitumenalterung	. 13
	3.1.1.2	Mechanische Analysemethoden	. 14
	3.1.1.3	Chemische Analysemethoden	. 21
	3.1.2 Verw	endete Materialien	. 26
	3.1.2.1	Beschreibung der Probestrecke	. 26
	3.1.2.2	Charakterisierung der Ausgangsmaterialien	. 29
		rung bestehender Asphaltalterungsmethoden (AP2)	
		ung und Optimierung einer Asphaltalterungsmethode (AP3) erentwicklung der festgelegten Alterungsmethode	
	3.3.1.1	UV-A und UV-B Alterungsstudie	
	3.3.1.2	Entwicklung und Konstruktion der neuen Alterungszelle für	. 00
	0.0.1.2	prismatische Probekörper	. 60
	3.3.2 Festl	egung der Parameter der neuen Zelle	. 62
		ung der empfohlenen Methode (AP4)	
	J	meines	
		ierung des Alterungsverfahrens	
		programm zur Ermittlung der erforderlichen Materialkennwerte und 6	
		Allgemeines	
	3.4.3.2	Untersuchungen auf Asphaltebene	
	3.4.3.3	Untersuchungen auf Bitumenebene	
		entierung in die rechnerische Dimensionierung (AP5)	
	•	ementierung in die deutsche Dimensionierungsmethode	
	3.5.1.1	Berechnungsverfahren nach den RDO Asphalt 09	. 81
	3.5.1.2	Parameterentwicklung infolge VAPro-Alterung	. 87
	3.5.1.3	Grundlagen für die Berechnungen	. 91
	3.5.1.4	Ergebnisse der Berechnungen mit dem Programm ADtoPave (Mehrschichtentheorie)	



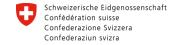




Bundesamt für Strassen ASTRA

	3.5.1.5	Ergebnisse der Berechnungen mit SAFEM (semianalytische FE- Methode)103
	3.5.2 lr	mplementierung in die österreichische Dimensionierungs-methode 106
	3.5.2.1	Betrachtung im Grenzzustand der Tragfähigkeit 106
	3.5.2.2	Betrachtung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit 109
3		mplarische Anwendung des Gesamtkonzepts (AP6)
	3.6.1.1	Versuchsergebnisse AC 110
	3.6.1.2	Parameterentwicklung infolge VAPro-Alterung 110
	3.6.1.3	Rechnerische Dimensionierung und Ergebnisse AC 113
	3.6.2 A	nwendung im Rahmen der österreichischen Methode 119
	3.6.2.1	Betrachtung im Grenzzustand der Tragfähigkeit 119
	3.6.2.2	Betrachtung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit 119
	3.6.3 Z	Zusammenfassende Bewertung
4	Zusamm	enfassung und Ausblick
Lite	raturverze	eichnis
Anh	ang	131







Bundesamt für Strassen ASTRA

1 STAND DES WISSENS UND ZIELSETZUNG DES FORSCHUNGSPROJEKTS OPTIMAL

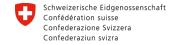
1.1 Allgemeines

Asphaltmischgut, zusammengesetzt aus Füller, feinen und groben Gesteinskörnungen, sowie bitumenhaltigem Bindemittel, ist ein wesentlicher Baustoff im Infrastrukturbau. Mehr als 90% aller, mit gebundenen Baustoffen befestigten Straßen in Deutschland, Österreich und der Schweiz sind Asphaltstraßen (Blab et al., 2012); daneben werden Asphaltbefestigungen auch für Parkplätze, Gehund Radwege, Flugbetriebsflächen, in Hafenanlagen, im Deponie- und Bahnbau verwendet. Obwohl die Bindemittelkomponente im Asphaltmischgut nur etwa 4 M.-% bis 10 M.-% ausmacht, ist sie für das viskoelastoplastische Verhalten von Asphalt verantwortlich. Die Viskoelastizität ist eine wesentliche Eigenschaft, dass Asphaltstraßen aufgrund der Relaxationsfähigkeit nahezu fugenlos ausgeführt werden können, und sie verhindert Rissbildung bei tiefen Temperaturen (Isacsson and Zeng, 1998). Auch sogenannte Healing-Effekte werden durch Bitumen ermöglicht, wodurch bei längeren Lastpausen eine teilweise Regeneration des Ermüdungszustandes eintritt (Bhasin et al., 2011). Im höheren Temperaturbereich kann es bei nicht entsprechender Zusammensetzung des Mischguts zu bleibenden Verformungen kommen (Francken, 1977; Hofko and Blab, 2010).

Von wesentlichem Einfluss auf die Eigenschaften der Asphaltstraße kann eine Veränderung der Bindemittelkomponente mit der Zeit sein, die zusammengefasst als Alterung bezeichnet wird. Dabei wird Alterung i. a. in zwei Phasen unterschieden: (a) die Kurzzeitalterung, die während des Transports und der Lagerung von Bitumen, sowie bei Produktion, Transport und Einbau des Mischguts entsteht und (b) die Langzeitalterung, die während der Liegedauer von verdichteten Asphaltschichten auftritt. Kurzzeitalterung ist geprägt durch rasche Oxidation bei hohen Temperaturen (150°C und mehr) und großer spezifischer Oberfläche während der Mischgutproduktion (Poulikakos et al., 2014). Zudem verdunsten verbliebene, niedrigsiedende Öle. Die Langzeitalterung tritt bei natürlichen Umweltbedingungen auf und wird durch langsam fortschreitende Oxidation vorangetrieben (Ma et al., 2008). Neue Studien zeigen, dass das Oxidationspotential von atmosphärischem Sauerstoff O₂ bei den im Feld vorhandenen Temperaturen nicht ausreicht, um Oxidation in einem Ausmaß auszulösen wie es auf Deckschichten zu beobachten ist (Hofko et al., 2015). Vielmehr müssen hoch-reaktive sauerstoffhaltige Gase (sog. Reactive Oxygen Species, ROS), die in geringeren Konzentrationen, jedoch ebenso dauerhaft verfügbar sind, in der

7







Bundesamt für Strassen ASTRA

Alterung berücksichtigt werden (Seinfeld and Pandis, 2016). Dies sind vor allem Ozon, Stickoxide und OH Radikale, sogenannter Photosmog. Grundsätzlich gilt, dass oberflächennahe Bereiche deutlich stärker oxidieren als tieferliegende Schichten. Höherer Hohlraumgehalt begünstigt das Fortschreiten der Alterung in die Tiefe. Insgesamt führt Alterung auf makroskopischer, mechanischer Ebene zu einer Verhärtung und Versprödung des Bindemittels. Aus chemisch-physikalischer Sicht ist die Verhärtung durch eine Erhöhung der polaren Bestandteile durch Oxidation zu erklären, die Versprödung vor allem durch eine Veränderung des Polaritätsgefüges im Kolloidalsystem. Wie in Abbildung 1 dargestellt, kommt es durch fortschreitende Oxidation des Mantels um die Partikelzentren zu einem immer steiler werdenden Polaritätsgradienten zwischen dem Kern der Partikel und der umgebenen Matrix, was zu einer Veränderung in der Mikrostruktur und damit zu einer mechanischen Sollbruchstelle führt (Hofko et al., 2015).

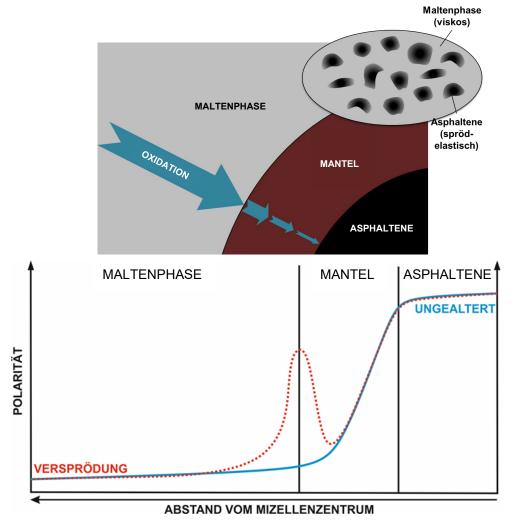
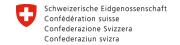


Abbildung 1:Modellvorstellung zur Veränderung des Polaritätsgefüges im Kolloidalsystem infolge Oxidation (Hofko et al., 2015)







Bundesamt für Strassen ASTRA

Im Straßenaufbau nimmt mit fortschreitender Alterung einerseits die Beständigkeit gegen bleibende Verformungen durch zunehmende Steifigkeit zu, während durch abnehmende Rissbeständigkeit Relaxationsfähigkeit die bei tiefen Temperaturen Ermüdungsbeständigkeit tendenziell abnehmen (Hofko et al., 2014). Rein auf die makroskopische Ebene abzielende, mechanische Charakterisierungsverfahren sind nicht ausreichend, um das notwendige Verständnis zur Alterung zu erhalten. Vielmehr müssen die komplexen Zusammenhänge zwischen dem mechanischem Verhalten und den Veränderungen in der Mikrostruktur einerseits, sowie deren Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung andererseits vertieft werden (Hofko et al., 2016; Eberhardsteiner et al., 2015a; Eberhardsteiner et al., 2015b). Daher ist die Einbeziehung von Experten aus anderen Gebieten, speziell der Mikroskopie und Spektroskopie notwendig, um Fortschritte auf dem Gebiet erzielen zu können.

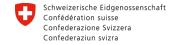
1.2 Alterungsverfahren

Standardisierte Methoden um Kurz- und Langzeitalterung auf Bitumenebene simulieren zu können, sind der Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) (CEN, 2014), der Rotating Cylinder Aging Test (RCAT) (CEN, 2007) und der Pressure Aging Vessel (PAV) (CEN, 2012b). Während RTFOT rein die Kurzzeitalterung und darauf aufbauend PAV die Langzeitalterung simulieren, können mit dem RCAT beide Alterungsstufen berücksichtigt werden. Korrelation zwischen RTFOT im Labor und Kurzzeitalterung in Mischanlagen ist durch Studien belegt (Huang et al., 1996; Verhasselt, 1997; Lee et al., 2008). Im PAV wird durch erhöhte Temperatur (90°C-110°C) und erhöhten Druck (21 bar) angestrebt, die Oxidation zu beschleunigen und so in wenigen Stunden die Langzeitalterung, die im Feld während 5 bis 10 Jahren auftritt, anzunähern. Es wird jedoch bezweifelt, dass der erhöhte Druck und die hohen Temperaturen tatsächlich zu denselben chemischen Reaktionen in Bezug auf die Alterung führen, wie im Feld (Galal and White, 1997; Qin et al., 2014). Korrelationen zwischen Labor- und Feldalterung sind daher eingeschränkt gültig. Dies gilt speziell für polymermodifiziertes Bitumen, bei dem die UV-Strahlung wesentlich zur Alterung (Degeneration) des Polymers beiträgt und diese im PAV nicht berücksichtigt wird.

Auf Ebene des Asphaltmischguts gibt es bisher kein normiertes Verfahren zur Simulation des Alterungsverhaltens. Allerdings wurde in den letzten Jahren eine "technical specification (TS)", eine Vornorm, auf europäischer Ebene entwickelt. In dieser TS 12697-52 (CEN, 2015) werden verschiedene Methoden zusammengefasst. Im Rahmen der nächsten Überarbeitung dieser TS im Jahr 2020 soll auf Basis von Erfahrungen aus Studien

9







Bundesamt für Strassen ASTRA

eine Methode für Kurz- und Langzeitalterung ausgewählt und die TS in eine Europäische Norm (EN) umgewandelt werden, die von den Mitgliedstaaten für die Normierung der Erstprüfung bindend sein wird.

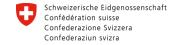
Das erste Ziel des Projekts OptiMAI ist hier bestehende Methoden zu evaluieren, wesentliche Kriterien zu bestimmen und ein geeignetes Verfahren auszuwählen und zu optimieren.

1.3 Rechnerische Dimensionierung

Mit den deutschen Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht – RDO Asphalt 09 (FGSV, 2009), welche wesentlich am Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau der TU Dresden (TUD) erarbeitet wurden, ist im Vergleich zur konventionellen Dimensionierungsmethodik (FGSV, 2012) ein wesentlicher Schritt hin zu einer ökonomischen und nachhaltigen Dimensionierung von Verkehrsflächenbefestigungen in Asphaltbauweise erfolgt. Dimensionierungsrelevante Materialkennwerte und -kennwertfunktionen gehen in die Dimensionierung ein: so werden die temperatur- und frequenzabhängige Steifigkeit von Asphaltschichten und die Ermüdungsfunktion der Tragschicht berücksichtigt. Lastseitig greift die Methode auf eine statistische Verteilung von 11 Achslastklassen zurück (Uhlig, 2007). Für die Berücksichtigung der Temperaturbedingungen werden 13 Temperaturklassen mit zugehöriger Auftretenshäufigkeit verwendet. Unterschiedlichen klimatischen Bedingungen und damit unterschiedliche Verteilungen der Oberflächentemperaturen, wird durch eine Temperaturzonenkarte Rechnung getragen.

In der österreichischen Bemessungsmethodik mit dem Bemessungskatalog gemäß RVS 03.08.63 (FSV, 2016) kommen Kalibrierfaktoren zur Abstimmung Ermüdungsverhaltens unterschiedlicher Bautypen aufeinander zur Anwendung. Diese Faktoren beinhalten Anteile zur Berücksichtigung u.a. der Ausfallverteilung auf Netzebene, des Size-Effects zwischen Ermüdung in der Straße und im Labor und der Alterung, die jedoch nicht getrennt voneinander definiert sind (Litzka et al., 1996). Auch in der rechnerischen Dimensionierung gemäß RVS 03.08.68 kommen solche Faktoren zur Anwendung. Eine direkte Berücksichtigung des Alterungsverhaltens unterschiedlicher Mischgüter ist in der Bemessung in Österreich daher momentan nicht möglich. Da der Vorteil alterungsbeständiger Mischgüter somit wirtschaftlich nicht abbildbar ist, passiert in der Regel keine Optimierung in diese Richtung.







Bundesamt für Strassen ASTRA

Das zweite Ziel des Forschungsprojekts ist es die bestehenden Modelle zur rechnerischen Dimensionierung derart zu optimieren, um in Zukunft eine Mischgutoptimierung unter Einbezug der Effekte der Asphaltalterung zu ermöglichen.

2 VORGEHENSWEISE

Im Projekt (Abbildung 2) wurden zunächst vorhandene Verfahren zur Langzeitalterung von Asphaltmischgut umfassend evaluiert (AP 2). Dazu wurden die Verfahren, die in der TS 12697-52 vorgesehen sind, berücksichtigt. Zu diesen Methoden bestehen zahlreiche Publikationen, die zum Teil (bis zum Erscheinungsjahr 2012) bereits in Vorprojekten ausgewertet wurden. Neuere Studien wurden im Rahmen dieses Projekts berücksichtigt.

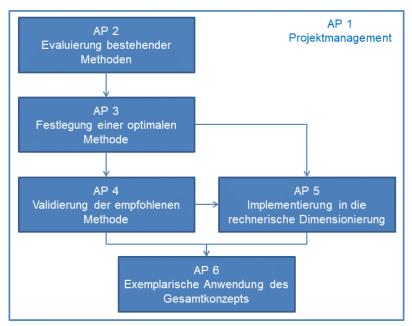
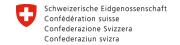


Abbildung 2: Vorlage Abbildungsbeschriftung

Diese Bewertung ist Grundlage für die Anpassung und Festlegung eines optimierten Alterungsverfahrens (AP 3), sodass es die Anforderungen an ein optimales Verfahren in Bezug auf Effizienz, Realitätsnähe und Sicherheit vollständig erfüllt. Dazu wurde ein Prototyp am IVWS entwickelt. Sowohl Oxidation, als auch UV-Strahlung als die zwei wesentlichen Elemente der Langzeitalterung im Feld waren dabei im Fokus der Überlegungen. Während bei Deckschichten die UV-Strahlung eine wesentliche Rolle in der Verhärtung der Oberfläche spielt, kann dies bei Binderschichten ausgeschlossen werden. Weiter unten liegende Tragschichten sind gemäß Erfahrungen aus vergangenen Studien kaum von Langzeitalterung betroffen. Sichergestellt wurde außerdem, dass mit der Methode verschiedene Probekörpergeometrien homogen konditioniert werden können. Im







Bundesamt für Strassen ASTRA

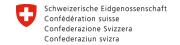
Wesentlichen sind das Probekörper, die für die GVO-Asphaltprüfungen zur Ermittlung der Tieftemperaturbeständigkeit (TSRST und UTST) und des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens (IT-CY) verwendet werden. Um die Grundlage für die Festlegung der Randbedingungen der optimalen Methode zu schaffen, wurde eine straffe Parameterstudie durchgeführt, die sich auf die Analyse von rückgewonnen Bitumenparametern konzentrierte.

Das festgelegte Verfahren, wurde im nächsten Schritt des Projekts umfassend validiert (AP 4). Da der Einfluss der Alterung im Wesentlichen in den Deckschichten signifikant ist, konzentriert sich, wie bereits beim Kick-Off festgelegt, die Analyse auf genau diese Schicht. Dazu wurden Materialien aus einer Probestrecke in Deutschland verwendet. Aus Rückstellproben des ungealterten Bitumens, welches in geringer Menge zur Verfügung stand und ähnlicher Gesteinskörnung wurde eine begrenzte Anzahl an Probekörpern im Labor hergestellt. Diese Probekörper wurden einerseits im Ausgangszustand auf Mischgutund Bitumenebene untersucht und andererseits nach erfolgter Laboralterung. Ein Vergleich mit Ergebnissen des feldgealterten Materials ermöglichte die Validierung des Verfahrens. Diese Validierung beschränkt sich dabei nicht auf makroskopisch feststellbare Veränderungen des mechanischen Verhaltens, sondern bezieht auch ein, wie sich die chemische Struktur und Zusammensetzung während der Alterung verändert. Anschließend wurden umfassende Materialprüfungen an einem, in ausreichender Menge verfügbaren Mischgut zur Aufstellung der Kennwertfunktionen im AP 5 bzw. 6 durchgeführt.

Parallel zu diesem Arbeitspaket, begann die Arbeit am zweiten Schwerpunkt des Projekts, der Implementierung von Alterungsparametern in der rechnerischen Dimensionierung (AP 5). Für die Weiterentwicklung der Dimensionierung wurden Daten zu Steifigkeits-, Ermüdungs- und Abkühlprüfungen an ungealterten und laborgealterten Probekörpern aus den Untersuchungen in AP 3 und AP 4 analysiert, um den Einfluss der Alterung auf die wesentlichen Kenngrößen quantifizieren zu können. Zudem wurde eruiert, welche der mathematischen Modelle geeignet sind, um die zeitlichen Veränderungen der Materialkennwerte und -kennwertfunktionen zu beschreiben. Durch erste Szenario-Berechnungen bei unterschiedlichen Randbedingungen wurde der Einfluss auf die Dimensionierung analysiert. Angestrebt wird, den Einfluss der Alterung im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung (sowohl in Deutschland als auch in Österreich) zukünftig mitzuberücksichtigen.

Abschließend wurde das entwickelte Konzept exemplarisch durchgeführt (AP 6). Anhand der ermittelten Materialparameter wurde eine Dimensionierung nach dem bisher gültigen







Bundesamt für Strassen ASTRA

Konzept und des neu entwickelten Konzepts, dass die Alterung berücksichtigt, umgesetzt. Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Dimensionierungsvarianten in Bezug auf Lebensdauer wurden analysiert.

Eingebettet ist das Projekt in ein Projektmanagement (AP 1), das vom IVWS übernommen wurde. Es stellt die effiziente, zeitgerechte Erreichung aller Projektziele, die interne und externe Kommunikation sicher.

3 ERGEBNISBERICHT

3.1 Allgemeines

Die durchgeführten Arbeiten, Ergebnisse und Erkenntnisse werden in diesem Kapitel beschrieben. Prinzipiell erfolgt die Darstellung dabei geordnet nach den Arbeitspaketen. Allgemeine Themen wie Methodik und Charakterisierung der Ausgangsmaterialien werden von den Arbeitspaketen entkoppelt hier im allgemeinen Teil abgehandelt.

3.1.1 Untersuchungsmethodik

Zur Untersuchung der im Projekt gesammelten Bitumen- und Asphaltproben kommen verschiedenste Methoden zur Anwendung, die nachfolgend beschrieben werden. Die Aufteilung der Untersuchungen auf die Projektpartner erfolgte gemäß Tabelle 1

Tabelle 1: Aufteilung der Materialuntersuchungen auf die Projektpartner

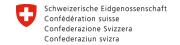
Projektpartner	Bitumen- untersuchungen	Asphalt- untersuchungen	Chemische Untersuchungen
IVWS	X *	X *	
IMC			X
ISBS	X	X	
TUD		X	

^{*}vereinzelte Untersuchungen

3.1.1.1 Bitumenalterung

Zur Simulation des Alterungsverhaltens im Labor haben sich auf Bitumeneben zwei Verfahren international etabliert. Der "Rolling-Thin-Film-Oven-Test" (RTFOT) nach EN 12607-1 (CEN, 2014) simuliert im Labor die Alterung des Bindemittels, die es im Straßenbau während der Herstellung, der Lagerung, des Transports und der Verarbeitung erfährt. Hierfür rotieren acht, mit einer definierten Bitumenmenge von 35 g gefüllten runden Glasbehälter in einer Wärmekammer bei 163°C horizontal um ihre eigene Achse (Abbildung 3, links). Zusätzlich wird während der Rotation heiße Luft in die Öffnung der Glasbehälter







Bundesamt für Strassen ASTRA

eingeblasen. Der in den Gläsern dünne rollende Bitumenfilm oxidiert aufgrund seiner großen Oberfläche, der Hitze und der eingeblasenen Luft stark und ändert so seine Eigenschaften. Nach einer Alterungsdauer von 75 Minuten bei konstanter Temperatur ist die RTFOT-Alterung abgeschlossen.



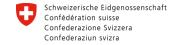
Abbildung 3. RTFOT-Ofen (links) und PAV-Druckalterungsbehälter (rechts).

Zur Simulation der Langzeitalterung nach dem Einbau des Asphalts steht das Laboralterungsverfahren mit dem Pressure Aging Vessel (PAV) nach EN 14769 (CEN, 2012b) zur Verfügung. Das PAV besteht aus einem Druckalterungsbehälter mit angeschlossener Druckluftversorgung (Abbildung 3, rechts). Das Bitumen wird in flachen Metallschalen einer Temperatur von $(90 \pm 1)^{\circ}$ C und einem Druck von $(2,1 \pm 0,1)$ MPa über einen festgelegten Zeitraum von 20 Stunden ausgesetzt, was den Alterungsprozess simulieren soll, den das Bindemittel während der durchschnittlichen Asphaltliegedauer von ca. 5-10 Jahren erfährt. Durch den konstant einwirkenden Druck bilden sich kleine Lufteinschlüsse, die die Oxidation des Bitumens fördern und durch eine, der PAV-Alterung angeschlossen Erhitzung des Bitumens im Ofen bei 170°C über 30 Minuten, wieder entfernt werden.

3.1.1.2 Mechanische Analysemethoden

Um Alterungsverfahren zu validieren und den Einfluss von Alterung zu quantifizieren, ist es notwendig, Bitumen und Asphaltmischgut aus Labor- und Feldalterung mit entsprechenden Methoden mechanisch zu charakterisieren und zu vergleichen. Auf Asphaltniveau bieten Gebrauchsverhaltensorientierte (GVO) Prüfmethoden zur Ermittlung der Beständigkeit gegen bleibende Verformungen und Rissbildung bei tiefen Temperaturen, sowie bei Dauerbeanspruchung (Ermüdung) ein ausgereiftes Instrumentarium. Auf Bitumenniveau existieren zahlreiche mechanische Methoden, wobei empirische Prüfmethoden







Bundesamt für Strassen ASTRA

(Penetration, Erweichungspunkt Ring und Kugel, Brechpunkt nach Fraaß) aufgrund mangelnder Korrelation mit dem tatsächlichen Gebrauchsverhalten nicht alleinstehend anwendbar sind. GVO Methoden, wie das Dynamische Scherrheometer (DSR) oder die Abkühlprüfung (TSRST) sind ausgereifte Alternativen. Im Folgenden werden die verwendeten Methoden kurz beschrieben.

Methoden auf Bitumenebene

Dynamisches Scherrheometer (DSR)

Das DSR ist ein in Forschung und Industrie weit verbreitetes Gerät zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften verschiedenster Materialen. Allgemein besteht das Gerät aus zwei parallelen runden Platten, wobei das zu prüfende Material dazwischen eingebaut wird (Der Durchmesser der Platten ist von der Viskosität des zu prüfenden Materials abhängig; bei Bitumen kommen üblicherweise Durchmesser von 4 mm, 8 mm oder 25 mm zum Einsatz). Die obere Platte oszilliert und bringt damit eine definierte Scherspannung oder Deformation auf die Probe auf. Die, aufgrund des viskoelastischen Materialverhaltens, zeitverzögerte Verformung der Probe wird gemessen. Durch Temperierung der unteren Platte kann dieser Versuch bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt werden. Abbildung 4 zeigt eine skizzenhafte Darstellung des Messprinzips und den Zusammenhang zwischen aufgebrachter Spannung und resultierender Verformung.







Bundesamt für Strassen ASTRA

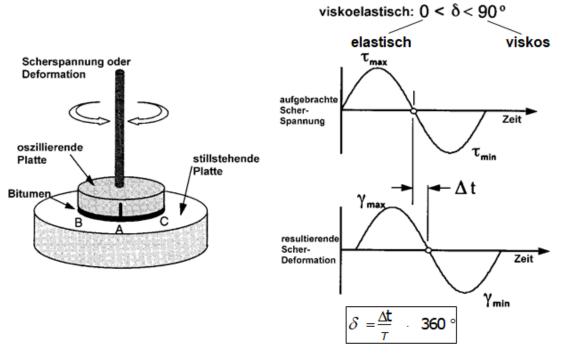


Abbildung 4. Schematische Darstellung des Messprinzips des Dynamischen Scherrheometers [nach (ASPHALT INSTITUTE, 1994)]

Mit dem am ISBS entwickelten Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren (BTSV) im DSR steht ein geeignetes Hilfsmittel zur Verfügung, um die Änderung der Bitumeneigenschaften durch Alterung effizient zu charakterisieren. Bei diesem Verfahren wird eine Bitumenprobe (ca. 1 g) zwischen zwei parallele Platten mit einem Durchmesser von 25 mm und einem Plattenabstand von 1 mm im DSR eingebaut. In Anlehnung an den Erweichungspunkt Ring und Kugel wird die Temperatur von 20 bis 90°C kontinuierlich (1,2 K/min) gesteigert. Während der Temperierung wird die Bitumenprobe dauerhaft durch Oszillation der oberen Platte mit einer Scherspannung von 500 Pa und einer Frequenz von 1,59 Hz belastet. Die Vorgabe der Scherspannung führt automatisch zu einer Deformation innerhalb des LVE-Bereichs, sofern für |G*| der Wert von 15 kPa nicht unterschritten ist. Nach Durchführung des BTSV kann der temperaturabhängige Verlauf von komplexen Schermodul |G*| und Phasenwinkel δ dargestellt werden (Abbildung 5). Als Ergebnis des BTSV wird jene Temperatur bestimmt, bei der der komplexe Schermodul auf einen Wert von |G*| = 15 kPa abgesunken ist. Diese Temperatur wird als T_{BTSV} bezeichnet. Die zweite abzulesende Größe ist der zu dieser Temperatur korrespondierende Phasenwinkel δ_{BTSV} (vgl. Abbildung 5).





Bundesamt für Strassen ASTRA

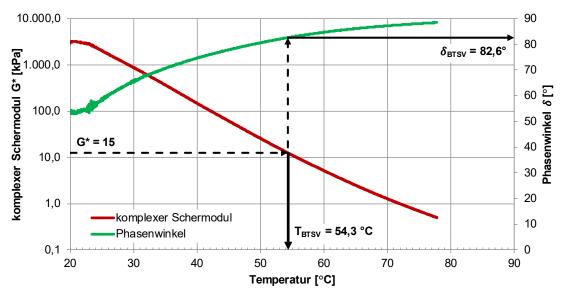
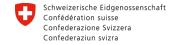


Abbildung 5: Beispiel zur Ableitung der BTSV-Ergebnisse (Alisov, 2017)

Mithilfe der beiden Kennwerte können die rheologischen Eigenschaften von Bitumen präzise beschrieben und damit die Bitumen charakterisiert werden. In Abbildung 6 sind die Spannweiten dieser Kennwerte für verschiedene Bitumen des deutschen Regelwerks TL Bitumen (FGSV, 2013) in Form von Kästchen dargestellt. Es zeigt sich, dass mit T_{BTSV} zwischen der Bindemittelhärte und mit δ_{BTSV} zwischen dem Modifizierungsgrad der Bitumen differenziert werden (Wistuba and Schrader, 2018) kann. Diese Differenzierung ist auch für polymermodifizierte und gealterte Bitumen möglich, bei denen der traditionelle Erweichungspunkt RuK an seine Grenzen (Alisov, 2017) stößt Das BTSV wurde kürzlich mit der DIN 52050 (DIN, 2018) in das deutsche Regelwerk übernommen und seit einem Rundschreiben des Bundeministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI, 2019) in Deutschland flächendeckend eingesetzt

Untersuchungen zum Alterungsverhalten haben gezeigt, dass sich beide BTSV-Kennwerte infolge thermischer und oxidativer Beanspruchung stets proportional zueinander verändern. Die Proportionalität ist dabei jedoch von der Art der Beanspruchung abhängig und bitumenspezifisch. Bei mehrfacher RTFOT- bzw. PAV-Alterung zeigen sich spezifische Verhaltensfunktionen im BTSV-Diagramm (Abbildung 6). Bei einer Gegenüberstellung mit tatsächlich gealtertem Material nach 17 Jahren Liegedauer zeigt sich, dass sich die auf Makroebene, mechanisch messbare Bitumenalterung durch eine Kombination von RTFOT- und PAV-Alterung darstellen lässt. Durch die Kenntnis der lieferfrischen und der gealterten Materialeigenschaften kann das reale Alterungsverhalten spezifiziert werden und mit der Laboralterung verglichen werden. Verschiedene Alterungsverfahren können anhand ihrer







Bundesamt für Strassen ASTRA

Verhaltensfunktionen im BTSV-Diagramm verglichen und hinsichtlich ihrer Eignung bewertet werden.

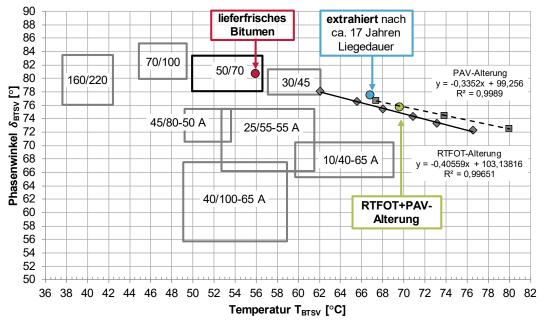


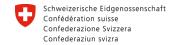
Abbildung 6: Einfluss der Alterung auf BTSV- Kennwerte (Alisov, 2017)

Asphaltebene

Spaltzugschwellversuch (IT-CY) zur Bestimmung der Ermüdungsfunktion und der Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion

Im Spaltzug-Schwellversuch wird eine zylindrische Probekörperscheibe zwischen zwei diametral gegenüberliegenden Lasteinleitungsstreifen belastet. Infolge der Probekörperform und der linienförmigen Lasteinleitung auf der Mantelfläche bildet sich im Probekörper in vertikaler und horizontaler Richtung ein inhomogener Spannungszustand aus. Anhand von Berechnungen mit der Finiten-Elemente-Methode konnte gezeigt werden, dass in der Mitte des Probekörpers über einen Bereich von ca. 70 % des Probekörperdurchmessers die horizontale Zugspannung nahezu konstant ist. An den Lasteinleitungsstellen treten in horizontaler Richtung Druckspannungen auf. Die vertikalen Druckspannungen sind geometriebedingt im Probekörpermittelpunkt am geringsten und an den Lasteinleitungsstellen am größten (siehe Abbildung 7). Im Probekörpermittelpunkt beträgt das Verhältnis zwischen vertikaler Druck- und horizontaler Zugspannung 3 zu 1 (Wellner et al. 2007).







Bundesamt für Strassen ASTRA

Mit Hilfe des Spaltzug-Schwellversuches können die Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion und die Ermüdungsfunktion eines Asphaltgemisches bestimmt werden. Es ist vorteilhaft, den Steifigkeitsmodul bei verschiedenen Temperaturen und Frequenzen zu ermitteln, um so mit Hilfe der Masterkurve ausreichend viele Messpunkte zur sicheren Bestimmung der Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion (siehe Abbildung 8) zu erhalten.

Vorteile dieses Versuches sind die einfache Probekörperherstellung und -vorbereitung. Es können einerseits Bohrkerne aus im Labor mit dem Walzsektorverdichter hergestellten Platten oder anderseits aus Straßenbefestigungen entnommen Bohrkronen verwendet werden. Die Belastung erfolgt ausschließlich über Druckkräfte. Außerdem können die zur Auswertung notwendigen Horizontalverformungen direkt am Probekörper bestimmt werden. Die Durchführung und Auswertung des Spaltzug-Schwellversuches ist in den TP Asphalt-StB, Teil 24 und 26 beschrieben (FGSV, 2018).

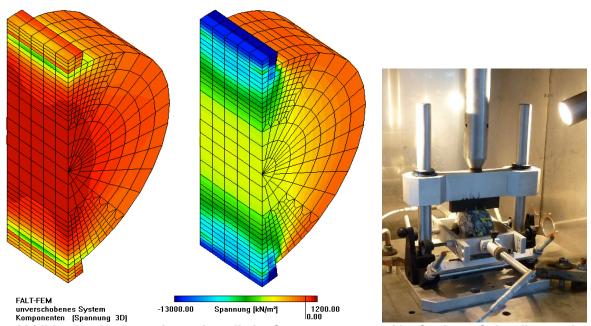
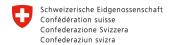


Abbildung 7: Horizontaler und vertikaler Spannungszustand im Spaltzug-Schwellversuch (OESER, 2009)

Mit den Spaltzug-Schwellversuchen sollen im Rahmen des Forschungsvorhabens die dimensionierungsrelevanten Parameterfunktionen bestimmt werden, um mit Hilfe des Verfahrens gemäß den RDO Asphalt 09 (FGSV, 2009) die Auswirkungen verschieden zusammengesetzter Epoxidharze auf die Festlegung der Schichtdicken zu berechnen. Weiterhin sind die Materialparameter für die FE-Simulation der Beanspruchungszustände erforderlich.







Bundesamt für Strassen ASTRA

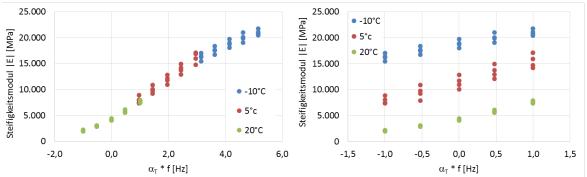


Abbildung 8: Beispiel einer Masterkurve für Asphalt – Zusammenhang zwischen Temperatur, Frequenz und Steifigkeitsmodul

Abkühlprüfung und direkter Zugversuch

Zur Bewertung der Asphalteigenschaften im Bereich der unteren Gebrauchstemperatur werden Abkühlversuche (englisch: Thermal Stress Restrained Specimen Test, TSRST) und Zugversuche (Uniaxial Tension Stress Test, UTST) gemäß EN 12697-46 (CEN, 2012a) durchgeführt.

Beim direkten Zugversuch wird ein prismatischer Probekörper bei konstant gehaltener Temperatur (+20, +5, -10 und -25°C) mit einer zeitabhängigen Zugdehnung beansprucht. Das Ergebnis ist die Zugfestigkeit und die Ausfalldehnung beim Bruch des Probekörpers.

Beim Abkühlversuch wird die Länge des Probekörpers konstant gehalten, während die Temperatur mit der Zeit abgesenkt wird. Aufgrund des verhinderten thermischen Schrumpfens bauen sich im Probekörper zunehmend kryogene Zugspannungen auf. Als Ergebnis des Abkühlversuchs erhält man die Ausfallspannung und die Ausfalltemperatur zum Zeitpunkt des Bruchs. Über die temperaturabhängige kryogene Zugspannung und die Zugfestigkeit aus dem Zugversuch kann außerdem die Zugfestigkeitsreserve berechnet werden (vgl. Abbildung 9).



Bundesamt für Strassen ASTRA

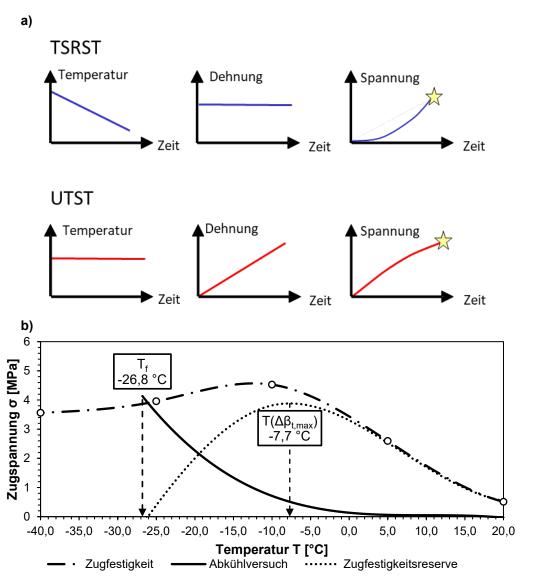


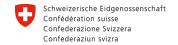
Abbildung 9: a) Schematische Darstellung der Versuchsparameter von TSRST und UTST; b) Beispielhafte Ergebnisse des Zug- und Abkühlversuchs.

3.1.1.3 Chemische Analysemethoden

Rasterkraftmikroskopie (AFM)

AFM ist eine in verschiedenen Disziplinen weit verbreitete Technik, um die Nanomorphologie zu untersuchen. Durch nichtinvasives Abtasten der Materialoberfläche wird durch die atomare Wechselwirkung zwischen Spitze und Probe die Probenoberfläche abgebildet. Abhängig davon, welche Spitze und welcher Abtastmodus verwendet werden, können mechanische Steifigkeit, Nanointendierung, magnetische Informationen oder







Bundesamt für Strassen ASTRA

chemische Kraftwechselwirkung unter Verwendung einer modifizierten Spitze erhalten werden. Die Oberflächentextur spielt eine wichtige Rolle bei den meisten mechanischen Eigenschaften. Die Oberflächenschiefe (SSk), die arithmetische mittlere Rauheit (Sa), die quadratische mittlere Rauheit (Sq) und der Abstand von Spitze zu Spitze (pk-pk) (Höhenunterschied zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Pixel im Bild) liefern entscheidende Informationen über die Oberflächenqualitäten von Werkstoffen und können Aufschluss über die durch die oxidative Alterung hervorgerufene Oberflächenverformung geben. Die Rasterkraftmikroskopie wurde hier im Tapping-Modus betrieben. Alle Messungen wurden mit einem WITec alpha 300 RSA+ Instrument durchgeführt. Stereometrische Analysen der 3D-Oberflächentextur von ungealterten und PAV-gealterten Asphaltbindern wurden hiermit untersucht. Die Oberflächenparameter wurden mit der Software WITec Project 5.0 erfasst und ausgewertet.

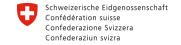
cryo-Rasterelektronenmikroskopie (cryo-ESEM)

Eine wesentlich größere Abbildungsfläche der Oberfläche kann bei tiefen Temperaturen Rasterelektronenmikroskopie (**cryo**genic environmental **s**canning microscopy, cryo-ESEM) erzielt werden. Cryo-ESEM ist eine Methode zur Abbildung der Oberfläche von Proben, um Oberflächenunebenheiten und Strukturen im Mikromaßstab zu erhalten. Ein Strahl hochbeschleunigter Elektronen trifft auf die Probenoberfläche und erzeugt Sekundärelektronen oder rückgestreute Elektronen, die zur Erzeugung des Bildes der Oberfläche verwendet werden. Cryo-ESEM liefert bei sehr niedrigen Temperaturen eine schnelle Beobachtung der mikrostrukturellen Zusammensetzung der Oberfläche, ohne die Oberfläche mit dem Elektronenstrahl zu beschädigen. Die Strukturbildung an der Oberfläche während des Alterns wurde mit Cryo-ESEM untersucht. Durch Gefrierbrechen in der Vorkammer des FEI Quanta 250 FEGSEM wurde eine neue frische Bitumenoberfläche erzeugt und diese Oberfläche wurde abgebildet. Cryo-ESEM (bei 80 K) wurde mit FEI Quanta 250 FEGSEM mit einer Beschleunigung des Elektronenstrahls im Bereich von 20 bis 40 kV durchgeführt. Untersucht wurden die Strukturen auf Form, Größe und Anzahl. Die Größenverteilung der Mikrostrukturen wurde mit ImageJ (Schindelin, 2012) bestimmt und die Gauß'schen Verteilungskurven wurden entsprechend dargestellt.

Infrarotspektroskopie (ATR-FTIR)

Der Zuwachs von Oxidationsprodukten und damit der Nachweis der oxidativen Alterung, lässt sich unter anderem mit der FTIR Spektroskopie (Fourier-Transform-Infrarot-





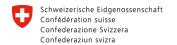


Bundesamt für Strassen ASTRA

Spektroskopie) erbringen. Die funktionellen Gruppen, insbesondere Carbonylbanden bei 1700 cm⁻¹ und Sulfoxidbanden bei 1030 cm⁻¹ wurden herangezogen, um den Carbonyl- bzw Sulfoxidindex zu bestimmen, beide gemeinsam bilden einen Maßstab für die Alterung. Typischerweise wird ein Zuwachs erwartet, wenn bituminöse Bindemittel zur Oxidation neigen (Hofko et al., 2018; Poulikakos et al., 2019). Die Veränderung der chemischen Zusammensetzung als Folge der Oxidation kann entlang der verschiedenen Oxidationsstufen während des gesamten Alterungsprozesses verfolgt werden. Es wurde ein FTIR Spektrometer Bruker Vertex 80v (Bruker, Ettlingen, Deutschland) mit einer abgeschwächten Totalreflexionseinheit GladiATR™ (Pike Technologies, Wisconsin, USA) und einem Diamantkristall verwendet, um die IR-Banden zu bestimmen, die mit der Alterung korrelieren. Die Spektren wurden in einem Bereich zwischen 3200 cm-1 und 650 cm-1 mit einer Auflösung von 2 cm⁻¹ aufgenommen. Für jedes Spektrum wurden 48 Scans akkumuliert. Das Bindemittel wurde im Ofen auf 120°C erhitzt, homogenisiert und auf den Diamantkristall als dünner gleichmäßiger Film aufgebracht. Grundlinienkorrektur wurden die Spektren unter Berücksichtigung der Flächen unterhalb der spezifischen Absorptionsbanden unter Verwendung der OriginPro 2019 - Software analysiert.

Typische Banden wie CO (1666 - 1746 cm⁻¹), SO (924 - 1066 cm⁻¹) sowie die Aliphaten als Referenz (1319 - 1520 cm⁻¹) wurden für die Berechnungen des Alterungsindexes ausgewertet (Hofko et al., 2017). Ein Beispiel für eine Flächenanalyse ist in Abbildung 10: Absorptionsspektrum einer im PAV gealterten Probe mit integrierten grauen Bereichen um die asymmetrischen Streckschwingungen von CO-, SO- und der symmetrischen und asymmetrischen Deformationsschwingungen der Aliphaten. dargestellt, die für die Berechnungen der CO- (1680 cm⁻¹) und SO- (1030 cm⁻¹) Banden verwendet wurden.







Bundesamt für Strassen ASTRA

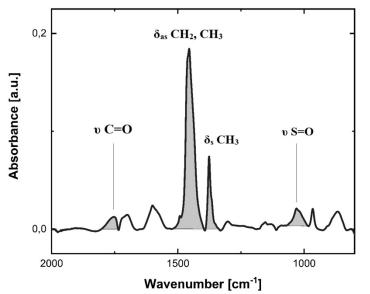


Abbildung 10: Absorptionsspektrum einer im PAV gealterten Probe mit integrierten grauen Bereichen um die asymmetrischen Streckschwingungen von CO-, SO- und der symmetrischen und asymmetrischen Deformationsschwingungen der Aliphaten.

Der Carbonylindex (I_{CO}) und der Sulfoxidindex (I_{SO}) wurden gemäß der Formel berechnet:

$$I_{x} = \frac{Ax}{Ay}(1)$$

A_x Integrationsbereich der CO bzw SO Bande

A_v Referenzbande der Aliphaten

Fluoreszenzspektroskopie

Für die Fluoreszenzspektroskopie wurde ein FSP920 von Edinburgh Instruments verwendet. Das Spektrometer ist mit einer XE900-Xenon-Bogenlampe ausgestattet, welche eine hochintensive Strahlung mit einem breiten Spektrum liefert. Eine sehr enge Auswahl der spektralen Bandbreite kann durch den Aufbau von doppelten Czerny-Turner Monochromatoren (Typ TMS300) gewährleistet werden. Der Detektor ist ein S900-Einphotonen-Photovervielfacher (Typ R928). Mit dem Spektrometer Anregungsmessungen durchgeführt. Zur Probenvorbereitung wurde das Bitumen auf 120°C erhitzt und ein Tropfen Bitumen auf einen Standard-Objektträger aufgetragen. Dieser Objektträger wurde 5 Minuten bei erhöhter Temperatur (80°C) gelagert. Danach wurden die Proben auf Raumtemperatur abgekühlt und Fluoreszenzspektren aufgenommen. Abbildung 11 zeigt beispielhaft ein solches Spektrum. Um den oxidativen Einfluss der Umgebungsluft auf die Probenoberfläche auszuschließen, wurde die Probenkammer kontinuierlich mit Stickstoff gespült, wodurch die Sauerstoffaufnahme der Probe begrenzt wurde. Als Messmethode wurden Anregungsscans (variable Anregung,

24





Bundesamt für Strassen ASTRA

feste Detektionswellenlänge) gewählt. Für die Anregungsscans wurde die gleiche Detektionswellenlänge gewählt, 525 nm, und der Spektralbereich von 200–500 nm Anregungswellenlänge aufgenommen. Wichtig für die Aufnahme ist es, einen 340-nm-Filter zu verwenden, um ein Signal der zweiten Beugungsordnung der Rayleigh-Linie bei 207,5 nm auf dem Detektor zu vermeiden.

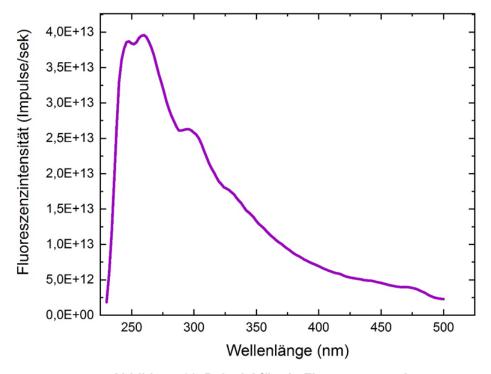
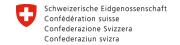


Abbildung 11: Beispiel für ein Fluoreszenzspektrum.

Fluoreszenzmikroskopie

Für die Fluoreszenzmikroskopie wurde ein Nikon Eclipse Ci-L ausgestattet mit einer 100 W Metall-Halid Lichtquelle, einer Digitalkamera (DS-Fi3), einem 100x Plan Fluor Objektiv mit einer numerischen Apertur von 0,9 und einer Epifluoreszenzeinheit mit einem Anregungsfilter bei 465-496 nm, einem dichroitischen Spiegel bei 505 nm und einem Emissionsfilter bei 515 – 555 nm verwendet. Die Fluoreszenzbilder wurden mit der Software NIS Elements BR mit einer Beleuchtungszeit von 700 ms aufgenommen.







Bundesamt für Strassen ASTRA

3.1.2 Verwendete Materialien

Zur Validierung der Alterungsmethode in AP 4 werden Rückstellproben und Proben aus Bohrkernen einer Probestrecke in Thüringen verwendet. Für die Mischgutproduktion und -untersuchungen im Labor wurde ein zur Probestrecke vergleichbares Bitumen, das in ausreichender Menge zur Verfügung stand, gewählt. Die Ausgangsmaterialien wurden umfassend mechanisch und chemisch analysiert

3.1.2.1 Beschreibung der Probestrecke

Die Probestrecke war in den vergangenen Jahren bereits Teil verschiedener Forschungsprojekte (Lipke and Münscher, 2010; Renken et al., 2000; Weninger-Vycudil et al., 2016). Es handelt sich dabei um die südlich vom Harz liegende Landstraße L3080 zwischen Nordhausen und Sangerhausen. Während des Asphalteinbaus im Jahr 1999 wurde das Bitumen der Deckschicht gezielt variiert (Abbildung 12, links). Aus der Probestrecke wurden zwei Deckschicht-Varianten, jeweils ein SMA 11 S mit einem 45/80-50A als Bindemittel (Hersteller BP & Shell), für die Validierung in diesem Projekt ausgewählt. Die relevanten Angaben der Eignungsprüfung sind nachfolgend aufgeführt:

Gesamtbindemittelgehalt: 6,5 M.-%

Mineralstoffart: Grauwacke, Dolomitsteinmehl

Art der stabilisierenden Zusätze: Faserstoffe

Brechsand-Natursand-Verhältnis: 1:0

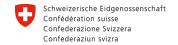
Korngrößenverteilung:

0	-	0,09 mm	11,0 M%
0,09	0,09 - 0,25		3,2 M%
0,25	-	0,71 mm	4,1 M%
0,71	-	2,0 mm	6,7 M%
2,0	-	5,0 mm	11,1 M%
5,0	-	8,0 mm	21,0 M%
8,0	8,0 - 11,2 mm		38,7 M%
11,2	11,2 - 16 mm		4,2 M%

Rohdichte der Mineralstoffe: 2,706 g/cm³

Rohdichte: 2,454 g/cm³







Bundesamt für Strassen ASTRA

Im Rahmen der zuvor erwähnten Forschungsprojekte wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten vor, während und nach dem Einbau sowie nach gewisser Nutzungsdauer die Eigenschaften Bindemittelvarianten untersucht. Aus den Untersuchungen stehen verschiedene Rückstellproben zur Verfügung, welche im Projekt OptiMAI herangezogen werden. Unter anderem stehen Rückstellproben der Frischbitumen (jeweils ca. 4kg) und des Bitumens nach Einbau und Verdichtung (jeweils ca. 30g) aus dem Jahr 1999 zur Verfügung.

Um den aktuellen Zustand zu erfassen wurden im Jahr 2018 jeweils 30 Bohrkerne (Ø150 mm) der beiden ausgewählten Varianten (als Variante O und Variante P bezeichnet) gezogen. Aufgrund der beschränkten Ausdehnung der jeweiligen Probefelder wurden die Bohrkerne in 5er-Clustern in einem Abstand von ca. 100m für Variante O und ca. 20 m für Variante P gezogen. Eine detaillierte Darstellung der Bohrkernentnahme ist in Abbildung 12, rechts dargestellt. Die Bohrkerne wurden von BK1 bis BK70 durchnummeriert (10 zusätzliche Bohrkerne wurden für ein anderes Projekt entnommen).

Splittmastixasphalt 0/11S Caribit 65, Variante O 30 Bohrkerne Ø150 mm Caribit 65 65 elf/Caribit 6 BK2 B 65 elf BK3 12/3+42030 12/3+39700 B 65 elf Olexobit 65, Variante P BK4 Streckenabschnitt/Streckenkilometer Caribit 65 BK5 30 Bohrkerne Ø150 mm B 65 elf aribit 45/B 65 e 12/2+940** 12/2+72210 BK 17-20 Olexobit 48 BK31 BK32 BK33 Caribit 45 BK 5-8 12/2+453 ca 100m BK34 BK35 12/2+424 12/2+4345 Olexobit 65 BK6 20-30m BK7 Caribit 65 BK 1-4 12/2+032 BK8 BK9 BK10 BK37 BK38 BK39 BK40 usw. usw. Fahrtrichtung NDH Fahrtrichtung SGH

Landstraße L 3080

Bohrkernentnahme als 5er-Cluster

Abbildung 12: Übersicht der Probestrecke L 3080 mit Markierung der für das Projekt OptiMAI verwendeten Materialvarianten (links) und detaillierte Darstellung der Bohrkernentnahme im Jahr 2018 (rechts).

27 OptiMAI





Bundesamt für Strassen ASTRA



Abbildung 13: Probestrecke L3080 am Tag der Bohrkernentnahme von Variante P im Jahr 2018, die 5er-Cluster sind deutlich zu erkennen.

Die Deckschichten der Bohrkerne wurden in 1cm starke Schichten geschnitten, getrennt nach den Schichten am ISBS extrahiert und als 5-er Gruppen zusammengefasst. Abbildung 14 zeigt das beschriebene Vorgehen für die Bohrkerne 1 bis 5, bei denen die oberste Schicht als BK1-5_S1 zusammengefasst wird. Das in Abbildung 14 gezeigte Trennschema wurde für alle 60 Bohrkerne angewendet, sodass am Ende jeweils 12 Bitumenproben aus jeder der drei getrennten Schichten für die weitere Untersuchung zur Verfügung stehen.

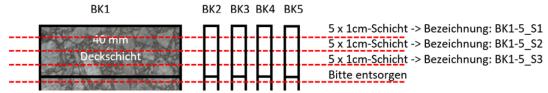


Abbildung 14: Aufteilung der Bohrkerne in einzelne Schichten

Aus den zur Verfügung stehenden Materialvarianten wurden 16 repräsentative Bitumenproben unterschiedlicher Alterungszustände (Rückstellproben aus 1999 im Frischzustand und nach Einbau und Verdichtung sowie extrahiert aus Bohrkerne aus 2018, aus unterschiedlichen Schichten) für die weiteren Untersuchungen im Projekt OptiMAI ausgewählt. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die ausgewählten Bitumenproben und Alterungszustände.

28 OptiMAI



Schweizerische Eidgenossenschaft Confédération suisse Confederazione Svizzera Confederaziun svizra



Bundesamt für Strassen ASTRA

Tabelle 2: Übersicht der repräsentativen Bitumenproben aus der Probestrecke

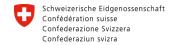
Variante	Zustand	Informationen
01	nach Anlieferung	Rückstellprobe von 1999 (erneut geprüft 2018)
O5	nach Einbau und Verdichtung	Rückstellprobe von 1999 (erneut geprüft 2018)
P1	nach Anlieferung	Rückstellprobe von 1999 (erneut geprüft 2018)
P5	nach Einbau und Verdichtung	Rückstellprobe von 1999 (erneut geprüft 2018)
BK1-5_S1	nach 19 Jahren Liegedauer	Schicht 1 (erster Zentimeter) von Bohrkern 1 bis 5
BK11-15_S1	nach 19 Jahren Liegedauer	Schicht 1 (erster Zentimeter) von Bohrkern 11 bis 15
BK56-60_S1	nach 19 Jahren Liegedauer	Schicht 1 (erster Zentimeter) von Bohrkern 56 bis 60
BK61-65_S1	nach 19 Jahren Liegedauer	Schicht 1 (erster Zentimeter) von Bohrkern 61 bis 65
BK1-5_S2	nach 19 Jahren Liegedauer	Schicht 2 (zweiter Zentimeter) von Bohrkern 1 bis 5
BK11-15_S2	nach 19 Jahren Liegedauer	Schicht 2 (zweiter Zentimeter) von Bohrkern 11 bis 15
BK56-60_S2	nach 19 Jahren Liegedauer	Schicht 2 (zweiter Zentimeter) von Bohrkern 56 bis 60
BK61-65_S2	nach 19 Jahren Liegedauer	Schicht 2 (zweiter Zentimeter) von Bohrkern 61 bis 65
BK1-5_S3	nach 19 Jahren Liegedauer	Schicht 3 (dritter Zentimeter) von Bohrkern 1 bis 5
BK11-15_S3	nach 19 Jahren Liegedauer	Schicht 3 (dritter Zentimeter) von Bohrkern 11 bis 15
BK56-60_S3	nach 19 Jahren Liegedauer	Schicht 3 (dritter Zentimeter) von Bohrkern 56 bis 60
BK61-65_S3	nach 19 Jahren Liegedauer	Schicht 3 (dritter Zentimeter) von Bohrkern 61 bis 65

3.1.2.2 Charakterisierung der Ausgangsmaterialien

Ausgehend von dem auf dem Probefeld eingesetzten Bitumen PmB 45/80-50A wurde ein PmB 45/80-65 zur Herstellung der Probekörper für die Materialuntersuchungen als Input für das AP 5 bzw. 6 gewählt. Dieses Bitumen, welches in ausreichender Menge zur Verfügung stand, wurde an alle Partner verschickt, um umfassende Untersuchungen durchzuführen. Für die Parameterstudien in AP 4 wurde als Mischgut einerseits ein AC 11 mit einem Bitumengehalt von 5,2 M-% und analog zum Probefeld ein SMA 11 im Labor hergestellt. Der SMA 11 wurde allerdings mit einem im Vergleich zum Probefeld niedrigeren Bindemittelgehalt von 5,6 M.-% hergestellt. Als Gesteinskörnung wurde ein vergleichbares Hartgestein gewählt (Loja).

Die Korngrößenverteilung des AC 11 bzw. SMA 11 ist in Tabelle 3 und Abbildung 15 angeführt bzw. dargestellt







Bundesamt für Strassen ASTRA

Tabelle 3: Korngrößenverteilung der verwendeten Mischgüter

			AC 11	SMA 11	
			M%		
0	-	0,063 mm	8,1	6,8	
0,063	-	0,125 mm	3,1	2,7	
0,125	-	0,25 mm	4,0	2,7	
0,25	-	0,5 mm	5,7	3,6	
0,5	-	1,0 mm	8,1	4,5	
1,0	-	2,0 mm	11,7	6,8	
2,0	-	4,0 mm	13,5	3,9	
4,0	4,0 - 8,0 mm		23,4	17,8	
8,0	8,0 - 11,2 mm		16,6	46,2	
11,2	11,2 - 16 mm		5,8	5,0	

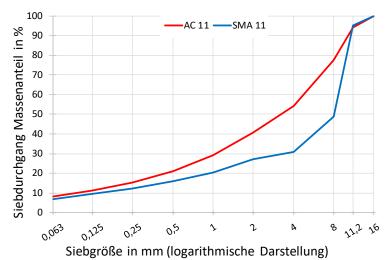
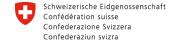


Abbildung 15: Die Sieblinien der verwendeten Mischgüter

Das Referenzbitumen PmB 45/80-65 wird in Rahmen dieses Projekts als Variante V bezeichnet. Das Bitumen wurde frisch und in verschiedenen Alterungszuständen geprüft. Die verschiedenen Bitumenzustände sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

30 OptiMAI







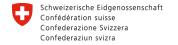
Bundesamt für Strassen ASTRA

Tabelle 4: Alterungszustände des Referenzbitumens

Variante	Zustand	Informationen	
V1	frisch	Lieferzustand	
V1.1	1xRTFOT	75 min im RTFOT-Ofen	
V1.2	2xRTFOT	150 min im RTFOT-Ofen	
V1.3	3xRTFOT	225 min im RTFOT-Ofen	
V1.4	4xRTFOT	300 min im RTFOT-Ofen	
V1.5	5xRTFOT	375 min im RTFOT-Ofen	
V1.6	6xRTFOT	450 min im RTFOT-Ofen	
V1.7	7xRTFOT	525 min im RTFOT-Ofen	
V1.8	8xRTFOT	600 min im RTFOT-Ofen	
V1.0.1	1xPAV	20 h im PAV-Behälter	
V1.0.2	V1.0.2 2xPAV 40 h im PAV-Behälter		
V1.0.3	V1.0.3 3xPAV 60 h im PAV-Behälter		
V1.1.1	1xRTFOT & 1xPAV	75 min im RTFOT-Ofen & 20 h im PAV-Behälter	

Weiterhin wird das Bitumen zur Herstellung von Asphaltprobekörpern für GVO-Prüfungen (vgl. Kapitel 3.4.3) verwendet. Das Bitumen der geprüften Probekörper wird extrahiert und ebenfalls in verschiedenen Alterungszuständen untersucht. Tabelle 5 gibt eine Übersicht der untersuchten Materialvarianten. Anzumerken ist, dass neben der einmaligen Durchführung der VAPro-Alterung auch ein zweifacher Durchlauf durchgeführt wird (vgl. 1xVAPro<->2xVAPro). Dies ist für die Aufstellung der Materialkennwertfunktionen im Arbeitspaket 5 bzw. 6 wichtig.







Bundesamt für Strassen ASTRA

Tabelle 5: Alterungszustände des extrahierten Referenzbitumens

Variante	Extraktion aus Probekörper	
SMA-Zyl_0xVAPro2018	Ungealterte zylindrische SMA Probekörper, hergestellt 2018	
SMA-Zyl_0xVAPro2019	Ungealterte zylindrische SMA Probekörper, hergestellt 2019 (angepasster Hohlraumgehalt)	
SMA-Zyl_1xVAPro	1xVAPro-gealterte zylindrische SMA Probekörper	
SMA-Zyl_2xVAPro	2xVAPro-gealterte zylindrische SMA Probekörper	
AC-Zyl_0xVAPro	Ungealterte zylindrische AC Probekörper, hergestellt 2018	
AC-Zyl_1xVAPro	1xVAPro-gealterte zylindrische AC Probekörper	
AC-Zyl_2xVAPro	2xVAPro-gealterte zylindrische AC Probekörper	
SMA-Prism_0xVAPro	Ungealterte prismatische SMA Probekörper, hergestellt 2018	
SMA-Prism_1xVAPro	1xVAPro-gealterte prismatische SMA Probekörper	
SMA-Prism_2xVAPro	2xVAPro-gealterte prismatische SMA Probekörper	

Analyse des Referenzbitumens

Alterung von Bitumen führt grundsätzlich zu einer Versprödung des Materials, welches sich in einem Anstieg der Äquisteifigkeitstemperatur T_{BTSV} bemerkbar macht (vgl. Abbildung 6). Dieser Anstieg ist auch bei einer Alterung des Referenzbitumen V1 erkennbar. In Abbildung 16 sind die BTSV-Kennwerte des Referenzbitumens unter mehrfacher Anwendung verschiedener Alterungsverfahren dargestellt. Im Hintergrund sind zusätzlich die Spannweiten von typischen Bitumen in Deutschland dargestellt. Das Frischbitumen 45/80-65 entspricht im Ausgangszustand etwa einem in Deutschland spezifizierten 40/100-65. Die 8-fache RTFOT-Alterung (Abbildung 16, rote Linie) führt zu einer linearen Änderung der BTSV-Kennwerte. Die Temperatur T_{BTSV} nimmt zu (Steifigkeitszunahme) und der zugehörige Phasenwinkel δ_{BTSV} nimmt ab (Zunahme der Elastizität). Die ersten vier Alterungsstufen des RTFOT haben einen ähnlichen Einfluss während die nachfolgenden Alterungsstufen nur noch einen verminderten Einfluss auf die BTSV-Kennwerte zeigen. Bei mehrfacher PAV-Alterung (Abbildung 16, grüne Linie) zeigt sich ebenfalls ein linearer Trend mit Zunahme der Materialsteifigkeit. Jedoch ist in diesem Fall eine Zunahme des Phasenwinkels δ_{BTSV} zu beobachten. Die PAV-Alterung hat durch das Vorhandensein der Druckluft im Vergleich zu dem RTFOT-Verfahren eine veränderte Wirkung auf die viskoelastischen Eigenschaften. Die Kombination von RTFOT und PAV-Alterung (Abbildung 16, lila Punkt) führt wie erwartet zu rheologischen Eigenschaften die zwischen den Alterungstrends der beiden Alterungsverfahren liegt.





Bundesamt für Strassen ASTRA

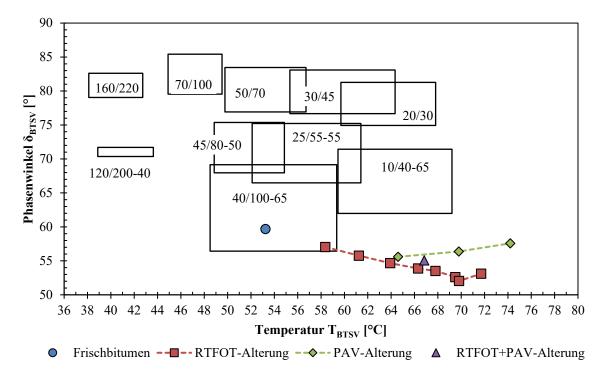
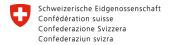


Abbildung 16: BTSV-Ergebnisse für das Referenzbitumen V1 in verschiedenen Alterungszuständen

Weiters wurden die unterschiedlich gealterten Bitumen mit dem AFM, Cryo-ESEM und der Infrarotspektroskopie analysiert.

Mit dem AFM wurden dreidimensionale Bilddaten von den Bindemittelproben innerhalb einer Stunde nach der Probenvorbereitung erfasst. Lineare Änderungen mit fortschreitender Oxidation konnten auch mit AFM beobachtet werden. Die Aufnahmen sind in Abbildung 17 dargestellt. Die AFM Bilder zeigen morphologische Veränderungen und die Bildung von sphärischen Domänen mit fortschreitender Alterung. Im Vergleich zum ungealterten Bitumen nimmt der Kontrast zwischen der Matrix und den sphärischen Domänen auf der Oberfläche bei gealterten Proben signifikant zu. Aufgrund der Bildung neuer funktioneller Gruppen wie Carbonyle und Sulfoxide nimmt nicht nur die Molekülgröße zu, sondern auch die Molekülagglomeration aufgrund der Zunahme der Polarität und des Kolloidindexes. Diese Aspekte beeinflussen maßgeblich die Morphologie des Bindemittels und erklären somit die Änderungen der Oberflächentopographie.







Bundesamt für Strassen ASTRA

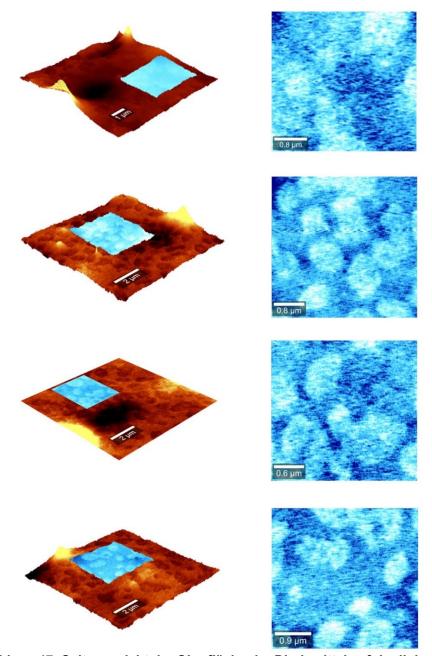
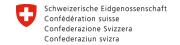


Abbildung 17: Seitenansicht der Oberfläche der Bindemittel auf der linken Seite mit fortschreitender Alterung (beginnend mit V1, V1.0.1, V1.0.2 und V.1.0.3) und der Ausschnitt aus ausgewählten Bereichen der Proben. Aufgenommen mit AFM-tapping Modus.

Als Folge einer, durch atmosphärische Oxidation verursachten Änderung der SARA-Fraktion (Loeber et al., 1998) sollte dies Änderungen der Teilstrukturen hervorrufen. Dieser spezielle Effekt ist in den AFM-Topografiebildern in Abbildung 17 und in den aufgetragenen Rauheitswerten in Abbildung 18 zu beobachten, in denen sphärische Domänen sichtbarer werden, die an Höhe zunehmen, was sich insbesondere in den Oberflächeneigenschaften wie der arithmetisch gemittelten Höhe (Sa), quadratischen Durchschnittshöhe (Sq) und







Bundesamt für Strassen ASTRA

Oberflächenschiefe (SSK) bemerkbar macht, die alle merklich zunehmen. Auffallend ist, dass die genannten Parameter insbesondere während des ersten Alterungsschritts signifikant zunehmen, wie in Tabelle 6 dargestellt. Insbesondere die SSK Kennzahl, die die Asymmetrie des Höhenverteilungshistogramms beschreibt, weist den höchsten Anstieg für den ersten PAV-Alterungsschritt auf, der von 0,01 auf 0,57 ansteigt. Die morphologische Untersuchung zeigt eine lineare Abhängigkeit der Alterung für den ersten Alterungsschritt und einen moderaten Anstieg für die nachfolgenden Alterungsschritte. Alle erfassten Oberflächenparameter nehmen signifikant bei der Alterung zu. Es muss betont werden, dass der erste Alterungsschritt, einen stärkeren Einfluss auf die rheologischen Materialfunktionen im Vergleich zu den darauffolgenden Alterungsschritten hat. Der Unterschied in der Zunahme von SA zwischen ungealtertem Bindemittel und PAV 1 ist deutlicher (von 12,20 nm bis 113,22 nm) als die SA-Zunahme zwischen PAV 1 und PAV 2 mit 124,05 nm und PAV 3 mit 146,24 nm. Dies bestätigt, dass der erste Alterungsschritt den größten Einfluss auf das Bindemittel hat und belegt, dass AFM als Methode geeignet ist, um die Alterung zu verfolgen und zu verstehen. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden vor und nach der Photooxidation jeweils AFM Aufnahmen aufgenommen, um das Ausmaß und die Auswirkungen der UV-Alterung zu ermitteln. In Abbildung 18 werden die Oberflächenparameter wie die SA, SQ, SSK und pk-pk dargestellt.



Bundesamt für Strassen ASTRA

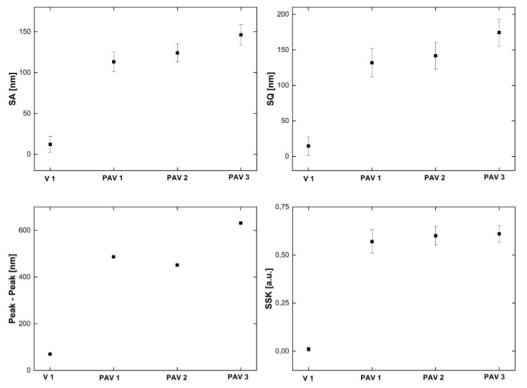


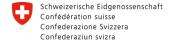
Abbildung 18: Arithmetische Durchschnittshöhe (SA), quadratische Durchschnittshöhe (SQ), Oberflächenschiefe (SSK) und Peak-Peak-Werte für ungealtertes und PAV-gealtertes Bindemittel.

Tabelle 6: Ergebnisse der verschiedenen Oberflächeneigenschaften für ungealterte und PAV-gealterte Proben.

Sample	V1	V1.0.1	V1.0.2	V1.0.3
SA [nm]	12,20 ± 9,80	113,22 ± 12,01	124,05 ± 10,87	146,24 ± 12,51
SQ [nm]	14,62 ± 12,80	131,89 ± 20,12	141,75 ± 18,70	174,44 ± 18,84
SSK	0,01 ± 0,01	$0,57 \pm 0,06$	$0,60 \pm 0,05$	$0,61 \pm 0,04$
pk-pk [nm]	69,91 ± 1,59	486,69 ± 2,01	451,45 ± 1,79	631,12 ± 1,08

Die Cryo-ESEM Aufnahmen in Abbildung 19 zeigen ähnliche Catana-Phasen, die auch als 'Bee-Strukturen' bezeichnet werden und in früheren AFM- und SEM-Studien (Loeber et al., 1996) beobachtet wurden.







Bundesamt für Strassen ASTRA

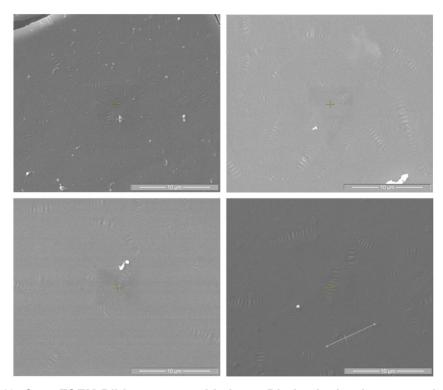


Abbildung 19: Cryo-ESEM-Bilder von verschiedenen Bindemittelproben: ungealterte V1 (a), PAV 1 (b), PAV 2 (c) und PAV 3 (d).

Cryo-ESEM liefert Mikrostrukturen mit einem Längenbereich von 0,215 - 9,215 µm für PAV-gealterte und 0,871 - 6,363 µm für RTFOT-gealterte Proben (Abbildung 19). In dieser Studie wurde die Länge der Oberflächenmikrostrukturen mit ImageJ bestimmt. Sie sind in einem Histogramm der Partikelgrößenverteilung nach Größe und Anzahl in Abbildung 20 dargestellt.



Bundesamt für Strassen ASTRA

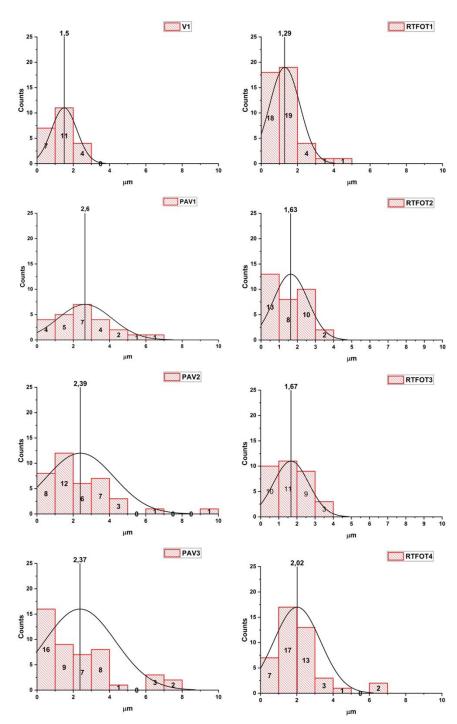


Abbildung 20: Partikelgrößenverteilung der aus Cryo-ESEM Abbildungen erhaltenen ungealterten, PAV- und RTFOT-Proben.

Der allgemeine Trend entlang der verschiedenen Alterungsstufen zeigt eine Verschiebung des Maximums des Histogramms in Richtung einer höheren Teilchenlänge, was bedeutet, dass längere Strukturen mit fortschreitender Alterung gebildet werden. Darüber hinaus wird







Bundesamt für Strassen ASTRA

die Halbwertsbreite (**f**ull **w**idth at **h**alf **m**aximum, FWHM) des Histogramms breiter, was auf Diskrepanzen in der Länge während des Alterungsprozesses hinweist (Tabelle 7).

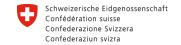
Tabelle 7: Ergebnisse für mit Cryo-ESEM aufgezeichnete Mikrostrukturen für ungealterte, PAV- und RTFOT-gealterte Bitumenproben

	# der Mikrostrukturen	Halbwertsbreite (µm)	Durchschnittliche Partikellänge (µm)	STABW ±
V 1	22	1,73	1,44	0,13
PAV 1	24	3,51	2,64	0,14
PAV 2	38	4,38	2,39	0,12
PAV 3	46	4,59	2,37	0,12
RTFOT 1	43	1,98	1,30	0,08
RTFOT 2	33	2,24	1,64	0,09
RTFOT 3	33	2,29	1,67	0,08
RTFOT 4	43	3,00	2,03	0,08

Die fortschreitende Alterung bewirkt eine Aufteilung der Längen der Mikrostrukturen von mittelgroßen Mikrostrukturen auf längere und kürzere Mikrostrukturen. Die Gesamtanzahl der Mikrostrukturen steigt linear mit dem Alterungszustand von PAV an, wohingegen die RTFOT-Alterung die Anzahl der Oberflächenmikrostrukturen nicht beeinflusste. Mit fortschreitender Alterung ist eine Verbreiterung der FWHM und eine Zunahme der Anzahl an Oberflächenstrukturen zu beobachten. Die Längenverteilung des ungealterten Bitumens ist im Vergleich zum gealterten Bindemittel homogener.

Altern führt zu molekularen Veränderungen (Mühlich, 2018; Petersen and Glaser, 2011) und damit zu einer Verschiebung der SARA-Fraktionen (saturates, aromatics, resins, asphaltenes, SARA). Die gesättigte Fraktion ändert sich während des Alterungsprozesses nicht wesentlich. Die Asphaltene, Aromaten und Harze unterliegen jedoch einer starken Veränderung. Während die Konzentration an aromatischen Verbindungen mit fortschreitender Alterung abnimmt (Handle et al., 2017), nimmt die Menge an Asphaltenen mit der Alterung zu, wobei die PAV-Alterung einen stärkeren Anstieg der Asphaltenkonzentration bewirkt. Daher ist eine Erhöhung des Kolloidindex (Agglomeration von Asphaltenen infolge der Abnahme der aromatischen Konzentration) zu erwarten. Dies kann auch den beständigen Anstieg der Anzahl von Mikrostrukturen für PAV-gealterte Proben erklären (Tabelle 7). Ob die Catana-Mikrostrukturen hauptsächlich aus Asphaltenen bestehen, ist jedoch noch Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen.







Bundesamt für Strassen ASTRA

Bei der Analyse der ATR-FTIR Messungen zeigen die PAV- und RTFOT-gealterten Proben einen kontinuierlichen Anstieg sowohl für CO als auch für SO Konzentrationen, d.h. die Alterung nimmt allmählich mit jeder Alterungsstufe zu. Interessant hierbei ist die Kombinationsalterung PAV und RTFOT (RTFOT + PAV) welche die stärkste Alterung unter allen hier verwendeten Laboralterungsmethoden zeigt (vgl. Abbildung 21).

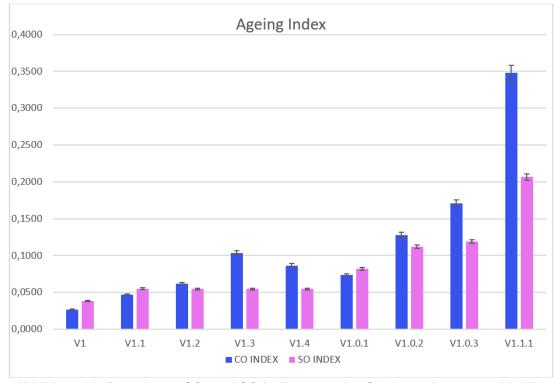


Abbildung 21: Berechnete CO- und SO-Indizes aus den Spektren der unterschiedlich gealterten Bitumen

Die absolute Fluoreszenzintensität nimmt mit dem Fortschritt der Alterung sowohl für PAV, als auch für RTFOT Proben ab. Die Kombinationsalterung RTFOT + PAV zeigt auch bei Fluoreszenzmessungen die stärkste Alterung (Fluoreszenzintensität sinkt). Die Ergebnisse der Fluoreszenzspektroskopie sind in Abbildung 22 und Abbildung 23 dargestellt.





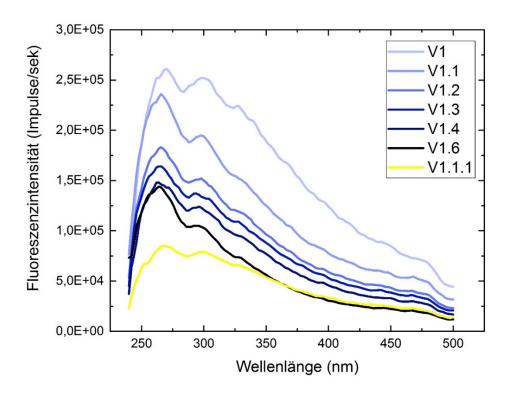
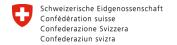


Abbildung 22: Absolute Fluoreszenzintensitäten für V1, V1.1, V1.2, V1.3, V1.4, V1.6 und V1.1.1.







Bundesamt für Strassen ASTRA

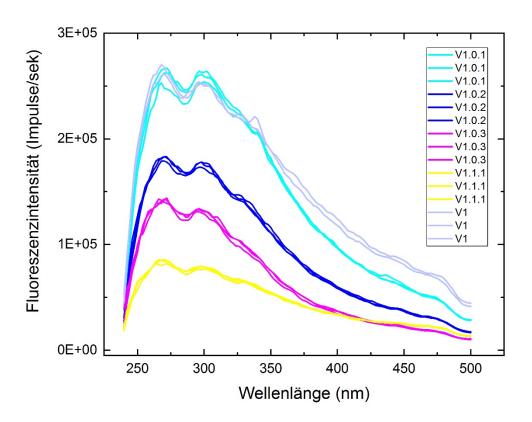


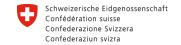
Abbildung 23: Absolute Fluoreszenzintensitäten V1, V.1.1,V1.0.1, V1.0.2 und V1.0.3.

Die Ergebnisse aus der Untersuchung des Referenzbitumens zeigen, dass die Alterung von bituminösen Bindemitteln in Bezug auf die rheologischen, spektroskopischen und mikroskopischen Eigenschaften in etwa linear verläuft. Interessanterweise haben alle physikalisch-chemischen Untersuchungen gezeigt, dass die Oxidation im ersten Alterungsschritt am stärksten wirkt, wohingegen alle nachfolgenden Alterungsbedingungen in etwa ähnliche, aber geringere Auswirkungen haben.

Analyse der Feldproben

Aus der Probestrecke L3080 stehen Rückstellproben in verschiedenen Alterungszuständen zur Verfügung. Die BTSV-Kennwerte der für das Projekt OptiMAI ausgewählten Materialvarianten sind in Abbildung 24 dargestellt. Die Ausgangsbitumen O1 und P1 von unterschiedlichen Herstellern entsprechen im frischen Zustand den rheologischen Eigenschaften eines PmB 45/80-50. Nach Herstellung und Verdichtung (O5 und P5) kommt es durch Kurzzeitalterung wie bereits in Abbildung 16 dargestellt zu einer Zunahme der Temperatur T_{BTSV} und einer Abnahme von δ_{BTSV} . Die Langzeitalterung durch eine







Bundesamt für Strassen ASTRA

Liegedauer von etwa 19 Jahren (O8 und P8) zeigt eine weitere Steifigkeitszunahme durch Anstieg der Temperatur T_{BTSV}, wohingegen sich der Phasenwinkel kaum ändert. Bei Betrachtung des Alterungsfortschrittes über die Schichttiefe zeigt sich, dass nach 19 Jahren in der obersten Schicht (Abbildung 24, rote Punkte) eine vergleichsweise große Steifigkeitszunahme auftritt, während in den darunter liegenden Schichten (Abbildung 24, grüne und lila Punkte) kaum ein Einfluss der Langzeitalterung zu beobachten ist. Die rheologischen Eigenschaften der Schichten 2 und 3 entsprechen daher ungefähr dem Zustand nach Einbau und Verdichtung.

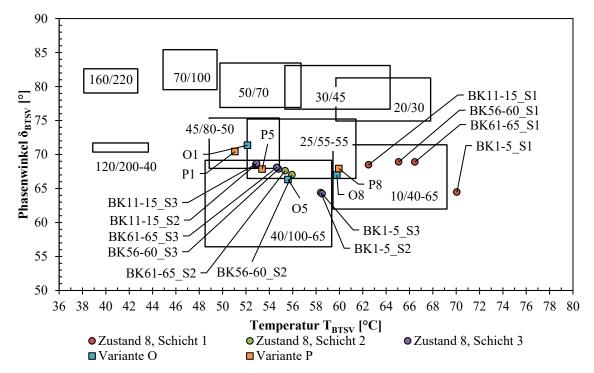
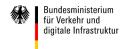


Abbildung 24: BTSV-Ergebnisse der ausgewählten Bitumenvarianten aus der Probestrecke in verschiedenen Alterungszuständen

Die Feldproben wurden mittels FTIR auf den Carbonyl- bzw. Sulfoxidgehalt und die Aromaten und Resinkonzentration untersucht. Die Ergebnisse wurden wiederum mit denen der Fluoreszenzspektroskopie verglichen Die Ergebnisse der Berechnung der CO- und SO-Indizes aus den Infrarotspektren ist in Abbildung 25 dargestellt.

43





Bundesamt für Strassen ASTRA

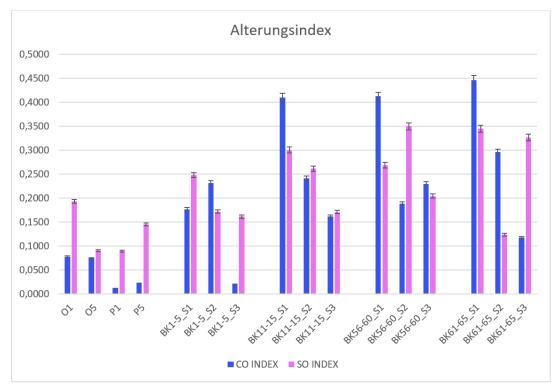
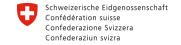


Abbildung 25: Berechnete CO- und SO-Indizes aus den Spektren für O1, O5, P1, P5 und Feldproben.

Von besonderer Bedeutung sind vor allem die Banden bei 1700 cm-1 und 1030 cm-1. Diese stammen von den Carbonylverbindungen sowie Sulfoxidverbindungen, die im Allgemeinen durch Oxidation zunehmen. Betrachtet man die Ergebnisse der Bitumenproben nach Anlieferung und Einbau (O1, O5, P1, P5), ist festzustellen, dass diese sich in ihren CO Konzentrationen ähnlich sind, die SO Konzentrationen weichen wiederum ab. Ein klarer Trend bzw. Zusammenhang zu den rheologischen Eigenschaften ist hier nicht zu erkennen. Bei den nach 19 Jahren entnommenen Bohrkernen sieht dies anders aus. Durch die Intensitätsdifferenz lässt sich eine quantitative Aussage treffen: Die Anzahl der Carbonylverbindungen nimmt mit der Schichttiefe für alle Bohrkerne ab. Dieser Trend ließ sich bereits bei den mechanischen Untersuchungen feststellen. In allen Bohrkernen ist die Abnahme zwischen erster Schicht und zweiter Schicht größer als zwischen zweiter und dritter Schicht, eine Ausnahme stellt die BK1-5 Probe dar. Aufgrund dessen kann die Annahme getroffen werde, dass die Oxidation ausgehend von der Oberfläche exponentiell abnimmt. Der Intensitätsunterschied ist deutlicher bei der Sulfoxidbande, aber auch bei der Carbonylbande ist eine Abnahme der Intensität bemerkbar. Die Sulfoxidindizes für BK1-5 und BK11-15 zeigen einen ähnlichen Trend. Eine Ausnahme liefern hier die Bohrkerne







Bundesamt für Strassen ASTRA

BK56-60 und BK61-65, welche vom erwarteten Trend (in Bezug auf Sulfoxidverbindungen) abweichen.

Beim Vergleich der Ergebnisse der Fluoreszenzspektroskopie erkennt man, dass die Fluoreszenzintensität mit der Schichttiefe für alle Bohrkerne zunimmt. D.h. die Alterung nimmt mit der Schichttiefe ab, was im Einklang mit den Ergebnissen aus BTSV und ATR FTIR steht. Weiter zu beobachten ist, dass auch hier wiederum der Unterschied zwischen der ersten und zweiten Schicht viel größer ist, als jener der zweiten und dritten Schicht. Sowohl die absolute als auch die relative Fluoreszenz zeigen einen Abfall der Fluoreszenz mit der Alterung (vgl. Abbildung 26, Abbildung 27 und Abbildung 28). Nachdem die Fluoreszenz von verschiedenen geometrischen Faktoren wie z.B. Lampenintensität und Probendicke und Lichtweg abhängt, ist der Vergleich von Proben nur bedingt möglich. Idealerweise sollten alle Proben zur gleichen Zeit, die exakt gleiche Oberflächenrauigkeit, Probendicke und Position in der Messkammer einnehmen, welche bei Bitumenmessungen aufgrund der Viskoelastizität und somit der Dynamik des Materials nur bedingt möglich ist. Trotz der Schwankungen in der Intensität von unterschiedlichen Messserien konnten lineare Abhängigkeiten innerhalb einer Messserie erreicht werden.



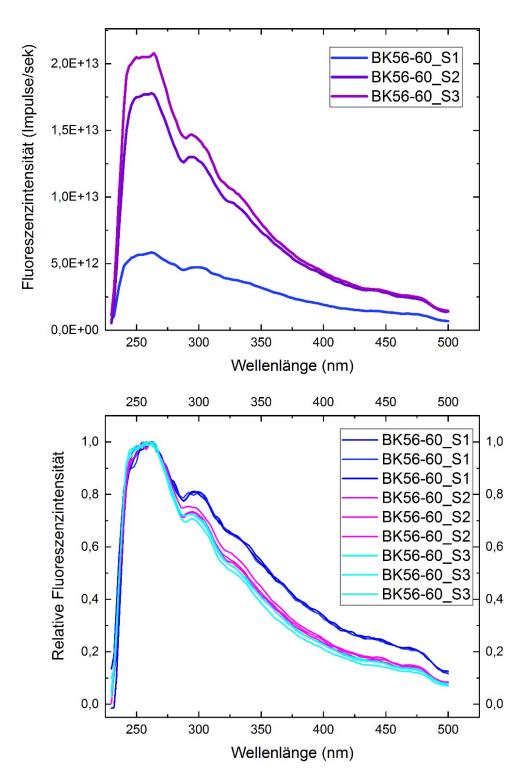


Abbildung 26: Absolute (oben) und relative (unten) Fluoreszenzintensitäten für Bohrkerne BK56-60_S1, BK56-60_S2 und BK56-60_S3.



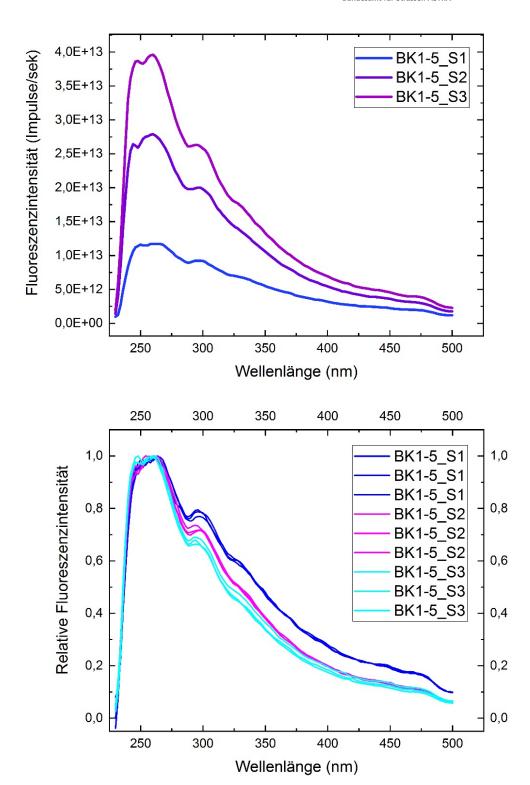
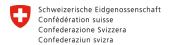


Abbildung 27: Absolute (oben) und relative (unten) Fluoreszenzintensitäten für Bohrkerne BK1-5_S1, BK1-5_S2, BK1-5_S3.







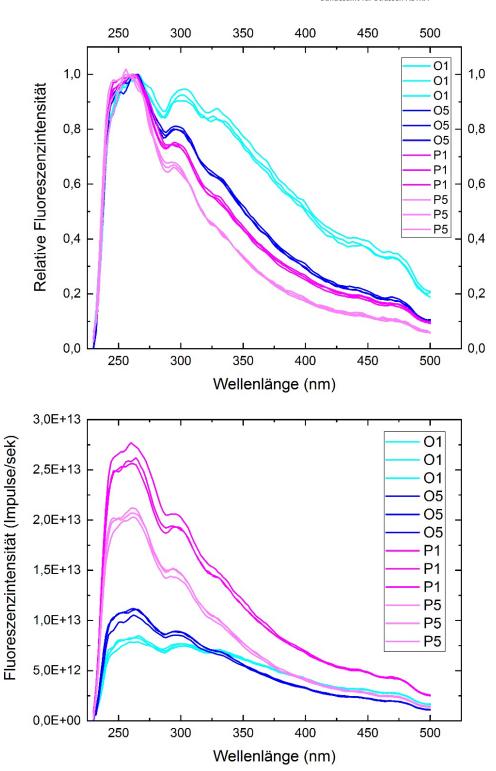
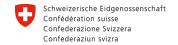


Abbildung 28: Absolute (oben) und relative (unten) Fluoreszenzintensität für Rückstellproben O1, O5, P1 und P5.







Bundesamt für Strassen ASTRA

Zusammenfassung

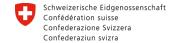
Es lässt sich also feststellen, dass Laboralterung und Feldalterung einen ähnlichen Einfluss auf die rheologischen Kennwerte haben. Auf chemischer Ebene zeigen einige Methoden ähnliche Trends, allerdings ist aufgrund der unterschiedlichen Bedingungen zwischen Feldund Laboralterung (PAV) weiterhin davon auszugehen, dass im PAV nicht dieselben Reaktionen ablaufen, wie im Feld. Grundsätzlich kommt es bei jeder Alterung zu einer Steifigkeitszunahme, feststellbar durch einen Anstieg der Temperatur T_{BTSV}. Bei mehrfacher Laboralterung ist dabei für die beiden Laboralterungsverfahren RTFOT & PAV ein linearer Trend zu erkennen. Die Feldalterung scheint sich ausschließlich auf die oberste Schicht (1 cm) der Asphaltdeckschicht auszuwirken. Die darunterliegenden Schichten wurden in Bezug auf die rheologischen und chemischen Materialkennwerte nicht durch die Alterung beeinflusst.

Bei allen verwendeten Analysetechniken zeigt sich, dass die rheologischen, spektroskopischen und makroskopischen Eigenschaften mit zunehmender Alterung Veränderungen unterworfen sind. Die atmosphärische Oxidation zeigt einen nahezu linearen Trend für fast alle Bitumenproben. Der erste Alterungsschritt bei der Laboralterung hat den größten Einfluss, sowohl auf die rheologischen als auch auf die spektroskopischen Eigenschaften des Bitumens, wohingegen alle darauffolgenden Alterungsschritte zu ähnlichen, aber geringeren Auswirkungen führen. Die Komplexität der Alterung von Bitumen ergibt sich aus der Anwesenheit vieler verschiedener chemischer Verbindungen und ihrer Anfälligkeit für Reaktionen mit reaktiven Sauerstoffspezies (ROS) in der Atmosphäre. Diese atmosphären-chemische Alterung beeinflusst wiederum die physikalischen und chemisch-mechanischen Eigenschaften des Bitumens.

3.2 Evaluierung bestehender Asphaltalterungsmethoden (AP2)

Methoden zur Langzeitalterung dienen der Simulation der Änderungen von wichtigen Gebrauchseigenschaften des Asphaltes bei Liegezeiten nach Einbau von ca. 5-10 Jahren. Dabei kommt es zu einer Verhärtung und Versprödung des Bitumens und zu einer Verschiebung der Temperaturgebrauchsspanne von Asphaltaufbauten. Dies kann bei tiefen Temperaturen dazu führen, dass sich verstärkt Kälterisse in der Deckschicht bilden können (Petersen, 2009; Hofko et al., 2014). Grund dafür ist, dass sich durch die Versprödung und das schlechtere Relaxationsverhalten kryogene Zugspannungen schneller aufbauen können und somit die Zugfestigkeit schon früher, d.h. bei höheren Temperaturen überschritten wird, als es bei jungen Asphaltaufbauten der Fall ist. Verfahren







Bundesamt für Strassen ASTRA

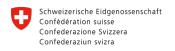
Alterung Asphaltmischgut sind daher die Konzeption zur von für neuer Asphaltzusammensetzungen sehr wichtig, da damit die Veränderungen des Asphalts – im Laufe seiner Liegedauer – im Labor bestimmt werden können und ein Vergleich mit anderen Zusammensetzungen bezüglich der Lebensdauer von Straßen angestellt werden kann. Um dies abzubilden wurden bereits verschiedenste Labormethoden entwickelt, die diese Veränderungen im Material mit annehmbarem Zeitaufwand versuchen nachzustellen. Viele Verfahren bedienen sich dabei zum Beispiel losem Mischgut, hohem Druck und/oder hohen Temperaturen (Yin et al., 2017). Angestrebt wird aber eine Methode, welche eine Alterung an verdichtetem Asphaltkörpern unter realitätsnahen Randbedingungen erlaubt. Ein Vorteil, die in der Natur ablaufenden chemischen Prozesse möglichst getreu abzubilden, liegt außerdem darin, die tatsächlichen Auswirkungen von Mischgutzusätzen Rejuvenatoren, Antioxidantien oder unterschiedlicher Füllermaterialien (z.B. Kalkhydrat) besser abschätzen zu können.

Im Zuge der Literaturrecherche wurden relevante Methoden zur Laboralterung von Asphaltmischgut auf ihre Eignung geprüft. Im Speziellen werden die Verfahren, die bereits in der TS 12697-52 implementiert sind, berücksichtigt, da diese Verfahren bereits von den Experten des europäischen Normungsgremiums CEN TC 227 WG 1 TG 2 als aussichtsreiche Kandidaten ausgewählt wurden. In Tabelle 8 werden einige vorhandene Asphaltalterungskonzeptionen aufgelistet. Mehr als 30 Methoden wurden in den letzten Jahrzehnten entwickelt. Dabei unterscheiden sich die Methoden in ihrem Aufbau, im verwendeten Alterungsmedium und hinsichtlich vieler anderer Parameter teilweise stark voneinander.

Tabelle 8: Übersicht vorhandener Laboralterungsmethoden [aufbauend auf (Bell et al., 1994; Choi, 2005; Çetinkaya, 2011; Yin et al., 2017)]

Alterungsmethode	Temp.	Dauer [h]	Probenart	Jahr	Alterungsmedium	
Short-Term Oven Aging (STOA)	135	8-36	loses Material	1988	-	
Long-Term Oven Aging (LTOA)	85	120	verdichtete PK	1988	-	
Bewitterungsschranksystem (BSS)	48	672	Probekörper		UV-Licht, Wasser &Luft	
Low-Pressure Oxidation (LPA)	60, 85	120	verdichtete PK	1989	Sauerstoff (1,9 l/min)	
Rotating Cylinder Aging Test (RCAT)	70-100	144	Asphaltmastix	1991	Sauerstoff (4,5 l/h)	
Bitutest-Protocol	135	2	loses Material	1995	-	

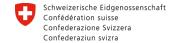






Alterungsmethode	Temp.	Dauer [h]	Probenart	Jahr	Alterungsmedium	
	85	120	verdichtete PK	1995	-	
	163	variiert	verdichtete PK 1952		-	
Ottawa Sand Mixtures	60	1200	verdichtete PK	1982	-	
Plancher et al.	150	5	verdichtete PK 1976		-	
Hugo & Kennedy	100	96, 168	-	1985	80 % relative Luftfeuchtigkeit	
Khalid & Walsh	60	bis 600	verdichtete PK	2000	Luft (3 l/min)	
Kumar & Goetz	60	24-240	verdichtete PK	1977	Luft Wasser	
Kim et al.	60	24-120	verdichtete PK	1886	Druckluft (0,7 MPa)	
Pressure Aging Vessel – PAV-A	100	72	verdichtete PK	1996	Druckluft (2,07 MPa)	
Saturation Ageing tensile stiffness conditioning Test 85 65 (SATS)		65	verdichtete PK	2004	Wasser Druck (2,1 MPa)	
Modelltopf nach Potschka	140	1	loses Material	1987	20%Sauerstoff 80%Stickstoff	
Braunschweiger Alterung (BSA)	80	96	loses Material	2007	Luft	
Warmbold'scher Alterungstisch	40	720- 1440	verdichtete PK	1996	Luft UV-Licht	
Alterung im Wärmeschrank	135- 175	4-24	loses Material	1999	Luft Stickstoff	
Bochumer Alterungsverfahren BAV	100	72	verdichtete PK	2011	Erwärmte Druckluft	
Wheatherometer Delft	-20-+60	6-12 Wochen	verdichtete PK	2008 2011	UV-Licht Luftfeuchtigkeit	
BRRC long term Re road	60	24-336	loses Material	Material 2010 Sauerstoff (15		
UV (LCPC) Long Term	60	336	loses Material	2010	UV-Licht	
Viennese Aging Procedure (VAPro)	60	72	verdichtete PK	2016	ozon und stickoxidangereicherte Luft	
Rilem (ISBS - Braunschweig)	85	24-216	loses Material	2010	-	
Pr.2-van de Ven-STA-oven	135	4	loses Material	2012	-	







Bundesamt für Strassen ASTRA

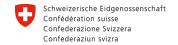
Alterungsmethode	Temp. [°C]	Dauer [h]	Probenart	Jahr	Alterungsmedium	
Pr.2-van de Ven - protocol 2 - heated up and compacted	155		loses Material	2012	Sauerstoff mechanische Bel.	
Pr.2-van de Ven - LTA - PAV	70-80	72-96	verdichtete PK	2012	Druck (21 bar)	
c - long-term aging	85	120	verdichtete PK	2013	-	
TEAGE	60	720	verdichtete PK	2018	Wasser / Luft / UV	

Der zeitliche Ablauf einer heterogenen chemischen Reaktion (zwischen Gasphase und kondensiertem Substrat) ist von den Parametern Konzentration, Temperatur und Druck abgängig. Auf Basis der Stoßtheorie nach (Trautz, 1916) werden Reaktionen durch Erhöhung der Teilchenkonzentration aufgrund der höheren Wahrscheinlichkeiten von erfolgreichen Kollisionen von Gasmolekülen erhöht. Erhöhte Temperaturen beschleunigen die Teilchen, die wiederum bei Kollisionen mehr Energie freisetzen. Erhöhter Druck bewirkt, dass sich die Teilchenkonzentration erhöht und somit eine größere Wahrscheinlichkeit von Teilchenkollisionen auftritt. Eine Abschätzung des Zusammenhangs zwischen Temperatur und Geschwindigkeiten von chemischen Reaktionen kann auf Basis von Vant'hoff (Benedix, 2011; Hoff et al., 1896–1896) gegeben werden. Die "Reaktionsgeschwindigkeit-Temperatur"-Regel besagt, dass mit einer Erhöhung der Temperatur um 10K, chemische Reaktionen um den Faktor 2-3 beschleunigt werden.

Studien über Temperaturgrenzen für Langzeitalterungsverfahren wurden von verschiedensten Instituten durchgeführt. Beispielsweise können sommerliche Maximaltemperaturen im Asphaltaufbau dafür herangezogen werden. In Österreich sind dies bis zu maximal 65°C. Verschiedenste Empfehlungen für die oberen Temperaturgrenzen werden in der Literatur angegeben:

Nach (Mill et al., 1992 Yao, & Canavesi, 1992) werden keine chemischen Veränderungen bei Temperaturen zwischen 60°C und 130°C in Abwesenheit von Sauerstoff stattfinden. Über 150°C könnten trotz Abwesenheit von Sauerstoff chemische Veränderungen im Bitumen stattfinden. Nach (Read and Whiteoak, 2003) starten nicht-oxidative Reaktionen ab 150°C. (Steiner et al., 2018) zeigen, dass zusätzliche nicht-oxidative Effekte bei der Bitumenalterung bereits ab +110°C auftreten. Bei Temperaturen, die 100°C überschreiten starten Phänomene, wie der Abbau von Sulfoxiden und der Aufbruch molekularer Verbände (Petersen, 2009). Nach (Choi, 2005) sollte die Grenze von +100°C nicht überschritten







Bundesamt für Strassen ASTRA

werden, da die Gefahr von Strukturschädigungen durch Kohäsionsverlust des Bitumens besteht. Weiters ist eine Vergleichbarkeit zu Temperaturbereichen, die üblicherweise im Sommer auftreten, nicht gegeben. Kürzlich erschienene Studien empfehlen die Reduktion der Temperaturen bei üblich verwendeten Ofenalterung auf +95°C. Dabei wären aber Alterungszeiträume von 10 Tagen notwendig um ein Feldalterungsniveau zu erreichen. In diesen Temperaturbereichen ist der Zusammenhang zwischen Rheologie und chemischen Veränderungen bei der Alterung noch gegeben, welcher bei Temperaturen von +135°C verloren geht (Board et al., 2017 2017). Viele dieser Methoden sind daher kritisch zu betrachten. Neuere Verfahren bedienen sich daher einem anderen Ansatz zur Beschleunigung der chemischen Reaktionen: Die Temperatur wird in realistischen Bereichen (+60°C) gehalten. Um die Alterungsprozesse zu beschleunigen, werden die Probekörper mit Luft durchströmt, die mit in der Natur vorkommenden hoch-reaktiven Oxidationsmitteln angereichert ist. (Steiner et al., 2016b). Andere Verfahren wiederum stellen die Natur mittels UV-Bestrahlung und Beregnung/Luftfeuchte nach (Hagos, 2008; Crucho et al., 2018)

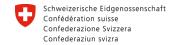
Zusammenfassend sind folgende Punkte für eine optimale Alterungsmethode anzustreben:

- Verwendung von verdichteten Asphaltprobekörper
- Einsatz von Temperatur und Druck in einem Bereich, in dem sie in der Realität auch vorliegen
- Geringe Versuchsdauer von wenigen Tagen
- Ausreichende Veränderung der mechanischen und chemischen Eigenschaften

3.3 Festlegung und Optimierung einer Asphaltalterungsmethode (AP3)

Ausgehend von den Erkenntnissen aus Kapitel 3.2 wurde zur Auswahl des geeignetsten Alterungsverfahrens eine Bewertungsmatrix mit den vielversprechendsten Kandidaten aufgestellt (siehe Tabelle 9). Die Wahl fällt dabei auf das Viennese Aging Procedure (VAPro).







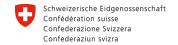
Bundesamt für Strassen ASTRA

Tabelle 9: Entscheidungsmatrix zur Auswahl des Alterungsverfahrens

Alterungsmethode	Temp.	Dauer [h]	Probenart	Alterungs- medium			
Bewitterungs- schranksystem	48	672	lose	UV-Licht, Wasser &Luft			
Khalid & Walsh	60	bis 600	verdichtet	Luft (3 I/min)			
Kim et al.	60	24-120	verdichtet	Druckluft (0,7 MPa)			
PAV-A	100	72	verdichtet	Druckluft (2,1 MPa)			
SATS	85	65	verdichtet	Wasser Druck (2,1 MPa)			
Modelltopf nach Potschka	140	1	lose	20%Sauerstoff 80%Stickstoff			
Braunschweiger Alterung	80	96	lose	Luft			
Warmboldscher Alterungstisch	40	720- 1440	verdichtet	Luft UV-Licht			
Alterung im Wärmeschrank	135- 175	4-24	lose	Luft Stickstoff			
Viennese Aging Procedure	60	72	verdichtet	Ozon und Stickoxide			
Bochumer Alterungsverfahren	100	72	verdichtet	Erwärmte Druckluft			
Wheatherometer Delft	-20- +60	6-12 Wochen	verdichtet	UV-Licht Luftfeuchtigkeit			
BRRC long term Re road	60	24-336	lose	Sauerstoff (15ml/min)			
UV (LCPC) long term	60	336	lose	UV-Licht			
TEAGE	60	720	verdichtet	Wasser / Luft / UV			
Legende:							
ungeeignet geeignet							

Dieses Verfahren wurde in den letzten Jahren an der TU Wien ausgehend von Erkenntnissen im FFG-Projekt Oekophalt (834203) als alternatives Verfahren zur Alterung von verdichteten Asphaltprobekörpern im Labor entwickelt. Ansatz der Methode ist es, die Alterungsparameter so zu wählen, dass eine Simulation der Alterung an verdichteten Probekörpern bei realitätsnahen Randbedingungen (Umgebungsdruck / Temperaturen max. 60°C) möglich ist. Um dennoch eine zeitraffende Wirkung zu erreichen, werden stark







Bundesamt für Strassen ASTRA

oxidative Gase zur Alterungsbeschleunigung verwendet. Das Luft/Ozon/Stickoxid-Gemisch wird mithilfe eines Ozongenerators produziert und mit leichtem Überdruck (max. 1 bar) bei moderaten Temperaturen (60°C) durch zylindrische Probekörper (Ø 100 mm), eingebaut in einer Triaxialzelle geleitet (siehe Abbildung 29 und Abbildung 30). Dabei können die mechanischen Kennwerte des Asphalts sowohl vor, als auch nach der Alterung am selben Probekörper bestimmt werden (Steiner et al., 2016a). Zusätzlich dazu können mechanische und chemische Eigenschaften am rückgewonnenen Bitumen geprüft werden. Dabei ist eine deutliche Veränderung der Eigenschaften beobachtbar. Wichtig, um die gleichmäßige Durchströmung der Probekörper sicherzustellen, ist das Vorhandensein eines gewissen Hohlraumgehalts der Probekörper. Dieser bewegt im Bereich von 5-8 V.-% (Steiner et al., 2016b; Maschauer et al., 2018).

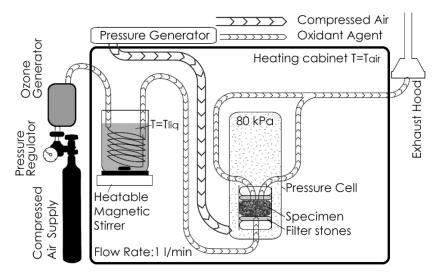


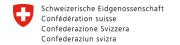
Abbildung 29: Schematische Darstellung des Viennese Aging Procedure (VAPro)



Abbildung 30: Foto von VAPro im Labor

55 OptiMAI







Bundesamt für Strassen ASTRA

Während VAPro bereits wesentliche Verbesserungen im Vergleich zu den anderen Methoden aufweist, konnte der Einfluss der UV-Strahlung auf die Alterung bisher nur teilweise umgesetzt werden. Der hochreaktive Photosmog (Ozon und Stickoxide) wird mittels VAPro berücksichtigt, direkte Sonnenstrahlung, die ebenfalls zur Alterung beiträgt, ist jedoch bisher nicht implementiert worden. Da Strahlung nur eine hauptsächlich auf die Oberfläche begrenzte Wirkung hat, entsteht dabei eine stark inhomogen gealterte Probe. Zur Bestimmung von Materialparametern werden aber möglichst homogen gealterte Materialien benötigt. Aus diesem Grunde wird auf die direkte UV-Bestrahlung verzichtet, da angenommen wird, dass die Wirkung des Photosmogs durch das verwendete Alterungsmedium abgebildet wird. Teil der Optimierung ist es, die Wirkung der UV-Strahlung weiter zu untersuchen und diese Annahme zu stützen. Der Fokus der Optimierung liegt auf der Weiterentwicklung der Alterungszelle, um prismatische Probekörper für Tieftemperaturversuche altern zu können.

3.3.1 Weiterentwicklung der festgelegten Alterungsmethode

Der Fokus dieses Teiles liegt auf der Entwicklung und dem Bau einer neuen Alterungszelle, um auch prismatische Probekörper altern zu können. Es wird dabei auf das VAPro-Prinzip aufgebaut. Zur Unterscheidung der bestehenden (Triaxialzelle) und der neu entwickelten Alterungszelle werden folgende Bezeichnungen verwendet:

- Alterung in der Triaxialzelle = VAProtri
- Alterung in der neuen Zelle = VAPropri

Um ein Verständnis für die UV-Alterung zu erhalten, wird eine entsprechende Studie mit einem eigens entwickelten Versuchsaufbau durchgeführt.

3.3.1.1 UV-A und UV-B Alterungsstudie

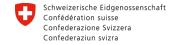
Um die UV-Alterung zu simulieren wurde eine UV/VIS Alterungszelle entwickelt in der die Probe mit UV-A und UV-B Strahlung bestrahlt wird. Dabei entsteht hoch-reaktiver Photosmog, der sich aus Ozon (O₃) und Stickoxiden (NO_x) zusammensetzt.

Die Prozesse werden in den folgenden Gleichungen gezeigt:

$$O_2 + E(498kJ \ mol^{-1}) \rightarrow 20.$$
 (1)

$$0. + 0_2 + M \rightarrow 0_3 + M$$
 (2)







Bundesamt für Strassen ASTRA

$$N_2 + 2O. + M \rightarrow 2NO + M$$
 (3)

Schließlich werden die entstehenden Stickstoffmonoxide (3) durch Ozon weiter oxidiert, um Stickstoffdioxid (4) zu bilden.

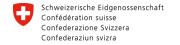
$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2 \tag{4}$$

Die Alterung der Oberflächenstrukturen wurde mit Rasterkraftmikroskopie (AFM) und Fluoreszenzmikroskopie verfolgt und somit der Einfluss der UV/VIS Alterung auf die strukturelle Änderung des Materials erfasst und Informationen über die Nanostruktur gewonnen. Die Photooxidation der Bitumenoberfläche wurde in einer photochemischen Reaktionszelle durchgeführt und in Abbildung 31 dargestellt. Als UV/VIS - Quelle wurde eine Lumatec 2 mit UV-B und UV-A Anteil verwendet. Das emittierte Spektrum der UV-Lampe sowie die Intensität sind in Abbildung 32 dargestellt.



Abbildung 31: Foto der Photooxidationszelle





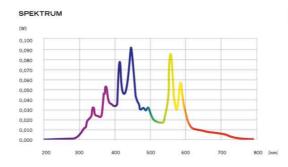


Bundesamt für Strassen ASTRA

OPTISCHE LEISTUNG

Lumatec 2 (UV-A + UV-B)





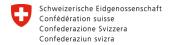
Spektralbereich		Leistung	Intensität	
UVB	280-320 nm	500 mW	2.500 mW/cm ²	
UVA	320-400 nm	4.500 mW	22.500 mW/cm ²	
Violett	400-420 nm	2.000 mW	10.000 mW/cm ²	
Blau	400-500 nm	8.000 mW	40.000 mW/cm ²	
UVA-Violett	320-420 nm	6.500 mW	32.500 mW/cm ²	
IIVA - Plan	320 - 500 nm	12 500 mW	62 500 mW/cm2	

Abbildung 32: UV/VIS-Lampenspezifikationen

Das ungealterte Bitumen wird zwölf Stunden in der photochemischen Reaktionszelle unter Druckluftversorgung beleuchtet. Das dabei erzeugte Gemisch aus O₃ und NO_x reagiert dabei intensiv mit der Bitumenoberfläche. Eine Änderung der Chemie und der Strukturen des Bitumens kann sowohl mit der Rasterkraftmikroskopie als auch mit der Fluoreszenzmikroskopie beobachtet werden. Eine Veränderung durch eine mögliche Temperaturentwicklung wird durch Wasser-IR-Filter, welche zwischen der Licht-Quelle und der Bitumenoberfläche implementiert wurde, ausgeschlossen.

Als Folge der Photooxidation sind Strukturveränderungen der Oberfläche zu beobachten, welche mit Fluoreszenz- und Rasterkraftmikroskopie erfasst wurden. In Abbildung 33 ist die Oberfläche der Probe vor und nach der Alterung mittels der Fluoreszenzmikroskopie dargestellt. Es sind partikuläre Strukturen unterschiedlicher Größen zu beobachten. Bemerkenswert ist, dass die Teilstrukturen Unterschiede in der Fluoreszenz zeigen und die Catana Strukturen (Loeber et al., 1996) sich ebenfalls chemisch von ihrer Umgebung unterscheidet. Mit der Zunahme der atmosphärischen Photooxidation wurde eine Änderung der Polarität in der chemischen Zusammensetzung, und somit eine Zunahme des Kolloidindexes erzeugt. Als Folge der Alterung zeigen die partikulären Teilstrukturen eine Zunahme in der Höhe von weniger als 10 nm auf mehr als 500 nm.







Bundesamt für Strassen ASTRA

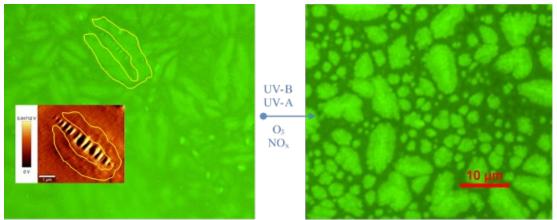


Abbildung 33: Fluoreszenzmikroskopie und Rasterkraftmikroskopieaufnahmen vor und nach der UV-A & UV-B Alterung. Dauer der Alterung beträgt zwölf Stunden

Die Oberfläche nach der photochemischen Alterung zeigt jedenfalls eine erhöhte Domänenbildung und eine Agglomeration der Fluoreszenzzentren und bestätigen somit auch die theoretischen Annahmen in Bezug auf die chemische Zusammensetzung und die Kolloidbildung als Folge der Alterung (Lesueur, 2009; Loeber et al., 1998). In Abbildung 34 sind die AFM Aufnahmen (Amplitude, Phase und Topographie) und die Fluoreszenzaufnahmen der Oberfläche nach der Alterung in Abbildung 35 dargestellt.

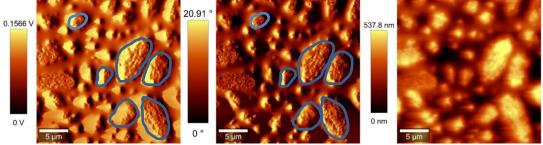


Abbildung 34: AFM Aufnahmen nach der Alterung: Amplitude, Phase und Topographie

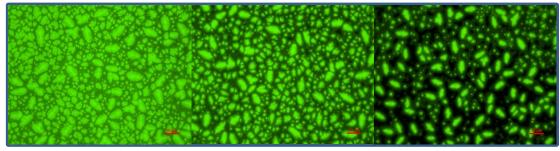
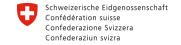


Abbildung 35: Fluoreszenzaufnahmen der gealterten Probe an unterschiedlichen Probenstellen

Die AFM und Fluoreszenzaufnahmen zeigen, dass die Oxidation des Bindemittels in Anwesenheit von Ozon, Stickoxide und UV-A und UV-B Strahlung sich insbesondere auf

59 OptiMAI







Bundesamt für Strassen ASTRA

die Erhöhung der polaren Bestandteile ausgewirkt hat, was in der Literatur als eine Veränderung des Polaritätsgradienten beschrieben wird. Die bisherigen Modellierungen zeigen, dass es, durch den steiler werdenden Polaritätsgradienten zwischen Kern, Mantel und Matrix, zu einer Veränderung der Mikrostruktur kommt. Dies konnte in dieser Studie durch den UV/VIS- Alterungsversuch erstmals experimentell bestätigt und durch Fluoreszenz- und Rasterkraftmikroskopie abgebildet werden. Die Mikroskopieaufnahmen zeigen die Veränderungen der Mikrostrukturen und eine Agglomeration aufgrund des Anstiegs der Polarität im Bindemittel, die durch den Einbau von Sauerstoff durch die Reaktion mit reaktiven Sauerstoffspezies (ROS) aus der Atmosphäre zustande kommt. Die Oxidation der Oberfläche bietet eine Basis für die Rissbildung, Versprödung und das mechanische Versagen des Bindemittels.

3.3.1.2 Entwicklung und Konstruktion der neuen Alterungszelle für prismatische Probekörper

Am Anfang der Prototypenentwicklung wurden verschiedene Möglichkeiten der Konstruktion durchgespielt: Grundsätzlich sollte die neue Zelle dem VAPro-Prinzip folgen – Durchströmung des Asphalts mit hochreaktiven Gasen – und dabei prismatische Probekörper für Tieftemperaturversuche altern. Zwei grundlegende Ideen standen dabei zur Debatte: Die Durchströmung einzelner Probekörper oder einer ganzen Asphaltplatte, wie sie im Labor hergestellt wird. Aufgrund der Freiheit in der Probekörperwahl, da aus einer ganzen Platte verschiedene Probekörpergeometrien herausgeschnitten werden können, fiel die Entscheidung auf die gesamte Asphaltplatte.

Es wurden diverse Handskizzen angefertigt und verschiedene Ideen entwickelt. Dieser Schritt erwies sich als zeitintensiver als angenommen, wodurch sich bereits eine Verzögerung im Projekt ergab. Es kam dabei vor allem zu zwei besonderen Herausforderungen: Zum einen war dies, das wirksame Unterbinden der Umströmung der Asphaltplatte, zum anderen die Wahl der Materialien, welche den hoch-reaktiven Gasen wiederstehen müssen. Als Optimum aus Funktionalität und Herstellungskosten wurde das Design so gewählt, dass die Asphaltplatte in einem Aluminiumgehäuse zwischen Filterplatten aus porösem Aluminium mithilfe einer Elastomerdichtung eingebettet ist und von unten nach oben durchströmt wird. Abbildung 36 zeigt den ersten konkreten Entwurf des Prototyps.





Bundesamt für Strassen ASTRA

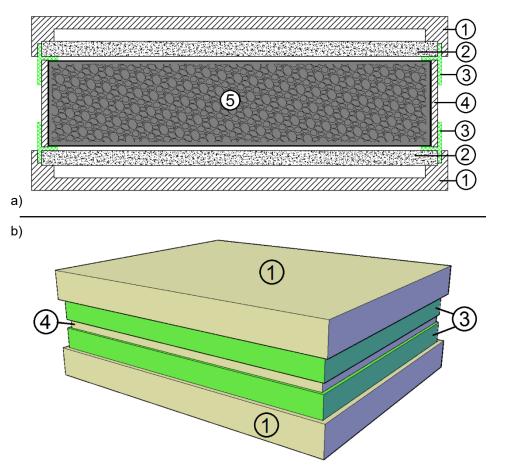
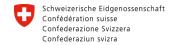


Abbildung 36: Erste CAD-Entwürfe des neuen Prototypen: a) Schnitt b) Ansicht;

Legende: 1 Deckel und Boden 2 Filtersteine 3 Dichtungen
4 innerer Rahmen 5 Asphaltplatte

In Zusammenarbeit mit der mechanische Werkstätte Fa. Herzog wurde der Entwurf finalisiert und der Prototyp hergestellt. Das Ergebnis ist in Abbildung 37 zu sehen.







Bundesamt für Strassen ASTRA

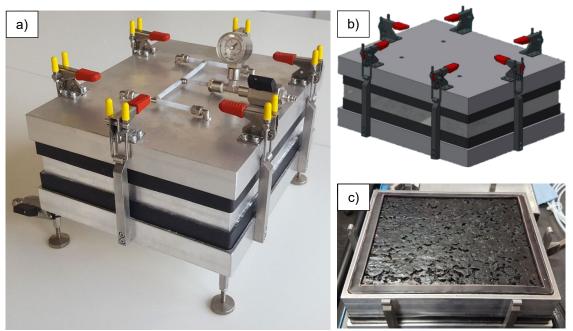


Abbildung 37: a) fertiggestellter Prototyp; b) finalisierte CAD-Zeichnung; c) Prototyp mit eingelegter Asphaltplatte

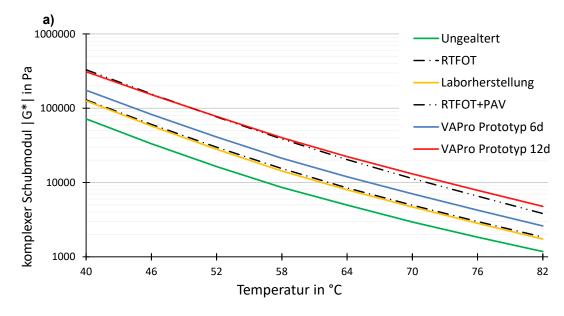
3.3.2 Festlegung der Parameter der neuen Zelle

Ziel ist es, die passenden Parameter von Durchfluss, Dauer und Druck so festzulegen, damit der Asphalt in einem langzeitgealterten Zustand vorliegt. Es wurde die Dauer der Alterung verlängert, der Durchfluss blieb dabei bei dem bewährten Wert von 1 I/min und der Druck im System stets unter 1 bar. Es wurde jeweils eine Platte für 6 Tage und 12 Tage konditioniert und anschließend das Bitumen mittels Lösemittel und Vakuumdestillation vom Gestein getrennt, um es im DSR zu untersuchen. Verglichen werden die Ergebnisse mit den Werten nach RTFOT+PAV Alterung. Abbildung 38 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen. Man sieht, dass eine Verlängerung der Alterungsdauer auf zwölf Tage einen Anstieg des Schubmoduls vergleichbar mit dem RTFOT+PAV gealterten Bitumen bewirkt, der Phasenwinkel ist sogar deutlich niedriger. Die Alterungsdauer der neuen Zelle (1xVAPro) wurde damit für dieses Projekt auf zwölf Tage festgelegt.

Diese deutliche Erhöhung der Dauer ist, bei Beibehaltung des gleichen Durchflusses und Drucks dadurch zu erklären, dass weitaus mehr Asphalt im Vergleich zur Triaxialzelle zu konditionieren ist. Die weitere Optimierung der Alterungsparameter ist ein wichtiger Punkt und wird im Anschluss des Projekts weiterverfolgt.



Bundesamt für Strassen ASTRA



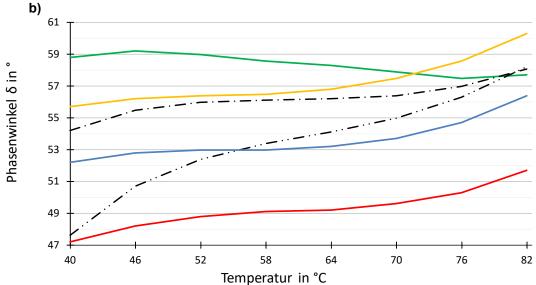


Abbildung 38: Darstellung des komplexen Schubmduls $|G^*|$ (a) und des Phasenwinkels δ (b) über eine Temperaturspanne von 40 bis 82°C

3.4 Validierung der empfohlenen Methode (AP4)

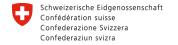
3.4.1 Allgemeines

Zur Validierung der Alterungsmethode wurden die Rückstellproben des Frischbitumens der Probestrecke (Variante P) von 1999 verwendet. Aus diesem Material wurde eine begrenzte Anzahl an zylindrischen Probekörpern hergestellt und anschließend mit VAPro gealtert. Das für die Validierung verwendete Mischgut ist ein AC 11. Vor und nach der Alterung wurde

63 OptiMAI









Bundesamt für Strassen ASTRA

die Steifigkeit der Probekörper im Spaltzugschwellversuch geprüft. Am rückgewonnenen Bindemittel wurden auch Untersuchungen auf Bindemittelebene durchgeführt.

Nach der Validierung des Alterungsverfahrens wurde innerhalb dieses Arbeitspakets das Prüfprogramm zur Bestimmung der Materialkennwerte als Input für das Arbeitspaket 5 bzw. 6 abgearbeitet. Dazu wurden Steifigkeits- und Ermüdungsversuche an zylindrischen Probekörpern, sowie Zug- und Abkühlversuche an prismatischen Probekörpern durchgeführt.

3.4.2 Validierung des Alterungsverfahrens

Aufgrund des leicht höheren Polymergehalts des Bitumen V1 hat es eine etwas höhere Viskosität als das Bitumen P1 der Probestrecke. Um die gleichen Herstellungsbedingungen des Mischguts und das Erreichen der gewünschten Hohlraumgehälter sicherzustellen wurden beide Bitumen im Rotationviskosimeter geprüft (siehe Abbildung 39).

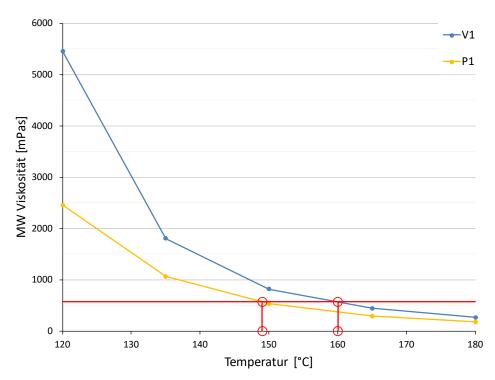
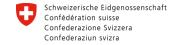


Abbildung 39: Vergleich der Viskosität der beiden Bitumen V1 und P1 im Rotationsviskosimeter

Um die notwendigen Hohlraumgehälter zu erreichen, wurde das Mischgut mit Bitumen V1 bei 160°C hergestellt. Aus Abbildung 39 ist ersichtlich, dass das Bitumen P1 die gleiche Viskosität bei 149°C besitzt. Daher wurde für die Herstellung mit Bitumen P1 eine Temperatur von ca. 150°C gewählt.







Bundesamt für Strassen ASTRA

Es wurden je Alterungsstufe drei Probekörper mit VAPro^{tri} gealtert. Abbildung 40 zeigt die Ergebnisse des Spaltzugschwellversuchs bei 10°C und den Prüffrequenzen von 1, 5 und 10 Hz. Erkennbar ist ein Anstieg des komplexen Elastizitätsmoduls um im Mittel 21-28% für 1xVAPro und 33-55% für 2xVAPro gealterte Probekörper. Ein weiterer Anstieg der Steifigkeit mit der Verlängerung der Alterungsdauer ist also erkennbar.

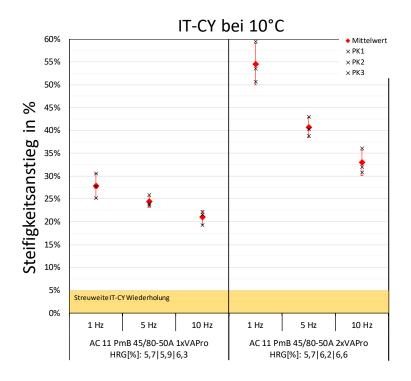
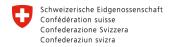


Abbildung 40: Steifigkeitszuwachs von 1x und 2xVAPro gealterten Asphaltprobekörpern im Spaltzugschwellversuch bei 10°C

Die Bindemittel wurden anschließend gealterten mittels Lösungsmittel Vakuumdestillation vom Gestein getrennt und im DSR untersucht und mit den Ergebnissen der Probefelduntersuchungen verglichen (Abbildung 41). Die kurzzeitgealterten Proben aus dem Labor (RTFOT und Laborherstellung) liefern ähnliche Ergebnisse wie das im Feld eingebaute Mischgut. Bei den Schichten der Deckschicht sieht man den großen Abfall vom ersten auf den zweiten Zentimeter. Das PAV-gealterte Bitumen erreicht nur das Alterungsniveau des zweiten Zentimeters. VAProtri hingegen erreicht im oberen Temperaturbereich bereits bei einfacher Alterungsdauer (3 Tage) das Niveau des obersten Zentimeters einer 19 Jahre alten Deckschicht. Der zweifache Durchlauf der VAProtri-Alterung (6 Tage) liegt leicht über der S1-Schicht. Man kann also sagen, dass eine 19 Jahre im Feld gealterte Probe zwischen 1xVAPro und 2xVAPro liegt.







Bundesamt für Strassen ASTRA

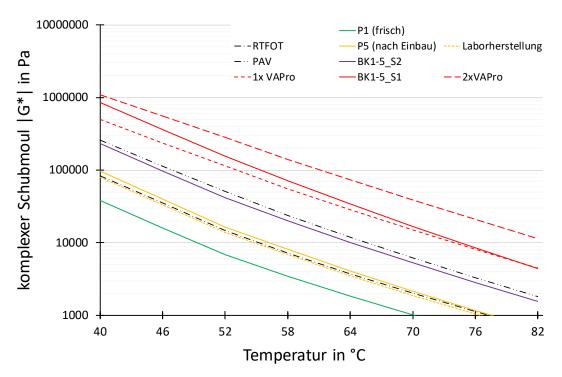


Abbildung 41: Vergleich der DSR Ergebnisse (komplexer Schubmodul): Validierung des Viennese Aging Procedures auf Bitumenebene

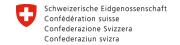
Die Validierung des Viennese Aging Procedure ist damit auf Bitumenebene eindrucksvoll erbracht. Das erzielbare Alterungsniveau einer VAPro-Alterung mit 3 Tagen Konditionierungsdauer bei 60°C nähert sich einer 19 Jahre gealterten Deckschicht im obersten Zentimeter an und mit einer Verlängerung der Dauer lässt sich auch eine weitere Alterung über das Niveau der Feldproben bewerkstelligen.

3.4.3 Prüfprogramm zur Ermittlung der erforderlichen Materialkennwerte für AP 5 und 6

3.4.3.1 Allgemeines

Um die entsprechenden Eingangswerte für die Arbeiten im Arbeitspaket 5 bzw. 6 bereitzustellen, wurde ein umfassendes Prüfprogramm abgearbeitet. Dabei wurden die Probekörper von der TU Wien hergestellt und an die Partner verschickt. Die TU Dresden übernahm die Prüfung der zylindrischen Probekörper auf Steifigkeit und Ermüdung im Spaltzugschwellversuch. Die prismatischen Probekörper erhielt die TU Braunschweig, um daran Abkühlversuche und Kältezugprüfungen durchzuführen. Ausgewählte Probekörper wurden anschließend von der TU Braunschweig nach Bindemittelextraktion und







Bundesamt für Strassen ASTRA

Vakuumdestillation mit dem BTSV untersucht. Zusätzlich wurden extrahierte Bindemittel zurück zur TU Wien geschickt, um diese chemisch zu analysieren.

An dieser Stelle wurden interessante Effekte beobachtet: Die Ergebnisse im Spaltzugschwellversuch fielen vor allem beim SMA 11, so aus, dass nur eine scheinbar geringe Alterung zu beobachten war. Vermutet wurde zunächst ein Einfluss des Hohlraumgehalts bzw. die beim SMA höhere Bindemittelfilmdicke. Nachdem aber der bewährte AC 11 auch nicht an die erwarteten Steifigkeitszuwächse herankam, wurden weitere Untersuchungen zur Ursachenfindung durchgeführt. Durch Wiederholung einzelner Versuche an der TU Wien fand sich ein plausibler Erklärungsansatz. Aufgrund organisatorischer Gründe wurden bei den Wiederholungsprüfungen einige Probekörper, nicht wie gewöhnlich direkt nach der Alterung geprüft, sondern erst ca. eine Woche später. Die Ergebnisse dieser Prüfungen fielen ähnlich aus wie die zuvor durchgeführten Prüfungen an der TU Dresden. Die aktuelle These ist daher, dass es in den Tagen nach Abschluss der Alterung zu einer Art Entspannungs-/Ausgleichseffekt in den Probekörpern kommt, der die Ergebnisse auf Asphaltebene beeinflusst. Zur eindeutigen Benennung und Berücksichtigung dieser Vorgänge ist allerdings weiterer Forschungsbedarf notwendig.

3.4.3.2 Untersuchungen auf Asphaltebene

Ergebnisse Spaltzugschwellversuche

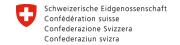
Zur Bestimmung der Materialeigenschaften der gealterten und ungealterten Asphaltgemische wurden Spaltzugschwellversuche gemäß TP Asphalt-StB Teil 24 (Ermüdung) und Teil 26 (Steifigkeit) durchgeführt (FGSV, 2018).

SMA 11

Zur Bestimmung der Ermüdungsfunktion (siehe Formel 1) wurden je Alterungsstufe mindestens neun Probekörper geprüft und die Messergebnisse ausgewertet. Die Einzel-Ergebnisse der Ermüdungsversuche sind dem Anhang A zu entnehmen. Die Bestimmtheitsmaße der Ermüdungsfunktionen für den untersuchten SMA 11 liegen in einem Bereich von 0,9751 bis 0,9925. Die Qualität der Funktionen ist daher als sehr gut zu beurteilen.

$$N_{Makro} = K_1 \cdot \varepsilon_{el}^{K_2}$$
 Formel 1







Bundesamt für Strassen ASTRA

In Abbildung 42 sind die Ermüdungsfunktionen des SMA 11 für die drei Alterungsstufen dargestellt. Es zeigt sich eine geringe Veränderung infolge der VAPro-Alterung. Es ist jedoch kein Unterschied zwischen den Ermüdungsfunktionen der einmaligen bzw. zweimaligen VAPro-Alterung festzustellen. Es wurden verschiedene Einflussgrößen betrachtet, um die Ursachen für die fehlende Veränderung infolge der zweimaligen (72 Stunden) VAPro-Alterung zu finden.

Die Zeitdauer zwischen Ende der Alterung und der Durchführung der Spaltzugschwellversuche betrug zwischen 34 und 136 Tagen. Der Einfluss der Dauer zwischen Alterung und Ermittlung der Materialparameter konnte nicht abschließend geklärt werden. Es bedarf hier, wie eingangs erwähnt noch weiterer umfassender Forschungstätigkeit.

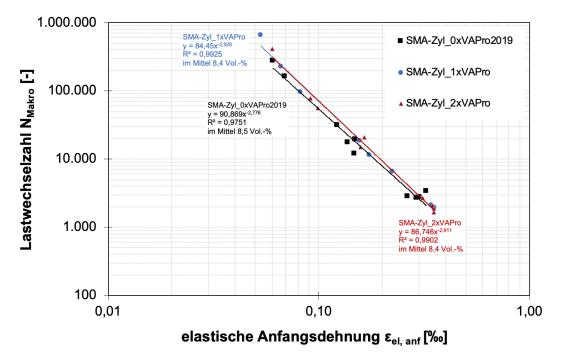
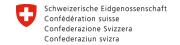


Abbildung 42: Ermüdungsfunktionen des SMA 11

Die Ermüdungsfunktion der ungealterten Variante mit abweichenden Hohlraumgehalt ist in Abbildung 43 ergänzt. Der Hohlraumgehalt ist im Vergleich zu den gealterten Varianten mit im Mittel 6,9 Vol.-% zu niedrig. Untersuchungen (Weise, 2012) haben gezeigt, dass die Verdichtung einen maßgeblichen Einfluss auf die Materialparameter hat. Bei identischer Materialzusammensetzung führt eine stärkere Verdichtung zu einer Verbesserung der Ermüdungsfunktion. Dies wird auch aus Abbildung 43 deutlich. Eine Veränderung der







Bundesamt für Strassen ASTRA

Ermüdungsfunktionen aufgrund der Alterung konnte nicht ermittelt werden, da gleichzeitig der Hohlraumgehalt anstieg und somit die Effekte der Alterung nicht darstellbar waren.

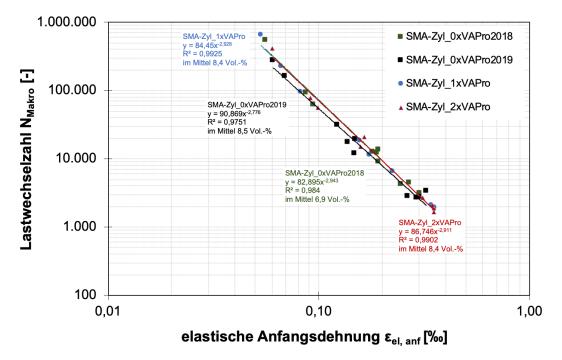


Abbildung 43: Ermüdungsfunktionen des SMA 11 mit der ungealterten Variante mit zu niedrigerem Hohlraumgehalt (grün)

Zur Bestimmung der Hauptkurve (Mastercurve) bzw. der Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktion wurden jeweils drei bzw. vier Probekörper untersucht. Die Probekörper wurden Multistage-Versuchen unterzogen. D.h. die Steifigkeiten der einzelnen Probekörper wurden bei drei Temperaturen (-10, 5 und 20°C) und bei verschiedenen Belastungsfrequenzen (10, 3, 1, 0,3 und 0,1 Hz) ermittelt. Für jeden Einzelwert (siehe Anhang B) wurden aus Temperatur und Frequenz zugeordnet die x*-Werte (Formel 2) berechnet, die zum Aufstellen der Hauptkurve nach Formel 3 notwendig sind. Die Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktion stellt einen Sonderfall der Hauptkurve für die Belastungsfrequenz von 10 Hz aufgetragen über die Temperatur dar.

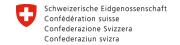
$$x^* = \frac{\phi \cdot \left(\frac{1}{T + 273,15} - \frac{1}{T_0 + 273,15}\right) + \ln(f)}{\ln(10)}$$
 Formel 2

x* = beliebiger Wert auf der Abszissenachse der Hauptkurve, bestimmt mit Hilfe der Temperatur-Frequenz-Äquivalenz [Hz]

φ = Materialparameter [-]

T = Temperatur für den gesuchten, zu berechnenden Steifigkeitsmodul [°C]







Bundesamt für Strassen ASTRA

 T_0 = Referenztemperatur (Temperatur, für welche die Hauptkurve zu bestimmen ist, in der Regel 20°C) [°C]

f = Belastungsfrequenz [Hz]

$$|E^*| = |E^*|_{-\infty} + \frac{|E^*|_{+\infty} - |E^*|_{-\infty}}{1 + \rho(\dot{z}_1 \cdot x^* + \dot{z}_0)}$$
 Formel 3

|E*| = absoluter Wert des komplexen Steifigkeitsmoduls [MPa]

|E*|+∞ = Grenzwert des Steifigkeitsmoduls bei sehr tiefen Temperaturen und/oder hohen Belastungsfrequenzen [MPa]

|E*|-∞ = Grenzwert des Steifigkeitsmoduls bei sehr hohen Temperaturen und/oder niedrigen Belastungsfrequenzen [MPa]

x* = beliebiger Wert auf der Abszissenachse der Hauptkurve, bestimmt mit Hilfe der Temperatur-Frequenz-Äquivalenz [Hz]

 \dot{z}_0 , \dot{z}_1 = Material parameter der Hauptkurve [-]

Im Ergebnis können die Parameter (Tabelle 10) der Hauptkurve mit Hilfe der Regression bestimmt werden. Es zeigt sich eine sehr geringe Streuung der Einzelwerte und somit ein sehr gutes Bestimmtheitsmaß.

Tabelle 10: Parameter der Hauptkurven

Variante	E* +∞	E* _{-∞}	ф	\dot{z}_0	\dot{z}_1	R ²
SMA-Zyl_0xVAPro2018	20.893	0	24.223	-0,7359633	2,4411469	0,991
SMA-Zyl_0xVAPro2019	20.955	0	26.053	-0,7161143	2,5544847	0,994
SMA-Zyl_1xVAPro	23.141	0	25.471	-0,6715179	2,5713317	0,994
SMA-Zyl_2xVAPro	23.511	0	26.637	-0,6581639	2,5373927	0,991

Aus Abbildung 44 wird gleichzeitig deutlich, dass die Alterung des SMA 11 mit dem VAPro-Verfahren nur einen sehr geringen Einfluss auf die Steifigkeitseigenschaften aufweist. Vielmehr bewegen sich die Änderungen im Bereich der normalen Streuungen für ein Asphaltgemisch.

70 OptiMAI





Bundesamt für Strassen ASTRA

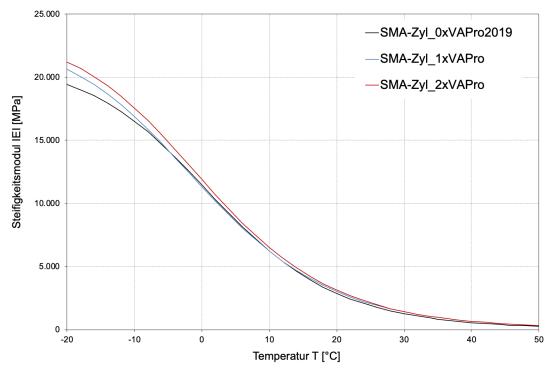


Abbildung 44: Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktionen des SMA 11

Entgegen den erwarteten Auswirkungen, konnte kein **Einfluss** der Verdichtung / des Hohlraumgehaltes für die Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktionen nachgewiesen werden, wie in Abbildung 45 verdeutlicht. Die Varianten SMA-Zyl_0xVAPro2018 und SMA-Zyl_0xVAPro2019 besitzen nahezu identische Steifigkeitseigenschaften.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra



Bundesamt für Strassen ASTRA

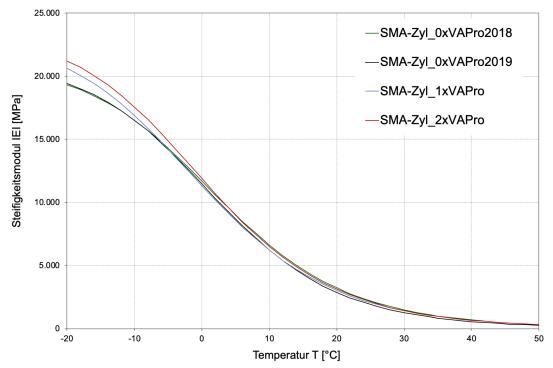


Abbildung 45: Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktionen des SMA 11

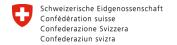
Die auf Basis der Versuchsergebnisse bestimmten Materialparameter hinsichtlich Ermüdungs- und Steifigkeitsverhalten wurden zur Entwicklung der Parameterfunktionen verwendet.

AC 11

Für dieses Mischgut wurden ebenso die dimensionierungsrelevanten Materialparameter – Steifigkeit und Ermüdung – für die drei Alterungsstufen (0xVAPro, 1xVAPro-gealtert, 2xVAPro-gealtert) bestimmt.

Die Ergebnisse der Spaltzugschwellversuche sind in Abbildung 46 und Abbildung 47 dargestellt. Die Einzel-Ergebnisse der Ermüdungsversuche sind dem Anhang A zu entnehmen. Die Ermüdungsfunktionen zeigen im Gegensatz zum SMA 11 moderate Veränderungen aufgrund der einfachen VAPro-Alterung. Für den signifikant häufig auftretenden Dehnungsbereich kleiner 0,15 ‰ kann eine Zunahme der ertragbaren Lastwechselzahlen bis zum Makroriss-Kriterium beobachtet werden. Die doppelte Alterungsdauer (2xVAPro) bewirkt in diesem Bereich dann jedoch keine weitere maßgebliche Veränderung der Ermüdungsfunktion. Für hohe Dehnungen kann eine Abnahme der ertragbaren Lastwechselzahlen beobachtet werden.







Bundesamt für Strassen ASTRA

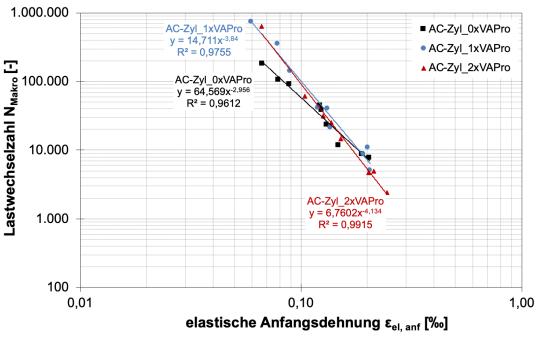
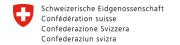


Abbildung 46: Ermüdungsfunktionen des AC 11

Die Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktionen zeigen im Bereich der Temperaturen unter 0°C eine geringfügige Versteifung infolge der einmaligen bzw. doppelten VAPro-Alterung. Aufgrund der geringen Auftretenshäufigkeiten dieser Temperaturen, sind die Auswirkungen auf die Ergebnisse der rechnerischen Dimensionierung als insgesamt irrelevant einzuschätzen. Die Einzel-Ergebnisse der Steifigkeitsversuche sind dem Anhang B zu entnehmen.







Bundesamt für Strassen ASTRA

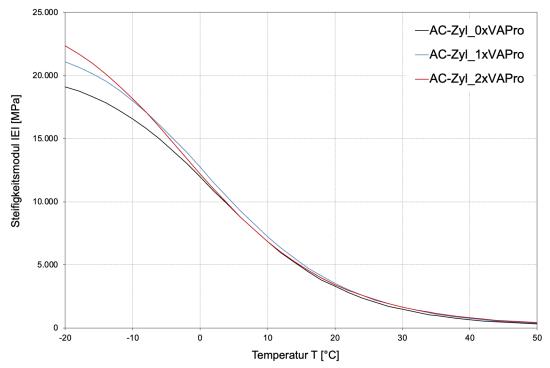


Abbildung 47: Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktionen des AC 11

Ergebnisse der Zug- und Abkühlversuche

Zug- und Abkühlversuche wurden an prismatischen SMA Probekörpern durchgeführt. Die Konditionierung erfolgte mit dem neu entwickelten Protoypen. Die Ergebnisse für die ungealterten Probekörper sind in Abbildung 48 und die Ergebnisse für die 1-fach VAProgealterten Probekörper in Abbildung 49 dargestellt. Die blauen Punkte kennzeichnen dabei jeweils die ermittelte Zugfestigkeiten bei den Prüftemperaturen -25, -10, 5 und 20°C, welche über einen kubischen Spline verbunden sind. Die angegebene Zugfestigkeit bei -40°C wird laut TP Asphalt-StB, Teil 46A (FGSV, 2018) mit 0,9 x σ (T=-25°C) näherungsweise abgeschätzt. Die Abbildungen enthalten außerdem den mittleren Verlauf der Abkühlversuche bzw. der kryogenen Spannungen (rote Linien) mit Angabe der Bruchtemperaturen. Aus der Differenz von Zugfestigkeit und kryogenen Spannungen im Abkühlversuch wird die Zugfestigkeitsreserve berechnet.





Bundesamt für Strassen ASTRA

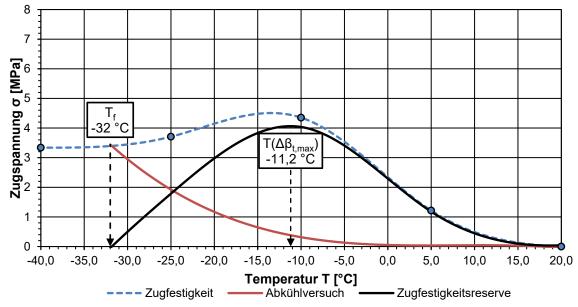


Abbildung 48: Ergebnisse der Zug- und Abkühlversuche der ungealterten Probekörper

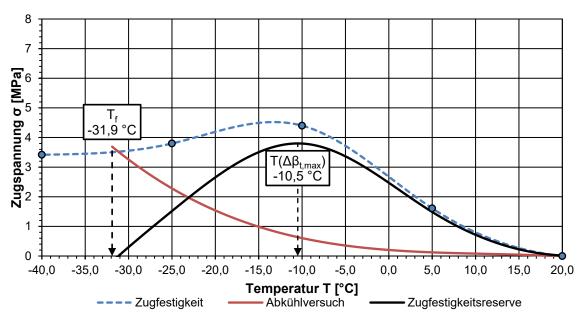
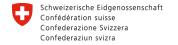


Abbildung 49: Ergebnisse der Zug- und Abkühlversuche der 1xVAPro-gealterten Probekörper

Für 2xVAPro-gealterte Probekörper wurden keine Zugversuche durchgeführt, sodass keine Zugfestigkeitsreserve berechnet werden kann. Die Ergebnisse der Abkühlversuche von 2-fach VAPro-gealterten SMA Probekörpern sind in Abbildung 50 zusammen mit den Ergebnissen der ungealterten und 1-fach VApro-gealterten Varianten dargestellt. Mit Zunahme des Alterungszustandes ist demnach ein Anstieg der auftretenden kryogenen Spannungen zu beobachten. Zusätzlich ist die Bruchtemperatur beim 2-fach VAPro-







Bundesamt für Strassen ASTRA

gealterten Probekörper im Vergleich zu dem ungealterten Probekörper um ca. 5°C erhöht. Es zeigt sich also, dass die VAPro-Alterung einen signifikanten Einfluss auf das Verhalten im Tieftemperaturbereich hat. Die VAPro-gealterten Probeköper sind demnach empfindlicher für Tieftemperaturrisse.

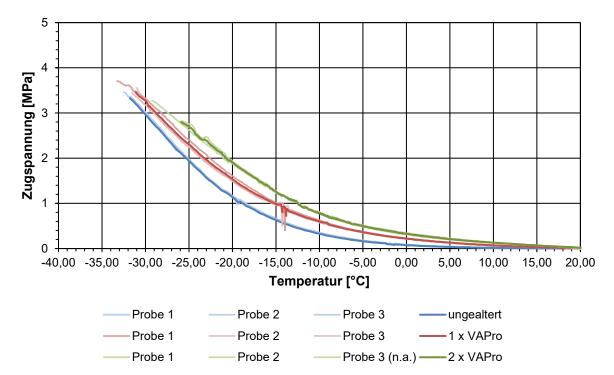


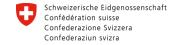
Abbildung 50: Vergleichende Darstellung der Abkühlversuche in unterschiedlichen Alterungszuständen

3.4.3.3 Untersuchungen auf Bitumenebene

Ergebnisse des BTSV

Die Veränderung der BTSV-Kennwerte durch VAPro-Alterung ist in Abbildung 51 dargestellt. In diesem Fall werden immer aus Asphaltprobekörpern extrahierte Bitumen untersucht, die bereits eine Kurzzeitalterung durch die Asphaltherstellung erfahren haben. Die Kurzzeitalterung hat bei allen untersuchten Materialien einen ähnlichen Effekt auf die BTSV-Kennwerte (Abbildung 51, grauer Kreis), welcher gleichzeitig mit der Wirkung von einmaliger RTFOT-Alterung (vgl. Abbildung 16) übereinstimmt. Die Langzeitalterung mit dem VAPro-Verfahren ist dagegen stark abhängig von untersuchtem Material und der Probekörperform. Die VAPro-Alterung von zylindrischen Probekörpern aus SMA (Abbildung







Bundesamt für Strassen ASTRA

51, orange Linien) zeigt im Vergleich zu der PAV-Alterung (vgl. Abbildung 16) nur eine geringe Wirkung und das sowohl bei 1-facher VAPro-Alterung (Abbildung 51, orange Kreise), als auch bei 2-facher VAPro-Alterung (Abbildung 51, orange Dreiecke).

Bei 1- und 2-facher VAPro-Alterung von zylindrischen Probekörpern aus AC (Abbildung 51, hellblaue Linie) zeigt sich eine deutlich größere Wirkung in Bezug auf die BTSV-Kennwerte. In diesem Fall lässt sich an Anstieg der Temperatur T_{BTSV} und ein Abfall des Phasenwinkels δ_{BTSV} feststellen. Dieser Effekt lässt sich auch für prismatische Probekörper SMA (Abbildung 51, gelbe Linie), die in der neuen Alterungszelle konditioniert wurden feststellen, wenngleich nicht ganz so stark ausgeprägt.

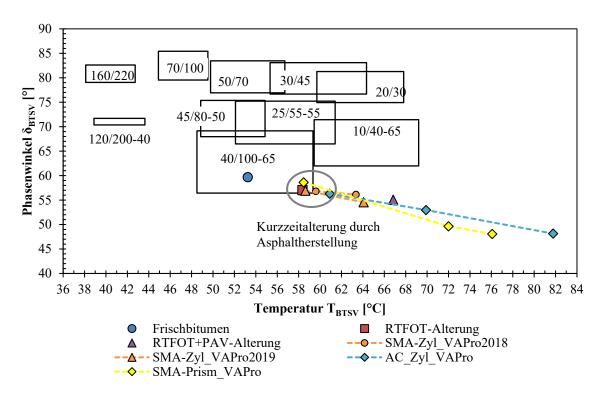
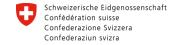


Abbildung 51: BTSV-Ergebnisse der extrahierten Bitumen aus Asphaltprobekörpern in verschiedenen Alterungszuständen

Zum Vergleich und zur rheologischen Bewertung der verschiedenen Alterungszustände ist in Abbildung 52 die Zunahme des Kennwerts T_{BTSV} für alle laborgealterten Materialvarianten gegenübergestellt. Die Werte gelten dabei als Indikator für die Veränderung der mechanischen Eigenschaften der Bitumenvarianten durch Steifigkeitszunahme. Hier zeigt sich erneut der sehr starke Effekt der VAPro-Alterung auf die zylindrischen AC und prismatischen SMA Probekörper, der signifikant größer ist als die der PAV-Alterung. Es lässt sich also feststellen, dass der AC 11 auf Bindemittelebene wieder wie gewohnt







Bundesamt für Strassen ASTRA

gealtert ist, was bedeutet, dass die vermuteten Entspannungseffekte nur einen Effekt auf die Asphaltprüfungen haben. Die Wirkung der VAPro-Alterung ist allerdings stark vom Material (bzw. Hohlraumgehalt) und von der Probekörperform abhängig, sodass keine abschließenden Aussagen getroffen werden können.

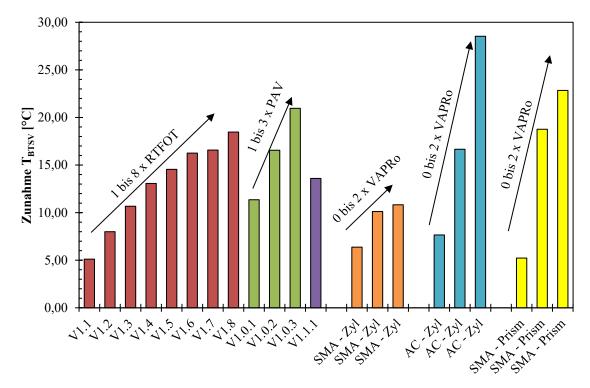
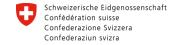


Abbildung 52: Zunahme der Temperatur T_{BTSV} als Folge unterschiedlicher Alterungsverfahren und -intensitäten

Es lässt sich also feststellen, dass Laboralterung und Feldalterung einen ähnlichen Einfluss auf die rheologischen Kennwerte des BTSV haben. Grundsätzlich kommt es bei jeder Alterung durch eine Steifigkeitszunahme, feststellbar durch einen Anstieg der Temperatur T_{BTSV}. Bei mehrfacher Laboralterung ist dabei für alle Laboralterungsverfahren (RTFOT, PAV und VAPro) ein linearer Trend zu erkennen. Die Kombination der Laboralterung mit RTFOT und PAV führt in Bezug auf die BTSV-Kennwerte zu sehr ähnlichen Wirkungen wie die Feldalterung. Die VAPro-Alterung zeigt ebenfalls ein ähnliches Verhalten, jedoch ist die Wirkung stark von Material und Probekörperform abhängig.

Die Feldalterung scheint sich ausschließlich auf die oberste Schicht (1 cm) der Asphaltdeckschicht auszuwirken. Die darunterliegenden Schichten werden in Bezug auf die rheologischen Materialkennwerte nicht durch die Alterung beeinflusst.







Bundesamt für Strassen ASTRA

Chemische Untersuchungen

Infrarotspektroskopie

Es wurden die Bindemittel der AC 11 Probekörper untersucht. Eine signifikante Zunahme der CO und SO Indizes durch 1xVAPro ist zu beobachten. Die erneute Alterung der Probe zeigt, dass dies die stärkste Auswirkung auf die Probe hat. Der CO Index zeigt die stärkste Zunahme bei 2xVAPro und gleichzeitig eine signifikante Abnahme des SO Indizes (vgl. Abbildung 53).

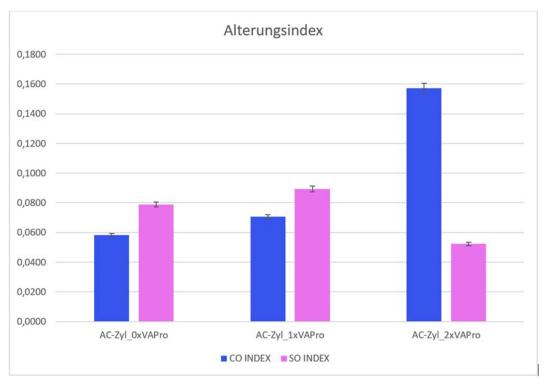


Abbildung 53: Berechnete CO- und SO-Indizes aus den Spektren für die im Zuge der Parameterstudie hergestellten Proben

Fluoreszenzspektroskopie

Abbildung 54 zeigt die Ergebnisse der Fluoreszenzspektroskopischen Untersuchungen. Sowohl die absolute als auch die relative Fluoreszenz zeigen einen Abfall der Fluoreszenz mit Verlängerung der Alterungsdauer.



Bundesamt für Strassen ASTRA

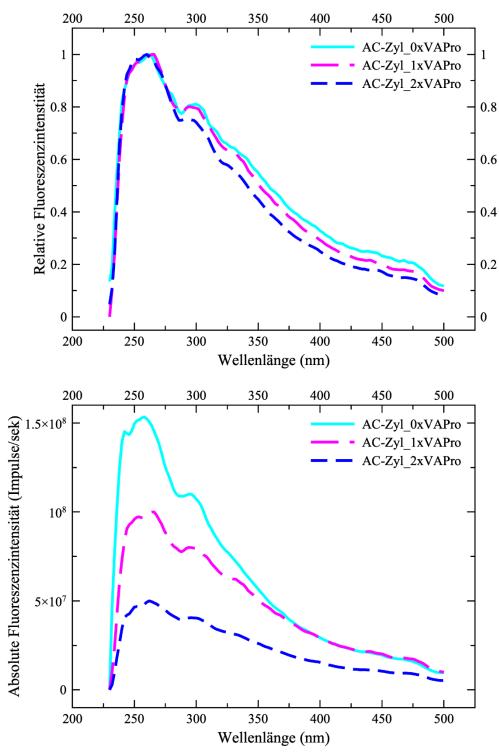
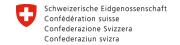


Abbildung 54: Absolute (oben) und relative (unten) Fluoreszenzintensität für die AC 11 Proben.







Bundesamt für Strassen ASTRA

Auch mit chemischen Methoden ist eine deutliche Alterung zu erkennen. Dies lässt annehmen, dass der Effekt der Liegedauer zwischen Alterung und Asphaltprüfung und die damit verbundenen geringen Änderungen der mechanischen Eigenschaften sich auf die Asphaltebene beschränken. Das Bindemittel ist also gealtert, allerdings verringert sich der Alterungseffekte mit der Zeit auf Asphaltebene. Dieser Effekt bedarf jedenfalls noch weiterer Untersuchung

3.5 Implementierung in die rechnerische Dimensionierung (AP5)

Aufgrund der unterschiedlichen Bemessungsansätze in Deutschland und Österreich werden die Methoden zur Implementierung getrennt betrachtet.

3.5.1 Implementierung in die deutsche Dimensionierungsmethode

3.5.1.1 Berechnungsverfahren nach den RDO Asphalt 09

Das Verfahren der rechnerischen Dimensionierung gemäß RDO Asphalt 09 ist in Abbildung 55 schematisch dargestellt. Als Eingangsgrößen sind

- die dimensionierungsrelevanten Materialkenngrößen,
- die Verkehrslasten, in Form einer in diskrete Klassen gegliederten Häufigkeitsverteilung der Achslasten sowie
- die klimatischen Bedingungen, berücksichtigt über eine Häufigkeitsverteilung der Oberflächentemperaturen und der zugehörigen Temperaturprofile erforderlich.

Die Schichtenfolge und die Ausgangsschichtdicken sind festzulegen. Die Gesamtdicke des frostsicheren Oberbaus sowie der Nachweis der Frostsicherheit sind gemäß den RStO 12 zu berücksichtigen. Das Berechnungsmodell wird basierend auf der festgelegten Schichtenfolge und den zugehörigen Schichtdicken generiert. Mit Hilfe des Berechnungsmodells (Mehrschichtentheorie) können für alle Belastungsvariationen aus Verkehrsbelastung und Temperaturzustand in der Konstruktion an den maßgebenden Nachweispunkten die relevanten Beanspruchungsgrößen (Spannungen und Dehnungen) berechnet werden. Die Nachweise sind an den Maßgebenden Nachweispunkten für die festgelegte Nutzungsdauer zu führen.



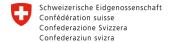




Bundesamt für Strassen ASTRA

Die Oberbaubefestigung ist ausreichend dimensioniert, wenn alle Nachweise (Asphalt (Ermüdung, Spurrinne), ToB, HGT, Planum) erfüllt sind. Ist dies nicht der Fall, sind entweder die Schichtdicken des Konstruktionsaufbaus anzupassen oder andere Materialien mit besseren Eigenschaften zu verwenden. Gegebenenfalls ist dieser Iterationsprozess zu wiederholen, bis die Nachweise erfüllt sind.







Bundesamt für Strassen ASTRA

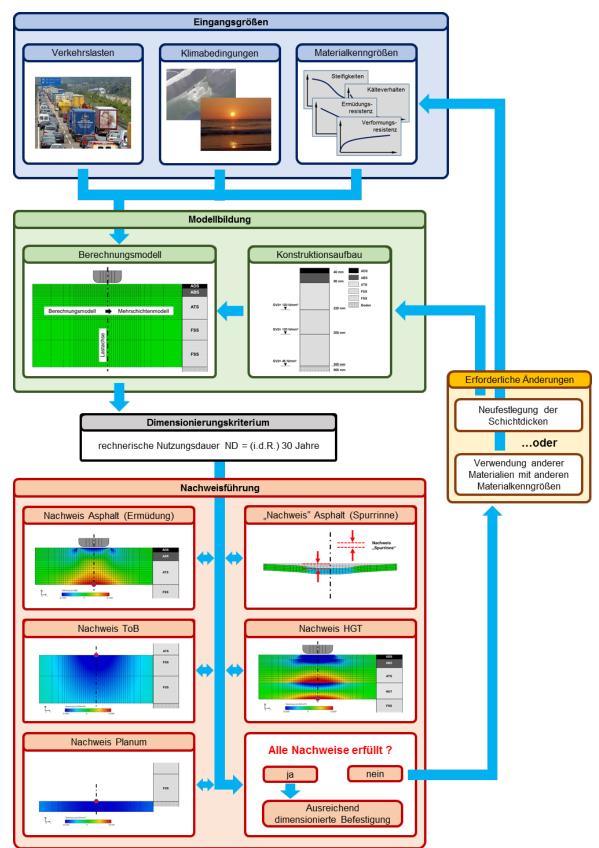
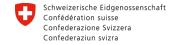


Abbildung 55: Ablaufschema zur rechnerischen Dimensionierung von Asphaltbefestigungen [Zeißler 2020]







Bundesamt für Strassen ASTRA

Modellbildung

Die Beanspruchungen in der Oberbaubefestigung werden anhand eines Berechnungsmodells bestimmt. Die Belastungsvarianten für die Nachweisführung ergeben sich aus Kombination der Verkehrsbelastung und Temperaturzustände. Gemäß RDO Asphalt 09 sind 11 Achslastklassen und 13 Temperaturzustände zu berücksichtigen. Daraus ergeben sich 143 Beanspruchungszustände, für die an den jeweiligen Nachweispunkten die maßgebenden Beanspruchungsgrößen (Spannungen, Dehnungen, Verschiebungen) berechnet werden müssen.

Das Berechnungsprogramm AdtoPave nutzt ein durch die Firma Shell entwickeltes Mehrschichtenmodell [BISAR], welches sich durch kurze Berechnungszeiten und hinreichend genaue Ergebnisse auszeichnet. Das Mehrschichtenmodell ist rotationssymmetrisch, in horizontaler Richtung unendlich ausgedehnt und lässt nur eine elastische/viskoelastische Stoffmodellierung zu. Aufgrund der Rotationssymmetrie können Belastungen nur in Form einer kreisrunden Belastungsfläche (r=15 cm) betrachtet werden. Die Belastungsgröße (Radkontaktspannung) ergibt sich aus der jeweiligen Achslast sowie der Größe der Radaufstandsfläche (A_{Rad}=17.672mm²) unter Berücksichtigung der Normfallbeschleunigung (g=9,81m/s²).Der festgelegte Befestigungsaufbau wird in Subschichten unterteilt, wobei der Untergrund als elastischer Halbraum betrachtet wird.

Für die rechnerische Dimensionierung nach den RDO Asphalt 09 werden in der Regel für den Nachweis der Ermüdung der Asphalttragschicht nur die Beanspruchungen in der Lastachse benötigt. Die Asphaltschichten werden hierbei in weitere Subschichten unterteilt, die Temperaturabhängigkeit der Steifigkeiten der Asphaltmaterialien Berechnungsprozess berücksichtigen zu können. Die Subschichtdicke von 1 cm für die Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht sowie von 2 cm für die Asphalttragschicht hat sich bewährt. Für alle anderen im Konstruktionsaufbau verwendeten Materialien ist eine Unterteilung Subschichten nicht erforderlich, detailliertere in sofern keine Temperaturabhängigkeit der Materialeigenschaften vorliegt.

Für die im Konstruktionsaufbau vorhandenen Asphaltschichten ist der Zusammenhang zwischen Temperaturprofil und Steifigkeit in Abbildung 56 beispielhaft aufgeführt.



Bundesamt für Strassen ASTRA

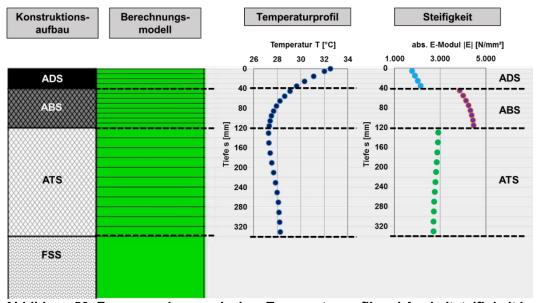


Abbildung 56: Zusammenhang zwischen Temperaturprofil und Asphaltsteifigkeit im Berechnungsmodell [Zeißler 2020]

Basierend auf dem Temperaturprofil in der Konstruktion kann für jede einzelne Subschicht die Temperatur jeweils in der Mitte der Subschicht bestimmt werden. Mit Kenntnis der Temperatur lässt sich unter Berücksichtigung der Hauptkurve für das jeweilige Asphaltmaterial die Steifigkeit (absoluter E-Modul) berechnen. Als Belastungsfrequenz wird in der Regel ein Wert von 10 Hz in Ansatz gebracht. Da sich die Eigenschaften der einzelnen Asphalte zum Teil deutlich voneinander unterscheiden, sind Steifigkeitssprünge an den Schichtgrenzen deutlich zu erkennen. Die unter Berücksichtigung des Temperaturprofils in der Konstruktion berechneten Steifigkeiten für die Asphaltmaterialien werden in das Berechnungsmodell übergeben. Die Querdehnzahl wird für Asphaltmaterialien konstant mit μ =0,35 festgelegt.

Der Schichtenverbund beschreibt die Verbundwirkung zwischen den einzelnen Befestigungsschichten und ist eine weitere wichtige Größe im Berechnungsmodell. Je besser der Schichtenbund zwischen den Asphaltschichten ausgebildet ist, umso eher wirkt das Gesamtasphaltpaket für die Lastverteilung und Lastabtragung im Befestigungsaufbau. Im Mehrschichtenmodell kann die Verbundwirkung zwischen den einzelnen Schichten über einen Verbundfaktor VF berücksichtigt werden. In den RDO Asphalt 09 sind die in Tabelle 11 aufgeführten Verbundfaktoren zu verwenden. Es wird unterschieden in einen vollständigen und einen vollständig aufgelösten Schichtenverbund.



Schweizerische Eidgenossenschaft Confédération suisse Confederazione Svizzera Confederaziun svizra



Bundesamt für Strassen ASTRA

Tabelle 11: Schichtenverbund und zugehörige Verbundfaktoren im Mehrschichtenmodell

Beschreibung des Schichtenverbundes	Verbundwirkung zwischen den Schichten	Verbundfaktor (VF) im Mehrschichtenmodell
vollständiger Schichtenverbund	100%	0
vollständig aufgelöster Schichtenverbund	0%	1.000
abgeminderter Schichtenverbund	abgemindert	0,035

Ermüdungsnachweis

Zum Nachweis der Asphalte gegenüber Ermüdung (Nachweispunkt Unterseite Asphalttragschicht – Abbildung 57) wird die jeweils vorhandene Lastwechselzahl der 143 Beanspruchungszustände der zulässigen Lastwechselzahl gegenübergestellt. Die zulässige Lastwechselzahl ergibt sich aus der Ermüdungsfunktion des Asphaltes (Formel 4).

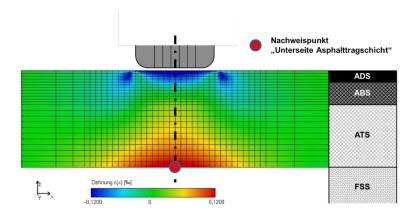


Abbildung 57: Nachweispunkt "Unterseite Asphalttragschicht" (Zeißler, 2020)

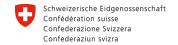
$$zul\ N_i = AF \cdot a \cdot \varepsilon^k$$
 Formel 4

dabei sind:

zul N _i	[-]	die mit der Beanspruchung (σ oder ϵ) im Beanspruchungszustand i=1,2,,n ertragbare (zulässige) Anzahl an Lastwechseln infolge von Achsübergängen in dem geplanten Nutzungszeitraum
а	[-]	Parameter der Ermüdungsfunktion, durch Regression bestimmt aus dem Ermüdungsversuch
k	[-]	Parameter der Ermüdungsfunktion, durch Regression bestimmt aus dem Ermüdungsversuch

86 OptiMAI







Bundesamt für Strassen ASTRA

Unter Berücksichtigung der Hypothese von MINER (Formel 5) werden die 143 Einzelquotienten aufsummiert:

$$\sum_{MINER} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\text{vorh } N_i}{zul \, N_i} \le 1$$
 Formel 5

dabei sind:

\sum MINER	[-]	MINER-Summe (Summe aller Teilschädigungen)
vorh N_i	[-]	die mit der Beanspruchung (σ oder ϵ) im
		Beanspruchungszustand i=1,2,,n zu erwartende Anzahl an
		Lastwechseln infolge von Achsübergängen in dem geplanten
		Nutzungszeitraum
zul N_i	[-]	die mit der Beanspruchung (σ oder ϵ) im
		Beanspruchungszustand i=1,2,,n ertragbare (zulässige)
		Anzahl an Lastwechseln infolge von Achsübergängen in dem
		geplanten Nutzungszeitraum
n	[-]	Anzahl an zu berücksichtigenden Beanspruchungszuständen

3.5.1.2 Parameterentwicklung infolge VAPro-Alterung

Um die Alterung von Asphaltgemischen mit VAPro in die Rechnerische Dimensionierung einfließen zu lassen, war es notwendig, für die Materialparameter Verhaltensfunktionen aufzustellen, um Zwischenwerte bzw. Prognosewerte zu ermitteln.

Anhand der graphischen Darstellung der Materialparameter sowohl für die Ermüdungsfunktion (K_1 und K_2) in Abbildung 58 als auch für die Hauptkurve ($|E^*|_{+\infty} = E_{max}$, $|E^*|_{-\infty}$, $\phi = phi$, \dot{z}_0 , \dot{z}_1) und in Abbildung 59 wurde für den SMA 11 eine lineare Interpolation zwischen den Materialparametern der einzelnen Alterungsstufen festgelegt. Aufgrund der geringen Veränderungen der Materialeigenschaften infolge der VAPro-Alterung, sind auch die Änderungen der beschreibenden Parameter gering.

In AP 4 und im Allgemeinen werden die Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktionen (für eine Belastungsfrequenz von 10 Hz) genutzt, um Veränderungen bzgl. dieser Eigenschaft darzustellen. In Berechnungsprogrammen wie z.B. ADtoPave werden die Hauptkurven als materialspezifische Eingangsgrößen verwendet, da diese die Option bieten, individuelle Belastungsfrequenzen festzulegen.



Bundesamt für Strassen ASTRA

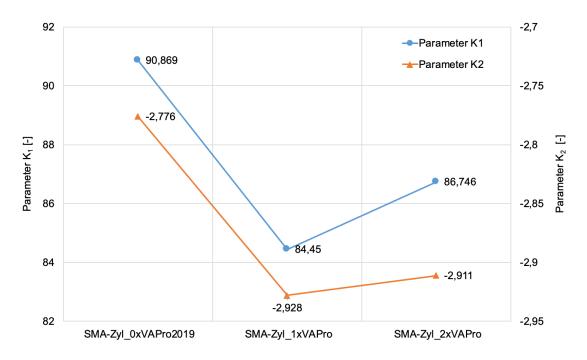


Abbildung 58: Entwicklung der Ermüdungsparameter K₁ und K₂ in Abhängigkeit der Alterungsstufe für den SMA 11

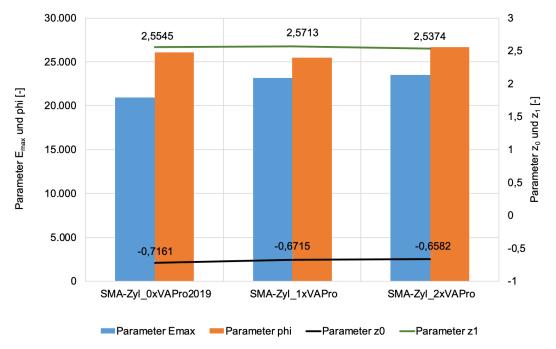
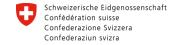


Abbildung 59: Entwicklung der Materialparameter der Hauptkurve in Abhängigkeit der Alterungsstufe für den SMA 11

Die Parameter a₁ bis a₅ der Verläufe der kryogenen Zugspannungen für den SMA 11 sind in Abbildung 60 in Abhängigkeit der Alterungsstufe dargestellt. Die besten Anpassungen







Bundesamt für Strassen ASTRA

konnten mit linearen Funktionen erzielt werden, welche ebenso in Abbildung 60 angegeben ist.

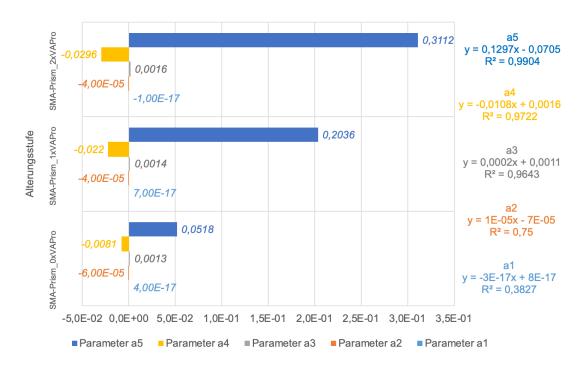


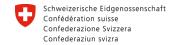
Abbildung 60: Entwicklung der Parameter a₁ bis a₅ der Verläufe der kryogenen Zugspannungen in Abhängigkeit der Alterungsstufe für den SMA 11

Davon ausgehend, dass die einmalige VAPro-Alterung (72 Stunden) in etwa einer Alterung von 5 Jahren in-situ (analog 2xVAPro ≈10 Jahre) entspricht wurden die Materialparameter der Nutzungsjahren entsprechend zugeordnet.

- Jahr 1 = 0xVAPro gealtert
- Jahr 6 = 1xVAPro gealtert
- Jahr 11 = 2xVAPro gealtert

Die Nutzungsdauer der Asphaltdeckschicht wurde für die rechnerische Dimensionierung auf 15 Jahren festgelegt, so dass ab Jahr 11 anhand der versuchstechnisch bestimmten Werte eine lineare Extrapolation der Materialparameter erfolgte. Anschließend wurde graphisch überprüft, ob mit dieser Vorgehensweise realistische Funktionen bzw. Verläufe bestimmt wurden.







Bundesamt für Strassen ASTRA

In Tabelle 12 und Tabelle 13 sind die Parameter für die einzelnen Jahre des Ermüdungsund Steifigkeitsverhaltens sowie der kryogenen Zugspannungsverläufe zusammengefasst. Diese Werte stellen die materialmäßigen Eingangsgrößen der rechnerischen Dimensionierung dar und wurden in der Materialdatenbank des Berechnungsprogramms ADtoPave entsprechend hinterlegt.

Tabelle 12: Parameter der Ermüdungsfunktionen und der Hauptkurve für den SMA 11 (rot = versuchstechnisch bestimmte Kennwerte) für die einzelnen Jahre

	Ermüdung		Steifigke	eit		
Jahr	K ₁	K ₂	E* _{+∞} [N/mm²]	φ [°]	$\dot{\mathbf{z}}_0$	$\dot{\mathbf{z}}_1$
1	90,869	-2,776	20.955	26.053	-0,71611432	2,55448466
2	89,5852	-2,8064	21.392	25.937	-0,70719503	2,55785407
3	88,3014	-2,8368	21.829	25.820	-0,69827574	2,56122348
4	87,0176	-2,8672	22.267	25.704	-0,68935646	2,56459288
5	85,7338	-2,8976	22.704	25.587	-0,68043717	2,56796229
6	84,45	-2,928	23.141	25.471	-0,67151788	2,5713317
7	84,9092	-2,9246	23.215	25.704	-0,66884708	2,56454389
8	85,3684	-2,9212	23.289	25.937	-0,66617628	2,55775609
9	85,8276	-2,9178	23.363	26.171	-0,66350549	2,55096828
10	86,2868	-2,9144	23.437	26.404	-0,66083469	2,54418048
11	86,746	-2,911	23.511	26.637	-0,65816389	2,53739267
12	87,2052	-2,9076	23.585	26.870	-0,65549309	2,53060486
13	87,6644	-2,9042	23.659	27.103	-0,65282229	2,52381706
14	88,1236	-2,9008	23.733	27.337	-0,6501515	2,51702925
15	88,5828	-2,8974	23.807	27.570	-0,6474807	2,51024145

90 OptiMAI







Bundesamt für Strassen ASTRA

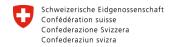
Tabelle 13: Parameter der Abkühlfunktion (kryogene Zugspannung) für den SMA 11 (rot = versuchstechnisch bestimmte Kennwerte) für die einzelnen Jahre

	Paramter der Abkühlfunktion (kryogene Zugspannung)									
Jahr	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅					
1	4,0E-17	-6,00E-05	1,30E-03	-8,100E-03	5,180E-02					
2	4,6E-17	-5,60E-05	1,32E-03	-1,088E-02	8,216E-02					
3	5,2E-17	-5,20E-05	1,34E-03	-1,366E-02	1,125E-01					
4	5,8E-17	-4,80E-05	1,36E-03	-1,644E-02	1,429E-01					
5	6,4E-17	-4,40E-05	1,38E-03	-1,922E-02	1,732E-01					
6	7,0E-17	-4,00E-05	1,40E-03	-2,200E-02	2,036E-01					
7	5,4E-17	-4,00E-05	1,44E-03	-2,352E-02	2,251E-01					
8	3,8E-17	-4,00E-05	1,48E-03	-2,504E-02	2,466E-01					
9	2,2E-17	-4,00E-05	1,52E-03	-2,656E-02	2,682E-01					
10	6,0E-18	-4,00E-05	1,56E-03	-2,808E-02	2,897E-01					
11	-1,0E-17	-4,00E-05	1,60E-03	-2,960E-02	3,112E-01					
12	-2,6E-17	-4,00E-05	1,64E-03	-3,112E-02	3,327E-01					
13	-4,2E-17	-4,00E-05	1,68E-03	-3,264E-02	3,542E-01					
14	-5,8E-17	-4,00E-05	1,72E-03	-3,416E-02	3,758E-01					
15	-7,4E-17	-4,00E-05	1,76E-03	-3,568E-02	3,973E-01					

3.5.1.3 Grundlagen für die Berechnungen

Für die Berechnungen wurde ein typischer Straßenaufbau der BK32 (Belastungsklasse, gemäß RSTO 12, Tabelle 1) angenommen, der in Abbildung 61 dargestellt ist. Die Materialparameter der Asphaltbinder- und Tragschicht sowie der ungebundenen Schichten sind Tabelle 14 zu entnehmen und sind für alle nachfolgenden Berechnungen gleich und unterliegen keiner Materialänderung durch Alterung. Es sind nur die Parameter der Steifigkeitseigenschaften erforderlich, da keine Nachweise hinsichtlich der Ermüdung der Asphalttragschicht durchgeführt werden sollen







Bundesamt für Strassen ASTRA

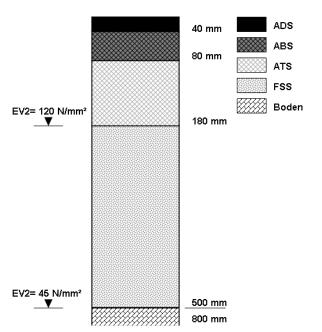


Abbildung 61: Befestigungsaufbau der BK32

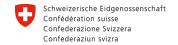
Tabelle 14: Materialparameter für die rechnerische Dimensionierung

Schicht	Material	Materialparameter
Asphaltbinderschicht	AC 16 B S	E* _{+∞} = 25.700 N/mm ²
	25/55-55A	$\Phi = 23.552^{\circ}$
		\dot{z}_0 = -0,76534324
		\dot{z}_1 = 0,91529778
Asphalttragschicht	AC 22 T S	Steifigkeit
	50/70	E* _{+∞} = 27.325 N/mm²
		Φ = 23.451°
		\dot{z}_0 = -0,79692308
		ż ₁ = 1,11605599
		Ermüdung
		$K_1 = 1,5849$
		$K_2 = -3,359$
FSS	FSS 0/32	$E_{v2} = 120 \text{ N/mm}^2$
Boden		$E_{v2} = 45 \text{ N/mm}^2$

Im Regelfall wird im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung der Nachweis der Ermüdung an der Unterseite der Asphalttragschicht und in der Lastachse geführt, da an dieser Stelle die größten Zugspannungen auftreten. Im Gegensatz dazu liegt für die Asphaltdeckschicht hinsichtlich der resultierenden Beanspruchungen kein derart definierter Nachweispunkt vor.

Die in der Asphaltdeckschicht auftretenden horizontalen Zugdehnungen (analog des Verfahrens an der Unterseite der Asphalttragschicht) sind vergleichsweise klein und im







Bundesamt für Strassen ASTRA

Vergleich zu den maximalem Hauptzugdehnungen nicht maßgebend. Daher werden die horizontalen Zugdehnungen bei den Berechnungen im Folgenden nicht berücksichtigt. Die maximalen Hauptzugdehnungen ergeben sich aus dem Hauptspannungszustand, der sich für jeden Punkt der Konstruktion berechnen lässt. Definitionsgemäß sind die Schubspannungen im Hauptspannungszustand 0.

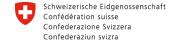
Es wurde daher zunächst 65 initiale Nachweispunkte in der Asphaltdeckschicht bezüglich der maximalen Hauptzugdehnungen festgelegt. In Abbildung 62 ist die Lage der Nachweispunkte im Bezug zur Lasteinleitungsfläche dargestellt. Im für die rechnerische Dimensionierung gemäß RDO Asphalt 09 verwendeten Berechnungstool (ADtoPave), wird von einem rotationssymmetrischen Ausschnitt ausgegangen. Die Lasteinleitungsfläche hat einen Radius von 150 mm.

z/x [mm]	0	50	100	120	140	150	155	160	165	170	180	190	200
0	1	6	11	16	21	26	31	36	41	46	51	56	61
10	2	7	12	17	22	27	32	37	42	47	52	57	62
20	3	8	13	18	23	28	33	38	43	48	53	58	63
30	4	9	14	19	24	29	34	39	44	49	54	59	64
40	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65

Abbildung 62: Anordnung der 65 initialen Nachweispunkte in der Asphaltdeckschicht

Für die 65 Nachweispunkte wurde ausgehend von einer Nutzungsdauer von 15 Jahren und vollem Verbund zwischen den Asphaltschichten der Ermüdungsstatus für die maximalen Hauptzugdehnungen bestimmt. Dazu wurden die Materialparameter des SMA 11 im ungealterten Zustand angesetzt. Die ermittelten Ermüdungsstatus sind in Abbildung 63 enthalten. Sowohl unter dem Reifenlatsch als auch ab einer Entfernung von 180 mm zur Lastachse treten keine signifikanten Zugdehnungen und daraus resultierend maßgebliche Ermüdungsstatus auf. Zur Reduzierung des Rechenaufwandes bleiben eben diese Bereiche für die weiteren Berechnungen unberücksichtigt. Es ergeben sich somit 25 Nachweispunkte, die im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung betrachtet werden müssen. Diese sind in Abbildung 64 dargestellt.







Bundesamt für Strassen ASTRA

z/x [mm]	0	50	100	120	140	150	155	160	165	170	180	190	200
0	1,15	1,14	1,12	1,12	1,14	3,49	9,96	7,72	8,15	9,13	11,06	12,35	12,62
10	0,43	0,42	0,00	0,01	5,63	40,96	38,32	28,50	23,20	20,34	16,98	14,82	13,27
20	0,00	0,00	0,00	0,60	12,58	22,23	24,66	25,29	24,90	23,81	20,30	16,55	13,64
30	0,00	0,00	0,00	0,97	14,25	22,38	25,34	27,04	27,31	26,25	21,69	16,76	13,12
40	0,00	0,00	0,00	2,42	24,87	49,23	55,13	54,08	47,77	39,24	24,23	15,63	11,40

Ermüdungsstatus [%]						
	40-60					
	30-40					
	20-30					
	10-20					
	0-10					

Abbildung 63: Ermüdungsstatus der 65 initialen Nachweispunkte in der Asphaltdeckschicht

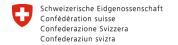
z/x [mm]	150	155	160	165	170
0	1	6	11	16	21
10	2	7	12	17	22
20	3	8	13	18	23
30	4	9	14	19	24
40	5	10	15	20	25

Abbildung 64: Anordnung der 25 Nachweispunkte in der Asphaltdeckschicht

Ergänzend werden die Berechnungen auch für sehr geringe Verkehrsbelastungen (BK1) und sehr hohe Verkehrsbelastungen (BK100) vorgenommen. Die Befestigungsaufbauten sind in Abbildung 65 gezeigt. Die Materialparameter sind Tabelle 14 zu entnehmen.









Bundesamt für Strassen ASTRA

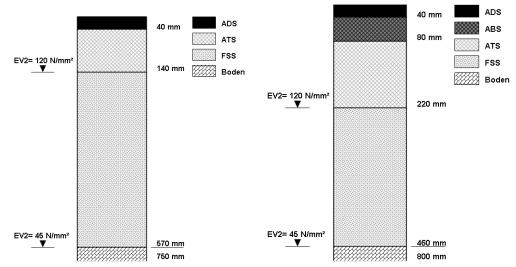


Abbildung 65: Befestigungsaufbau für BK1 (links) und BK100 (rechts)

Für die beschriebenen gewählten Befestigungsaufbauten gelten die in Tabelle 15 zusammengefassten Verkehrsbeanspruchungen. In der Summe ergibt sich somit eine Achsübergangssumme von rund 30,5 Mio. und daher eine Befestigungsklasse BK32. Die Verkehrsbeanspruchung wurde auch für die Befestigungsaufbauten der BK100 und der BK1 angesetzt.

Tabelle 15: Verkehrsbeanspruchung für die Berechnungsbeispiele

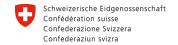
Jahr	ΑÜ	DTV ^(SV)	Jahr	ΑÜ	DTV ^{(S}	Jahr	ΑÜ	DTV ^{(S}
					V)			V)
1	1.642.500	910	6	1.904.108	1.054	11	2.207.383	1.222
2	1.691.775	937	7	1.961.231	1.086	12	2.273.604	1.259
3	1.742.528	965	8	2.020.068	1.119	13	2.341.812	1.297
4	1.794.804	994	9	2.080.670	1.152	14	2.412.067	1.336
5	1.848.648	1.024	10	2.143.090	1.187	15	2.484.429	1.376
1-5	8.720.256	966	6-10	10.109.166	1.120	11-15	11.719.294	1.298
1-15	30.548.717	1.127						

Weiterhin wurde für die Berechnungen angenommen, dass

- die Häufigkeitsverteilung der Oberflächentemperaturen gemäß RDO Asphalt 09,
 Zone 3 entsprechen und
- dass Achslastkollektiv BAB Fernverkehr (RDO Asphalt 09) gilt.

95 OptiMAI







Bundesamt für Strassen ASTRA

Davon ausgehend, dass die Alterung einer Asphaltdeckschicht von oben nach unten geschieht, wurden verschiedene, im Folgenden aufgeführte, Alterungsszenarien ausgewählt und die Berechnungen zur Bestimmung des Ermüdungsstatus durchgeführt:

- **jährliche** Änderung der Materialparameter der gesamten Asphaltdeckschicht (Dicke 4 cm) infolge Alterung gemäß der Parameter in Tabelle 12 und Tabelle 13
- **blockweise** Änderung der Materialparameter infolge der Alterung für die gesamte Asphaltdeckschicht jeweils nach 5 Jahren (Jahr 1-5: 0xVAPro gealtert, Jahr 6-10: 1xVAPro-gealtert, Jahr 11-15: 2xVAPro-gealtert)
- schichtweise Alterung der Asphaltdeckschicht, Aufteilung in zwei Subschichten zu je 2 cm, die versetzt um 5 Jahre, mit den jährlichen Änderungen der Materialparameter gemäß Tabelle 12 und Tabelle 13

3.5.1.4 Ergebnisse der Berechnungen mit dem Programm ADtoPave (Mehrschichtentheorie)

Die Auswirkungen der VAPro-Alterung auf den Ermüdungszustand der Asphaltdeckschicht ergeben sich für den SMA 11 bei vollem Verbund zwischen den Asphaltschichten und bei einer jährlichen Änderung der Materialparameter entsprechend der Tabelle 16 und Abbildung 66. Der Vergleich der Werte der maßgebenden Nachweispunkte 10 und 15 für die Berechnungen mit / ohne Alterung zeigt einen darstellbaren Unterschied des Ermüdungsstatus von ca. 10 Prozentpunkten. Ohne Einfluss der Alterung beträgt der Ermüdungsstatuts des SMA 11 an der Unterseite in einem Abstand von 155 mm nach 15 Jahren rund 29%. Wird die jährliche Änderung der Materialparameter infolge der VAPro-Alterung berücksichtigt, so beträgt der Ermüdungsstatus im betreffenden Nachweispunkt nur noch rund 18,5%. Durch die Berücksichtigung der Alterung wird somit eine signifikante Reduzierung des Ermüdungsstatus und somit eine rechnerisch längere Nutzungsdauer für die Asphaltdeckschicht erzielt. Die Jährlichen Ermüdungsanteile für die Nachweispunkte (gemäß Abbildung 64) in Abbildung 66 spiegeln den linearen Änderungen der Materialparameter und die konstante Zunahme der Verkehrsbelastung wieder.





Bundesamt für Strassen ASTRA

Tabelle 16: Ermüdungsstatus der Nachweispunkte der Asphaltdeckschicht mit/ohne
Alterung für die BK32 bei vollem Verbund zwischen den Asphaltschichten – jährliche
Änderung der Materialparameter

Σ Jahr 1-15	ohne Alteri	ung			
z/x [mm]	150	155	160	165	170
0	0,0711	3,0618	1,6215	1,7477	2,2366
10	17,1434	16,2376	12,0783	9,5239	8,0482
20	8,7366	9,8017	10,3287	10,368	9,9431
30	9,0705	10,3919	11,2533	11,4926	11,072
40	25,6406	28,777	28,0489	24,4053	19,5626
Σ Jahr 1-15	mit Alterun	g			
z/x [mm]	150	155	160	165	170
0	0,4056	2,2226	1,7026	1,9177	2,2743
10	10,9834	11,516	9,1113	7,3948	6,3393
20	5,8319	6,9521	7,5946	7,7563	7,5057
30	6,0507	7,1448	7,9095	8,2078	8,0126
40	16,3017	18,4381	18,1319	15,9567	12,9913

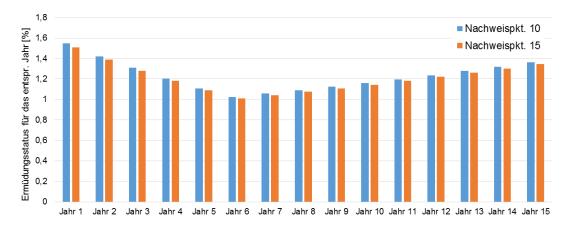
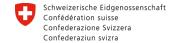


Abbildung 66: Ermüdungsstatus (jährlich) für die BK32 bei jährlicher Änderung der Materialparameter infolge Alterung mit vollem Verbund

Die jährliche Änderung der Materialparameter infolge der VAPro-Alterung erfordert 15 einzelne Berechnungen für die 25 Nachweispunkte. Eine weitere Reduzierung der Nachweispunkte ist nicht möglich, da ggf. maßgebende Punkte unberücksichtigt bleiben könnten.

Daher wurde zur Reduzierung des Rechenaufwandes die **blockweise Änderung** der Materialparameter infolge Alterung angesetzt. Die Ergebnisse für die BK32 sind in Tabelle 17 und Abbildung 67 dargestellt. Werden die Materialeigenschaften jeweils für







Bundesamt für Strassen ASTRA

5 Jahre konstant angesetzt, ergibt sich für die maßgeblichen Nachweispunkte an der Unterseite der Asphaltdeckschicht ein Ermüdungsstatus von rund 20%. Bei der jährlichen Betrachtungsweise wurden rund 18,5% ermittelt. Diese Unterschiede erscheinen hinsichtlich der deutlichen Reduzierung des Rechen- und Auswerteaufwandes um 80% für die BK32 und dem angenommenen SMA11 als akzeptabel.

Tabelle 17: Ermüdungsstatus der Nachweispunkte der Asphaltdeckschicht mit/ohne
Alterung für die BK32 bei vollem Verbund zwischen den Asphaltschichten – Blockweise
Änderung der Materialparameter

Σ Jahr 1-15 ohne Alterung									
z/x [mm]	150	155	160	165	170				
0	0,0711	3,0618	1,6215	1,7477	2,2366				
10	17,1434	16,2376	12,0783	9,5239	8,0482				
20	8,7366	9,8017	10,3287	10,368	9,9431				
30	9,0705	10,3919	11,2533	11,4926	11,072				
40 25,6406		28,777	28,0489	24,4053	19,5626				
Σ Jahr 1-15	mit Alterun	g							
z/x [mm]	150	155	160	165	170				
0	0,2922	2,2644	1,5959	1,7933	2,1689				
10	11,8742	12,1542	9,4659	7,6194	6,5013				
20 6,2157 7,312		7,3125	7,9281	8,0675	7,7894				
30 6,459		7,5805	8,3547	8,6398	8,4068				
40	17,7309	20,0253	19,6479	17,2326	13,9622				

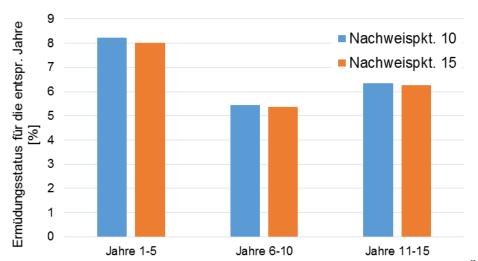
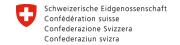


Abbildung 67: Ermüdungsstatus (5-Jahres-Blöcke) für die BK32 bei blockweiser Änderung der Materialparameter infolge Alterung mit vollem Verbund

98 OptiMAI







Bundesamt für Strassen ASTRA

Es ist davon auszugehen, dass die Alterung an der Oberseite der Asphaltdeckschicht beginnt und im weiteren zeitlichen Verlauf nach unten fortschreitet. Somit ist die Annahme, dass die gesamte Asphaltdeckschicht mit einer Dicke von 4 cm komplett der Änderung der Materialparameter durch die VAPro-Alterung unterliegt, nicht realistisch. Die schichtweise Änderung der Materialparameter wurde ebenso in 15 einzelnen Berechnungsschritten für die betrachteten Jahre angesetzt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 18 und Abbildung 68 zusammengefasst. Der Ermüdungsstatus im maßgebenden Nachweispunkt an der Unterseite der Asphaltdeckschicht beträgt rund 21%. Es ergibt sich somit bei Annahme einer realistischen Alterung eine im Vergleich zur jahresweisen Alterung der gesamten Schicht (gemäß Tabelle 16) geringere rechnerische Nutzungsdauer. Der Verlauf der jährlichen Werte in Abbildung 68 zeigt in den ersten fünf Jahren eine Zunahme, da die Verkehrsbeanspruchung zunimmt und die gleichzeitig nur die oberen 2 cm einer Alterung unterliegen, was nur einen sehr geringen Einfluss auf die maximalen Hauptzugdehnungen an der Unterseite der Asphaltdeckschicht hat. In den folgenden fünf Jahren sinken die Werte, da auch die unteren 2 cm altern und somit versteifen. Für die letzten fünf Jahre des Betrachtungszeitraums steigen die jährlichen Werte aufgrund der Verkehrszunahme und der nahezu identischen Materialkennwerte für den einfach bzw. zweifach gealterten Asphaltwieder an.

Tabelle 18: Ermüdungsstatus der Nachweispunkte der Asphaltdeckschicht mit/ohne
Alterung für die BK32 bei vollem Verbund zwischen den Asphaltschichten – Schichtweise
Änderung der Materialparameter

		Ū	•						
Σ Jahr 1-15 ohne Alterung									
z/x [mm]	150	155	160	165	170				
0	0,0711	3,0618	1,6215	1,7477	2,2366				
10	17,1434	16,2376	12,0783	9,5239	8,0482				
20	8,7366	9,8017	10,3287	10,368	9,9431				
30	9,0705	10,3919	11,2533	11,4926	11,072				
40	25,6406	28,777	28,0489	24,4053	19,5626				
Σ Jahr 1-15	mit Alterun	g							
z/x [mm]	150	155	160	165	170				
0	0,4074	2,2646	1,7092	1,8945	2,2394				
10	11,1567	11,6148	9,1038	7,3691	6,3338				
20	6,3904	7,472	8,0842	8,2346	7,9699				
30	6,746	7,895	8,6879	8,9799	8,7378				
40	18,8299	21,2564	20,8552	18,2911	14,8108				



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra



Bundesamt für Strassen ASTRA

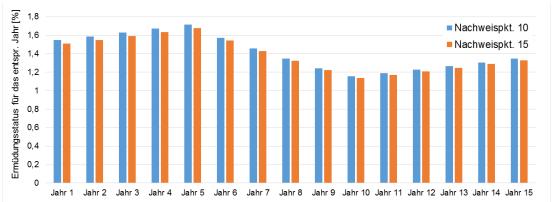


Abbildung 68: Ermüdungsstatus für die BK32 bei schichtweiser Änderung der Materialparameter infolge Alterung mit vollem Verbund

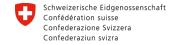
Zusätzlich wurden die Auswirkungen des Schichtenverbundes auf den Ermüdungsstatus der maßgebenden Nachweispunkte bestimmt.

Der abgeminderte Verbund ist gemäß es Einführungsschreibens zur RDO Asphalt 09 folgendermaßen definiert:

Für den AK-Faktor (BISAR) wird statt des Wertes 0 für den vollen Verbund 0,035 eingesetzt. Für den Zustand ohne Verbund beträgt der AK-Faktor 1000. Durch den abgeminderten Verbund (AK-Faktor=0,035) reduziert sich die rechnerische Nutzungsdauer bei Betrachtung des Ermüdungsnachweises der Asphalttragschicht um 30%.

Der Vergleich der ermittelten Ermüdungsstatus bei vollem Verbund (Tabelle 16) bzw. abgeminderten Verbund (Tabelle 19) zeigt, dass sich sowohl die Lage des maßgeblichen Nachweispunktes als auch die Größenordnung des Ermüdungsstatus signifikant ändert. Bei vollem Verbund ist der maßgebende Nachweispunkt an der Unterseite der Asphaltdeckschicht lokalisiert. Bei abgemindertem Verbund verlagert sich der Nachweispunkt (maximale Hauptzugdehnungen) in eine Tiefe von 10 mm unterhalb der Oberseite der Asphaltdeckschicht. Dies lässt auf eine ermüdungsbedingte Rissinitiierung an der Oberseite der Asphaltdeckschicht schließen. Gleichzeitig reduziert sich der Ermüdungsstatus auf rund die Hälfte des Wertes bei vollem Verbund. Die Unterschiede bezüglich mit / ohne Berücksichtigung der der Alterung liegen sowohl für den vollen als auch für den abgeminderten Verbund in der gleichen Größenordnung.







Bundesamt für Strassen ASTRA

Für die Einschätzung der rechnerischen Nutzungsdauer der Asphaltdeckschicht ist daher der volle Verbund maßgebend. Auf die Darstellung weiterer Ergebnisse für den abgeminderten Verbund wird daher verzichtet.

Tabelle 19: Ermüdungsstatus der Nachweispunkte der Asphaltdeckschicht mit/ohne
Alterung für die BK32 bei abgemindertem Verbund zwischen den Asphaltschichten –
jährliche Änderung der Materialparameter

Σ Jahr 1-15 ohne Alterung, abgeminderter Verbund								
z/x [mm]	[mm] 150 155 160 165							
0	0,0455	2,823	1,2955	1,2954	1,7021			
10	15,9097	14,5223	10,5489	8,3316	7,1731			
20	6,2531	6,7897	7,4023	7,9834	8,2945			
30	30 3,7752 4,231 5,1841				7,5832			
40	40 5,6977 6,4765		7,5781	8,8549	9,8905			
Σ Jahr 1-1	5 mit Alterur	ng, abgemin	derter Verb	ound				
z/x [mm]	150	155	160	165	170			
0	0,3404	1,9746	1,3697	1,5018	1,8027			
10	10,0654	10,1728	7,8783	6,4109	5,5948			
20	4,0456	4,73	5,3881	5,9192	6,1955			
30	2,3625	2,8042	3,5776	4,5509	5,4403			
40	2,8692	3,5772	4,4269	5,489	6,4504			

In weiteren Berechnungen wurden die Auswirkungen der schichtenweisen Alterung der Asphaltdeckschicht bei Befestigungsaufbauten der BK1 (geringe) und der BK 100 (sehr hohe Verkehrsbelastung) unter Annahme des vollen Verbundes ermittelt.

Aus den Ergebnissen der BK100 in Tabelle 20 in Verbindung mit den Ergebnissen für die BK32 in Tabelle 18 ergibt sich eine geringfügige Verringerung des Ermüdungsstatus im maßgeblichen Nachweispunkt. Dies ist auf die Erhöhung der Asphalttragschicht um 40 mm auf insgesamt 200 mm und den damit einhergehenden Änderungen im Spannungszustand bei gleichbleibender Verkehrsbeanspruchung zurückzuführen.

Bei Betrachtung der Ergebnisse für die BK1 in Tabelle 21 zeigt sich infolge der fehlenden Asphaltbinderschicht und dem daher veränderten Spannungs-/Dehnungszustand in der Asphaltdeckschicht ein signifikanter Anstieg des Ermüdungsstatus. Gleichzeitig wird deutlich, dass sich zusätzlich zu den hohen Ermüdungsstatus in 10 mm Tiefe eine zweite Ebene mit hoher Beanspruchung in 40 mm Tiefe an der Unterseite der Asphaltdeckschicht







Bundesamt für Strassen ASTRA

ausbildet. Dieser Zustand weist auf eine Überlastung und daraus resultierend auf ein umfängliches Schadensbild mit mehreren Rissstartpunkten hin.

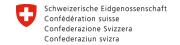
Tabelle 20: Ermüdungsstatus der Nachweispunkte der Asphaltdeckschicht mit/ohne
Alterung für die BK100 bei vollem Verbund zwischen den Asphaltschichten – schichtweise
Änderung der Materialparameter

Σ Jahr 1-15 ohne Alterung, voller Verbund, BK 100									
z/x [mm]	150	155	160	165	170				
0	0,031	3,4673	1,1763	0,809	1,0366				
10	17,004	13,5034	8,7528	6,4199	5,248				
20	8,4508	8,4521	8,1378	7,7161	7,1558				
30	8,5936	9,2467	9,4983	9,304	8,6697				
40	24,3251	26,9156	25,8085	22,0025	17,1886				
Σ Jahr 1-15	mit Alterun	g, voller Ve	rbund, BK1	00					
z/x [mm]	150	155	160	165	170				
0	0,2928	2,271	1,1846	2,561	2,5032				
10	10,9195	9,466	6,5213	4,7305	3,981				
20	6,0978	6,3381	6,2746	5,8876	5,4923				
30	6,309	6,9244	7,2261	7,0592	6,6509				
40	17,7038	19,6827	18,9728	15,5113	12,8286				

Tabelle 21: Ermüdungsstatus der Nachweispunkte der Asphaltdeckschicht mit/ohne Alterung für die BK1 bei vollem Verbund zwischen den Asphaltschichten – schichtweise Änderung der Materialparameter

Σ Jahr 1-15 ohne Alterung, voller Verbund, BK1									
z/x [mm]	150	155	160	165	170				
0	4,7898	25,6885	28,7878	31,6086	33,9474				
10	32,5847	58,7847	61,4182	55,8922	50,137				
20	22,3577		44,4496 39,9489		48,0829 44,2749				
30	24,6619								
40 54,655		63,182	65,2271	61,7125	55,0044				
Σ Jahr 1-15	mit Alterun	g, voller Ve	rbund, BK1						
z/x [mm]	150	155	160	165	170				
0	5,0467	22,5977	24,8114	28,043	28,4098				
10	24,2933	46,0939	48,9436	44,2034	40,291				
20	18,226	29,123	37,0599	40,1281	40,2856				
30	20,13	27,3119	33,0513	36,2807	36,8731				
40	43,3608	50,3403	52,2856	49,8355	44,7848				







Bundesamt für Strassen ASTRA

Aus den Berechnungsergebnissen lässt sich ableiten, dass die Auswirkungen der Veränderung der Materialparameter infolge Alterung auf die Ergebnisse der rechnerischen Dimensionierung hinsichtlich der maßgeblichen Nachweispunkte in der Asphaltdeckschicht darstellen lassen.

Der Vergleich der Ermüdungsstatus bei jährlicher Änderung der Materialparameter infolge Alterung (21,26%) und bei blockweiser Änderung der Parameter (20,02%) zeigt, dass eine signifikante Reduzierung des Rechen- und Auswerteaufwandes möglich ist.

3.5.1.5 Ergebnisse der Berechnungen mit SAFEM (semianalytische FE-Methode)

Um den Einfluss des Schichtenverbundes in Verbindung mit der Änderung der Materialeigenschaften infolge Alterung realistisch abschätzen zu können, wurden Berechnungen mit dem Programm SAFEM durchgeführt. Abweichend vom beschriebenen Verfahren der RDO Asphalt 09, können mit SAFEM versuchstechnisch bestimmte Funktionen zur Beschreibung des Schichtenverbundes berücksichtigt werden.

In Abbildung 69 sind Ergebnisse für einen exemplarischen Straßenaufbau der Belastungsklasse BK100 dargestellt, um den Einfluss des Schichtenverbundes auf den Ermüdungsnachweis zu verdeutlichen. Erreicht der Ermüdungsstatus Asphalttragschicht 100%, so haben sich Makrorisse gebildet und die Tragschicht erträgt bis zum vollständigen Versagen nur noch wenige Lastwechsel. Die Verläufe für vollen Verbund (grün) und ohne Verbund (rot) stellen die Extrema dar und sind nur theoretischer Natur. Lila dargestellt ist der Verlauf der Ermüdung der Tragschicht beim besten jemals prüftechnisch ermittelten Schichtenverbund (Good Case - GC). Orange gestrichelt dargestellt ist der sogenannte Bad Case – BC. Dies verdeutlicht die Untergrenze des prüftechnisch ermittelten Schichtenverbundes, d. h. zwischen diesen beiden Funktionen liegt der Bereich, der durch reguläre Abweichungen/Unterschiede auf der Baustelle erzielt werden kann.



Bundesamt für Strassen ASTRA

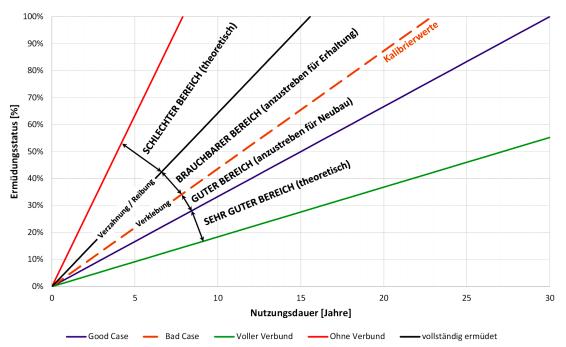


Abbildung 69: Qualitätsbereiche des Schichtenverbundes für Neubau und Erhaltung (Bk100) [Wellner & Hristov 2016]

Die Ermittlung der Spannungen/Dehnungen für das verwendete FE-Modell (Abbildung 70) für die 143 Beanspruchungszustände gemäß RDO Asphalt 09 dauert bei Parallelisierung über 9 Prozessoren rund 75 Stunden, da jeweils mehrere Iterationsschritte ausgeführt werden müssen. Aufgrund des extremen Zweitaufwandes wurden nur die Funktionen für die Varianten Good Case und Bad Case des Schichtenverbundes angesetzt.

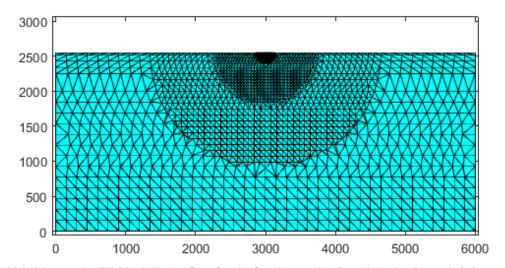
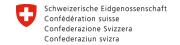


Abbildung 70: FE-Modell der Straßenbefestigung im Bereich der Lasteinleitung







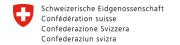
Bundesamt für Strassen ASTRA

Nachteil der derzeit zur Verfügung stehenden Version von SAFEM ist, dass ausschließlich die horizontalen Zugdehnungen und nicht die maximalen Hauptzugdehnungen zur Auswertung herangezogen werden können. Die Absolutwerte der Ermüdungsstatus in der Asphaltdeckschicht sind daher entsprechend zu beurteilen. Vergleichende Betrachtungen zwischen den Varianten innerhalb der Berechnungen mit SAFEM und zu den ADtoPave-Ergebnissen sind dennoch möglich. Der Nachweispunkt mit den höchsten horizontalen Zugdehnungen liegt in einem Abstand von 120 mm zur Lasteinleitungsachse an der Unterseite der Asphaltdeckschicht.

Für die Berechnungen mit SAFEM wurden die für die ADtoPave-Berechnungen getroffenen Annahmen hinsichtlich Schichtenaufbau, Verkehrsbelastung und Temperaturbedingungen beibehalten. Es wurden sowohl die jährliche als auch die blockweise Änderung der Materialeigenschaften infolge Alterung im Vergleich zur Variante ohne Alterung angesetzt. Zur besseren Darstellung wurden die Ergebnisse gewichtet, wobei die Variante ohne Alterung und mit Bad Case Schichtenverbund zu 100% gesetzt wurde.

In Abbildung 71 sind die Ergebnisse zusammengefasst. Es ist nicht möglich, die Ergebnisse der Berechnungen direkt mit den Werten der ADtoPave-Berechnungen vergleichend darzustellen, da bei vollem Verbund definitionsgemäß keine Verschiebungen/Dehnungen in der Grenzschicht zwischen Asphaltdeckschicht und Asphaltbinderschicht auftreten. Für diesen Fall ist der gewichtete Ermüdungsstatus null. Der in ADtoPave implementierte abgeminderte Schichtenverbund ist bisher in keine entsprechende Funktion überführt und daher in SAFEM nicht anwendbar. Der Vergleich zwischen Good Case und Bad Case zeigt nur einen geringen Einfluss des Schichtenverbundes auf den Ermüdungsstatus. Die Änderung der Materialeigenschaften infolge Alterung beeinflusst im Gegensatz dazu den ermittelten Ermüdungsstatuts deutlicher. Auch bei den Berechnungen mit SAFEM zeigt sich ein geringer Unterschied zwischen der blockweisen und jährlichen Betrachtungsweise. Die Größenordnung des Unterschiedes ist analog zu den Berechnungen mit ADtoPave. Aufgrund des Rechenaufwandes wäre auch hier die blockweise Änderung der Materialparameter empfehlenswert.







Bundesamt für Strassen ASTRA

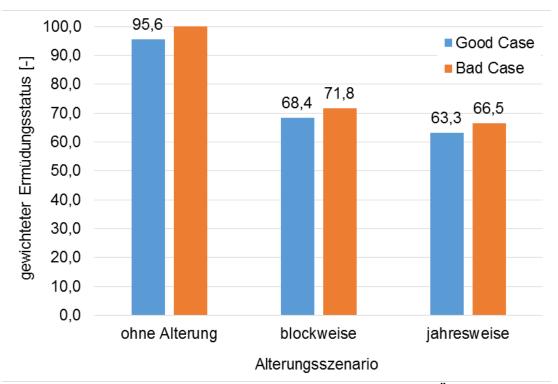


Abbildung 71: Ermüdungsstatus für die BK32 bei schichtweiser Änderung der Materialparameter infolge Alterung mit vollem Verbund

3.5.2 Implementierung in die österreichische Dimensionierungsmethode

3.5.2.1 Betrachtung im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Durch das spröde Materialverhalten von Asphaltmischgütern bei tiefen Temperaturen kann bei gleichzeitiger Überfahrt durch Fahrzeuge mit hohen Achslasten die Biegezugfestigkeit an der Oberseite der Deckschicht überschritten werden, wodurch spontan Risse entstehen. Dieses Phänomen kann im Labor durch die Kombination von Abkühl- und einaxialem Zugversuch untersucht werden (siehe Kapitel 3.1.1). Dabei wird die so genannte Zugfestigkeitsreserve bestimmt (siehe Abbildung 72), die angibt, welcher Anteil der Zugfestigkeit für die Aufnahme von Verkehrslastspannungen abhängig von der Temperatur zur Verfügung steht.





Bundesamt für Strassen ASTRA

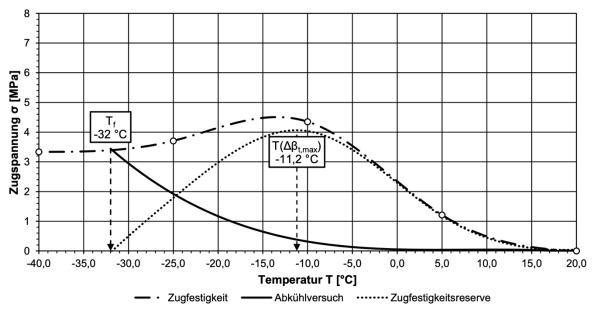


Abbildung 72: Zugfestigkeitsreserve für SMA16-Mischgut (ungealtert)

Zur Berücksichtigung von Alterungseffekten wird das Konzept der Zugfestigkeitsreserve in die österreichische Dimensionierungsmethode für Asphaltstraßen in Form eine Tragfähigkeitsnachweises implementiert. Hierfür müssen die Zugfestigkeitsreserve sowie der Steifigkeitsmodul – wie unter Kaptiel 3.1.1 beschrieben – an ungealtertem und gealtertem Deckschichtmischgut bestimmt werden. Zudem muss ein bemessungsrelevantes Fahrzeug ermittelt werden. Hierfür wurden die Ergebnisse von Bridge Weight in Motion-Messungen an drei Autobahnabschnitten in Österreich (A9, A10 und A12) herangezogen und die schädigende Wirkung von insgesamt 12 Fahrzeugtypen analysiert (siehe Abbildung 73). Dabei zeigt sich, dass der Fahrzeugtyp VC113 (Sattelschlepper; entspricht der Fahrzeugklasse FK4-7 gemäß RVS 03.08.68) deutlich die höchste Schädigungswirkung verursacht. Für diesen Fahrzeugtyp wurde die Gesamtgewichtsverteilung ausgewertet (siehe Abbildung 74).





Bundesamt für Strassen ASTRA

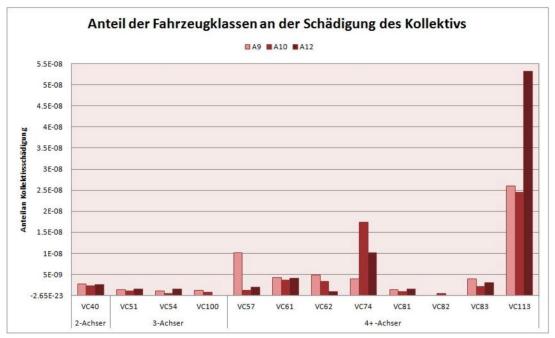
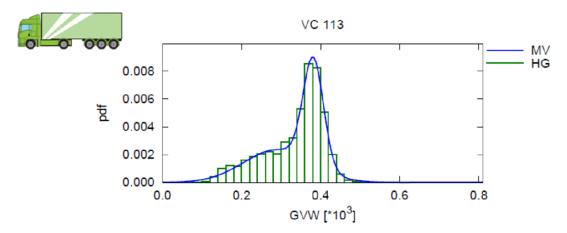


Abbildung 73: Schädigungswirkung des bemessungsrelevanten Fahrzeugkollektivs



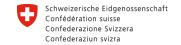
GVW~Mixed(0.5056*N(289.9,85.79), 0.4944*N(381.5,25.64))

(a) Regression und Streuung			(b) Korrelation						
A	α	β	σ_c		1	2	3	4	5
1	0.0606	49.9	10.1	1	/ 1	-0.117	-0.374	-0.537	-0.459
2	0.255	-2.36	12.7	2	-0.117	1	-0.552	-0.75	-0.549
3	0.219	-16.7	6.59	3	-0.374	-0.552	1	0.684	0.0898
4	0.228	-15.8	5.21	4	-0.537	-0.75	0.684	1	0.722
5	0.237	-15	7.27	5	-0.459	-0.549	0.0898	0.722	1 /

Abbildung 74: Gesamtgewichtsverteilung des Fahrzeugtyps VC113

108 OptiMAI







Bundesamt für Strassen ASTRA

Für jenes Gesamtgewicht, das in 95% aller Fälle am österreichischen A&S Netz erreicht oder unterschritten wird, wurden die Biegezugspannungen an der Oberseite der Deckschicht im ungealterten Zustand für drei maßgebliche Temperaturen (-25°C, -10°C und +10°C) mit Hilfe der Mehrschichtentheorie nach Burmister bestimmt. Diese Spannungen werden der Zugfestigkeitsreserve gegenübergestellt. Der Nachweis gilt als erfüllt, wenn die Einwirkung (ausgedrückt durch die auftretenden Spannungen zufolge Verkehr) kleiner ist als der Widerstand (ausgedrückt durch die Zugfestigkeitsreserve).

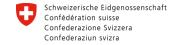
3.5.2.2 Betrachtung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Für die Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit steht in Österreich seit 1. Jänner 2018 die Richtlinie RVS 03.08.68 zur rechnerischen Dimensionierung von Asphaltstraßen Verfügung. wird basierend auf zur Darin dem Gebrauchsverhaltensorientierten Ansatz (GVO) eine maßgeschneiderte Bemessung ermöglicht, die es erlaubt, real gemessene Größen für die Eingangsparameter Verkehrsbelastung, klimatische Bedingungen sowie mechanische Kenngrößen der Asphaltmischgüter zu berücksichtigen. Neben der Möglichkeit auf statistisch abgeleitete Modellparameter zurückzugreifen, wurde speziell für die mechanischen Eigenschaften der eingesetzten Asphalte ein mehrstufiges System implementiert, das es erlaubt, die zuvor geprüften GVO-Parameter Steifigkeit S@20°C und Ermüdungsbeständigkeit ε6 in Rechnung zu stellen. Dies erlaubt im gegenständlichen Projekt, die Änderungen der GVO-Eigenschaften durch VAPro-Alterung abzubilden.

Im Zuge der Bemessung wird als Schadensmerkmal lediglich die Materialermüdung an der Unterseite der bituminösen Tragschicht berücksichtigt. Ermüdung an der Deckschicht bleibt im Rahmen dieser Methode bislang unberücksichtigt.

Um die Größenordnung der auftretenden Ermüdungserscheinungen an der Deckschicht und somit die Notwendigkeit der Implementierung in die österreichische Methodik abschätzen zu können, wurden die bei der Überfahrt durch Schwerverkehr an der Oberseite der Deckschicht auftretenden Spannungen untersucht. Hierfür wurden jene Spannungen ausgewertet, die bei der Überfahrt des Bemessungsfahrzeugs gemäß Punkt 3.5.2.1 auftreten (siehe Tabelle 22).







Bundesamt für Strassen ASTRA

Tabelle 22: Spannungen zufolge Verkehr an der Oberseite der Deckschicht für das bemessungsrelevante Fahrzeug

Temperatur	Spannungen zufolge Verkehr
[°C]	[MPa]
-25	0,0616
-10	0,0560
+10	0,0361

Spannungen dieser Größenordnung spielen nach der österreichischen Methode keine Rolle für die Ermüdung von Deckschichtmaterialien, weshalb von einer Implementierung dieses Schadensmerkmals Abstand genommen wurde. Die Auswirkungen der Alterung werden daher durch den Einfluss des Steifigkeitszuwaches des Deckschichtmischguts auf die Ermüdung der bituminösen Tragschicht abgebildet.

3.6 Exemplarische Anwendung des Gesamtkonzepts (AP6)

3.6.1 Anwendung im Rahmen der deutschen Methode

3.6.1.1 Versuchsergebnisse AC

Die exemplarische Anwendung des entwickelten Gesamtkonzeptes erfolgte an einem AC 11. Die Ermittlung der dimensionierungsrelevanten Materialparameter wurde in Kapitel 3.4.3 abgehandelt.

3.6.1.2 Parameterentwicklung infolge VAPro-Alterung

Für die ermittelten Materialparameter wurden die erforderlichen Verhaltensfunktionen aufgestellt. Für die Parameter K₁ und K₂ der Ermüdungsfunktionen ergibt sich gemäß Abbildung 75 ein potenzieller Funktionsansatz bzw. ein Polynom 2.Grades.



Bundesamt für Strassen ASTRA

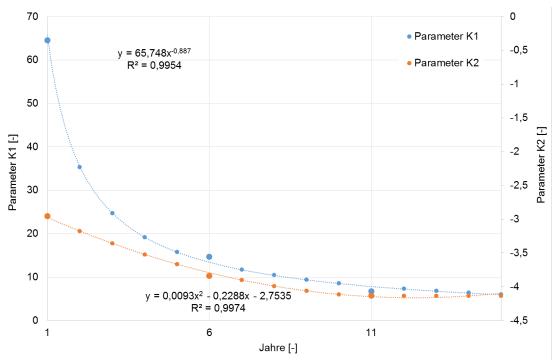
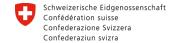


Abbildung 75: Entwicklung der Ermüdungsparameter K₁ und K₂ in Abhängigkeit der Alterung für den AC 11

Für die Verhaltensfunktionen der Parameter der Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktion (Abbildung 76) wurde eine lineare Interpolation zwischen den versuchstechnisch bestimmten Werten eingesetzt, da andere Funktionen keine ausreichend gute Anpassung ergaben. Die für die Dimensionierungsberechnungen benutzten Parameter des Ermüdungs- und Steifigkeitsverhaltens sind in Tabelle 23 für die einzelnen Jahre zusammengefasst.

Die kryogenen Zugspannungen wurden für dieses Material nicht bestimmt. Es ist jedoch bekannt, dass die im Abkühlversuch ermittelten kryogenen Zugspannungen maßgeblich durch das verwendete Bitumen bestimmt werden. Daher wurden für den AC 11 die Materialparameter der Abkühlfunktion des SMA 11 angesetzt.







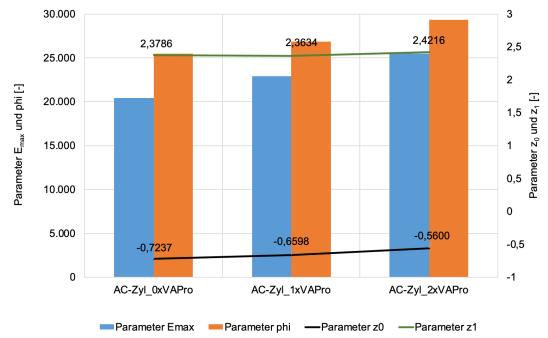
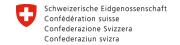


Abbildung 76: Entwicklung der Materialparameter der Hauptkurve in Abhängigkeit der Alterungsstufe für den AC 11

Tabelle 23: Parameter der Ermüdungsfunktionen und der Hauptkurve für den AC 11 (rot = versuchstechnisch bestimmte Kennwerte) für die einzelnen Jahre

	Ermüdung		Steifigke	it		
Jahr	K ₁	K ₂	E* _{+∞} [N/mm²]	φ [°]	Ż ₀	ż ₁
1	64,569	-2,956	20.420	25.488	-0,72368045	2,37857741
2	35,3341438	-3,1737	20.926	25.758	-0,71090033	2,37553597
3	24,7506408	-3,3566	21.432	26.028	-0,6981202	2,37249454
4	19,2260575	-3,5207	21.938	26.298	-0,68534008	2,3694531
5	15,8053182	-3,666	22.444	26.568	-0,67255995	2,36641167
6	14,711	-3,84	22.950	26.838	-0,65977983	2,36337023
7	11,7625865	-3,9002	23.449	27.332	-0,63982956	2,37502074
8	10,4613059	-3,9891	23.947	27.826	-0,6198793	2,38667124
9	9,43352458	-4,0592	24.446	28.319	-0,59992903	2,39832175
10	8,60000906	-4,1105	24.944	28.813	-0,57997877	2,40997225
11	6,7602	-4,134	25.443	29.307	-0,5600285	2,42162276
12	7,32787032	-4,134	25.942	29.801	-0,54007823	2,43327327
13	6,83056527	-4,134	26.440	30.295	-0,52012797	2,44492377
14	6,40027292	-4,134	26.939	30.788	-0,5001777	2,45657428
15	6,02408073	-4,134	27.437	31.282	-0,48022744	2,46822478







Bundesamt für Strassen ASTRA

3.6.1.3 Rechnerische Dimensionierung und Ergebnisse AC

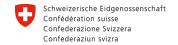
Die Dimensionierungsberechnungen wurden für die im AP 5 beschriebenen 25 Nachweispunkte in der Asphaltdeckschicht durchgeführt.

Für die BK32 zeigt sich bei vollem Verbund und jährlicher Änderung der Materialeigenschaften infolge Alterung bezüglich der aufsummierten Ermüdungsstatus in Tabelle 24 das aus AP 5 bekannte Bild. Bei Einbeziehung der Alterung ist eine Reduzierung des Ermüdungsstatus in den jeweiligen Nachweispunkten ermittelbar. Da die Materialparameter der Ermüdungsfunktion für die einzelnen Jahre mit einer Potenzfunktion abgebildet und die der Hauptkurve linear interpoliert werden, ergibt sich der in Abbildung 77 dargestellte unstetige Verlauf der jährlichen Ermüdungsanteile.

Tabelle 24: Ermüdungsstatus der Nachweispunkte der Asphaltdeckschicht mit/ohne
Alterung für die BK32 bei vollem Verbund zwischen den Asphaltschichten – jährliche
Änderung der Materialparameter

Σ Jahr 1-15	Σ Jahr 1-15 ohne Alterung, voller Verbund, BK32											
z/x [mm]	mm] 150 155 160 165											
0	0,0509	1,689	1,1731	1,4027	1,7723							
10	11,2596	11,7565	9,1004	7,2257	6,0816							
20	5,6547	6,8185	7,485	7,6393	7,3538							
30	5,8429	6,9862	7,7882	8,0953	7,8772							
40	16,7466	19,0412	18,7001	16,3452	13,1541							
Σ Jahr 1-15	mit Alterun	g, voller Ve	rbund, BK3	2								
z/x [mm]	150	155	160	165	170							
0	0,1148	0,7626	0,5964	0,7168	0,8893							
10	7,4991	7,9782	5,79	4,3399	3,5055							
20	3,2268	4,0773	4,565	4,6608	4,4292							
30	3,3098	4,1316	4,7243	4,9507	4,782							
40	11,8872	13,9701	13,6667	11,5593	8,8313							







Bundesamt für Strassen ASTRA

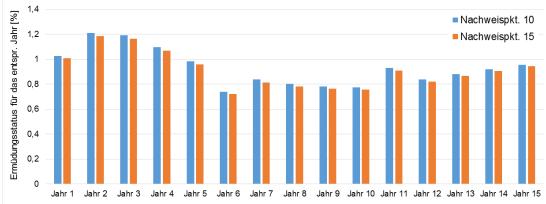


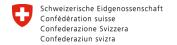
Abbildung 77: Ermüdungsstatus (jährlich) für die BK32 bei jährlicher Änderung der Materialparameter infolge Alterung mit vollem Verbund

Es wurde erneut der Nachweis geführt, ob eine Reduzierung des Rechenaufwandes durch Ansetzen der blockweisen Alterung möglich ist. Die Ergebnisse in Tabelle 25 und Abbildung 78 zeigen, dass durch die Zusammenfassung der gesamten Nutzungsdauer von 15 Jahren in drei Blöcken zu je 5 Jahren nur zu marginalen Unterschieden führt.

Tabelle 25: Ermüdungsstatus der Nachweispunkte der Asphaltdeckschicht mit/ohne
Alterung für die BK32 bei vollem Verbund zwischen den Asphaltschichten – blockweise
Änderung der Materialparameter

Σ Jahr 1-15	Σ Jahr 1-15 ohne Alterung, voller Verbund, BK32										
z/x [mm]	150	155	160	165	170						
0	0,0509	1,689	1,1731	1,4027	1,7723						
10	11,2596	11,7565	9,1004	7,2257	6,0816						
20	5,6547	6,8185	7,485	7,6393	7,3538						
30	5,8429	6,9862	7,7882	8,0953	7,8772						
40	16,7466	19,0412	18,7001	16,3452	13,1541						
Σ Jahr 1-15	mit Alterun	g, voller Ve	rbund, BK3	2							
z/x [mm]	150	155	160	165	170						
0	0,0744	0,8469	0,6218	0,7524	0,9482						
10	7,8489	8,2298	6,0176	4,557	3,7116						
20	3,4775	4,323	4,8015	4,893	4,6587						
30	3,571	4,4006	4,9918	5,2127	5,0371						
40	12,2642	14,3093	13,9931	11,8939	9,1668						







Bundesamt für Strassen ASTRA

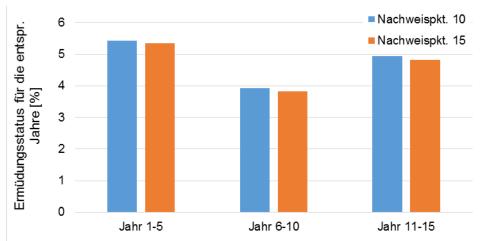


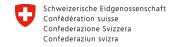
Abbildung 78: Ermüdungsstatus für die BK32 bei blockweiser Änderung der Materialparameter infolge Alterung mit vollem Verbund

Da die in-situ auftretende Alterung in den Berechnungsabläufen möglichst genau abgebildet werden muss, wird die schichtweise Änderung der Materialparameter infolge Alterung als maßgebend betrachtet. Die Ergebnisse in Tabelle 26 und Abbildung 79 zeigen, dass die Berücksichtigung der in-situ ablaufenden Prozesse zu einem Anstieg des Ermüdungsstatus führt.

Tabelle 26: Ermüdungsstatus der Nachweispunkte der Asphaltdeckschicht mit/ohne
Alterung für die BK32 bei vollem Verbund zwischen den Asphaltschichten – Schichtweise
Änderung der Materialparameter

Σ Jahr 1-15	ohne Alteri	ung, voller \	Verbund, Bl	< 32	
z/x [mm]	150	155	160	165	170
0	0,0509	1,689	1,1731	1,4027	1,7723
10	11,2596	11,7565	9,1004	7,2257	6,0816
20	5,6547	6,8185	7,485	7,6393	7,3538
30	5,8429	6,9862	7,7882	8,0953	7,8772
40	16,7466	19,0412	18,7001	16,3452	13,1541
Σ Jahr 1-15	mit Alterun	g, voller Ve	rbund, BK3	2	
z/x [mm]	150	155	160	165	170
0	0,1143	0,7881	0,5975	0,704	0,8688
10	7,7371	8,1061	5,7746	4,3063	3,4947
20	3,8621	4,7568	5,2763	5,3999	5,1802
30	4,0618	4,9665	5,6122	5,8619	5,6836
40	13,6354	15,8207	15,502	13,2776	10,3446







Bundesamt für Strassen ASTRA



Abbildung 79: Ermüdungsstatus für die BK32 bei schichtweiser Änderung der Materialparameter infolge Alterung mit vollem Verbund

Ergänzend wurden die Ermüdungsstatus für die bereits beschriebene BK100 und BK1 berechnet.

Für die BK100 (Tabelle 27 und Abbildung 80) verschlechtert sich der maßgebende Ermüdungsstatus gegenüber dem Befestigungsaufbau der BK32 von 13,9% auf 14,2%. Dies lässt sich wiederum mit der Erhöhung der Schichtdicke der Asphalttragschicht um 40 mm begründen.

Für den Befestigungsaufbau der BK1 (Tabelle 28 und Abbildung 81) ist besonders zu beachten, dass der maßgebliche Nachweispunkt 10 mm unter der Oberfläche der Asphaltdeckschicht liegt und mit den beschriebenen Beanspruchungen einen Ermüdungsstatus von 53,2% ergibt. Für die BK1 ist der Unterschied zwischen den Berechnungsvarianten mit bzw. ohne Berücksichtigung der Alterung nahezu null. Die jährliche Entwicklung des Ermüdungsstatus in Abbildung 81 zeigt ab dem Jahr 12 einen progressiven Verlauf für die beiden maßgebenden Nachweispunkte, die in einer Tiefe von 10 bzw. 40 mm unter der Oberseite der Asphaltdeckschicht liegen. Hier ist eine deutliche Überlastung der Asphaltdeckschicht infolge der Beanspruchung zu erkennen.



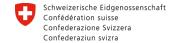




Tabelle 27: Ermüdungsstatus der Nachweispunkte der Asphaltdeckschicht mit/ohne
Alterung für die BK100 bei vollem Verbund zwischen den Asphaltschichten – schichtweise
Änderung der Materialparameter

Σ Jahr 1-15	Σ Jahr 1-15 ohne Alterung, voller Verbund, BK100										
z/x [mm]	m] 150 155 160 165										
0	0,0215	1,7737	0,6777	0,6066	0,7927						
10	11,0533	9,4661	6,348	4,682	3,807						
20	5,3726	5,7018	5,692	5,4785	5,0947						
30	5,4241	6,0458	6,3643	6,3277	5,9446						
40	15,6445	17,4904	16,8438	14,3693	11,2193						
Σ Jahr 1-15	mit Alterun	g, voller Ve	rbund, BK1	00							
z/x [mm]	150	155	160	165	170						
0	0,0754	0,8427	0,361	1,3303	1,2505						
10	7,5854	6,2194	3,7166	2,6102	1,8843						
20	3,6433	3,8816	3,8632	3,6994	3,2488						
30	3,7289	4,2099	4,4562	4,3656	4,0671						
40	12,5689	14,2943	13,6896	10,916	8,5883						



Abbildung 80: Ermüdungsstatus für die BK100 bei schichtweiser Änderung der Materialparameter infolge Alterung mit vollem Verbund



Schweizerische Eidgenossenschaft Confédération suisse Confederazione Svizzera Confederaziun svizra



Bundesamt für Strassen ASTRA

Tabelle 28: Ermüdungsstatus der Nachweispunkte der Asphaltdeckschicht mit/ohne
Alterung für die BK1 bei vollem Verbund zwischen den Asphaltschichten – schichtweise
Änderung der Materialparameter

Σ Jahr 1-15	ohne Alteru	ung, voller \	Verbund, Bl	< 1	
z/x [mm]	150	155	160	165	170
0	4,3455	23,8038	26,3826	28,6407	30,438
10	25,3744	50,0903	53,5134	48,728	43,5216
20	17,6615	29,1576	37,5822	41,1162	40,8173
30	19,2373	26,63	32,5744	35,9137	36,5124
40	41,3781	48,4123	50,5015	48,2305	43,3662
Σ Jahr 1-15	mit Alterun	g, voller Ve	rbund, BK1		
z/x [mm]	150	155	160	165	170
0	2,5584	18,327	20,7471	22,9208	24,7137
10	20,6421	49,4168	53,2129	46,7698	40,2929
20	14,3235	25,6028	34,3709	38,0868	37,6639
30	16,136	23,4993	29,6655	33,1745	33,7375
40	40,1696	48,3267	50,7896	48,0804	42,3692

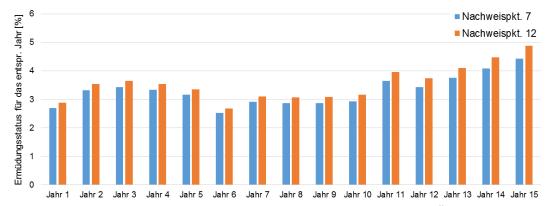
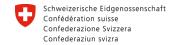


Abbildung 81: Ermüdungsstatus für die BK1 bei schichtweiser Änderung der Materialparameter infolge Alterung mit vollem Verbund

Vergleicht man die Werte des maßgebenden Nachweispunktes bei der schichtweisen Alterung (15,82% in Tabelle 26) mit dem bei blockweiser Alterung (14,31% in Tabelle 25), so sollten unter Berücksichtigung der deutlichen Reduzierung des Rechen- und Auswerteaufwandes zukünftig die hier beschriebene blockweise Änderung der Materialparameter infolge Alterung für die rechnerische Dimensionierung angesetzt werden. Gleichzeitig ist das Aufstellung von Verhaltensfunktionen damit nicht mehr erforderlich, soweit die Materialeigenschaften des Asphaltgemisches sowohl im ungealterten als auch im einfach sowie zweifach gealterten Zustand ermittelt werden.









Bundesamt für Strassen ASTRA

3.6.2 Anwendung im Rahmen der österreichischen Methode

3.6.2.1 Betrachtung im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Die unter Punkt 3.5.2 beschriebene Methodik soll mit dem im gegenständlichen Projekt geprüften Mischgut AC11 exemplarische angewandt werden. Hierfür wurde die Steifigkeit des Mischguts AC11 bei den Temperaturen -25°C, -10°C und +10°C für ungealtertes und einmal VAPro-gealtertes Mischgut ausgewertet (siehe Kapitel 3.4.3).

Mit Hilfe der Mehrschichtentheorie nach Burister (Software BISAR) wurden die durch das Bemessungsfahrzeug verursachten Spannungen berechnet. Die ermittelten Spannungen sind in Tabelle 29 zu sehen. Diese Spannungen werden der Zugfestigkeitsreserve gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass die auftretenden Spannungen so gering sind, dass keine Schäden zu erwarten sind.

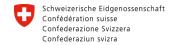
Tabelle 29: Spannungen zufolge Verkehr an der Oberseite der Deckschicht für das bemessungsrelevante Fahrzeug sowie die Zugfestigkeitsreserve (ungealtert und 1x VAProgealtert)

Temperatur	Spannungen z	ufolge Verkehr	Zugfestigkeitsreserve		
[°C]	[MI	Pa]	[MPa]		
	ungealtert	1x VAPro gealtert	ungealtert	1x VAPro gealtert	
-25	0,0616	0,0661	1,70	1,55	
-10	0,0560	0,0560 0,0594		3,80	
+10	0,0361	0,0387	1,18	1,49	

3.6.2.2 Betrachtung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Für die Untersuchung der Auswirkung der Alterung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wurden Dimensionierungsberechnungen mit der Software AsDim (siehe Abbildung 82) durchgeführt. Dabei wurde ein fiktives Beispiel mit dem in Abbildung 83 gezeigten Aufbau gewählt. Die Eingangsgrößen sind in Tabelle 30 dargestellt.







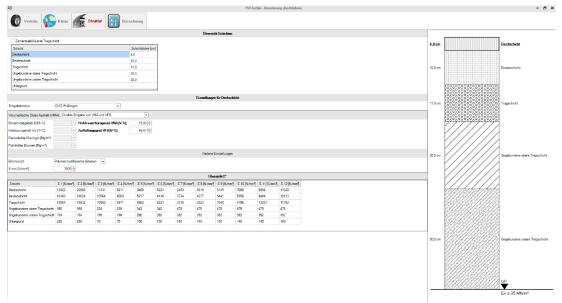


Abbildung 82: Bemessungssoftware AsDim

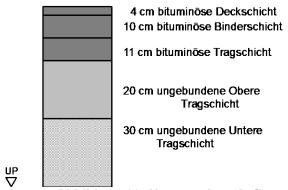
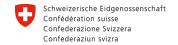


Abbildung 83: Untersuchter Aufbau







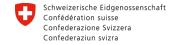
Bundesamt für Strassen ASTRA

Tabelle 30: Eingangsgrößen für die Bemessungsberechnungen mit der Software AsDim

Eingangsgrößen Verkehr								
JDTLV	2500 Kfz/24h							
Anzahl Richtungsfahrstreifen	3 oder meh	3 oder mehr						
Fahrstreifenbreite	3,75 m							
Bemessungsperiode	20 Jahre							
Zuwachsrate	2%							
Anteil 2-Achser	10%							
Anteil 3-Achser	30%							
Anteil 4+-Achser 60%								
Eingangsgrößen Klima	·							
Temperaturzone	1							
Eingangsgrößen Struktur								
	VMA [V-%]	VFB [V-%]	Bitumen- art	Steifigkeit [N/mm²]				
Deckschicht	18	66,67	pmB	GVO- Prüfungen				
Binderschicht	16	75	pmB	Modell- asphalt				
Tragschicht	15,2 60,53 B Modell-asphalt							
Ungebundene untere Tragschicht	Klasse U2	Klasse U2						
Ungebundene obere Tragschicht	Klasse U6							

Die Steifigkeit der Deckschicht bei 20°C wurde wie in Tabelle 31 angegeben berücksichtigt.







Bundesamt für Strassen ASTRA

Tabelle 31: Steifigkeit bei 20°C für ungealtertes und 1x VAPro-gealtertes Mischgut für die Bemessungsberechnungen mit der Software AsDim

	Steifigkeit (@20°C)
	[N/mm²]
ungealtert	3135
1x VAPro-gealtert	3500

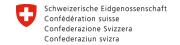
Aus dieser Berechnung ergibt sich eine Erhöhung der technischen Lebensdauer durch die Alterung der Deckschicht von 1,5%. Diese Änderung ist somit vernachlässigbar.

3.6.3 Zusammenfassende Bewertung

Nach Analyse der Ergebnisse der beiden angewandten Methoden können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die Berücksichtigung der Alterung der Asphaltdeckschicht ist für den <u>Ermüdungsnachweis der Asphalttragschicht unbedeutend</u>, da sich die Spannungen bzw. Dehnungen innerhalb der restlichen Straßenbefestigung nur geringfügig ändern.
- Der <u>Ermüdungsnachweis der Asphaltdeckschicht hingegen wird durch die</u>
 <u>Berücksichtigung der Alterung beeinflusst</u>. Werden die maximalen
 Hauptzugdehnungen für den Ermüdungsnachweis angesetzt, so zeigen sich sowohl
 an Ober-, als auch an der Unterseite der Asphaltdeckschicht Bereiche mit erhöhter
 Beanspruchung unmittelbar neben den Lasteinleitungsflächen.
- Im Hinblick auf die in-situ auftretenden Schadensbilder ist davon auszugehen, dass die in den Berechnungsergebnissen dargestellten Ermüdungseffekte zusätzlich durch sekundäre Schädigungsmechanismen beispielsweise durch Tausalz- und Wassereinwirkung, kryogene Spannungen infolge tiefer Temperatur und Schwerverkehrsbelastung überlagert werden. Aufgrund von Alterung des Deckschichtmischguts können diese Effekte daher maßgeblich für eine Verminderung der Dauerhaftigkeit werden. An dieser Stelle müssen die Forschungen fortgesetzt werden.







Bundesamt für Strassen ASTRA

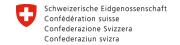
4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Materialeigenschaften von Bitumen bzw. Asphalt verändern sich infolge Alterung. erfolgt hauptsächlich durch Oxidation des Materials während des Herstellungsprozesses und der Liegedauer des Asphalts. Zur Optimierung von Asphaltrezepturen Zeit in annehmbarer ist es von Vorteil, geeignete Laboralterungsmethoden zur Verfügung zu haben. Auf Bitumenebene sind hier bereits zuverlässige Methoden normativ geregelt. Um den Einfluss von unterschiedlichen Gesteinsarten und/oder deren Wechselwirkungen mit etwaigen Bitumenzusätzen auf die Bindemittel- und Asphalteigenschaften zu untersuchen, werden Alterungsmethoden auf Asphaltebene benötigt. In den letzten Jahrzehnten wurden mehr als 30 verschiedene Verfahren entwickelt, welche verschiedensten Ansätzen folgen und jeweils über Vor- und Nachteile verfügen.

Das erste Ziel des Forschungsprojekts OptiMAI war es zur Alterung von Asphalt ein geeignetes Laboralterungsverfahren auszuwählen, zu validieren und gegebenenfalls zu optimieren. Im Zuge des Projekts wurde erfolgreich ein neuer Prototyp einer Alterungszelle, der auf dem Prinzip des an der TU Wien entwickelten Viennese Aging Procedure (VAPro) basiert, zur Alterung prismatischer Probekörper entwickelt. Besonderheit von VAPro ist es, dass Parameter, wie Temperatur (+60°C) und Druck (<0,5 bar) auf im Feld auftretenden Maxima gehalten werden und die Oxidation des Materials mit einer hoch reaktiven Gasmischung (Luft + Spuren von Ozon und Stickoxiden) erreicht wird. Die Idee ist dabei ein möglichst realistisches chemisches Milieu zu schaffen, um alle auftretenden Prozesse so realitätsgetreu wie möglich abzubilden. So soll der Einfluss von z.B. Bitumenzusätzen besser abschätzbar sein. Das Verfahren wurde anhand von Bohrkernen aus einer 19 alten Probestrecke, für die auch Rückstellproben in verschiedenen Jahren Alterungszuständen zur Verfügung standen, validiert. In weiterer Folge besitzt das Verfahren noch zusätzliches Optimierungspotential und weitere wissenschaftliche Untersuchungen, z.B. hinsichtlich des Einflusses verschiedener Bitumenzusätze, sind möglich.

Um bei der rechnerischen Dimensionierung die Auswirkungen von gealtertem Material besser abbilden zu können, war das zweite Ziel, vorhandene Rechenmodelle zu überarbeiten. Anhand der im Projekt erzielten Materialkennwerte konnte das Gesamtkonzept dargestellt werden. Dafür wurden verschiedenste mechanische (DSR,







Bundesamt für Strassen ASTRA

BTSV, IT-CY, TSRST) und chemische (FTIR, AFM, Fluoreszenzspektroskopie) Prüfverfahren verwendet, um die Materialien umfassend zu charakterisieren. Der festgestellte Einfluss der Alterung auf die rechnerische Dimensionierung mit den vorliegenden Materialkennwerten fällt gering aus. Das liegt daran, dass während des Prüfprogramms ein unerwarteter Effekt auftrat: Während der Dauer zwischen Alterung und Prüfung der Probekörper, die teilweise mehrere Wochen betrug (Probenversand, Maschinen- und Personalkapazitäten), verringerten sich die erzielten, alterungsbedingten Veränderungen auf Asphaltebene wieder, nicht jedoch auf Bindemittelebene. Diesen Effekt gilt es in Zukunft noch weiter zu erforschen.

Abschließend lässt sich sagen, dass das Projekt die Grundlagen geschaffen und dargestellt hat, dass VAPro sich dazu eignet Asphaltprobekörper effizient und realitätsnah in einen starken Alterungszustand zu versetzen. Damit können unter anderem

- schon im Rahmen der Optimierung der Rezeptur auch Langzeiteffekte aufgrund von Alterung berücksichtigt werden,
- der Einfluss der Mineralogie oder neuer Additive, für die noch kein Erfahrungshintergrund besteht, auf die langfristige Eignung im Straßenbau ohne aufwändige Probestrecken sondiert werden
- und der Einfluss von Mehrfachrecycling auf die langfristige Veränderung der Lebensdauer abgeschätzt werden.

Aus wissenschaftlicher Sicht ist ein interessantes Projektergebnis, dass die in rheologischen Prüfungen festgestellte annähernd lineare alterungsbedingte Veränderung von Bindemitteleigenschaften anhand von chemischen Prüfungen validiert werden konnte.

Das Projekt schafft auch Grundlagen, um die aktuelle Technische Spezifikation (TS) auf Europäischer Ebene in eine Europäische Norm (EN) umzuwandeln, um somit ein einheitliches Verfahren zur Asphaltalterung in Europa zu etablieren.







Bundesamt für Strassen ASTRA

LITERATURVERZEICHNIS

- ALISOV, A. 2017. *Typisierung von Bitumen mittels instationärer*Oszillationsrheometrie. Dissertation, Schriftenreihe Straßenwesen, Heft 33, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.
- ASPHALT INSTITUTE 1994. Performance Graded Asphalt, Binder Specification and Testing. Superpave Series No. 1 (SP-1), Lexington
- BELL, C. A., ABWAHAB, Y., CRISTI M.E. & D., S. 1994, Selection of Laboratory Ageing Procedures for Asphalt Aggregate Mixtures (SHRP-A-383), National Reserach Counil.
- BENEDIX, R. 2011. Bauchemie: Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten, Wiesbaden, Vieweg+ Teubner Verlag | GWV Fachverlage GmbH.
- BHASIN, A., PALVADI, S. & LITTLE, D. N. 2011. *Influence of Aging and Temperature on Intrinsic Healing of Asphalt Binders*. Transportation Research Record, 70-78.
- BLAB, R., HOFFMANN, M., LANGER, M., MARCHTRENKER, S., NISCHER, P., PEYERL, M. & STEIGENBERGER, J. 2012. *Betonstraßen Das Handbuch, Leitfaden für die Praxis,* Wien, Zement + Beton Handels- und Werbeges.m.b.H.
- BMVI 2019. *Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 08/2019*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn.
- BOARD, T. R., NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, E. & MEDICINE 2017. Long-Term Aging of Asphalt Mixtures for Performance Testing and Prediction, Washington, DC, The National Academies Press.
- CEN 2007, EN 15323: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel Beschleunigte Langzeit-Alterung mit dem Verfahren mit rotierendem Zylinder (RCAT).
- CEN 2012a, EN 12697-46: Asphalt Prüfverfahren für Heißasphalt Teil 46: Widerstand gegen Kälterisse und Tieftemperaturverhalten bei einachsigen Zugversuchen, Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel.
- CEN 2012b, EN 14769: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel Beschleunigte Langzeit-Alterung mit einem Druckalterungsbehälter (PAV).
- CEN 2014, EN 12607-1: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft Teil 1: RTFOT-Verfahren.
- CEN 2015, TS 12697-52: Asphalt Prüfverfahren Teil 52: Konditionierung, um der oxidativen Alterung Rechnung zu tragen.







- ÇETINKAYA, R. 2011. Bewertung der Einflussgrößen auf die thermisch-oxidative Alterung von Bitumen im Asphalt, Bochum; Germany, Europ. Univ.-Verl.
- CHOI, Y. K. 2005. Development of the saturation ageing tensile stiffness (SATS) test for high modulus base materials. University of Nottingham.
- CRUCHO, J., PICADO-SANTOS, L., NEVES, J., CAPITÃO, S. & AL-QADI, I. L. 2018. *Tecnico accelerated ageing (TEAGE) a new laboratory approach for bituminous mixture ageing simulation*. International Journal of Pavement Engineering, 1-13.
- DIN 2018, *DIN 52050 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel BTSV-Prüfung*, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin.
- EBERHARDSTEINER, L., FUSSL, J., HOFKO, B., HANDLE, F., HOSPODKA, M., BLAB, R. & GROTHE, H. 2015a. *Influence of asphaltene content on mechanical bitumen behavior: experimental investigation and micromechanical modeling*. Materials and Structures (48), 3099-3112.
- EBERHARDSTEINER, L., FUSSL, J., HOFKO, B., HANDLE, F., HOSPODKA, M., BLAB, R. & GROTHE, H. 2015b. *Towards a microstructural model of bitumen ageing behaviour*. International Journal of Pavement Engineering (16), 939-949.
- FGSV 2009, Richtlinien zur Dimensionierung von Oberbauten mit Asphaltdecke (RDO Asphalt).
- FGSV 2012, Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO).
- FGSV 2013, TL Bitumen-StB 07/13. Technische Lieferbedingungen für Straßenbaubitumen und gebrauchsfertige polymermodifizierte Bitumen, FGSV-Verlag.
- FGSV 2018. Technische Prüfvorschriften für Asphalt, FGSV-Verlag.
- FRANCKEN, L. Permanent deformation low of bituminous road mixtures in repeated triaxial compression. Proceedings of the 4th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, 1977.
- FSV 2016, *RVS 03.08.63 Oberbaubemessung*, Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr.
- GALAL, K. A. & WHITE, T. D. 1997. SHRP PG classification and evaluation of inservice asphalts after eight years. Progress of Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement): Evaluation and Implementation (1322), 135-150.



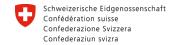




- HAGOS, E. T. 2008. The effect of aging on binder properties of porous asphalt concrete.
- HANDLE, F., HARIR, M., FUSSL, J., KOSYUN, A. N., GROSSEGGER, D., HERTKORN, N., EBERHARDSTEINER, L., HOFKO, B., HOSPODKA, M., BLAB, R., et al. 2017. *Tracking Aging of Bitumen and Its Saturate, Aromatic, Resin, and Asphaltene Fractions Using High-Field Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry*. Energy & Fuels (31), 4771-4779.
- HOFF, J. H. v. t., COHEN, E. & EWAN, T. 1896. *Studies in chemical dynamics,* Amsterdam; London, F. Muller; Williams & Norgate.
- HOFKO, B., ALAVI, M. Z., GROTHE, H., JONES, D. & HARVEY, J. 2017. Repeatability and sensitivity of FTIR ATR spectral analysis methods for bituminous binders. Materials and Structures (50).
- HOFKO, B. & BLAB, R. Assessment of Permanent Deformation Behavior of Asphalt Concrete by Improved Triaxial Cyclic Compression Testing.

 Proceedings of the 11th International Conference on Asphalt Pavements, Nagoya, Japan, 2010.
- HOFKO, B., EBERHARDSTEINER, L., FUSSL, J., GROTHE, H., HANDLE, F., HOSPODKA, M., GROSSEGGER, D., NAHAR, S. N., SCHMETS, A. J. M. & SCARPAS, A. 2016. *Impact of maltene and asphaltene fraction on mechanical behavior and microstructure of bitumen*. Materials and Structures (49), 829-841.
- HOFKO, B., HANDLE, F., EBERHARDSTEINER, L., HOSPODKA, M., BLAB, R., FUSSL, J. & GROTHE, H. 2015. *Alternative Approach Toward the Aging of Asphalt Binder*. Transportation Research Record, 24-31.
- HOFKO, B., HOSPODKA, M., BLAB, R., EBERHARDSTEINER, L., FUSSL, J., GROTHE, H. & HANDLE, F. 2014. *Impact of field ageing on low-temperature performance of binder and hot mix asphalt*. Asphalt Pavements, Vols 1 and 2, 381-395.
- HOFKO, B., POROT, L., CANNONE, A. F., POULIKAKOS, L., HUBER, L., LU, X., MOLLENHAUER, K. & GROTHE, H. 2018. FTIR spectral analysis of bituminous binders: reproducibility and impact of ageing temperature. Materials and Structures (51).
- HUANG, S. C., TIA, M. & RUTH, B. E. 1996. Laboratory aging methods for simulation of field aging of asphalts. Journal of Materials in Civil Engineering (8), 147-152.
- ISACSSON, U. & ZENG, H. 1998. Cracking of asphalt at low temperature as related to bitumen rheology. Journal of Materials Science (33), 2165-2170.

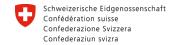






- LEE, S. J., AMIRKHANIAN, S. N., SHATANAWI, K. & KIM, K. W. 2008. Short-term aging characterization of asphalt binders using gel permeation chromatography and selected Superpave binder tests. Construction and Building Materials (22), 2220-2227.
- LESUEUR, D. 2009. *Evidence of the Colloidal Structure of Bitumen*. Proc. ISAP International Workshop on the Chemo-Mechanics of Bituminous Materials.
- LIPKE, S. & MÜNSCHER, F. 2010, Veränderung der Eigenschaften polymermodifizierter Bindemittel während der Nutzungsdauer, Schlussbericht, AP Projekt 07 351/S5, Bundesanstalt für Straßenwesen (bast).
- LITZKA, J., MOLZER, C. & BLAB, R. 1996. *Modifikation der Österreichschen Bemessungsmethode zur Dimensionierung des Straßenoberbaus*, Wien, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten.
- LOEBER, L., MULLER, G., MOREL, J. & SUTTON, O. 1998. *Bitumen in colloid science: a chemical, structural and rheological approach*. Fuel (77), 1443-1450.
- LOEBER, L., SUTTON, O., MOREL, J., VALLETON, J.-M. & MULLER, G. 1996. New direct observations of asphalts and asphalt binders by scanning electron microscopy and atomic force microscopy. Journal of Microscopy (182), 7.
- MA, L. X., WU, S. P., HUANG, J. F. & LI, N. 2008. Effect of UV ageing on components, structure and properties of asphalt. Advances in Heterogeneous Material Mechanics 2008, 415-418.
- MASCHAUER, D., STEINER, D., MIRWALD, J., HOFKO, B. & GROTHE, H. 2018. Viennese Aging Procedure – Behavior of various bitumen provenances. RILEM 252 CMB Symposium. Braunschweig, Germany.
- MILL, T., TSE, D., LOO, B., YAO, C. & CANAVESI, E. 1992. *Oxidation pathways for asphalt*. ASC Division of Fuel Chemistry (37), 1367-1375.
- MÜHLICH, U. 2018. Towards a continuum thermodynamics framework for mechanism-based modelling of oxidative ageing in bitumen. International Journal of Pavement Engineering, 1-10.
- OESER, M. 2009. Nichtlineare numerische Simulationsmodelle für Verkehrswegebefestigungen unter Berücksichtigung von mechanischen, thermischen und hydraulischen Einwirkungen. Habilitation, Technische Universität Dresden.
- PETERSEN, J. C. 2009. A review of the fundamentals of asphalt oxidation chemical, physicochemical, physical property, and durability relationships.







- PETERSEN, J. C. & GLASER, R. 2011. Asphalt Oxidation Mechanisms and the Role of Oxidation Products on Age Hardening Revisited. Road Materials and Pavement Design (12), 795-819.
- POULIKAKOS, L. D., CANNONE, F. A., WANG, D., POROT, L. & HOFKO, B. 2019. *Impact of asphalt aging temperature on chemo-mechanics*. RSC Advances (9), 11602-11613.
- POULIKAKOS, L. D., DOS SANTOS, S., BUENO, M., KUENTZEL, S., HUGENER, M. & PARTL, M. N. 2014. *Influence of short and long term aging on chemical, microstructural and macro-mechanical properties of recycled asphalt mixtures*. Construction and Building Materials (51), 414-423.
- QIN, Q., SCHABRON, J. F., BOYSEN, R. B. & FARRAR, M. J. 2014. Field aging effect on chemistry and rheology of asphalt binders and rheological predictions for field aging. Fuel (121), 86-94.
- READ, J. & WHITEOAK, D. 2003. *The Shell Bitumen Handbook,* London, Thomas Telford Ltd.
- RENKEN, P., HAGNER, T. & FEßER, A. 2000, Veränderung der Eigenschaften polymermodifizierter Bitumen während Herstellung, Lagerung, Transport und Einbau von Asphaltmischgut, Forschungsbericht FE-Nr. 07.179/1997/BGB im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.
- SCHINDELIN, J., et al. 2012. *Fiji: an open-source platform for biological-image analysis*. Nat Methods (9(7)), 676-682.
- SEINFELD, J. H. & PANDIS, S. N. 2016. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change, 3rd Edition, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons.
- STEINER, D., HOFKO, B. & BLAB, R. Effect of Air Void Content and Repeated Testing on Stiffness of Asphalt Mix Specimen. CIVIL ENGINEERING CONFERENCE IN THE ASIAN REGION CECAR 7, 2016a Waikiki, USA.
- STEINER, D., HOFKO, B. & BLAB, R. 2018. Introducing a nitrogen conditioning to separate oxidative from non-oxidative ageing effects of hot mix asphalt. Road Materials and Pavement Design, 1-19.
- STEINER, D., HOFKO, B., HOSPODKA, M., HANDLE, F., GROTHE, H., FUSSL, J., EBERHARDSTEINER, L. & BLAB, R. 2016b. *Towards an optimised lab procedure for long-term oxidative ageing of asphalt mix specimen*. International Journal of Pavement Engineering (17), 471-477.
- TRAUTZ, M. 1916. Das Gesetz der Reaktionsgeschwindigkeit und der Gleichgewichte in Gasen. Bestätigung der Additivität von Cv-3/2R. Neue





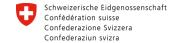


Bundesamt für Strassen ASTRA

Bestimmung der Integrationskonstanten und der Moleküldurchmesser. Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie (96), 1-28.

- UHLIG 2007. Grundlagen zur Bestimmung Dimensionierungsrelevanter Achslastkollektive für die rechnerische Dimensionierung von Oberbauten von Verkehrsflächen. Manuskript zur Dissertation, TU Dresden (unveröffentlicht).
- VERHASSELT, A. F. 1997. Field ageing of bituminous binders: Simulation and kinetic approach. Mechanical Tests for Bituminous Materials, 121-128.
- WEISE, C. 2012. Auswirkung des Hohlraumgehaltes auf die Lebensdauer von Asphaltbefestigungen. Asphalt (3/2012), 28-34.
- WENINGER-VYCUDIL, A., LITZKA, J., BROZEK, B., WISTUBA, M. P., WALTHER, A. & HAJDIN, R. 2016, Zustandsprognose und Materialtechnologie PROMAT, Endbericht PROMAT (VIF2013), PMS-Consult, Ingenieurbüro für Verkehrswesen und Infrastrukturplanung GmbH; Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie um für Verkehr, Innovation und Technologie Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien und Verkehrstechnologien.
- WISTUBA, M. & SCHRADER, J. 2018. *Das Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren*. Straße und Autobahn (Jahrgang 69, Heft 8), 645–652.
- YIN, F., ARÁMBULA-MERCADO, E., EPPS MARTIN, A., NEWCOMB, D. & TRAN, N. 2017. *Long-term ageing of asphalt mixtures*. Road Materials and Pavement Design (18), 2-27.
- ZEIßLER, A. 2020. Entwurf Habilitationsschrift. Technische Universität Dresden.





Bundesamt für Strassen ASTRA



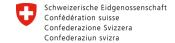
ANHANG

ANHANG A

Tabelle 1: Ergebnisse der Ermüdungsuntersuchungen am SMA 11 – ungealtert

Pk-Nr.	d	h	Т	f	μ	σu	σο	Δσ	N _{Ende}	N_{Makro}	IEI	Eel, anf
[-]	[mm]	[mm]	[°C]	[Hz]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[MPa]	[‰]
E995 AD	100,03	40,98				0,030	0,298	0,268	15.309	13.596	2.647	0,192
E995 S	100,05	40,74				0,029	0,317	0,289	11.609	9.153	2.848	0,1922
E995 W	100,06	41,13				0,026	0,369	0,343	4.769	4.426	2.417	0,2691
E996 C	100,07	43,64				0,026	0,382	0,356	5.063	4.294	2.749	0,2456
E996 M	100,08	42,69	20	10	0.200	0,026	0,306	0,280	13.809	12.138	2.801	0,1897
E995 Y	100,01	41,03	20	10	0,298	0,024	0,394	0,371	3.449	3.119	2.341	0,3002
E996 K	100,02	44,66				0,028	0,296	0,268	14.809	12.640	2.827	0,1794
E996 G	100,09	42,29				0,031	0,188	0,158	73.009	62.187	3.165	0,0945
E996 F	100,07	42,35				0,033	0,169	0,136	95.009	92.696	2.952	0,087
E995 AE	99,98	40,77				0,033	0,133	0,100	552.009	552.009	3.375	0,056





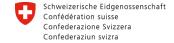


Bundesamt für Strassen ASTRA

Tabelle 2: Ergebnisse der Ermüdungsuntersuchungen am SMA 11 – ungealtert Wiederholung (korrekter Hohlraumgehalt)

Pk-Nr.	d	h	T	f	μ	σ_{u}	σ_{o}	Δσ	N _{Ende}	N _{Makro}	IEI	€el, anf
[-]	[mm]	[mm]	[°C]	[Hz]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[MPa]	[‰]
E1006 B	99,67	40,94				0,025	0,471	0,446	3.593	2.825	3.200	0,2642
E1075 E	99,68	40,59				0,027	0,346	0,319	3.863	3.414	1.867	0,3235
E1074 D	99,74	41,08				0,026	0,396	0,37	3.026	2.683	2.408	0,2911
E1074 A	99,66	40,76				0,027	0,416	0,389	3.301	2.736	2.442	0,3019
E1031 G	99,72	40,73	20	10	0.000	0,029	0,277	0,248	14.267	12.075	3.181	0,1476
E1074 F	99,76	40,84	20	10	0,298	0,031	0,248	0,217	20.631	19.352	2.761	0,1489
E1029 G	99,82	42,44				0,029	0,276	0,247	18.582	17.286	3.398	0,1377
E1073H	99,74	41,1				0,034	0,13	0,096	355.691	279.318	3.004	0,0609
E1075D	99,72	41,01				0,032	0,149	0,117	163.877	163.009	3.209	0,069
E1073A	99,64	40,65				0,032	0,209	0,177	32.080	31.071	2.741	0,1223







Bundesamt für Strassen ASTRA

Tabelle 3: Ergebnisse der Ermüdungsuntersuchungen am SMA 11 – 1xVAPro gealtert

Pk-Nr.	d	h	Т	f	μ	σ_{u}	σο	Δσ	NEnde	N _{Makro}	IEI	εel, anf
[-]	[mm]	[mm]	[°C]	[Hz]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[MPa]	[‰]
E 1001 P	99,97	43,1				0,023	0,437	0,414	2.250	1.934	2.202	0,3559
E 1014 G	99,42	40,3				0,024	0,445	0,421	2.669	2.084	2.332	0,3425
E 995 Z	99,93	40,45				0,024	0,447	0,423	2.329	1.892	2.258	0,355
E 1014 H	99,5	40,87				0,028	0,315	0,288	7.609	6.482	2.427	0,2246
E 1009 G	99,46	40,39	20	10	0,298	0,028	0,296	0,267	14.009	11.378	2.912	0,174
E 996 O	99,98	42,59				0,029	0,276	0,248	22.209	18.493	2.998	0,1567
E 1001 O	99,01	43,11				0,034	0,138	0,105	253.009	227.539	2.983	0,0664
E 996 i	99,93	42,86				0,031	0,176	0,145	121.009	95.333	3.348	0,0822
E 1009 B	99,47	40,7				0,033	0,13	0,097	787.009	651.367	3.440	0,0532



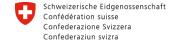
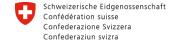




Tabelle 4: Ergebnisse der Ermüdungsuntersuchungen am SMA 11 – 2xVAPro gealtert

Pk-Nr.	d	h	Т	f	μ	σ_{u}	σο	Δσ	N _{Ende}	N _{Makro}	IEI	εel, anf
[-]	[mm]	[mm]	[°C]	[Hz]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[MPa]	[‰]
E995 X	100,1	40,58				0,025	0,445	0,421	3.891	2.712	2.560	0,3115
E1019 B	99,66	38,92				0,026	0,472	0,446	2.511	1.872	2.406	0,3516
E1015 E	99,56	40,81				0,026	0,473	0,447	2.469	2.108	2.441	0,3468
E1029 H	99,7	42,33				0,028	0,473	0,445	2.151	1.677	2.396	0,3522
E1019 H	99,67	37,71	20	10	0,298	0,03	0,297	0,267	18.565	14.896	3.205	0,1581
E1031 E	99,76	40,71				0,03	0,298	0,268	23.474	20.828	3.095	0,1642
E1019 F	99,68	37,74				0,032	0,219	0,187	69.846	56.746	3.575	0,0993
E1031 B	99,7	39,84				0,031	0,228	0,197	102.382	77.455	4.096	0,091
E1018 F	99,68	39,03				0,032	0,149	0,117	518.272	418.560	3.660	0,0604





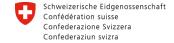


Bundesamt für Strassen ASTRA

Tabelle 5: Ergebnisse der Ermüdungsuntersuchungen am AC 11 – ungealtert

Pk-Nr.	h	d	Т	f	μ	σu	σο	Δσ	N _{Ende}	N _{Makro}	IEI	Eel, anf
[-]	[mm]	[mm]	[°C]	[Hz]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[MPa]	[‰]
E1118C	41,58	100,3				0,028	0,199	0,17	39.599	38.541	2.601	0,1242
E1118H	41,96	100,3				0,024	0,294	0,27	10.761	8.803	2.710	0,189
E1113B	41,62	99,8				0,022	0,318	0,296	10.099	7.702	2.743	0,2044
E1113C	41,61	99,64				0,026	0,247	0,221	13.563	11.802	2.836	0,1476
E1114D	41,31	99,7	20	10	0,298	0,029	0,199	0,17	51.539	44.831	2.633	0,1222
E1114G	41,56	99,7				0,031	0,16	0,129	99.523	90.308	2.757	0,0888
E1118A	41,2	100,3				0,025	0,236	0,21	27.101	23.519	3.053	0,1305
E1117C	38,61	100,3				0,031	0,14	0,108	200.299	181.461	3.067	0,067
E1118B	41,6	100,3				0,028	0,163	0,135	120.554	104.211	3.229	0,0793





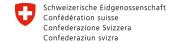


Bundesamt für Strassen ASTRA

Tabelle 6: Ergebnisse der Ermüdungsuntersuchungen am AC 11 – 1xVAPro gealtert

Pk-Nr.	h	d	Т	f	μ	σu	σο	Δσ	N _{Ende}	N _{Makro}	IEI	Eel, anf
[-]	[mm]	[mm]	[°C]	[Hz]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[MPa]	[‰]
E1093B	39,83	99,68				0,02	0,341	0,322	7.361	5.036	2.966	0,2056
E1094B	39,83	99,69				0,019	0,365	0,347	12.489	8.739	3.412	0,1926
E1093G	39,96	99,7				0,018	0,365	0,347	13.737	10.792	3.275	0,2011
E1093A	39,83	99,62				0,023	0,272	0,248	30.114	21.356	3.466	0,1357
E1094C	39,64	99,68	20	10	0,298	0,024	0,266	0,242	53.491	40.251	3.471	0,1323
E1094F	39,56	99,67				0,023	0,266	0,243	56.396	41.390	3.851	0,1194
E1094A	40,16	99,66				0,028	0,198	0,171	177.057	142.957	3.626	0,0891
E1094D	39,67	99,65				0,03	0,15	0,12	744.399	744.008	3.815	0,0595
E1094E	39,83	99,57				0,027	0,178	0,151	429.466	352.028	3.646	0,0783





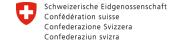


Bundesamt für Strassen ASTRA

Tabelle 7: Ergebnisse der Ermüdungsuntersuchungen am AC 11 – 2xVAPro gealtert

Pk-Nr.	h	d	Т	f	μ	σu	σο	Δσ	N _{Ende}	N _{Makro}	IEI	Eel, anf
[-]	[mm]	[mm]	[°C]	[Hz]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[MPa]	[‰]
E1103A	40,68	99,68				0,016	0,435	0,419	3.620	2.429	3.238	0,2454
E1104B	40,39	99,68				0,016	0,413	0,396	7.274	4.982	3.528	0,2128
E1104C	40,33	99,66				0,013	0,41	0,397	7.078	4.704	3.717	0,2026
E1104G	40,73	99,72				0,023	0,319	0,297	20.629	14.673	3.719	0,1511
E1104E	40,86	99,66	20	10	0,298	0,021	0,294	0,273	34.413	25.064	3.775	0,1372
E1103B	40,59	99,66				0,024	0,286	0,262	46.695	31.700	3.944	0,1261
E1104A	40,44	99,63				0,025	0,23	0,205	84.102	61.461	3.725	0,1043
E1103C	40,4	99,65				0,022	0,257	0,235	84.190	48.152	4.307	0,1035
E1103F	41,24	99,64				0,029	0,175	0,146	841.559	638.405	4.161	0,0663





Bundesamt für Strassen ASTRA



Anhang B

Tabelle 8: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen am SMA 11 – ungealtert

PK	Т	f	E	PK	Т	f	E	PK	Т	f	E
[-]	[°C]	[Hz]	[MPa]	[-]	[°C]	[Hz]	[MPa]	[-]	[°C]	[Hz]	[MPa]
E996 N	-10	10,0	16.554	E996 E	5	10,0	8.459	E996 E	20	10,0	3.212
E996 A	-10	10,0	17.257	E996 N	5	10,0	9.393	E996 N	20	10,0	3.534
E995 i	-10	10,0	17.718	E996 A	5	10,0	9.079	E996 A	20	10,0	3.508
E996 E	-10	10,0	15.546	E995 i	5	10,0	8.818	E995 i	20	10,0	3.153
E996 N	-10	3,0	15.217	E996 E	5	3,0	6.746	E996 N	20	3,0	2.432
E996 A	-10	3,0	14.950	E996 N	5	3,0	7.287	E996 A	20	3,0	2.407
E995 i	-10	3,0	15.203	E996 A	5	3,0	7.067	E995 i	20	3,0	2.237
E996 E	-10	3,0	13.646	E995 i	5	3,0	6.898				
E996 N	-10	1,0	13.808	E996 E	5	1,0	5.216	E996 E	20	1,0	1.546
E996 A	-10	1,0	13.263	E996 N	5	1,0	5.619	E996 N	20	1,0	1.661
E995 i	-10	1,0	13.289	E996 A	5	1,0	5.690	E996 A	20	1,0	1.671
E996 E	-10	1,0	11.859					E995 i	20	1,0	1.578
E996 N	-10	0,3	12.131	E996 E	5	0,3	3.868	E996 E	20	0,3	1.146
E996 A	-10	0,3	11.709	E996 N	5	0,3	4.334	E996 N	20	0,3	1.174
E995 i	-10	0,3	11.381	E996 A	5	0,3	4.257	E996 A	20	0,3	1.170
E996 E	-10	0,3	10.199	E995 i	5	0,3	3.952	E995 i	20	0,3	1.197
E996 N	-10	0,1	10.740	E996 E	5	0,1	2.949	E996 E	20	0,1	813
E996 A	-10	0,1	10.481	E996 N	5	0,1	3.316	E996 N	20	0,1	857
E995 i	-10	0,1	9.952	E996 A	5	0,1	3.365	E996 A	20	0,1	831
E996 E	-10	0,1	8.841	E995 i	5	0,1	3.032	E995 i	20	0,1	895



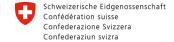
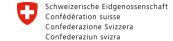




Tabelle 9: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen am SMA 11 – ungealtert Wiederholung (Hohlraumgehalt)

PK	Т	f	E	PK	Т	f	E	PK	Т	f	E
[-]	[°C]	[Hz]	[MPa]	[-]	[°C]	[Hz]	[MPa]	[-]	[°C]	[Hz]	[MPa]
E1031A	-10	10,0	16.656	E1031H	5	10,0	8.074	E1031H	20	10,0	3.024
E1030B	-10	10,0	15.986	E1030B	5	10,0	8.396	E1030B	20	10,0	3.157
E1072G	-10	10,0	17.114	E1072G	5	10,0	7.968	E1072G	20	10,0	3.173
E1031A	-10	3,0	15.147	E1031A	5	10,0	9.223	E1031A	20	10,0	3.246
E1030B	-10	3,0	14.438	E1031H	5	3,0	6.296	E1031H	20	3,0	2.098
E1072G	-10	3,0	15.627	E1030B	5	3,0	6.568	E1030B	20	3,0	2.123
E1031A	-10	1,0	13.576	E1072G	5	3,0	6.250	E1072G	20	3,0	2.101
E1030B	-10	1,0	12.882	E1031A	5	3,0	7.177	E1031A	20	3,0	2.184
E1072G	-10	1,0	14.083	E1031H	5	1,0	4.785	E1031H	20	1,0	1.462
E1031A	-10	0,3	11.866	E1030B	5	1,0	5.119	E1030B	20	1,0	1.517
E1030B	-10	0,3	11.260	E1072G	5	1,0	4.753	E1072G	20	1,0	1.438
E1072G	-10	0,3	12.480	E1031A	5	1,0	5.618	E1031A	20	1,0	1.513
E1031A	-10	0,1	10.483	E1031H	5	0,3	3.604	E1031H	20	0,3	1.061
E1030B	-10	0,1	9.871	E1030B	5	0,3	3.812	E1030B	20	0,3	1.153
E1072G	-10	0,1	10.997	E1072G	5	0,3	3.696	E1072G	20	0,3	1.027
				E1031A	5	0,3	4.207	E1031A	20	0,3	1.056
				E1031H	5	0,1	2.713	E1031H	20	0,1	779
				E1030B	5	0,1	2.882	E1030B	20	0,1	854
				E1072G	5	0,1	2.778	E1072G	20	0,1	764
				E1031A	5	0,1	3.234	E1031A	20	0,1	777





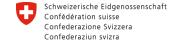


Bundesamt für Strassen ASTRA

Tabelle 10: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen am SMA 11 – 1xVAPro gealtert

PK	Т	f	ΙΕΙ	PK	Т	f	ΙΕΙ	PK	Т	f	E
[-]	[°C]	[Hz]	[MPa]	[-]	[°C]	[Hz]	[MPa]	[-]	[°C]	[Hz]	[MPa]
E995 AB	-10	10,0	16.763	E995 AB	5	10,0	8.587	E995 AB	20	10,0	3.256
E995 AF	-10	10,0	17.111	E995 AF	5	10,0	8.174	E995 AF	20	10,0	3.424
E995 J	-10	10,0	16.321	E995 J	5	10,0	8.412	E995 J	20	10,0	3.029
E995 V	-10	10,0	17.755	E995 V	5	10,0	8.955	E995 V	20	10,0	3.395
E995 AB	-10	3,0	14.885	E995 AB	5	3,0	6.854	E995 AB	20	3,0	2.223
E995 AF	-10	3,0	14.656	E995 AF	5	3,0	6.532	E995 AF	20	3,0	2.285
E995 J	-10	3,0	13.834	E995 J	5	3,0	6.580	E995 J	20	3,0	2.077
E995 V	-10	3,0	15.510	E995 V	5	3,0	6.895	E995 V	20	3,0	2.339
E995 AB	-10	1,0	13.479	E995 AB	5	1,0	5.620	E995 AB	20	1,0	1.575
E995 AF	-10	1,0	12.914	E995 AF	5	1,0	5.033	E995 AF	20	1,0	1.574
E995 J	-10	1,0	12.296	E995 J	5	1,0	5.112	E995 J	20	1,0	1.460
E995 V	-10	1,0	13.592	E995 V	5	1,0	5.332	E995 V	20	1,0	1.711
E995 AB	-10	0,3	11.962	E995 AB	5	0,3	4.145	E995 AB	20	0,3	1.161
E995 AF	-10	0,3	11.206	E995 AF	5	0,3	3.995	E995 AF	20	0,3	1.143
E995 J	-10	0,3	10.794	E995 J	5	0,3	3.773	E995 J	20	0,3	1.038
E995 V	-10	0,3	11.962	E995 V	5	0,3	3.988	E995 V	20	0,3	1.255
E995 AB	-10	0,1	10.489	E995 AB	5	0,1	3.154	E995 AB	20	0,1	868
E995 AF	-10	0,1	9.904	E995 AF	5	0,1	3.102	E995 AF	20	0,1	854
E995 J	-10	0,1	9.542	E995 J	5	0,1	2.895	E995 J	20	0,1	786
E995 V	-10	0,1	10.696	E995 V	5	0,1	3.166	E995 V	20	0,1	950







Bundesamt für Strassen ASTRA

Tabelle 11: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen am SMA 11 – 2xVAPro gealtert

PK	T	f	ΙΕΙ	PK	Т	f	E	PK	Т	f	E
[-]	[°C]	[Hz]	[MPa]	[-]	[°C]	[Hz]	[MPa]	[-]	[°C]	[Hz]	[MPa]
E1018B	-10	10,0	18.069	E1001i	5	10,0	9.347	E1001i	20	10,0	3.614
E1001i	-10	10,0	17.516	E1018G	5	10,0	8.431	E1018G	20	10,0	3.411
E1018G	-10	10,0	16.092	E1018B	5	10,0	9.540	E1018B	20	10,0	3.643
E1028E	-10	10,0	16.969	E1028E	5	10,0	8.702	E1028E	20	10,0	3.286
E1018B	-10	3,0	16.586	E1001i	5	3,0	7.382	E1001i	20	3,0	2.498
E1001i	-10	3,0	15.869	E1018G	5	3,0	6.618	E1018G	20	3,0	2.386
E1018G	-10	3,0	14.756	E1018B	5	3,0	7.535	E1018B	20	3,0	2.487
E1028E	-10	3,0	15.467	E1028E	5	3,0	6.853	E1028E	20	3,0	2.298
E1018B	-10	1,0	15.003	E1001i	5	1,0	5.719	E1001i	20	1,0	1.714
E1001i	-10	1,0	14.310	E1018G	5	1,0	5.147	E1018G	20	1,0	1.637
E1018G	-10	1,0	13.273	E1018B	5	1,0	5.932	E1018B	20	1,0	1.748
E1028E	-10	1,0	13.980	E1028E	5	1,0	5.405	E1028E	20	1,0	1.604
E1018B	-10	0,3	13.450	E1001i	5	0,3	4.363	E1001i	20	0,3	1.279
E1001i	-10	0,3	12.523	E1018G	5	0,3	3.856	E1018G	20	0,3	1.161
E1018G	-10	0,3	11.713	E1018B	5	0,3	4.500	E1018B	20	0,3	1.227
E1028E	-10	0,3	12.347	E1028E	5	0,3	4.126	E1028E	20	0,3	1.146
E1018B	-10	0,1	12.187	E1001i	5	0,1	3.349	E1001i	20	0,1	911
E1001i	-10	0,1	11.247	E1018G	5	0,1	2.946	E1018G	20	0,1	846
E1018G	-10	0,1	10.480	E1018B	5	0,1	3.506	E1018B	20	0,1	910
E1028E	-10	0,1	11.032	E1028E	5	0,1	3.287	E1028E	20	0,1	858



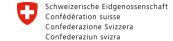




Tabelle 12: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen am AC 11 – ungealtert

PK	T	f	ΙΕΙ	PK	Т	f	E	PK	Т	f	E
[-]	[°C]	[Hz]	[MPa]	[-]	[°C]	[Hz]	[MPa]	[-]	[°C]	[Hz]	[MPa]
E1117G	-10	10,0	16.565	E1117G	5	10,0	8.552	E1117G	20	10,0	3.303
E1117E	-10	10,0	15.524	E1117E	5	10,0	8.926	E1117E	20	10,0	3.638
E1118G	-10	10,0	17.845	E1118G	5	10,0	9.151	E1118G	20	10,0	3.614
E1117G	-10	3,0	15.105	E1117G	5	3,0	6.858	E1117G	20	3,0	2.316
E1117E	-10	3,0	14.103	E1117E	5	3,0	7.291	E1117E	20	3,0	2.535
E1118G	-10	3,0	16.253	E1118G	5	3,0	7.355	E1118G	20	3,0	2.537
E1117G	-10	1,0	13.696	E1117G	5	1,0	5.344	E1117G	20	1,0	1.633
E1117E	-10	1,0	12.756	E1117E	5	1,0	5.773	E1117E	20	1,0	1.785
E1118G	-10	1,0	14.840	E1118G	5	1,0	5.704	E1118G	20	1,0	1.764
E1117G	-10	0,3	12.080	E1117G	5	0,3	4.024	E1117G	20	0,3	1.201
E1117E	-10	0,3	11.458	E1117E	5	0,3	4.271	E1117E	20	0,3	1.347
E1118G	-10	0,3	12.892	E1118G	5	0,3	4.170	E1118G	20	0,3	1.231
E1117G	-10	0,1	10.565	E1117G	5	0,1	3.017	E1117G	20	0,1	897
E1117E	-10	0,1	10.354	E1117E	5	0,1	3.222	E1118G	20	0,1	951
E1118G	-10	0,1	11.575	E1118G	5	0,1	3.117				



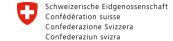




Tabelle 13: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen am AC 11 – 1xVAPro gealtert

PK	Т	f	ΙΕΙ	PK	Т	f	E	PK	Т	f	E
[-]	[°C]	[Hz]	[MPa]	[-]	[°C]	[Hz]	[MPa]	[-]	[°C]	[Hz]	[MPa]
E1093D	-10	10,0	17.162	E1093D	5	10,0	10.124	E1093D	20	10,0	3.908
E1093F	-10	10,0	17.730	E1093F	5	10,0	9.353	E1093F	20	10,0	3.937
E1094G	-10	10,0	18.129	E1093F	5	10,0	9.804	E1094G	20	10,0	3.940
E1093D	-10	3,0	16.203	E1093D	5	3,0	7.912	E1093D	20	3,0	2.711
E1093F	-10	3,0	16.461	E1093F	5	3,0	7.378	E1093F	20	3,0	2.691
E1094G	-10	3,0	16.756	E1093F	5	3,0	7.954	E1094G	20	3,0	2.809
E1093D	-10	1,0	14.701	E1093D	5	1,0	6.246	E1093D	20	1,0	1.975
E1093F	-10	1,0	14.966	E1093F	5	1,0	5.947	E1093F	20	1,0	1.883
E1094G	-10	1,0	15.216	E1093F	5	1,0	6.373	E1094G	20	1,0	1.940
E1093D	-10	0,3	13.168	E1093D	5	0,3	4.817	E1093D	20	0,3	1.377
E1093F	-10	0,3	13.478	E1093F	5	0,3	4.632	E1093F	20	0,3	1.412
E1094G	-10	0,3	13.491	E1093F	5	0,3	4.918	E1094G	20	0,3	1.410
E1093D	-10	0,1	11.847	E1093D	5	0,1	3.633	E1093D	20	0,1	997
E1093F	-10	0,1	12.022	E1093F	5	0,1	3.513	E1093F	20	0,1	1.079
E1094G	-10	0,1	12.105	E1093F	5	0,1	3.835	E1094G	20	0,1	1.049



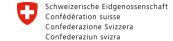




Tabelle 14: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen am AC 11 – 2xVAPro gealtert

PK	Т	f	E	PK	Т	f	ΙΕΙ	PK	Т	f	E
[-]	[°C]	[Hz]	[MPa]	[-]	[°C]	[Hz]	[MPa]	[-]	[°C]	[Hz]	[MPa]
E1113D	-10	10,0	15.976	E1113D	5	10,0	8.333	E1113D	20	10,0	3.115
E1104H	-10	10,0	18.069	E1104H	5	10,0	9.794	E1104H	20	10,0	3.965
E1103H	-10	10,0	17.921	E1103H	5	10,0	10.370	E1103H	20	10,0	4.275
E1113D	-10	3,0	15.238	E1113D	5	3,0	6.797	E1113D	20	3,0	2.183
E1104H	-10	3,0	17.063	E1104H	5	3,0	8.143	E1104H	20	3,0	2.908
E1103H	-10	3,0	16.874	E1103H	5	3,0	8.599	E1103H	20	3,0	3.112
E1113D	-10	1,0	13.902	E1113D	5	1,0	5.374	E1113D	20	1,0	1.576
E1104H	-10	1,0	15.366	E1104H	5	1,0	6.703	E1104H	20	1,0	2.180
E1103H	-10	1,0	15.487	E1103H	5	1,0	7.152	E1103H	20	1,0	2.341
E1113D	-10	0,3	12.313	E1113D	5	0,3	4.132	E1113D	20	0,3	1.165
E1104H	-10	0,3	13.799	E1104H	5	0,3	5.332	E1104H	20	0,3	1.620
E1103H	-10	0,3	13.837	E1103H	5	0,3	5.720	E1103H	20	0,3	1.735
E1113D	-10	0,1	10.797	E1113D	5	0,1	3.281	E1113D	20	0,1	897
E1104H	-10	0,1	12.686	E1104H	5	0,1	4.246	E1104H	20	0,1	1.272
E1103H	-10	0,1	12.583	E1103H	5	0,1	4.610	E1103H	20	0,1	1.321