



Schlussbericht

zur Bekanntmachung

HighTechMatBau

<p>Zuwendungsempfänger: ASPHALTA Prüf- und Forschungslaboratorium Herr Bernd Dudenhöfer Halenseestraße Innenraum AVUS Nordkurve 14055 Berlin</p>	<p>Förderkennzeichen: 13N13110</p>
<p>Vorhabensbezeichnung: Verbundname: Nachhaltiger High Tech – Asphalt: Schadstoff- und lärmindernd mit neuer Materialverarbeitung und -überwachung (NaHiTAs) Teilvorhaben: Erforschung performanceorientierter Prüfmethode zur Prognose der Leistungsbeständigkeit von Baustoffen und Baustoffgemischen für den Einsatz im Verkehrswegebau</p>	
<p>Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2015 - 30.12.2018</p>	

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Verbundpartner und Zusammenarbeit	4
3	Voraussetzung, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
4	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	5
4.1	Arbeits- und Zeitplan.....	5
4.2	Konzept der Untersuchungen	5
5	Wissenschaftlicher und technischer Stand	5
6	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	7
6.3	Automatisierte-Rheologische-Prüfung mit dem Dynamischen Scherrheometer.....	7
6.3.1	Automatische Justierung der Verformung im Dynamischen Scherrheometer	7
6.3.2	Ableitung der Prüftemperatur und Frequenz	8
6.3.3	Zusammenfassung der Messmethode	9
6.4	Alterung von Bitumen und Titandioxid-Mischungen unter UV-Licht Einstrahlung.....	13
6.5	Eigenschaften der synthetischen Gesteinskörnung	15
6.6	Prüfung der Erosionsbeständigkeit von Abstreukörnungen im Labor	18
7	Ergebnisse der Untersuchungen.....	20
7.1	Prüfung des Einflusses von TiO ₂ auf die Bitumeneigenschaften.....	20
7.1.1	Einfluss des Titandioxids auf die Bindemittleigenschaften im Vergleich zu konventionellen Füllern	22
7.1.2	Einfluss des Titandioxids auf die Alterung von Bitumen.....	24
7.2	Prüfung der Erosionsbeständigkeit von Gesteinskörnungen auf Asphalt	28
8	Zusammenfassung	31
8.1	Entwicklung von optimierten Prüfmethoden	31
8.2	Verwendung von Titandioxid in Granulaten für Asphaltdeckschichten	32
9	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	32
10	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	32
11	Verwertungsmöglichkeiten.....	32
12	Schlusswort.....	33
13	Literaturverzeichnis.....	34
14	Tabellenverzeichnis	35
15	Abbildungsverzeichnis	35

1 Einleitung

Die Verkehrsinfrastruktur bildet die Grundlage für die erfolgreiche Wirtschafts- und Gesellschaftssituation in Deutschland¹. Mit einer Gesamtlänge von 230.702 km nimmt das Straßennetz dabei den bedeutsamsten Anteil ein², wobei es sich überwiegend um Asphaltverkehrswege handelt³. Durch die stetig wachsenden Verkehrszahlen treten insbesondere in stark befahrenen Bereichen Probleme auf, die sich z.B. in erhöhten Schadstoff- und Lärmbelastungen zeigen. So werden die durch die Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) vorgegebenen Jahreshgrenzwerte für die NO₂-Konzentration vielerorts deutlich überschritten⁴, während aufgrund der Lärmbelastung Nationale Verkehrslärmepakete vom BMVBS entwickelt wurden⁵.

Im Rahmen dieses Verbundprojektes konnte ein photokatalytisch wirksames Einbaumaterial erforscht werden, welches die NO_x-Konzentration und den Verkehrslärm reduziert. Die Dauerhaftigkeit und Wirkung des Materials wurden durch Anpassungen am Material, der Asphaltdeckschicht bzw. den Einbauprozessen optimiert und für den praktischen Einsatz an Demonstratoren getestet.

Am Projekt waren 10 Verbundpartner⁶ mit eigenständigen Aufgaben und Zielen beteiligt. Insgesamt trug jedes Einzelziel zur erfolgreichen Erforschung des photokatalytisch wirksamen Einbaumaterials bei. Die ASPHALTA Prüf- und Forschungslaboratorium GmbH hat im Rahmen des Verbundprojektes hauptsächlich die Optimierung der mechanisch-physikalischen Eigenschaften des Einbaumaterials betrieben und weiterhin die Auswirkungen des Einflusses der photokatalytisch aktiven Komponente auf die Eigenschaften des Bitumens untersucht werden.

Das Gesamtprojekt kann in zwei Module gegliedert werden. Im ersten Modul sollten zunächst verschiedene synthetische Gesteinskörnungen mit TiO₂ untersucht und hinsichtlich der photokatalytischen Wirkung sowie der vorgesehenen Verwendung auf Asphaltdeckschichten (Bitumenalterung, Einbindung und Verankerung in der Oberfläche der Asphaltdeckschicht) beurteilt werden.

Wie sich in früheren anwendungsorientierten Forschungsprojekten mit materialtechnischem Hintergrund gezeigt hat, scheitert die spätere Anwendung innovativer Materialien häufig an deren Verarbeitungsmöglichkeit. Dies sollte in besonderem Maße berücksichtigt werden, indem im zweiten Modul neben der Ausführung des Demonstrators die Verarbeitungstechniken des photokatalytisch wirksamen Materials und dessen Wechselwirkung mit dem Einbauwerkzeug im Mittelpunkt stehen. Dadurch sollte eine zügige, auch großtechnische Umsetzung der Forschungsergebnisse nach der Erstellung der Demonstratoren ermöglicht werden. Weiterhin soll eine Applikationseinheit konzipiert werden, die eine sparsame und dauerhafte Einbindung der photokatalytisch aktiven Baustoffe ermöglicht, ohne dass dabei die lärmindernde und griffige Oberfläche einer Fahrbahn negativ beeinflusst wird.

Um die Eigenschaften/Einflüsse des TiO₂, der Gesteinskörnung bzw. schlussendlich fertig gestellten Asphaltdeckschicht zu untersuchen, wurden performanceorientierte Prüfmethode erforscht. In den nachfolgenden Bericht sind die wichtigsten Untersuchungen und Untersuchungsergebnisse dargestellt.

Innerhalb des Projektes wurden neben den hier dargestellten Lösungsansätzen mehrere Gesteine, Mikroplatten, Platten und künstlich geformte Körper mit definierten Oberflächen und Geometrien hergestellt und untersucht. Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse und Prüfkörper erfüllen die innerhalb des Projektes gesteckten Ziele einer lärmindernden, griffigen und Stickstoffdioxid abbauenden Oberfläche.

¹ (Friedrich-Ebert-Stiftung, 2012)

² (Statistische Bundesamt, 2019)

³ (Helm, 2011)

⁴ (Bolte & Flassak, 2012)

⁵ (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2019)

⁶ siehe Abschnitt 2

2 Verbundpartner und Zusammenarbeit

Das Projekt wurde mit nachfolgenden Verbundpartnern durchgeführt:

- TPA GmbH, Gesellschaft für Qualitätssicherung und Innovation (TPA)
- TU Berlin, Fachgebiet Baustoffe und Bauchemie (TUB)
- Technische Hochschule Köln, Institut für Landmaschinentechnik (THK)
- Universität Kassel, Fachgebiet Chemie mesoskopischer Systeme (Uni Kassel)
- F. C. Nüdling Betonelemente GmbH & Co. KG, Basalt- und Betonhersteller (FCN)
- Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, Luftreinhaltung, Klima, Aerodynamik, Umweltsoftware und Olfaktometrie (Lohmeyer)
- Müller-BBM GmbH, Bereiche der Akustik, der Bauphysik und des Umweltschutzes (Müller BBM)
- Bomag GmbH, Hersteller von Baumaschinen (BOMAG)
- MOBA Mobile Automation AG, Qualitätssysteme in der mobilen Automation (MOBA)
- ASPHALTA Prüf- und Forschungslaboratorium GmbH (ASPHALTA)

Um die Erfahrung der einzelnen Projektpartner gezielt zusammenzuführen wurden Arbeitsgruppen gebildet. Dies förderte die Zusammenarbeit und ermöglichte eine gezielte Lösungsfindung bei den zu bearbeitenden Teilproblemen.

- AG 1: Konzeption des Einbaumaterials
TUB, FCN, ASPHALTA, Lohmeyer
- AG 2: Akustischen Eigenschaften
TUB, Müller-BBM
- AG 3: Bitumenuntersuchungen
TUB, Uni Kassel, ASPHALTA, TPA
- AG 4: Ablegeinheit und Qualitätsüberwachung
THK, TPA, BOMAG, MOBA

3 Voraussetzung, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Voraussetzungen unter denen das Forschungsprojekt durchgeführt wurde, können als sehr gut bezeichnet werden. Alle Projektpartner konnten die im Rahmen des Forschungsprojekts „Nachhaltiger High Tech – Asphalt: Schadstoff- und lärmindernd mit neuer Materialverarbeitung und -überwachung (NaHiTAs)“ gesammelten Erfahrungen nutzen, um einen erfolgreichen Projektabschluss zu realisieren. Die Besonderheit des Forschungskonsortiums bestand in der interdisziplinären Zusammenarbeit der beteiligten Forschungspartner, welche aufgrund ihrer engen Kooperation untereinander ein Gelingen des Projektes ermöglichten.

4 Planung und Ablauf des Vorhabens

4.1 Arbeits- und Zeitplan

Die folgende Aufstellung zeigt eine einfache Übersicht der Arbeits- und Zeitplanung des Projektes mit grober Spezifizierung der Arbeitsinhalte für die verschiedenen Arbeitspakete:

	Projektjahr Quartal	2015		2016				2017				2018			
		3.	4.	1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.
Modul 1	AP 0 Lastenheft														
	AP 1 Konzeption photokatalytischen Einbaumaterials														
	AP 2 Modellierung der photokatalytischen Aktivität														
	AP 3 Untersuchung des Alterungs- und Verjüngerungsverhaltens von Bitumen														
Modul 2	AP 4 Optimierung der akkustischen Eigenschaften der Fahrbahnbeläge														
	AP 5 Konzeption, Bau und Test der Demonstratoren														
	AP 6 Erforschung der Automatisierungsmodule														
	AP 7 Konzeption der Qualitätsüberwachung														
	AP 8 Einbaustest														

Projektverlängerung

Legende:

	Arbeitspakete an denen der Teilvorhabensantragsteller nicht beteiligt ist
	Arbeitspakete in denen der Teilvorhabensantragsteller im Umfang von i Monaten im Quartal des Forschungsjahres beteiligt ist

Abbildung 1: Arbeits- und Zeitplan

Das Projekt wurde kostenfrei um sechs Monate verlängert, um die Möglichkeit der Erprobung weiterer Demonstratoren innerhalb der Projektlaufzeit bzw. der Bausaison des Straßenbaus zu nutzen.

4.2 Konzept der Untersuchungen

Während der Projektlaufzeit wurden unterschiedliche Methoden zur Herstellung von synthetischen Gesteinskörnungen von den Verbundpartnern erforscht. Die durchgeführten Untersuchungen können in drei Schwerpunkte gegliedert werden, die dazu dienen um folgende Fragen zu beantworten:

- (1) Nimmt Titandioxid durch die photokatalytische Wirkung Einfluss auf die Bindemittelalterung?
- (2) Welche Eigenschaften weist eine synthetische Gesteinskörnung mit Titandioxid gegenüber konventionellen Gesteinen des Straßenbaus auf und welche morphologischen Formen sind für die Praxis geeignet?
- (3) Wie kann die dauerhafte Einbindung einer Gesteinskörnung auf einer Asphaltdeckschicht durch Laborversuche prognostiziert werden?

Zur Beantwortung der Fragen wurden performanceorientierte Prüfmethode abgeleitet. Die Ergebnisse dieser Prüfmethode wurden mit bekannten Materialien oder den Ergebnissen der Verbundpartner verglichen und beurteilt.

5 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Widerstand von Gesteinskörnung gegen Polieren nach dem Wehner/Schulze-Verfahren

Derzeit wird das Merkmal „Griffigkeit“ bei der Konzeption von Baustoffgemischen für Fahrbahndeckschichten aus Asphalt und Beton über den PSV der Gesteinskörnung 8/10 prognostiziert. Diese Vorgehensweise ist nachgewiesenermaßen nicht schlüssig und führt zu Fehlbeurteilungen⁷. Bereits aus wissenschaftlichen Untersuchungen der 60er und 70er Jahre ist bekannt, dass ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Polierwiderstand von Gesteinskörnungen und der Griffigkeit von Straßendecken besteht⁸. Dieser lässt sich aber nur dann folgerichtig ableiten, wenn das Gesteinskörnungsgemisch in seiner realen Korngrößenverteilung

⁷ (Dames & Lindner, 1988)

⁸ (Dames & Lindner, 1990)

lung untersucht wird. Diese Erkenntnisse basieren auf Untersuchungen mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze an der TU Berlin⁹. Das Verfahren ist in den TP Gestein-StB Teil 5.4.2 beschrieben. Es existiert ein Bewertungshintergrund für das Prüfverfahren auf Basis einer über 30-jährigen Sammlung von Untersuchungsdaten aus Forschungsvorhaben und Routineprüfungen für die Gesteinsindustrie mit der ersten Gerätegeneration. Die Standardprüfungen werden an feinen Gesteinskörnungen 0,2/0,4 mm, an groben Gesteinskörnungen 2/5, 5/8 und 8/11 mm durchgeführt. Aus dem Bewertungshintergrund der 1. Gerätegeneration wurden Anforderungswerte abgeleitet, die in Länderregelungen¹⁰ bzw. einem Merkblatt der fgsv¹¹ umgesetzt wurden.

Ende der 90er Jahre waren die noch existierenden Prüfeinrichtungen nach dem Berliner Vorbild in der BAST, in Delft und Wien nicht mehr gebrauchstauglich. Dies bewog 1999 dazu, einen modernisierten Nachbau durchzuführen, der die wesentlichen Maschinenparameter beibehielt. Bei internen und unveröffentlichten Vergleichsuntersuchungen stellte sich heraus, dass mit den Prüfeinrichtungen der neuen Generation ein abweichendes Messwertniveau ermittelt wird¹². In Österreich hat man bereits reagiert und einen neuen Bewertungshintergrund mit Anforderungswerten für die in Österreich vorkommenden feinen Gesteinskörnungen geschaffen¹³.

Da Prüfeinrichtungen der 1. Generation nicht mehr zur Verfügung stehen, ist eine Transformation des Bewertungshintergrundes durch Vergleichsuntersuchungen nicht möglich.

Prüfung von Bindemittel

Zur Untersuchung von Bitumen steht eine Vielzahl an standardisierten Untersuchungsmethoden zur Verfügung, welche zur Charakterisierung von Bitumen herangezogen werden. Davon vor allem zu nennen sind:

- Der Erweichungspunkt Ring und Kugel gemäß DIN EN 1427¹⁴:
Beschreibt eine Temperatur, ab welcher das Bitumen bei konstanter Last zähflüssig wird.
- Die Nadelpenetration gemäß DIN EN 1426¹⁵:
Beschreibt eine Penetration bei einer Temperatur von 25°C und einer Zeit von 5 s.
- Die Kraftduktilität gemäß DIN EN 13589¹⁶:
Beschreibt die Kohäsion eines Bindemittels bei einer Temperatur und gleichbleibender Ausziehggeschwindigkeit.

Neben diesen Prüfungen stehen noch weitere Untersuchungsmethoden zur Beschreibung der Bitumeneigenschaften zur Verfügung (vgl. TL Bitumen-StB¹⁷). Allen gleich ist, dass Sie nur einen Kennwert oder eine Eigenschaft bei einer Temperatur, Belastungszeit und/oder Kraft wiedergeben. Um die Eigenschaften von Bitumen mit oder ohne den Einfluss von Titandioxid über eine Spanne der Gebrauchstemperatur und Beanspruchung zu beschreiben, wurde eine Methode mit dem Dynamischen Scherrheometer (DSR) erforscht. Die Standardprüfung mit dem Dynamischen Scherrheometer sieht eine Prüftemperatur zwischen 30°C und 90°C vor, bei einer Frequenz innerhalb des linear-viskoelastischen Verhaltens (AL DSR (T-Sweep)¹⁸). Dies entspricht nicht den Gebrauchstemperaturen von Bitumen auf der Straße, welche in einem Bereich zwischen etwa -15°C und 60°C liegen. Extreme Witterungen mit geringerer Wiederkehrzeit können zu höheren oder niedrigeren Temperaturen führen. Die Verkehrsstärke weist über einen Betrachtungszeitraum von Tagesstunden, Wochen oder Monaten verschiedene Schwankungen auf einer Strecke auf, die zu unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten führen. Diese Wechsel der frequentieren Belastung können mit dem DSR standardisiert simuliert werden, um die Empfindlichkeit der Bindemittel gegen die Frequenz zu erfassen.

⁹ (Dames & Lindner, 1989)

¹⁰ (Einführung der TL Min-StB 94 In Berlin, 1994)

¹¹ (Merkblatt für die Herstellung von Oberflächentexturen auf Fahrbahndecken aus Beton, 2000)

¹² (Dudenhöfer & Lindner, 2004)

¹³ (Kirchmaier & Pfeifer, 2009)

¹⁴ (DIN EN 1427, 2015)

¹⁵ (DIN EN 1426, 2015)

¹⁶ (DIN EN 13589, 2018)

¹⁷ (TL Bitumen-StB 07/13, 2013)

¹⁸ (AL DSR-Prüfung (T-Sweep), 2014)

6 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

6.3 Automatisierte-Rheologische-Prüfung mit dem Dynamischen Scherrheometer

Maßgebend für das Vorhaben war die Fragestellung, ob das photokatalytisch aufgenommene NO_x in der Kontaktfläche zum Bindemittel der Asphaltdeckschicht zu einer beschleunigten Alterung führt und ggf. Maßnahmen erforderlich sind.

6.3.1 Automatische Justierung der Verformung im Dynamischen Scherrheometer

Prüfungen mit dem Dynamischen Scherrheometer setzen voraus, dass der Erweichungspunkt Ring und Kugel, die Penetration und/oder die Bitumensorte/-art bekannt sind. Bei der Untersuchung von Bitumen aus realen Straßen, muss hierzu eine große Menge von Bitumen unter Verwendung von Lösemittel zurückgewonnen werden, dies gilt insbesondere für die Prüfung der Penetration. Weiterhin ist bei rückgewonnenen Bitumen häufig die Art und Sorte nicht bekannt. Folglich müssen Vorversuche durchgeführt werden, mit welchen die maximalen Verformungen der Hauptprüfung quantifiziert werden. Somit wird gewährleistet, dass nicht durch eine zu geringe Auslastung des Drehmomentes die Präzision und somit die Beurteilung der Ergebnisse verfälscht wird. Diese Vorversuche werden als Amplituden-sweeps bezeichnet. Dabei wird der Bereich der Verformung quantifiziert, welcher keine irreversiblen Strukturverformungen an der Probe erkennen lässt (vgl. Abbildung 2).

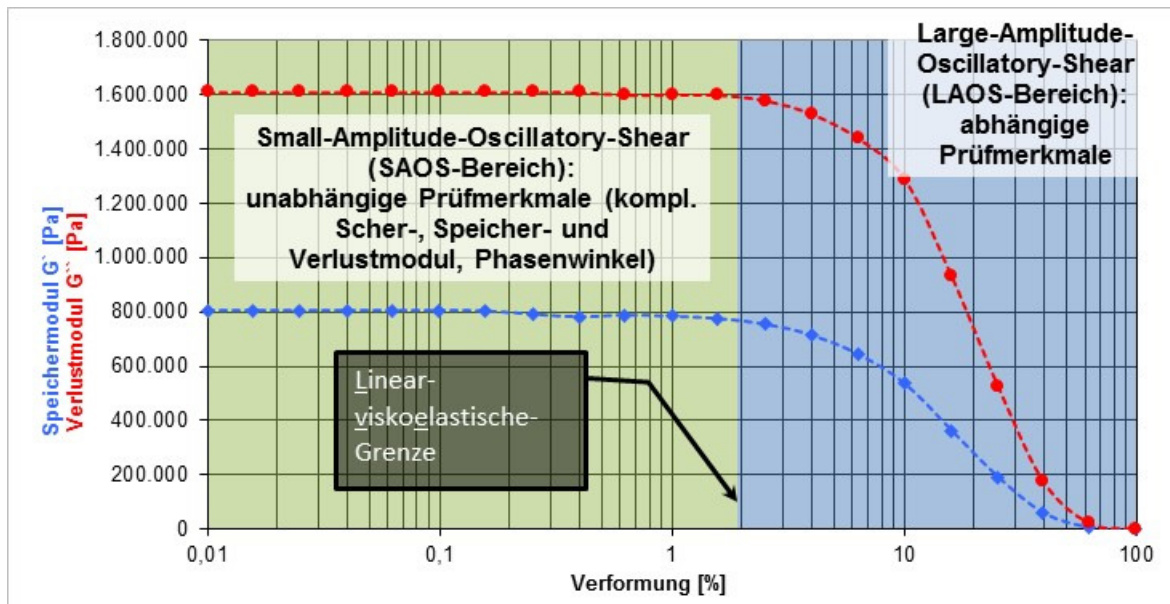


Abbildung 2: exemplarischer Amplitudensweep bei 30°C und 10 Hz

Das Ergebnis der Messungen charakterisiert die LVE-Grenze (Übergang vom SAOS- in den LAOS-Bereich Abbildung 2), welche die maximal mögliche Verformung wiedergibt, bei welcher keine strukturellen Veränderungen im Bitumen entstehen. Die LVE-Grenze ist abhängig von der Prüftemperatur, der Frequenz und der Bitumenart/-sorte. Folglich muss der Versuch bei allen Prüftemperaturen und Frequenzen für alle Proben erfolgen. Dies setzt wiederum eine hohe Anzahl an Proben und einen hohen Zeitbedarf voraus.

Zur Versuchsoptimierung wurden an den Bitumen im Ausgangszustand Amplitudensweeps bei 0°C, 30°C, 60°C und 90°C und jeweils einer Frequenz von 0,1 Hz und 10 Hz durchgeführt. Anschließend wurden die LVE-Grenzen hinsichtlich eines signifikanten Zusammenhangs mit konstanten Prüfmerkmalen (komplexer Schermodul, Phasenwinkel, Speicher- und Verlustmodul) innerhalb des SAOS-Bereiches unabhängig von der Prüftemperatur und -frequenz ausgewertet.

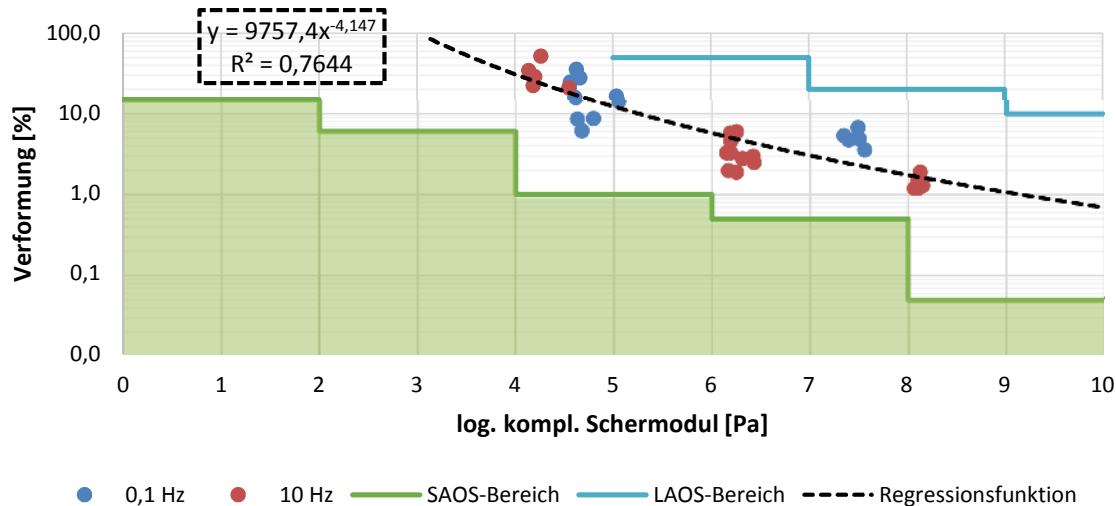


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen dem Phasenwinkel und der Verformung, unabhängig von der Prüftemperatur und der Frequenz (Temperatur zwischen 0 und 90°C, Frequenz zwischen 0,1 und 10 Hz, n=35)

Entsprechend den Regressionsanalysen besteht zwischen der Verformung und den Prüfmerkmalen komplexer Scher-, Speicher- und Verlustmodul sowie dem Phasenwinkel ein guter Zusammenhang (Bestimmtheitsmaß größer 60 %). Beim Zusammenhang zwischen Verformung und komplexem Schermodul konnte sowohl ein signifikanter Zusammenhang, als auch eine gute Korrelation ($R^2=76\%$) gefunden werden (siehe Abbildung 3). Somit wurde das komplexe Schermodul als Abbruchkriterium für eine zu hohe Verformung (Messung im SAOS-Bereich) bzw. zu niedrige Verformung (Messung im LAOS-Bereich) ausgewählt. Aufgrund der relativ hohen Streuung der Kennwerte um die Regressionsfunktion wurden die Begrenzungen des SAOS -Bereiches (grüner Bereich in Abbildung 3) mit einem Vorhaltemaß in fünf Teilbereiche gegliedert. Die hohe Streuung ist auf die unterschiedlichen Frequenzen, Temperaturen und Bitumensorten/-arten zurück zu führen. Der Zusammenhang wurde in die Software des DSR implementiert, sodass bei den Messungen automatisch entschieden wird welche Verformung eingestellt werden kann.

Entsprechend dem Ziel des Forschungsvorhabens waren auch automatisierte Untersuchungen im LAOS Bereich geplant. Innerhalb der Bearbeitergruppe wurde entschieden, dass Untersuchungen im Tieftemperaturbereich zielführender für das Vorhaben sind. Dementsprechend wurde nach Rücksprache mit der VDI das Konzept angepasst und ein entsprechendes Messsystem (CTD180 und eine Festkörpereinspannung in Abbildung 6) innerhalb des Forschungsprojektes beschafft.

6.3.2 Ableitung der Prüftemperatur und Frequenz

Um die Eigenschaften der Bitumen hinsichtlich des späteren Anwendungszweckes beurteilen zu können, ist es nötig einen Temperatur- und Frequenzbereich zu definieren, welcher den Gegebenheiten des Einsatzbereiches entspricht.

Duthie empfiehlt einen Frequenzbereich von 0,4 bis 260 Hz, welcher einer Geschwindigkeit von 2 km/h bzw. 150 km/h entspricht¹⁹. Nach Mezger entspricht eine Frequenz von 1,59 Hz jener Belastung eines Lastkraftwagens mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h²⁰. Jener Zusammenhang zwischen der Frequenz und der Verkehrsgeschwindigkeit erscheint plausibel, da mit zunehmender Geschwindigkeit der zeitliche Einfluss bezogen auf einem Querschnitt der Straße geringer wird. Währenddessen wird mit abnehmender Geschwindigkeit der zeitliche Einfluss auf einen Querschnitt höher und dementsprechend die Frequenz geringer. Inwieweit die Relationen zwischen Frequenz und Verkehrsgeschwindigkeit zutreffen, kann nicht beurteilt werden.

¹⁹ (Duthie, 1972)

²⁰ (Radenberg / Gehrke, 2012)

Der zu betrachtende Temperaturbereich ist abhängig von verschiedensten thermodynamischen, sowie physikalischen und meteorologischen Prozessen und der Lage der Schicht im gebundenen Oberbau²¹. Unabhängig von den Einflussfaktoren definierten Wellner und Kayser den Temperaturbereich der Fahrbahnoberfläche zwischen -12,5 bis 47,5 °C [32]. Jener Bereich kennzeichnet sich durch eine erhöhte statistische Wahrscheinlichkeit.

Eine eindeutige Definition der Randbedingungen (Prüftemperatur und Frequenz), welche den Praxisbedingungen entspricht, ist aufgrund der stark wechselnden Gegebenheiten (Geschwindigkeit, Wetterlage, örtliche Begebenheiten) nicht möglich. Für eine abgesicherte Aussage über Bindemittleigenschaften reichen Grenzbetrachtungen. Daher wurde die Prüftemperatur zwischen -15°C und 90°C in 10 Kelvin Schritten und die Frequenz in vier Stufen (0,1 Hz / 0,4 Hz / 1,59 Hz /10 Hz) gewählt. Der gewählte Temperaturbereich schließt den in der Praxis relevanten Temperaturbereich ein. Die gewählten Frequenzschritte umfassen die für verschiedene Geräte unterschiedlicher Hersteller machbaren Prüffrequenzen.

6.3.3 Zusammenfassung der Messmethode

Der automatisierte Ablauf für das DSR kann wie folgt dargestellt werden:

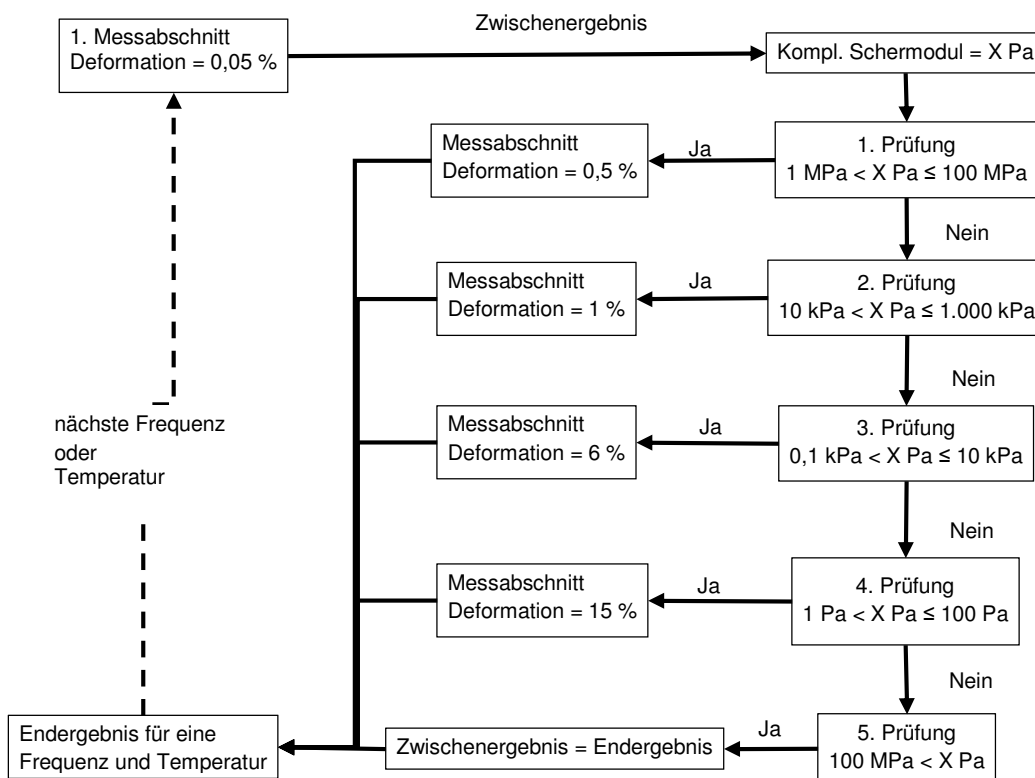


Abbildung 4: Ablaufschema der automatisierten Prüfung mit dem DSR

Nachdem ein Endergebnis für eine Frequenz oder Temperatur entsprechend der Abbildung 4 ermittelt wurde, springt das Programm automatisch zur nächst höheren Frequenz oder stellt nach Messung aller Frequenzen die Temperatur um 2 Kelvin/Minute höher. Vor jeder Temperaturstufe wird eine Temperatureinstellungsdauer von 10 Minuten mit konstanter Temperatur, ohne Aufbringung einer Last oder Verformung gehalten.

Als Gesamtergebnis der Messungen können die Isochronen (10 Hz, 1,59 Hz, 0,4 Hz und 0,1 Hz) des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels gegen die Temperatur aufgetragen werden (vgl. Abbildung 5).

²¹ (Wellner / Kayser, 2007)

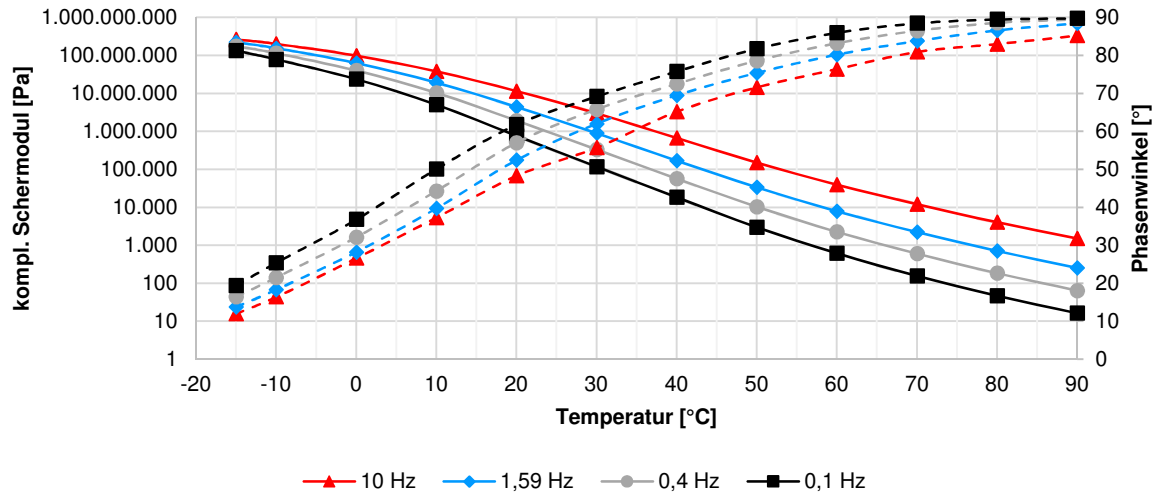


Abbildung 5: exemplarische Isochronen einer DSR Messung an einem Straßenbaubitumen 50/70

Der Temperaturbereich von 20°C²² bis 90°C konnte mit einem konventionellen Messsystem (25 mm planparallele Platten) untersucht werden. Für den Tieftemperaturbereich bis -15°C musste ein spezielles Messsystem (Festkörpereinspannung) und eine dazugehörige Kammer (CTD 180) zur Temperierung beschafft werden (vgl. Abbildung 6). Mit der Festkörpereinspannung wird durch den höheren Probekörper der Widerstand verringert und die Präzision erhöht. Dies ermöglicht auch die Messung in tieferen Temperaturbereichen mit höheren Steifigkeiten.

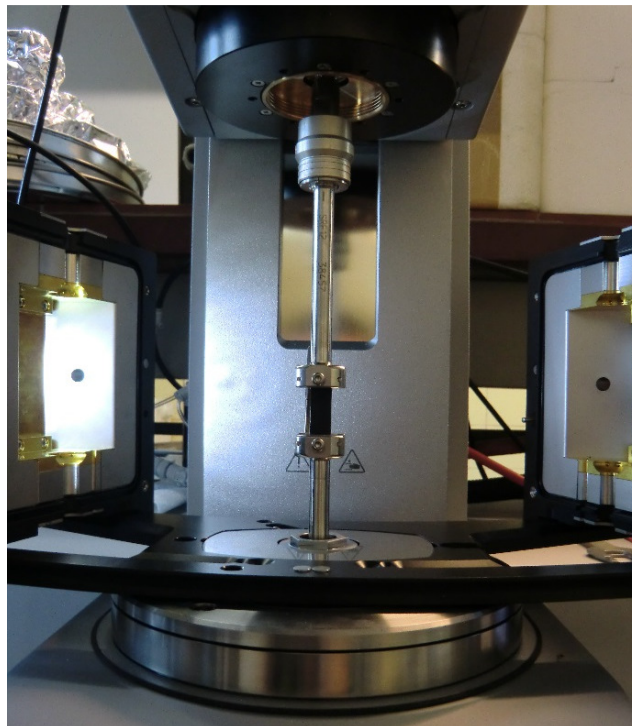


Abbildung 6: eingespannter Bitumenstab bei offenem Konvektionsofen (CTD 180)

Um gezielt die Gebrauchseigenschaften der Bindemittel zu beschreiben und vergleichen zu können wurden folgende drei Kennwerte aus den Messdaten abgeleitet:

²² Zwischen 10°C und 30° je nach Alter und Steifigkeit der Bindemittel.

- Bei tiefen Gebrauchstemperaturen wird eine hohe Kälteflexibilität gefordert, um kryogenen Rissen vorzubeugen. Dies kann primär über eine geringe Steifigkeit / komplexes Schermodul und sekundär über einen hohen Anteil des viskosen Verhaltens bzw. einen hohen Phasenwinkel bei -10°C erreicht werden. Maßgebend bei tiefen Temperaturen ist eine Frequenz von 10 Hz (schnell fahrender Verkehr), welche eine hohe Steifigkeit und ein geringes viskoses Verhalten gegenüber den anderen Prüffrequenzen fördert.

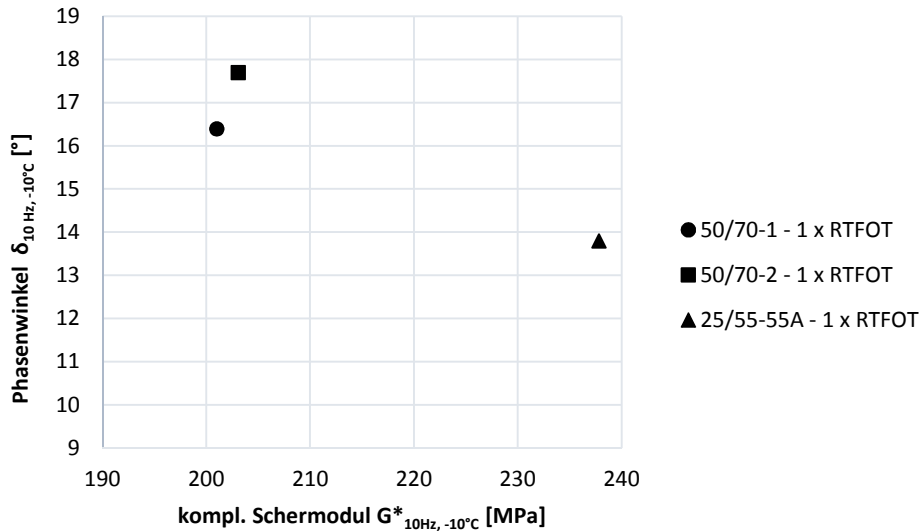


Abbildung 7: Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Dynamischen Scherrheometer im Bezug zur Kälteflexibilität der Ausgangsbitumen

Die Untersuchungen an den Ausgangsbitumen zeigten eine sehr gute Differenzierbarkeit in der Kälteflexibilität zwischen Straßenbaubitumen und Polymermodifizierten Bitumen (vgl. Abbildung 7). Demnach sind die Straßenbaubitumen aufgrund der geringeren Steifigkeit und des höheren Phasenwinkel günstiger im Sinne der Kälteflexibilität einzustufen. In weitergehenden Untersuchungen konnte bereits festgestellt werden, dass die zwei Kennwerte Phasenwinkel und kompl. Schermodul bei -10°C noch kein ausreichendes Indiz für die Kälteflexibilität darstellen. Es wird vermutet, dass zumindest eine dritte Komponente Einfluss auf das Gebrauchsverhalten bei tiefen Temperaturen nimmt.

- Bei hohen Gebrauchstemperaturen kann das Bindemittel durch eine hohe Steifigkeit und ein hohes Maß an elastischem Verhalten (kleiner Phasenwinkel) das Korngerüst des Asphaltmischgutes gegen bleibende Verformungen mit unterstützen. Die maßgebliche Betrachtungstemperatur ist wie bei der Kälteflexibilität abhängig von den Umgebungsbedingungen (direkte Sonneneinstrahlung, Schatten in einer Allee, Aufhellungsgestein usw.). Zum Zwecke der Vereinheitlichung wurde die Äquisteifigkeitstemperatur (T_{BTSV}) und der zugehörige Phasenwinkel (δ_{BTSV}) aus der Isochrone mit einer Frequenz von 1,59 Hz ersatzweise entsprechend der AL DSR-Prüfung (BTSV) ²³berechnet. In nachfolgender Abbildung 11 sind die Ergebnisse vor den Erwartungsbereichen der TU Braunschweig dargestellt. Da eine von der AL DSR-Prüfung (BTSV) abweichende Messmethodik gewählt wurde, sind geringfügige Abweichungen der Ausgangsbindemittel im Bezug zu den Erwartungsbereichen festzuhalten. Der Charakter der Ergebnisse bleibt jedoch bestehen. Mit zunehmender Äquisteifigkeitstemperatur nimmt auch die Viskosität der Bindemittel ab. Mit abnehmenden Phasenwinkel im Anlieferungszustand nimmt die Modifizierung zu. Straßenbaubitumen weisen einen Phasenwinkel um 80° auf. Mit zunehmender Alterung nimmt die Äquisteifigkeitstemperatur zu und der Phasenwinkel ab.

²³ (AL DSR-Prüfung (BTSV), 2017)

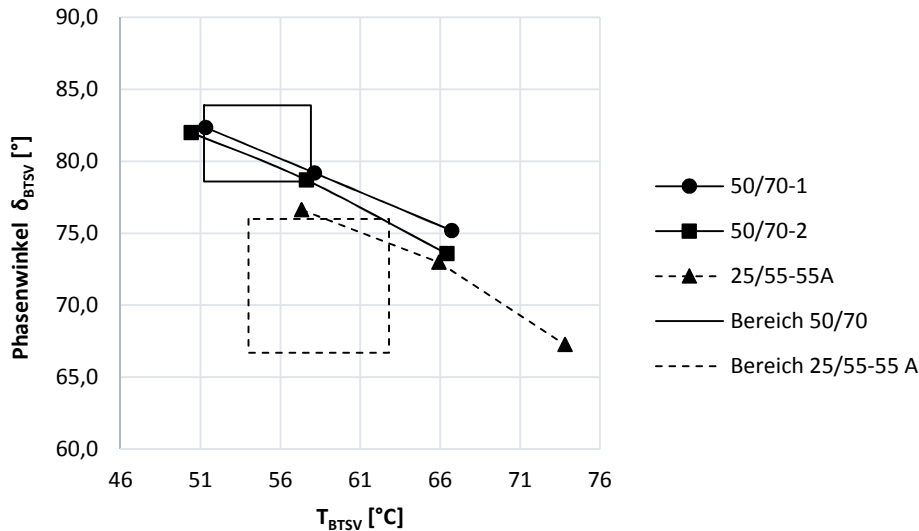


Abbildung 8: Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Dynamischen Scherrheometer zum Gebrauchsverhalten bei hohen Temperaturen an Ausgangsbitumen (1. Punkt, links: Ausgangszustand) und gealterten Bitumen (2. Punkt, Mitte: nach RTFOT²⁴; 3. Punkt, rechts: nach RTFOT und PAV²⁵)

- Unter Berücksichtigung dessen, dass sich das rheologische Verhalten der Bindemittel durch einen Wechsel der Frequenz bzw. der Geschwindigkeiten infolge der Verkehrsbelastung verändern kann, wurde vereinfacht die Frequenzempfindlichkeit der Bindemittel bei einer mittleren Temperatur von 30°C wie folgt als charakteristischer Kennwert mit einbezogen:

$$\epsilon_{30^\circ C} = \frac{G_{0,1Hz}^*}{G_{10Hz}^*} * 100 \text{ in } \%$$

Je höher der Kennwert ($\epsilon_{30^\circ C}$) ist, desto geringer ist die Empfindlichkeit gegenüber der Geschwindigkeit.

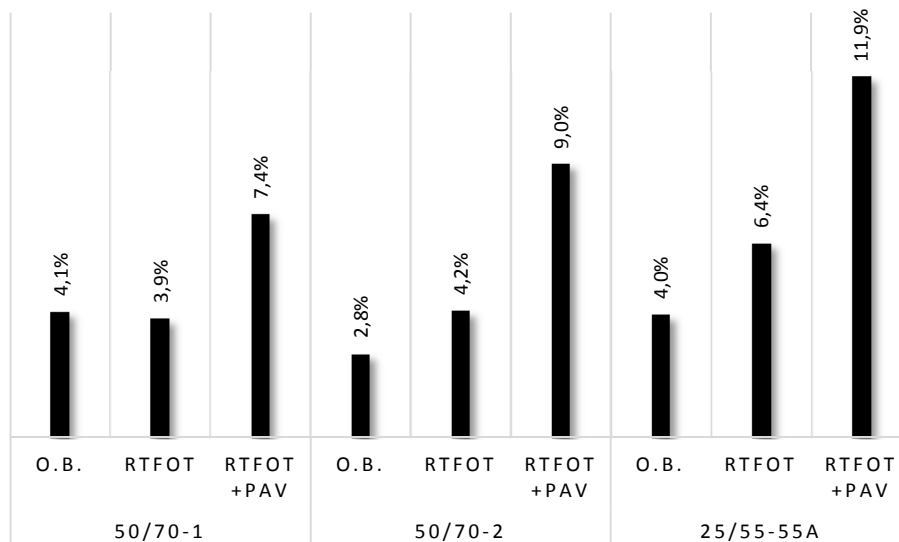


Abbildung 9: Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Dynamischen Scherrheometer zur Frequenzempfindlichkeit von Bitumen (o.B. – frisches Ausgangsbitumen, RTFOT, PAV – nach Laboralterung)

²⁴ Die Prüfung wird als RTFOT-Verfahren ("Rolling Thin Film Oven Test") bezeichnet, d. h. Prüfung mit rollierendem dünnen Film gemäß DIN EN 12607-1. Durch das RTFOT-Verfahren werden die Bindemittel einer standardisierten Kurzzeitalterung im Laboratorium unterzogen.

²⁵ Die Prüfung wird als PAV-Verfahren ("Pressure Ageing Vessel") bezeichnet. Das Verfahren beschreibt die Alterung von Bindemitteln in Schalen bei erhöhten Temperaturen in einem Druckalterungsbehälter gemäß DIN EN 14769. Durch das PAV-Verfahren werden die Bindemittel einer standardisierten Langzeitalterung im Laboratorium unterzogen.

An den Ausgangsbindemitteln konnte festgestellt werden, dass sich die Frequenzempfindlichkeit zwischen den Bitumenarten kaum unterscheidet (vgl. Abbildung 9). Erst mit zunehmenden Alterungsfortschritt sind Spreizungen erkenntlich.

Die Untersuchungen wurden an allen Bitumen und Mischungen nach dem RTFOT-Verfahren und nachfolgenden Alterungen durchgeführt. Die Ergebnisse der jeweiligen Untersuchungen sind im Abschnitt 7 entsprechend den Fragestellungen aufbereitet dargestellt.

Mit der dargestellten Prüfmethode ist es möglich die abgeleiteten Gebrauchseigenschaften der Bindemittel zu untersuchen und zu bewerten. Das Ziel des Teilprojektes wurde erfüllt.

6.4 Alterung von Bitumen und Titandioxid-Mischungen unter UV-Licht Einstrahlung

Die photokatalytische Reaktion des Titandioxides musste im labortechnischen Maßstab aktiviert werden, um zu untersuchen, ob das Titandioxid selbst oder mögliche Abbauprodukte des Prozesses zu einer Beschleunigung des Alterungsverhaltens von Bitumen führen können.

Das mit dem Einzelkorn an der Grenzfläche in Berührung kommende Bindemittel ist im Vergleich zum Gesamtbindemittelgehalt des Asphalttes als vernachlässigbar gering einzuschätzen. Für die Bindung des Einzelkornes und mögliche oberflächennahe Schäden ist es jedoch von hoher Priorität zu wissen, ob mit Titandioxid beaufschlagte Asphaltoberflächen zu einer beschleunigten Alterung neigen. Für die Beantwortung der Frage war es notwendig eine größere Masse an Bitumen-Titandioxid-Mischung für die Untersuchungen für alle Projektpartner zur Verfügung zu stellen.

Um dies zu realisieren wurden zwei Konzepte verfolgt, die nachfolgend vorgestellt werden:

- (1) Mischung von Titandioxid mit unterschiedlichen Anteilen in Bitumen:
Das Einmischen von Titandioxid in Bitumen ist vergleichbar mit der Herstellung eines Mastix aus Bitumen und Füller. Diese Vorgehensweise erlaubt die einheitliche und mengenmäßig größere Herstellung von Untersuchungsproben für alle Projektpartner. Zur Mischung wurden nur Bitumen verwendet, welche bereits einer RTFOT-Alterung im Laboratorium unterzogen worden waren. Somit war gewährleistet, dass nur Kurzzeit gealterte Proben, wie Sie auch in der Praxis beim Ablegen der Körner vorliegen, verwendet wurden.
- (2) Abstreuen von Körnern mit Titandioxid auf Bitumenoberflächen:
Die im Labor abgestreuten Oberflächen sind den in der Praxis angestrebten Bedingungen nahezu identisch. Sie eignen sich jedoch nicht zur Massenherstellung von Untersuchungsproben. Innerhalb des Teilprojektes wurden die so hergestellten Proben auf einem Bewitterungsstand über 367 Tage bei der ASPHALTA Prüf- und Forschungslaboratorium GmbH durch die natürliche Witterung vom Oktober 2017 bis Oktober 2018 beansprucht. Bereits nach 167 Tagen erfolgte eine erste Zwischenprobenahme. Die Proben wurden an die Projektpartner zur Untersuchung geschickt und in Dynamischen Scherrheometer untersucht. Die Ergebnisse der praxisnahen Alterung wurden zur Validierung der Untersuchungsergebnisse von den Mastix-Proben aus (1) herangezogen.



Abbildung 10: Bewitterungsstand mit abgestreutem Bitumen in einer Schichtdicke von 0,41 mm inkl. Referenzblech ohne Abstreuerung

Die Mastixproben wurden in unterschiedlicher Art und Weise im Labormaßstab gealtert. Nachfolgende Darstellung zeigt das Konzept der Alterung:

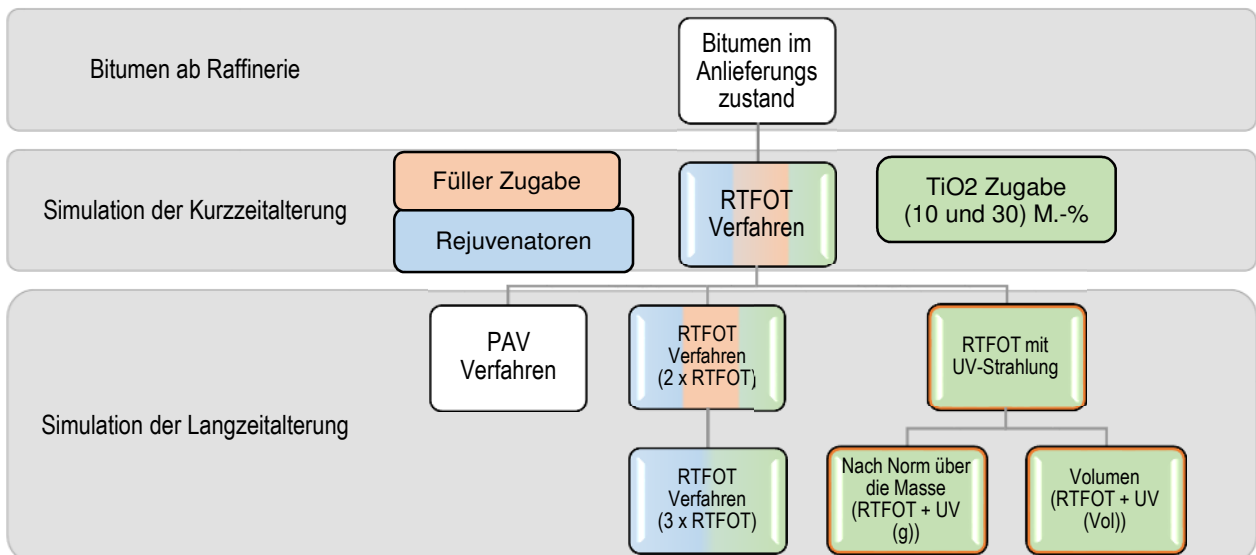


Abbildung 11: Konzept der Bindemittelalterung und Zugabe von Titandioxid

In jeder der drei Alterungsstufen (vgl. Abbildung 11) wurden die Bindemittel ohne Modifizierung mit Titanoxid, Füller oder Rejuvenatoren untersucht. Erst nach der RTFOT Alterung erfolgten die Modifizierungen. Die Untersuchungen nach Abschnitt 6.3 erfolgten bereits am frisch angemischtem Mix (in Abbildung 11 „RTFOT Verfahren“) und nach weiteren Alterungen.

Das RTFOT und PAV Verfahren stellen standardisierte Untersuchungen dar, welche von dafür nach RAP-Strat anerkannten Laboren vorgehalten werden müssen. Für eine schnelle Umsetzung einer UV-Alterung in der Praxis sind diese beiden Grundverfahren daher geeignet. Um den Kontakt der UV-Strahlung zur gesamten Probe zu gewährleisten, wurde das RTFOT-Verfahren gewählt, in welchem die Bindemittelprobe durch die rotierende Bewegung durchmischt wird.

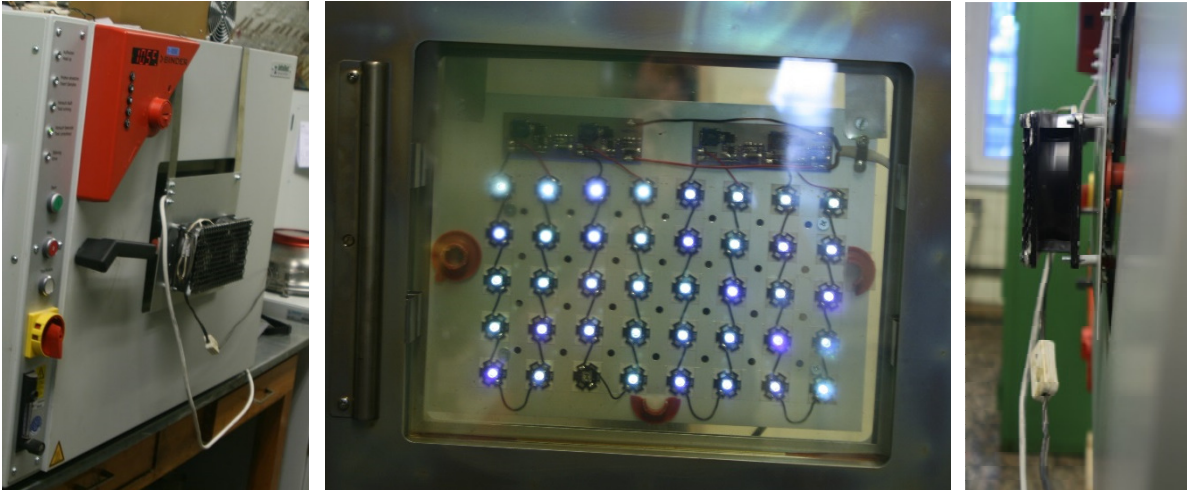


Abbildung 12: Umgebauter RTFOT-Ofen mit UV-LED Panel (links: vordere Seitenansicht, Mitte: LED Panel hinter dem Einfachsicherheitsglas, Rechts: Seitenansicht mit Lüftern)

Nach dem Umbau wurde die an der Probe eintreffende UV A-Strahlung durch den Projektpartner der TU Berlin mit einer Wellenlänge von 373 nm und Strahlleistung von $0,868 \text{ W/m}^2$ gemessen. Im Schrank wurden Spiegel installiert, um die Strahlung optimal verteilen zu können.

Mit der dargestellten Prüfmethode ist es möglich die UV-Alterung im Laboratorium standardisiert durchzuführen. Das Ziel des Teilprojektes wurde erfüllt.


6.5 Eigenschaften der synthetischen Gesteinskörnung

Um die künstlich hergestellte photokatalytisch aktive Gesteinskörnung auf einer Asphaltdeckschicht im unmittelbaren Kontakt mit dem Fahrzeugreifen einzusetzen, müssen unterschiedlichste Gebrauchseigenschaften geprüft und nachgewiesen werden. Bei der Umsetzung dieser Prüfungen wurden die in den TL Gestein-StB bestehenden Anforderungen für Abstreumaterialien zu Grunde gelegt. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf folgenden Eigenschaften:

- Widerstand gegen mechanische Beanspruchung
- Widerstand gegen kryogene Beanspruchung
- Widerstand gegen die polierende Wirkung von Fahrzeugreifen

Durch das Anwalzen während des Einbaus und der Verkehrsbeanspruchung können einzelne Körner abgerundet oder zertrümmert werden. Zur Beurteilung dieser Effekte gibt es normierte Prüfverfahren für grobe Gesteinskörnungen 8/12. Für die bei Abstreukörnungen verwendete Korngruppen 2/5 oder 1/3 gibt es derzeit noch kein normiertes Prüfverfahren. Es wurde ein Messverfahren erforscht, welches die Abrundung und Zertrümmerung feinerer Körnungen simuliert und eine Aussage zur Beständigkeit gegen mechanogene Beanspruchungen zulässt. Als Vergleich der künstlich hergestellten Gesteinskörnung aus Hochleistungsmörtel mit den etablierten Abstreukörnungen wurden zwei Referenzgesteine in die Untersuchungen einbezogen. Das Messverfahren besteht aus folgende Stufen:

Tabelle 1: Beständigkeit gegen mechanogene Beanspruchung

Stufe	Kennwert und <i>Beschreibung</i>		Betongranulat	Grauwacke	Basalt
[0] Referenz	Korngrößenverteilung <i>Bereinigung der Lieferkörnung von Über- und Unterkorn</i>	Überkornanteil (> 3,15 mm)	0,3 M.-%	6,9 M.-%	2,0 M.-%
		Unterkornanteil (≤ 1 mm)	0,0 M.-%	0,5 M.-%	1,2 M.-%
	Fließkoeffizient in Anlehnung an die DIN EN 933-6 <i>am Über- und Unterkorn bereinigten Material; Trichter mit 16 mm Auslauf</i>		35s	28s	29s
[1] Beanspruchung	Schlagzertrümmerung <i>am Über- und Unterkorn bereinigtem Material 10 Schläge aus 37 cm Fallhöhe Einwaage 375 ± 1 g</i>				
[2] nach Beanspruchung	Schlagzertrümmerungswert SZ _{1/3} -Wert		15,3 M.-%	12,2 M.-%	17,4 M.-%
	Fließkoeffizient Abnahme der Kantigkeit am Unterkorn bereinigten Prüfkorn	Absolut	28s	23s	23s
		Abnahme ggü. [0]	80%	82%	79%

Gegenüber den konventionell eingesetzten Gesteinen weist das künstlich hergestellte Betongranulat eine höhere Kantigkeit im Anlieferungszustand auf. Gegenüber mechanogenen Beanspruchungen liegt das Betongranulat zwischen den beiden Gesteinen natürlichen Gesteinskörnungen und weist damit einen ausreichenden Widerstand gegen mechanische Beanspruchung auf. Die Abnahme der Kantigkeit durch die mechanogene Beanspruchung, beurteilt über den Fließkoeffizient nach Schlagzertrümmerung, ist gegenüber den anderen Gesteinen nicht signifikant unterschiedlich. Aufgrund der hohen Kantigkeit im unbeanspruchten Zustand jedoch deutlich höher nach der mechanogenen Beanspruchung als bei der Grauwacke und dem Basalt.

Vor allem bei Beton, welcher im Verkehrswegebau eingesetzt werden soll ist der Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel Beanspruchung mit Tausalz von immenser Bedeutung. Dieser wird vor allem mit der Betonrezeptur und der damit einhergehenden Ausbildung des Porengefüges beeinflusst. Für die Prüfung einer Korngruppe 1/3 gibt es kein normiertes Prüfverfahren. Es wurde ein Messverfahren in Anlehnung an die DIN EN 1367-6 abgeleitet, welches eine Aussage über die Beständigkeit gegen kryogene Beanspruchung zulässt. Das Messverfahren wird in nachfolgenden Stufen durchgeführt:

Tabelle 2: Beständigkeit gegen kryogene Beanspruchung

Stufe	Kennwert und <i>Beschreibung</i>	Betongranulat	Grauwacke	Basalt	
[0] Referenz	Korngrößenverteilung <i>Bereinigung der Lieferkörnung von Über- und Unterkorn</i>	Überkornanteil (> 3,15 mm)	0,3 M.-%	6,9 M.-%	2,0 M.-%
		Unterkornanteil (≤ 1 mm)	0,0 M.-%	0,5 M.-%	1,2 M.-%
[1] Beanspruchung	Frost-Tau-Wechsel 10 Zyklen mit 1% NaCl- (Abbildung aus DIN EN 1367-6)				
[2] nach Beanspruchung	Absplitterung auf 1 mm Sieb	0,09 M.-%	0,10 M.-%	0,57 M.-%	

Die Absplitterungen des künstlichen Betongranulats sind gegenüber den konventionellen Gesteinen als gering zu beurteilen. Der Widerstand gegen kryogene Beanspruchung kann als sehr gut beurteilt werden.

Die Prüfmethode zur Beurteilung des mechanogenen und kryogenen Widerstandes an der Lieferkörnung 1/3 erlauben eine direkte Prüfung an angeliefertem Material. Bisherig vergleichbare Prüfungen sehen eine stellvertretende Prüfung an größeren Korngruppen vor und erlauben folglich keine direkte Qualitätsüberwachung. Weiterhin kann es zu Fehleinschätzung bei der Ableitung von Prüfergebnissen auf andere Korngruppen kommen.

Neben den Untersuchungen zum kryogenen und mechanogenen Widerstand der Korngruppe 1/3 wurde auch der Polierwert der Körner aus Betongranulat ersatzweise an der Korngruppe 2/5 bestimmt (vgl. Abbildung 13). Die synthetisch hergestellte Gesteinskörnung bzw. das AirClean Granulat weist einen Polierwert auf, welcher für sehr hohe Verkehrsbeanspruchungen geeignet ist. Zum Vergleich wurde der werkeigene Basalt des Projektpartners untersucht, welcher einen deutlich schlechteren Polierwert aufweist.

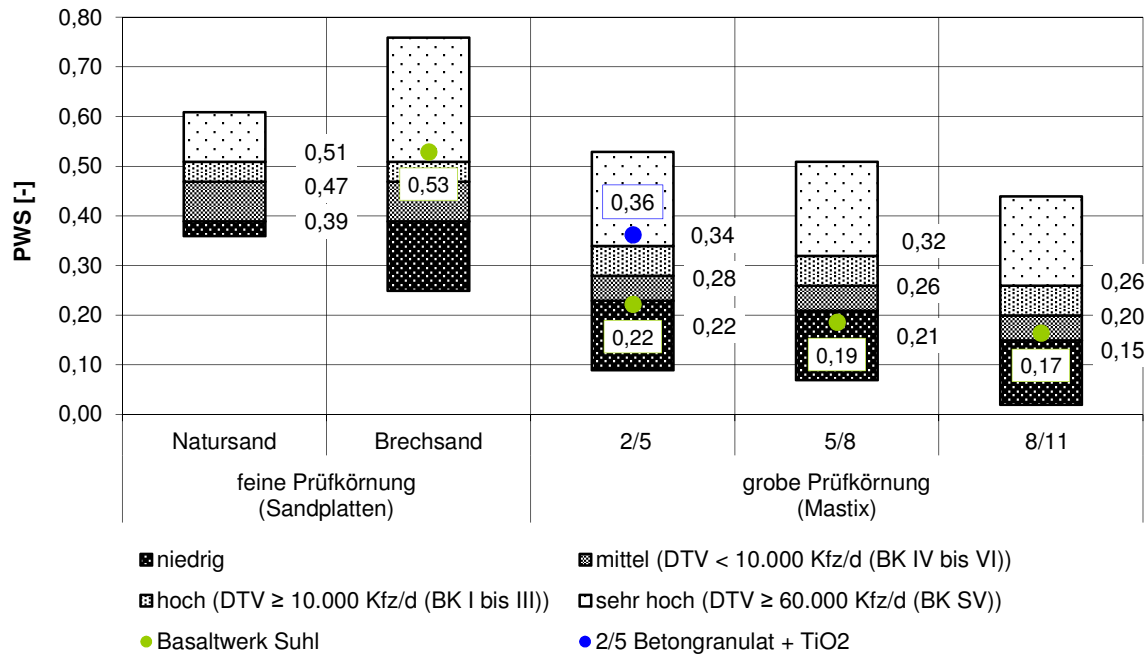


Abbildung 13: Ergebnisse der Untersuchung nach TP Gestein – Teil 5.4.2 vor dem Bewertungshintergrund aus²⁶

Mit den dargestellten Prüfmethode ist es möglich die Lieferkörnung ohne Verluste von Informationen direkt zu prüfen ohne auf stellvertretende Korngruppen zurückgreifen zu müssen. Das Ziel des Teilprojektes wurde erfüllt.

6.6 Prüfung der Erosionsbeständigkeit von Abstreukörnungen im Labor

Die in der Praxis durchgeführten Abstreuerungen von neu hergestellten Walzasphaltdeckschichten mit Gesteinskörnungen dienen im Wesentlichen der Erhöhung der Anfangsgriffigkeit und sind nach wenigen Monaten bereits nahezu restlos abgefahren. Das photokatalytische Einbaumaterial muss langfristig auf der Fahrbahnoberfläche verbleiben und dort sicher eingebunden werden. Nur so lässt sich eine langfristige Wirkung des photokatalytischen Einbaumaterials hinsichtlich der Ziele einer lärmarmen, Stickstoffdioxidreduzierenden und griffigen Straßenoberfläche sicherstellen.

Um den erosionsartigen Effekten der Witterung und den Beanspruchung durch die Überrollung mit Fahrzeugreifen entgegen zu wirken wurden innerhalb des Projektes unterschiedlichen Methoden der Applikation untersucht:

- (1) Ankleben von plattenähnlichen Probekörpern auf der Oberfläche
- (2) Ansprühen der Gesteinskörnungen mit Bindemittel
- (3) Umhüllen der Gesteinskörnungen mit Bindemittel

Zudem wurde der Einfluss der Nennkorngröße und der Morphologie des Einbaumaterials auf die Textur der Fahrbahnoberfläche bei unterschiedlichen Einbaubedingungen untersucht.

Die während des Projektes untersuchten plattenähnlichen Probekörper in unterschiedlichen Abmessungen wurden einerseits aufgrund des erhöhten Aufwandes bei der Herstellung (3d-Druck durch die TU Berlin) bzw. schlechten Verarbeitbarkeit bei Verlegen (Maxi-Platten der Fa. F.C. Nüdling) verworfen.

Für die Varianten 2 und 3 wurde eine Prüfmethode hinzugezogen, mit welcher der Widerstand gegen den Abrieb infolge mechanogener und kryogener Beanspruchungen abgeschätzt werden kann. Die Prüfmethode setzt sich aus folgenden Beanspruchungsstufen zusammen.

²⁶ (Dudenhöfer / Rückert, 2016)

Tabelle 3: Erosionsbeständigkeit von Fahrbahnoberflächen mit applizierter Gesteinskörnung

Stufe	Beschreibung
[0]	<u>Ausgangszustand:</u> Aufnahme der sichtbaren Gesteinskörnung durch fotografische Auswertung in % und Messung der Anfangsgriffigkeit
[1]	<u>nach 90.000 Überrollungen:</u> Aufnahme der sichtbaren Gesteinskörnung durch fotografische Auswertung in % und Messung der Griffigkeit
[2]	<u>nach 180.000 Überrollungen:</u> Aufnahme der sichtbaren Gesteinskörnung durch fotografische Auswertung in % und Messung der Griffigkeit
[3.1]	<u>nach 270.000 Überrollungen:</u> Aufnahme der sichtbaren Gesteinskörnung durch fotografische Auswertung in % und Messung der Griffigkeit
[3.2]	<u>nach 270.000 Überrollungen und zehn Zyklen Frost-Tau-Wechsel:</u> Aufnahme der sichtbaren Gesteinskörnung durch fotografische Auswertung in % und Messung der Griffigkeit
[4]	<u>nach 360.000 Überrollungen:</u> Aufnahme der sichtbaren Gesteinskörnung durch fotografische Auswertung in % und Messung der Griffigkeit
[5]	<u>nach 450.000 Überrollungen:</u> Aufnahme der sichtbaren Gesteinskörnung durch fotografische Auswertung in % und Messung der Griffigkeit
[6]	<u>nach 540.000 Überrollungen:</u> Aufnahme der sichtbaren Gesteinskörnung durch fotografische Auswertung in % und Messung der Griffigkeit

Die Prüfkörper in der Prüfanlage nach Wehner/Schulze einer Polierbeanspruchung ausgesetzt. In regelmäßigen Abständen wurde die Griffigkeit (μ_{FAP}) gemessen und die Prüfkörperoberfläche aus einem definierten Abstand unter identischen Lichtverhältnissen fotografiert. Nach 270.000 mechanogenen Überrollungen wurden die Prüfkörper einer Frost-Tau-Wechsel Beanspruchung in Anlehnung an die DIN EN 1367-1 ausgesetzt, um eine zusätzliche kryogene Beanspruchung zu simulieren. Im Anschluss wurde die Griffigkeit gemessen und der Zustand der Prüfkörperoberfläche optisch untersucht. Danach wurden die Prüfkörper weiteren mechanogenen Beanspruchungen ausgesetzt, bis zu einer Gesamtanzahl von 540.000 Überrollungen.

Die Fotos wurden digital bearbeitet, um den Kontrast zwischen den einzelnen Gesteinen und der mit Bitumen bedeckten Oberfläche zu erhöhen. Nachfolgend ist ein bearbeitetes Bild dargestellt. Rot gekennzeichnet ist in Abbildung 14 der nicht polierte Bereich der Oberfläche, welcher für die Auswertung nicht berücksichtigt wird. Der Anteil der Gesteinskörnung im polierten Kreisring wurde über den prozentualen Anteil der Pixel bestimmt.

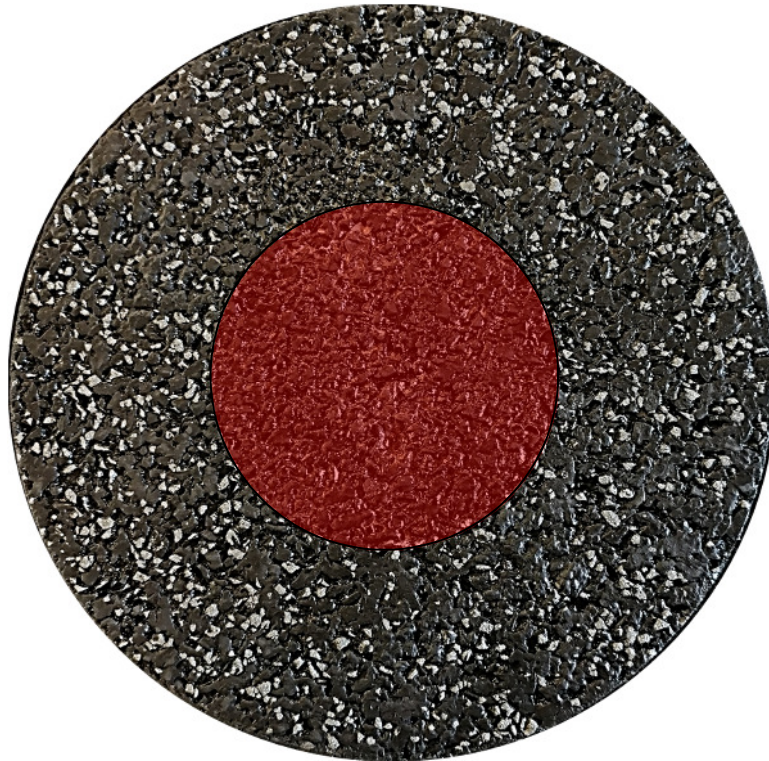


Abbildung 14: exemplarische Prüfkörperoberfläche nach der Stufe [6]

Dieses Vorgehen wurde anhand von Vorversuchen festgesetzt und führt zu den besten Spreizungen zwischen den Ergebnissen der Griffigkeitsuntersuchungen aber auch der sichtbaren Gesteinskörnung. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Abschnitt 7.2 als Mittelwerte von jeweils drei Einzeluntersuchungen dargestellt.

Mit den dargestellten Prüfmethoden ist es möglich die Einflüsse aus kryogener und mechanogener Beanspruchung auf die Polierbarkeit und die Erosionsbeständigkeit von Abstreukörnungen auf Fahrbahnoberflächen an Ausbauproben oder Laborproben zu prüfen. Das Ziel des Teilprojektes wurde erfüllt.

7 Ergebnisse der Untersuchungen

7.1 Prüfung des Einflusses von TiO_2 auf die Bitumeneigenschaften

Um den Einfluss von Titandioxid auf die im Straßenbau verwendeten Bitumen feststellen zu können, wurden folgende Fragestellungen bearbeitet:

- (1) Welche Auswirkungen nimmt Titandioxid auf die Bindemittleigenschaften durch Zumischen in definierten Mengen?
- (2) Hat Titandioxid einen Einfluss auf die Bindemittelalterung mit und ohne UV-Licht?
- (3) Können durch Rejuvenatoren die Auswirkungen von Titandioxid reduziert werden?

Das Untersuchungskonzept wurde einvernehmlich mit den Verbundpartnern der Bearbeitergruppe „Bitumen“ (TU Berlin, Uni Kassel und TPA) auf die jeweiligen Fragestellungen festgelegt. Die ASPHALTA Prüf- und Forschungslaboratorium GmbH führte neben den mechanisch-physikalischen Untersuchungen auch einen Großteil der Alterungen und Mischungen für alle Verbundpartner der Bearbeitergruppe durch, sodass alle hier vorgestellten Ergebnisse auf eine Bindemittelcharge bezogen werden können.

Für die Untersuchungen war es notwendig vorab Bindemittel auszuwählen, welche im Straßenbau am häufigsten verwendet werden. Hierzu wurden Proben an Mischwerken genommen und eine Grundcharakterisierung durchgeführt. Nachfolgend sind die Ergebnisse tabellarisch zusammengestellt und im Anschluss erläutert.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Grundcharakterisierung an den Bitumen

Probenbezeichnung		0	1	2	3	4	
Bitumensorte/-art		25/55-55 A	50/70	50/70	50/70	50/70	
Hersteller		A	A	A	B	C	
Raffinerie		1	2	3	4	5	
Probenahme		20.10.2015	05.10.2015	09.10.2015	15.10.2015	08.12.2015	
Ausgangszu- stand	Erweichungspunkt Ring und Kugel	59,2	52,8	50,8	51,0	50,6	
	Nadelpenetration	37	52	56	55	55	
	Temperaturemp- findlichkeit	Neigung (A)	0,039	0,043	0,045	0,045	0,045
		Penetrationsindex (I _p)	0,2	-0,4	-0,7	-0,7	-0,8
nach RTFOT	RTFOT Massenänderung	0,21%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	
	Erweichungs- punkt Ring und Kugel	Mittelwert	67,0	57,8	57,2	56,8	56,2
		Änderung	7,8	5,0	6,4	5,8	5,6
	Nadelpenetration	Mittelwert	26	34	39	34	35
		verbl. Penetration	70,3%	65,4%	69,6%	61,8%	63,6%
	Temperatur-emp- findlichkeit	Neigung (A)	0,035	0,042	0,041	0,043	0,044
		Penetrationsindex (I _p)	0,8	-0,3	-0,1	-0,5	-0,6
nach RTFOT und PAV	PAV Massenän- derung	Mittelwert	0,50%	0,56%	0,52%	0,62%	0,58%
	Erweichungs- punkt Ring und Kugel	Mittelwert	77,6	67,4	68,0	66,0	64,6
		Änderung (ggü. RTFOT)	10,6	9,6	10,8	9,2	8,4
		Änderung (ggü. AnZu)	18,4	14,6	17,2	15,0	14,0
	Nadelpenetration	Mittelwert	17	17	20	21	20
		verbl. Penetration (ggü. RTFOT)	65,4%	50,0%	51,3%	61,8%	57,1%
		verbl. Penetration (ggü. AnZu)	45,9%	32,7%	35,7%	38,2%	36,4%
Temperatur-emp- findlichkeit	Neigung (A)	0,032	0,039	0,037	0,039	0,040	
	Penetrationsindex (I _p)	1,6	0,1	0,5	0,2	-0,1	

Alle Proben entsprechen den Spezifikationen eines Polymermodifizierten Bitumens 25/55-55 A (Probe 0) bzw. Straßenbaubitumens 50/70 (Probe 1 bis 4) der TL Bitumen-StB 07/13 bzw. der DIN EN 12591. Das Polymermodifizierte Bitumen entspricht keiner Klasse der DIN EN 14023, was auf den Unterschieden in der nationalen und europäischen Spezifikation beruht.

Zur Beantwortung der Fragestellungen wurde innerhalb der Bearbeitergruppe entschieden das polymermodifizierte Bitumen 25/55-55 A (Probe 0) und die zwei Straßenbaubitumens 50/70 (Probe 1 und 2) zu verwenden. Grundlage der Entscheidung war neben den in Tabelle 4 dargestellten Ergebnissen auch die chemischen Untersuchungen der Verbundpartner. Weiterhin war bekannt, dass das Straßenbaubitumen Probe 2 als Grundlage zur Herstellung des polymermodifizierten Bitumens verwendet wird.

Den Bindemitteln wurden entsprechend der Abbildung 11 zwei Titandioxide (T1002 und T7050) mit 10 M.-% beigemischt, welche sich in der Reinheit und dem Sulfat-Gehalt unterscheiden. Zum Vergleich wurden die Bitumen mit 10 Vol.-% Füllern gängiger Gesteine (Basalt, Kalkstein und Quarz) untersucht.

7.1.1 Einfluss des Titandioxids auf die Bindemittleigenschaften im Vergleich zu konventionellen Füllern

Zu Beginn der Untersuchungen wurden die Bindemittel mit unterschiedlichen Mengen und Arten an Titan-dioxid vermischt. Zur Vergleichbarkeit wurden den Bindemitteln auch Füller konventioneller Gesteinskörnungen beigemischt und untersucht. Nachfolgend sind die Ergebnisse mit dem DSR an der Probe 50/70-1 und die zugehörigen Modifikationen exemplarisch dargestellt. Sie werden im Anschluss interpretiert.

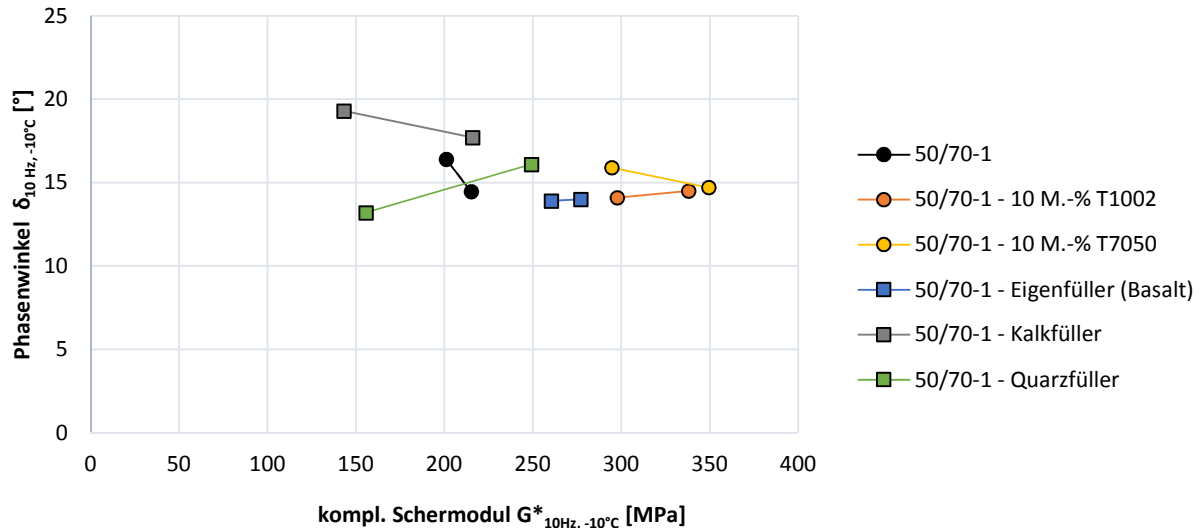


Abbildung 15: Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Dynamischen Scherrheometer im Bezug zur Kälteflexibilität der Probe 50/70-1 und der zugehörigen Modifikationen

Im Vergleich zum Grundbindemittel führt die Zugabe eines Füllers grundsätzlich zu einer höheren Steifigkeit der Bitumen-Füller-Gemische. Die mit Titandioxid modifizierten Bindemittel zeigen dabei eine besonders hohe Steifigkeit im Tieftemperaturbereich (vgl. Abbildung 15). Die Füller konventioneller Gesteine versteifen deutlich weniger und führen beim Basalt und Quarzfüller zu einer anfänglichen Verringerung der Steifigkeit bei -10°C . Mit fortschreitender Alterung nimmt die Steifigkeit bei den Proben zu. Der Phasenwinkel zeigt keinen eindeutigen Richtungstrend.

Es wird vermutet, dass im Tieftemperaturbereich, welcher vorwiegend das elastische Verhalten der Proben anspricht, Dichte, spezifische Oberfläche, Korngrößenverteilung und das Größtkorn der Füller und des Titandioxids einen signifikanten Einfluss nehmen. Es gibt einen signifikanten Unterschied zwischen dem Titandioxid und den Füllern aus natürlichen Gesteinen (vgl. Abbildung 16). Bereits in vorangegangenen Forschungsprojekten konnte der Zusammenhang zwischen den Eigenschaften der Füller und der Verformungsbeständigkeit von Asphalt fundiert nachgewiesen werden²⁷. Eine quantitative Ableitung ist bisher und mit den vorliegenden Daten nicht möglich.

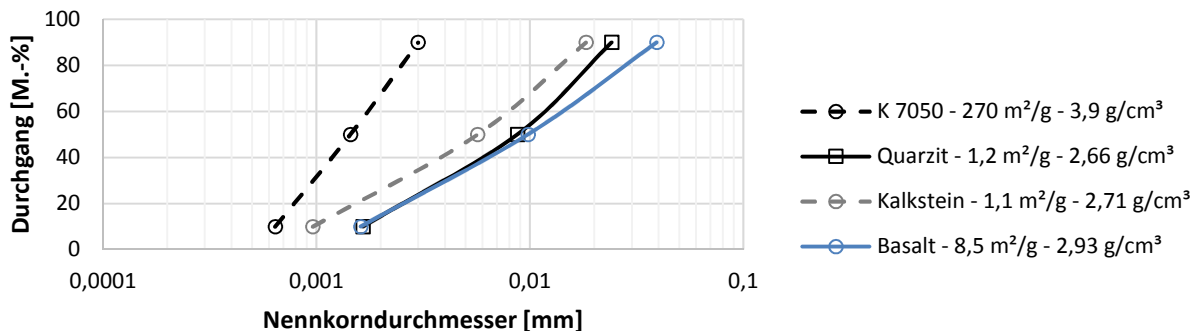


Abbildung 16: Korngrößenverteilung, spezifische Oberfläche (m^2/g) und Dichte des T7050 und der Füller

²⁷ (Feix, 1979)

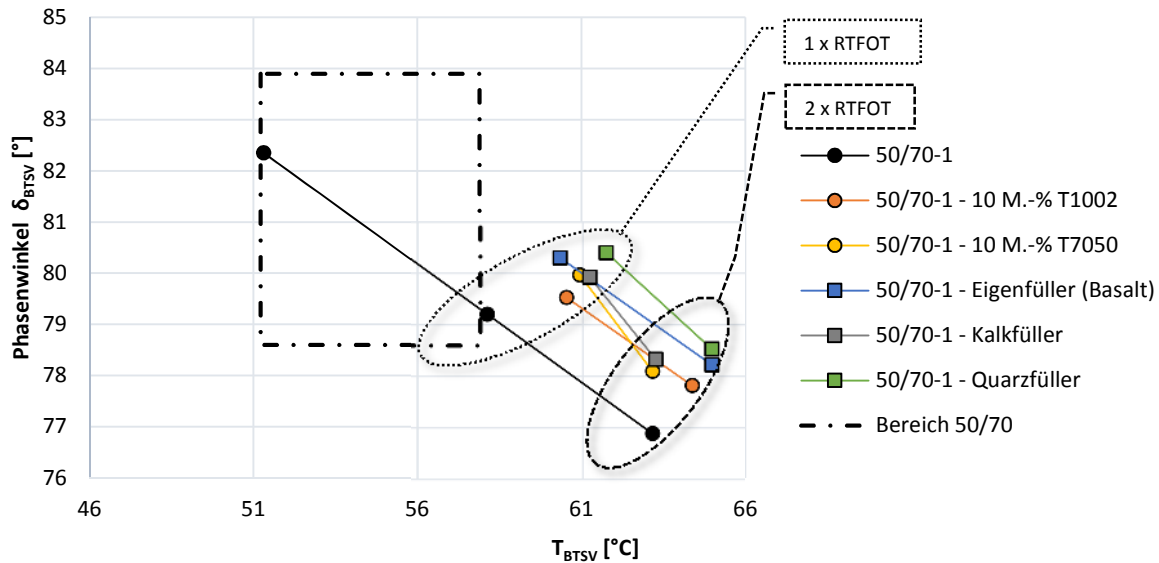


Abbildung 17: Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Dynamischen Scherrheometer im Bezug zum Gebrauchsverhalten bei hohen Temperaturen der Probe 50/70-1 und der zugehörigen Modifikationen

Das Verhalten der modifizierten Bindemittel bei hohen Gebrauchstemperaturen weist auf eine Versteifung durch Zugabe von Titandioxid oder Füllern hin. Nach zweifacher RTFOT-Alterung ist das Ranking der Äquisteifigkeitstemperatur durch unterschiedliche Alterungsverläufe durchmischt. Zur besseren Darstellung wurde die versteifende Wirkung im Bezug zur Äquisteifigkeitstemperatur des Grundbindemittels nach RTFOT und die absolute Veränderung durch die 2. RTFOT-Alterung in nachfolgender [Abbildung 18](#) dargestellt.

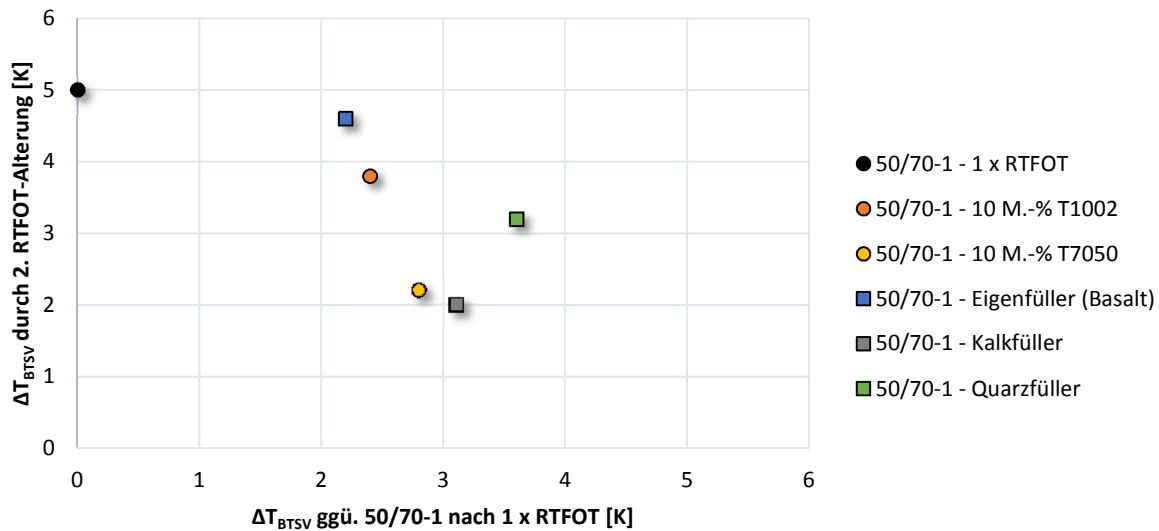


Abbildung 18: Versteifende Wirkung (Abszisse) und Veränderung durch fortschreitende Kurzzeitalterung (Ordinate) der Probe 50/70-1 und der zugehörigen Modifikationen

Die versteifende Wirkung der Modifikationen mit Titandioxid ist im Vergleich zu den Füllern aus konventionellem Gestein als stärker, aber tolerierbar zu bewerten. Die fortschreitende Alterung führt beim Grundbitumen zur höchsten Zunahme der Äquisteifigkeitstemperatur. Es wird vermutet, dass die mit Füllstoffen modifizierten Bindemittelmischungen eine verringerte Alterung aufweisen, da ein reduzierter Anteil an Bindemittel vorliegt, welcher im RTFOT-Verfahren altert.

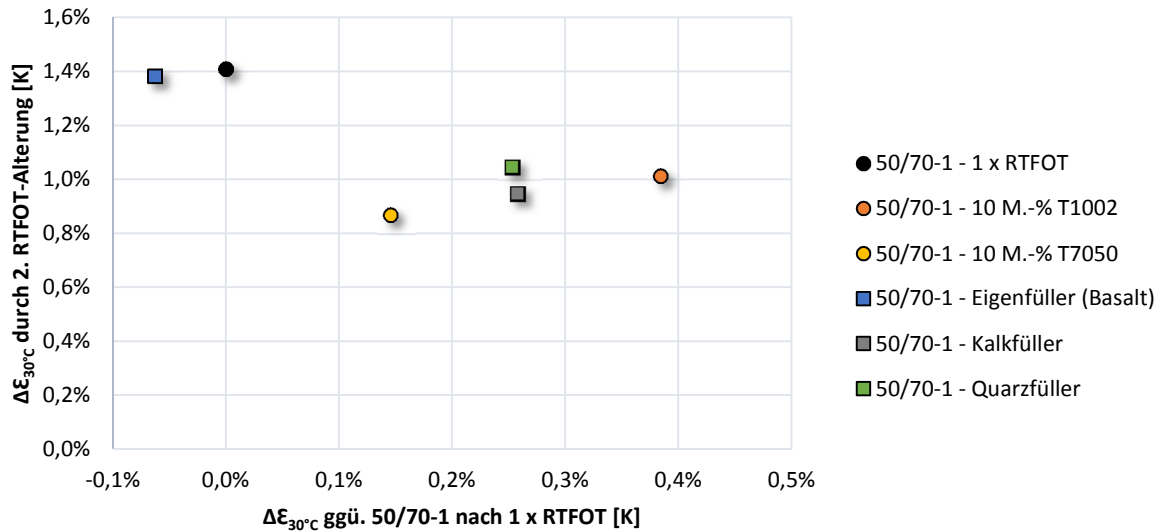


Abbildung 19: Veränderung der Frequenzempfindlichkeit ggü. dem Grundbindemittel und fortschreitender Kurzzeitalterung der Probe 50/70-1 und der zugehörigen Modifikationen

Gegenüber dem Grundbindemittel sind keine signifikanten Veränderungen der Frequenzempfindlichkeit festzuhalten. Die Veränderungen von -0,1 % bis 0,5 % sind als sehr gering einzuschätzen. Erst mit zunehmender Alterung sind Unterschiede zum Grundbindemittel erkennbar. Hiervon ausgeschlossen ist die Mischung mit einem Füller aus Basalt. Die übrigen Mischungen mit Titandioxid und Füllern aus Kalkstein und Quarz liegen nahezu einheitlich auf einem Niveau der Zunahme von im Mittel 1% nach der 2. RTFOT-Alterung.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die mechanisch-physikalischen Eigenschaften von Bitumen bei Zugabe durch Titandioxid verändert werden. Diese Veränderungen können jedoch der versteifenden Wirkung als Füller zugeschrieben werden. Unterschiede zwischen Titandioxid unterschiedlicher Spezifikation und im Straßenbau üblichen Füllern konnten quantifiziert werden.

7.1.2 Einfluss des Titandioxids auf die Alterung von Bitumen

Für eine abgesicherte Aussage zur Wirkung der Abbauprodukte aus photokatalytischen Prozessen mit Titandioxid auf die Bindemittelalterung treffen zu können, wurden eine Vielzahl an unterschiedlichen Mischungen von Bitumen, mit und ohne Titandioxid in unterschiedlichen Mengenanteilen, mit und ohne UV-Licht im Laboratorium gealtert. Die Ergebnisse der Untersuchungen wiesen alle auf einen vergleichbaren Trend der Alterung bzw. Reaktion hin. Da gemeinsam in der Bearbeitergruppe die Validierungen mit dem Bewitterungsstand am Bindemittel 50/70-1 in Kombination mit dem Air Clean-Granulat (Titandioxid T1002) durchgeführt wurden, wird nachfolgend auf die Ergebnisse an dieser Variante exemplarisch eingegangen.

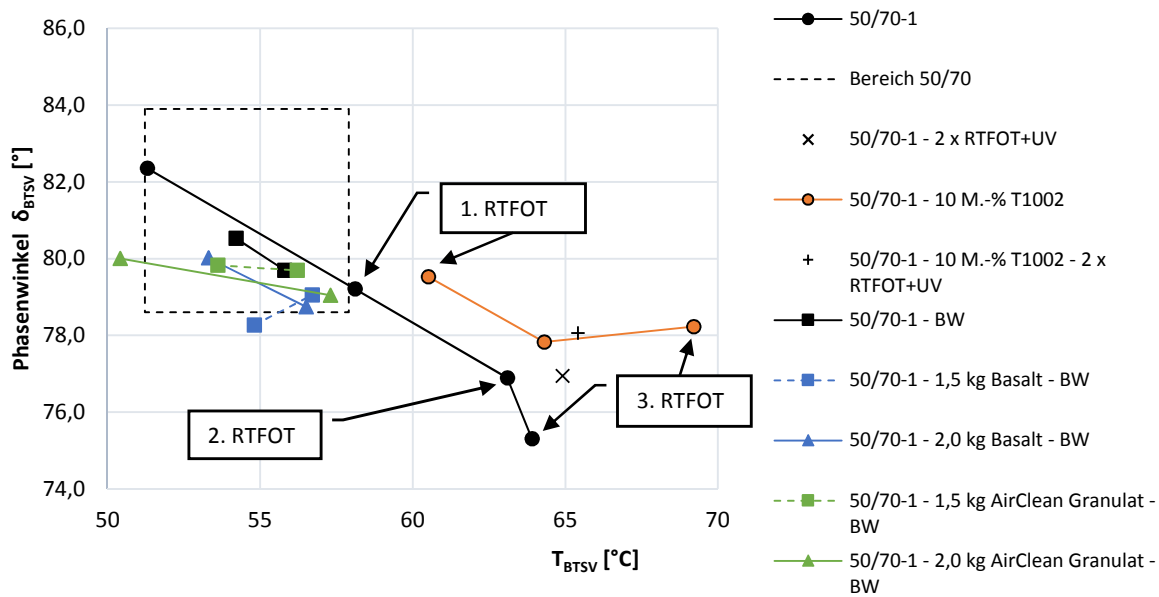


Abbildung 20: Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Dynamischen Scherrheometer im Bezug zum Gebrauchsverhalten bei hohen Temperaturen der Probe 50/70-1 und der zugehörigen Modifikationen bei unterschiedlichen Alterungsstufen (BW - Bewitterungsstand)

In Abbildung 20 sind die Ergebnisse des Grundbindemittels 50/70-1 im Anlieferungszustand und nach dreimaliger RTFOT-Alterung eingetragen. Zur Orientierung wurde der Erwartungsbereich für ein Straßenbaubitumen 50/70 im Anlieferungszustand mit dargestellt. Die letzte Alterung nach dem RTFOT-Verfahren weist eine deutliche Abweichung von der Alterungstrendlinie auf. Dieses Verhalten konnte in der Bearbeitergruppe durch die FTIR Analyse bestätigt werden. Neben der 2. konventionellen RTFOT-Alterung wurde auch am Grundbindemittel eine UV-Alterung durchgeführt. Die erhöhte Beanspruchung mit UV-Licht führt zu einer Erhöhung der Äquisteifigkeitstemperatur um 1,8 Kelvin. Vergleichbare Ergebnisse sind am Bindemittel mit 10 M.-% Titandioxid festzustellen. Die 3. RTFOT-Alterung weicht im Trendverlauf deutlich von den vorgehenden Alterungsstufen ab. Durch UV-Licht Beanspruchung nimmt die Äquisteifigkeitstemperatur um 1,1 Kelvin zu.

Die Bindemittel aus den Testfeldern des Bewitterungsstandes (BW) weisen nach 167 Tagen unterschiedliche Eigenschaften auf. Tendenziell nimmt die Äquisteifigkeitstemperatur gegenüber einem frischen Bindemittel zu, mit Ausnahme der Probe, welche mit 2,0 kg/m² AirClean Granulat abgestreut wurde. Nach 367 Tagen weisen alle Proben ein vergleichbares Niveau der Äquisteifigkeitstemperatur auf.

Die Daten des Bewitterungsstandes wurden nachfolgend in Abbildung 21 aufbereitet dargestellt. Entsprechend der Darstellung kann davon ausgegangen werden, dass nach 167 Tagen Bewitterung mit zunehmender Abstreuerung die Zunahme der Äquisteifigkeitstemperatur exponentiell abnimmt. Dem gegenüber steht eine erhöhte Zunahme nach weiteren 367 Tagen. Vergleichbare Schlüsse können tendenziell auch für das Tieftemperaturverhalten und die Frequenzempfindlichkeit gezogen werden (vgl. [Abbildung 22](#) und [Abbildung 23](#)). Mit zunehmender Alterung bzw. Abstreuerung am Bewitterungsstand nimmt die Steifigkeit bei geringen Temperaturen bzw. die Frequenzempfindlichkeit exponentiell zu. Ausgenommen hiervon ist die Frequenzempfindlichkeit des Grundbindemittels ohne Abstreuerung.

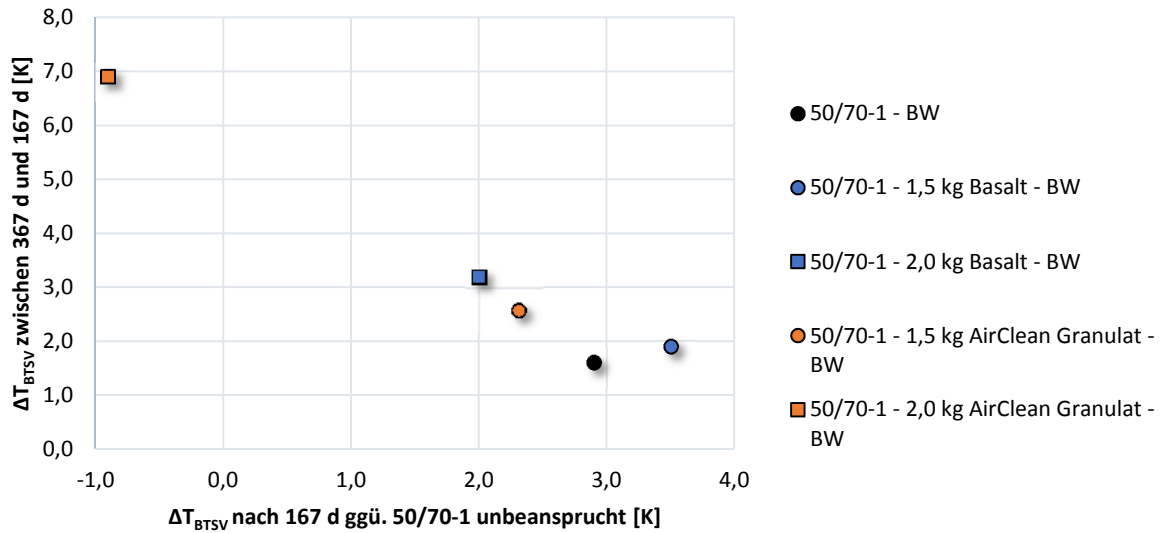


Abbildung 21: Veränderung der Äquisteifigkeitstemperatur ggü. dem Grundbindemittel und fortschreitender Alterung auf dem Bewitterungsstand der Probe 50/70-1 und der zugehörigen Abstreuerungen

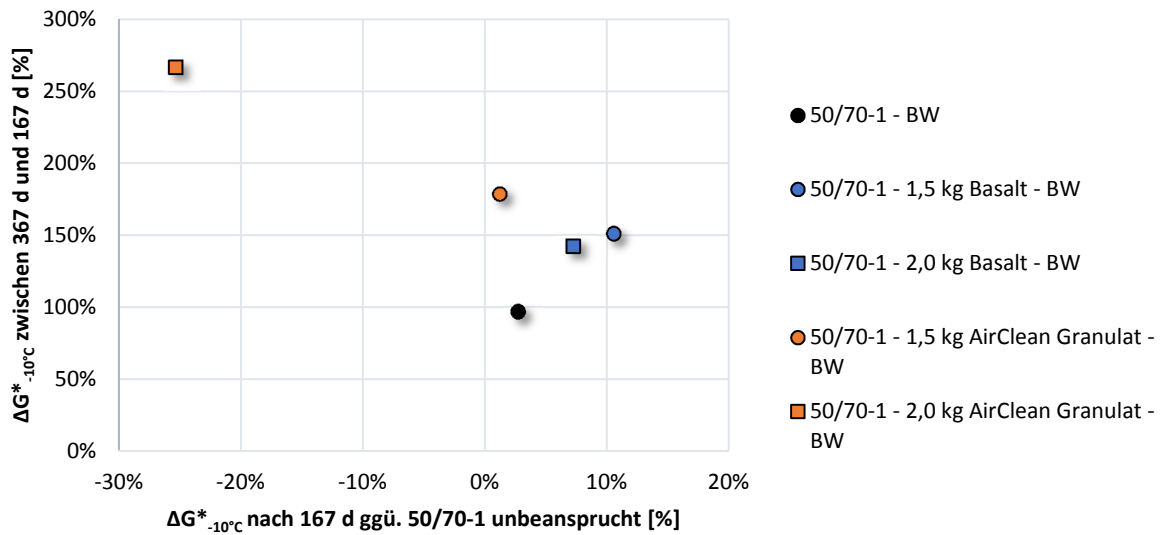


Abbildung 22: Veränderung der Kälteflexibilität ggü. dem Grundbindemittel und fortschreitender Alterung auf dem Bewitterungsstand der Probe 50/70-1 und der zugehörigen Abstreuerungen

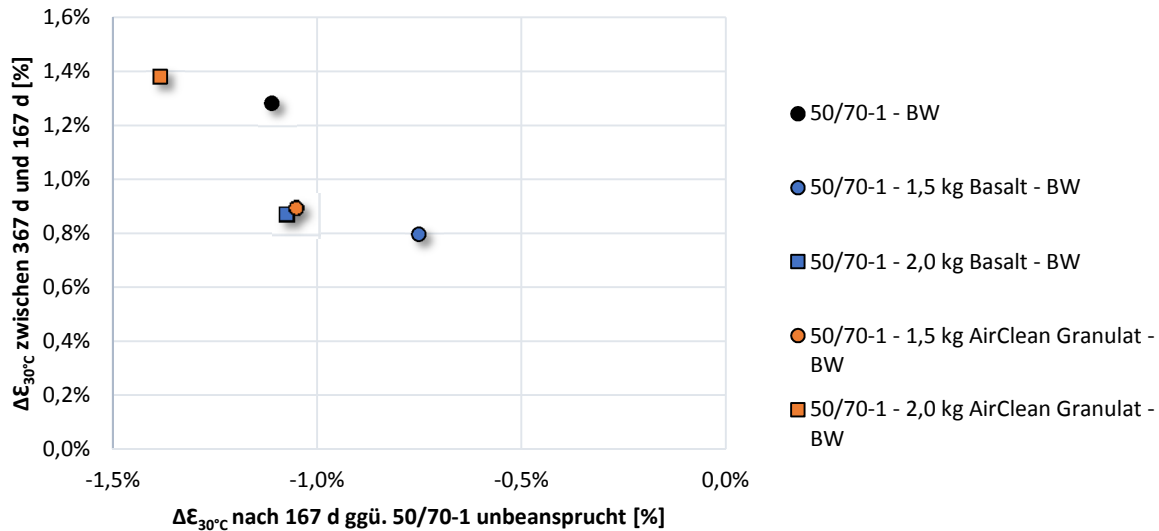


Abbildung 23: Veränderung der Frequenzempfindlichkeit ggü. dem Grundbindemittel und fortschreitender Alterung auf dem Bewitterungsstand der Probe 50/70-1 und der zugehörigen Abstreungen

Der Grund für die exponentielle Zunahme wird einerseits in der jahreszeitabhängigen Beprobung, als auch in der Abdeckung der Bitumen mit der Gesteinskörnung gesehen. Nach den ersten 167 Tagen verging eine Winter- und Frühlingsperiode. Nach der zweiten Beprobung nach 367 Tagen erfuhr der Bewitterungsstand einen sonnenreichen und heißen Sommer im Jahr 2018 (vgl. Abbildung 24). Für eine abgesicherte Aussage wäre eine Bewitterung über einen längeren Zeitraum notwendig gewesen, welcher mehrere jahreszeitliche Perioden umfasst.

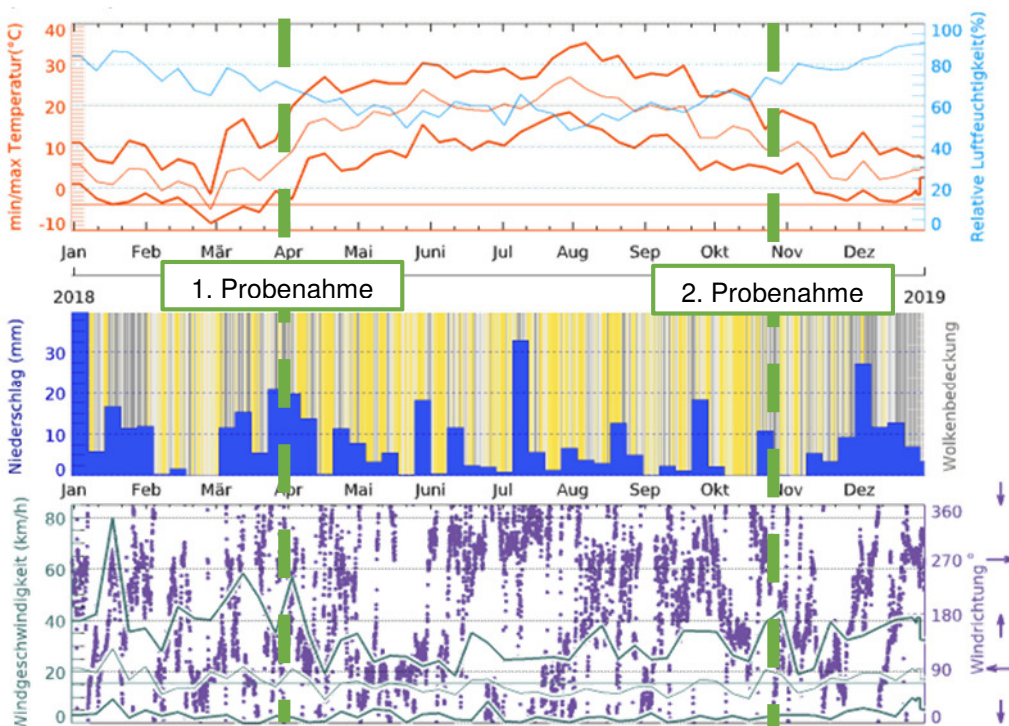


Abbildung 24: Wetterstatistik für Berlin aus dem Jahr 2018 (www.meteoblue.com)

Durch die Abstreung mit zwei Gesteinen unterschiedlicher Kornform und Dichte kam es zu einer unterschiedlichen Abdeckung des Bindemittels und folglich zu einer unterschiedlichen effektiven Fläche, die

der Sonneneinstrahlung ausgesetzt war. An den Platten wurde vor Beginn der Bewitterung photometrisch der Anteil der Gesteinskörnung gemessen bzw. dokumentiert (vgl. Abbildung 25).

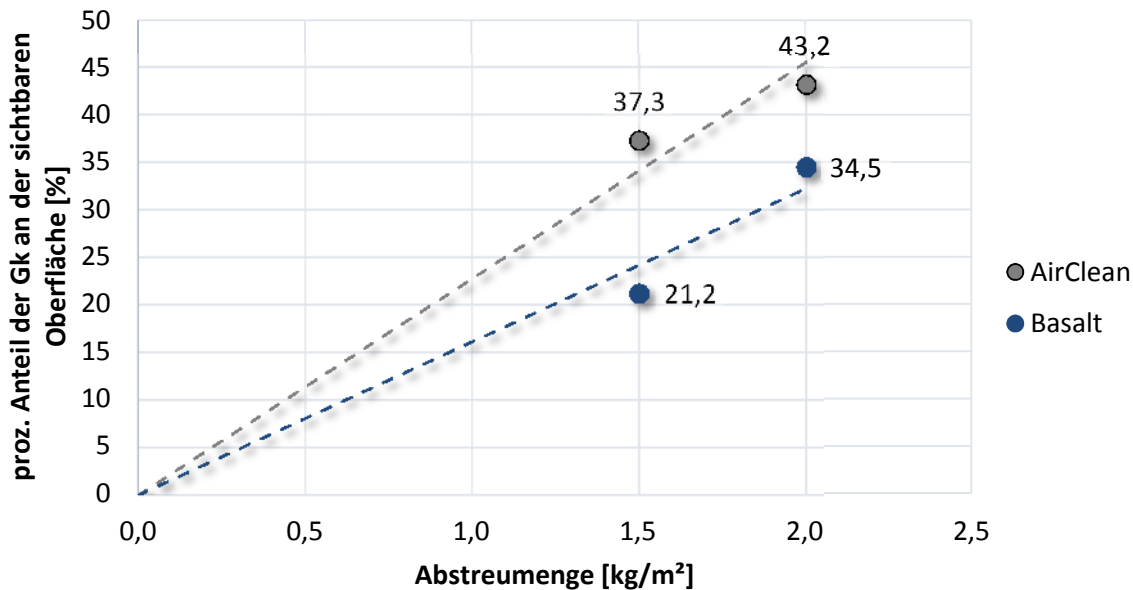


Abbildung 25: Zusammenhang zwischen der Abstreumenge und der prozentual sichtbaren Gesteinskörnung des Basalt ($3,06 \text{ g/cm}^3$) und dem AirClean Granulat ($2,55 \text{ g/cm}^3$)

Zusammenfassend konnte innerhalb der Bearbeitergruppe kein eindeutiger negativer Einfluss des Titandioxides oder dessen Abbauprodukten bei der photokatalytischen Wirkung auf die Bindemittelalterung identifiziert werden. Die Veränderungen der rheologischen Eigenschaften nach der UV-Alterung im Labor sind auch an den beiden Straßenbaubitumen und dem polymermodifizierten Bitumen nachweisbar. Die Veränderungen am Bewitterungsstand können nicht zweifelsfrei dem Titandioxid zugeschrieben werden. Im Forschungsprojekt konnte weiterhin nachgewiesen werden, dass die versteifende Wirkung der inerten Füllstoffe durch geeignete Verjüngungsmittel nachhaltig reduziert werden kann.

7.2 Prüfung der Erosionsbeständigkeit von Gesteinskörnungen auf Asphalt

Nach grundlegenden Untersuchungen zur Ableitung der Prüfmethode wie sie im Abschnitt 6.6 beschrieben ist, sowie weiteren Versuchen an Probefeldern aus dem Canyon des Projektpartners F.C. Nüdling, konnten folgende Zusammenhänge abgeleitet werden:

Mit zunehmenden Anteil an Betongranulat auf der Prüfkörperoberfläche nimmt das Niveau des Polierwertes zu, unabhängig von der Art der Einbaubedingung (vgl. Abbildung 26). Eine direkte Ableitung einer prozentualen Mindestbedeckung über einen Polierwert ist aufgrund der Stärke des Zusammenhangs von ca. 68 % nicht empfehlenswert. In der Abbildung 26 wurde dementsprechend das Konfidenzband (orange Strichlinien) mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % hinzugefügt. Die Regressionsgerade (schwarze Punktlinie) gibt das 50 % Quantil wieder. Aus eigener Erfahrung ist ein Niveau von 0,30 Einheiten des μ_{FAP} -Wertes als ausreichend anzusehen. Unter Berücksichtigung des unteren Konfidenzbandes entspricht dies zu 95 % einer Bedeckungsdichte mit 24 % des Betongranulates auf der Oberfläche bzw. mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % einer Bedeckungsdichte mit ca. 15 % Betongranulat auf der Oberfläche.

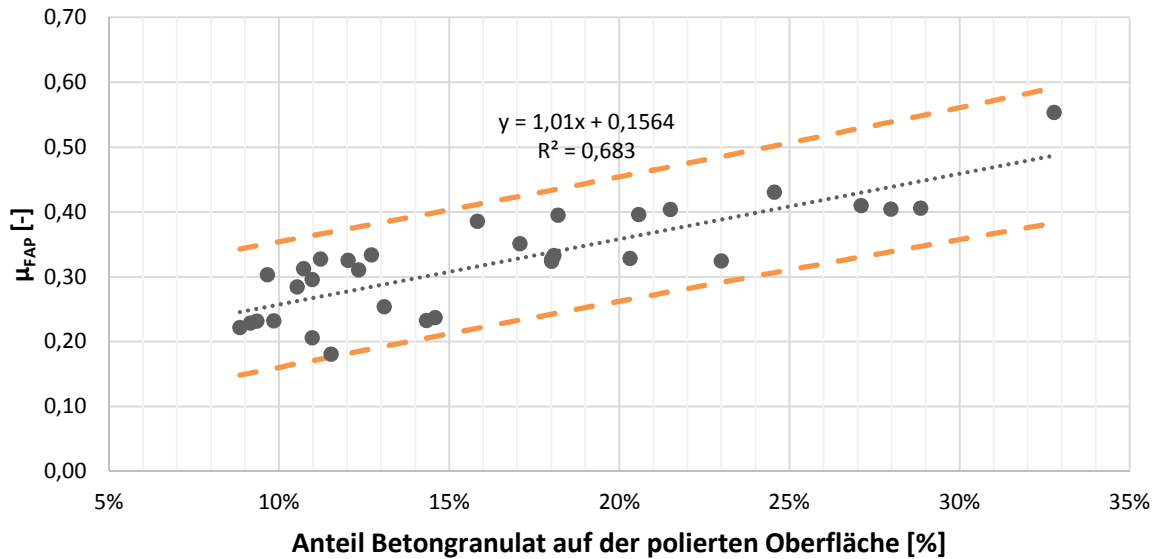


Abbildung 26: Zusammenhang zwischen dem Anteil an Betongranulat in der polierten Oberfläche und dem Polierwert unabhängig von der Polierstufe

Diese These führte nach ersten Tastversuchen, zur Abstimmung der abzulegenden Korngruppe und Textur der Asphaltoberfläche, zu weiteren Versuchen, die Erosionsbeständigkeit der Oberflächen zu verbessern. Im Laboratorium wurde versucht, in Zusammenarbeit mit der TU Berlin, durch unterschiedliche Maßnahmen die Abstreukörnung mit größerer Dauerhaftigkeit auf der Asphaltoberfläche zu verankern bzw. zu verkleben. Um den Einfluss der Rauheit (fein oder grob) zu erfassen, wurden die Versuche mit zwei unterschiedlichen Lieferkörnungen durchgeführt.

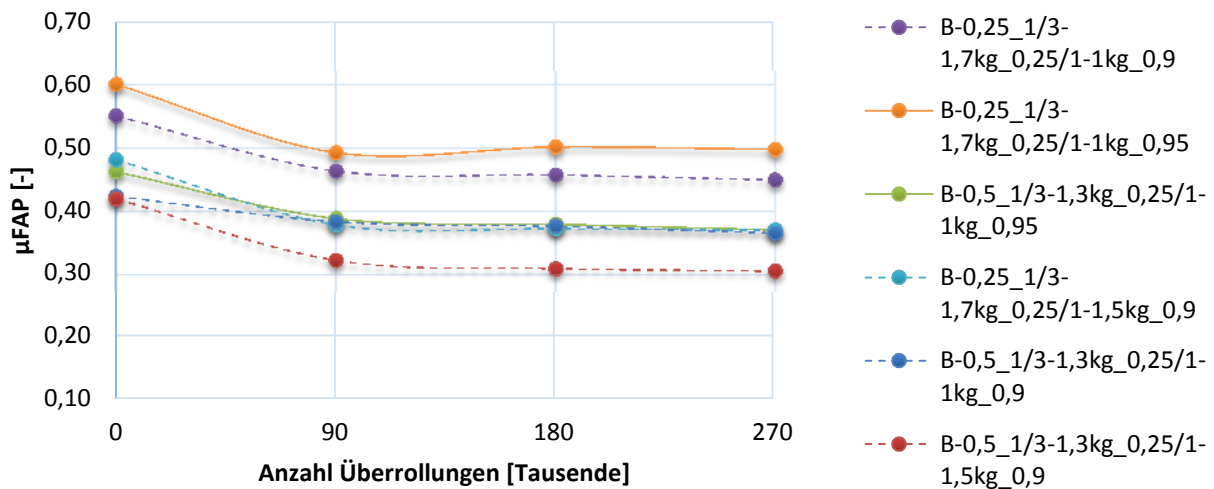


Abbildung 27: Ergebnisse der im Labor doppelten applizierten Gesteinskörnung mit unterschiedlichen Mengen an Bitumenemulsion und Zeitpunkten des Verdichtungsgrades (B-Bindemittelmenge in kg/m²_ Korngruppe 1/3 in kg/m²_ Korngruppe 0,25/1 in kg/m²_ Verdichtungsgrad zum Zeitpunkt der Applikation)

Die im Labor hergestellten Prüfkörper weisen auch nach 270.000 Überrollungen mit dem Polierkopf in der Wehner/Schulze Anlage noch eine sehr hohe Griffigkeit von 0,5 Einheiten auf und eine Abdeckung der Asphaltoberfläche mit Abstreukörnung von 22 %.

Parallel zu den Laborversuchen baute der Projektpartner TPA auf dem firmeneigenen Gelände in Bad Hersfeld einen Demonstrator (Proben aus 2018) aus einem optimierten SMA 5 S mit applizierter Abstreukörnung. Einbau und Applikation erfolgten mit einem Forschungsfertiger und integrierter Ablageeinrichtung. Die Proben des Demonstrators wurden ebenfalls entsprechend der im Abschnitt 6.6 dargestellten Prüfmethodik untersucht. Nachfolgend sind die Ergebnisse an den Laborprobekörpern gemeinsam mit

den Ergebnissen aus zwei Demonstratoren – mit (2018) und ohne optimierte Asphaltdeckschicht (2017) - dargestellt.

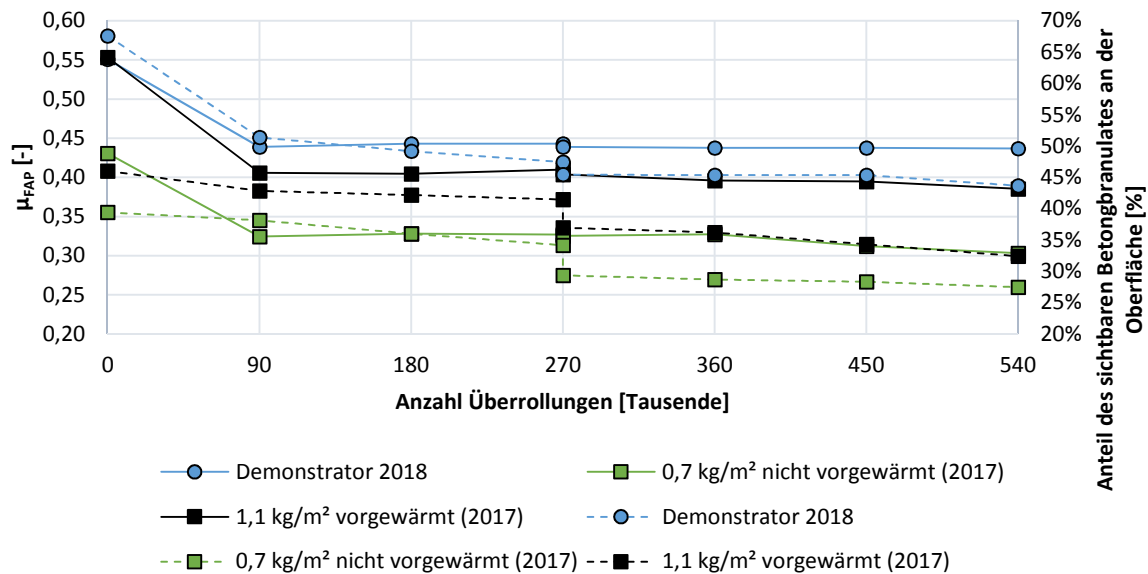


Abbildung 28: Vergleich der Erosionsbeständigkeit und Griffigkeitsentwicklung der Proben aus dem abschließendem Demonstrator von 2018 und den ersten Versuchen aus 2017

Die wesentlichen Unterschiede der ersten Versuche 2017 gegenüber 2018 bestehen in der Wahl der Asphaltdeckschichtsorte und der Technik des Aufbringens. Bei den Versuchsfeldern von 2017 wurde das Betongranulat noch händisch auf einen SMA 8 S abgestreut, während ein Jahr später eine Anpassung des Größtkorns auf SMA 5 S erfolgte und der integrierte Streuer verwendet wurde.

Bereits in den ersten Versuchsfeldern konnte nachgewiesen werden, dass eine erhöhte Abstreumenge (1,1 kg/m² gegenüber 0,7 kg/m²) zu einer Verbesserung der Griffigkeit von im Mittel 0,08 Einheiten führt, unabhängig von der Beanspruchungsstufe. Gleichmaßen wurde der Anteil der mit Betongranulat abgedeckten Fläche dadurch um im Mittel 6 % angehoben. Bei der kryogenen und mechanogenen Beanspruchung war mit zunehmender Abstreumenge auch eine erhöhte Erosion der Körner von der Oberfläche festzuhalten. Unter diesen Aspekten wurde innerhalb der Bearbeitergruppe ein Konzept entwickelt die an der Oberfläche sichtbare Gesteinskörnung zu erhöhen und die Einbindung auf der Oberfläche zu optimieren.

Das Konzept wurde mit einer Optimierung der Textur auf der Asphaltoberfläche zugunsten der zu applizierenden Korngruppe 1/3 und der Lärmreduzierung und einer Erhöhung der Abstreumenge auf 1,5 kg/m² umgesetzt. Eine weitere Optimierung fand an der Gerätetechnik durch den Projektpartner TPA statt. Durch die gezielte Applikation hinter dem Fertiger werden die Körner bei einem geringen Verdichtungsgrad der Asphaltdeckschicht abgestreut. Dies bietet den Vorteil, dass die Körner durch die nachfolgenden Walzvorgänge besser in die Schicht eingebunden werden und die Oberfläche der Körner erwartungsgemäß ebener ohne Anhäufungen von Splittkörnern ausgerichtet werden. Dies wirkt sich günstig auf die Rollgeräuschemission aus. Es entsteht eine weitgehend konkave Textur.

Dies trug dazu bei, dass die Ergebnisse des Demonstrators von 2018 zu einem höheren Widerstand gegen kryogene und mechanogene Beanspruchungen führen und nach der Prüfung ein erhöhter Anteil von im Mittel 11 % der Oberfläche durch die künstliche Gesteinskörnung abgedeckt war. Die Griffigkeit wies ebenso eine deutliche Steigerung von im Mittel 0,05 Einheiten auf.

Durch die Optimierung ist erkennbar, dass die kryogene Beanspruchung, welche nach 270.000 Überrollungen durchgeführt wird, nicht mehr maßgeblich die Eigenschaften der Griffigkeit oder den Anteil der sichtbaren Gesteinskörnung auf der Oberfläche beeinflusst.

8 Zusammenfassung

Nachfolgende Zusammenfassung wurde in zwei Kategorien untergliedert. Es werden die Ergebnisse für das Teilvorhabens und für das Gesamtvorhaben zusammengefasst und bewertet.

8.1 Entwicklung von optimierten Prüfmethode

Die Entwicklung neuer und die Weiterentwicklung existierender Prüfmethode ist, bei der steigenden Zahl innovativer Baustoffe die auf dem Markt angeboten werden, von großer Bedeutung für den Nachweis von Gebrauchseigenschaften und die Dauerhaftigkeit von Merkmalen, ebenso wie für die routinemäßige Überwachung der Baustoffe und Baustoffgemische im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle der Produzenten und Verarbeiter.

Die Prüfmethodik zur Ansprache des rheologischen Verhaltens von Bitumen und deren Modifikationen konnte mit dem Tieftemperaturbereich von 30 bis -20°C deutlich erweitert werden. Dieser Temperaturbereich ist für Gebrauchseigenschaften ausgesprochen wichtig, da mit zunehmender Alterung die Kälteflexibilität abnimmt, während der Widerstand gegen bleibende Verformungen zunimmt. Mit dem Konvektionsofen und der Festkörpereinspannung steht ein Messsystem zur Verfügung, welches schnell am Dynamischen Scherrheometer getauscht werden kann und präzise Messungen erlaubt. Andere Untersuchungen des Tieftemperaturverhaltens setzten entweder eine andere Apparatur voraus, welche aus Kostengründen nicht immer für jedes Labor als Anschaffung finanzierbar ist und außerdem eine schlechtere Präzision aufweist. Um den zeitlichen Aufwand der Messungen zu verringern konnte mit dem automatisierten Ablauf eine Methode entwickelt werden, welche die aufwendigen Voruntersuchungen einspart. Zeitlich wären sonst je Probe 15 Stunden für alle Untersuchungen einzukalkulieren. Ohne die Voruntersuchungen reduziert sich die Prüfzeit auf 3 Stunden. Innerhalb dieser Zeit kann eine Aussage zum Tieftemperaturverhalten, dem Verhalten bei hohen Gebrauchstemperaturen und der Frequenzempfindlichkeit getroffen werden. Weiterhin werden die Bereiche konventioneller Prüfungen abgedeckt. Aus anderen Arbeiten²⁸ ist bereits bekannt, dass die jeweils einen Punkt des Gebrauchstemperaturbereiches beschreibenden Messwerte aus Penetration und Erweichungspunkt präziser und umfassender mit dem Dynamischen Scherrheometer angesprochen werden können. Die Prüfmethode mit dem DSR erlaubt eine präzise Aussage zu den wichtigsten Gebrauchseigenschaften eines Bindemittels mit nur einem Prüfgerät.

Mit den dargestellten Prüfmethode für Gesteine (Abschnitt 6.5) konnte nachgewiesen werden, dass eine Prüfung unterschiedlicher Gebrauchseigenschaften auch an feineren Lieferkörnungen gegenüber dem normierten Versuch möglich und sinnvoll ist. Die Stellvertreterprüfung an Korngruppen, welche nicht eingesetzt werden, stellt ein hohes Potential für Fehlinterpretationen dar. Das beste Beispiel hierfür ist in der Korngrößenabhängigkeit des Polierwiderstandes von Basalt in Abbildung 13 erkennbar. Konventionell wird der Polierwert PSV an der Gesteinskörnung 8/10 bestimmt. Mit diesem Ergebnis werden alle Lieferkörnungen des Basaltes von der Verwendung bei hoch belasteten Straßen ausgeschlossen. Die Prüfung der feinen Gesteinskörnung zeigt jedoch deutlich, dass die Korngruppe 0/2 auch für höchste Beanspruchungen eingesetzt werden kann. Diese Fehlinterpretationen führen zur Benachteiligung von Lieferwerken und schließen lokale Gesteinsvorkommen häufig von der Verwendung aus. Dieses Problem wurde aufgenommen und in jüngst angelaufenen Forschungsprojekten der Bast weitergehend untersucht²⁹.

Anhand kryogener und mechanogener Beanspruchungen konnte eine Prüfmethode erstellt werden, welche die Abschätzung der Erosionsbeständigkeit von Gesteinskörnungen auf Asphaltdeckschichten zulässt. Durch die Kombination einer photometrischen Auswertung und des Polierwertes konnte ein erster Zusammenhang beider Kennwerte dargestellt werden. Die Beständigkeit beider Kennwerte über eine längere Beanspruchungsdauer lässt Empfehlungen zur Optimierung von Asphaltdeckschichten durch gezielten Einsatz von Abstreukörnungen und Abstreuverfahren zu.

²⁸ (Alisov, 2017), (Rückert, 2015), (Radenberg / Gehrke, 2012)

²⁹ (Dudenhöfer / Rückert, 2018), (Schulze / Benninghoff, 2018)

8.2 Verwendung von Titandioxid in Granulaten für Asphaltdeckschichten

Die Untersuchungen an Laborproben und Proben aus Demonstratoren lassen keine signifikanten Einflüsse des Titandioxides auf das Bindemittel Bitumen im Asphalt oder des daraus hergestellten Betongranulates auf die Oberflächeneigenschaften der Asphaltdeckschicht erkennen, die eine Verwendung ausschließen.

Die Oberflächeneigenschaften Griffigkeit, Rollgeräusche und nach Einschätzung der Verfasser auch die Helligkeit können bei angepasster Asphaltdeckschicht mit dem AirClean-Granulat dauerhaft verbessert werden.

9 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Tabelle 5: Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Gesamt	Pos.	Betrag	Förderanteil (46,0 %)
2015	0837	228.630,00 €	105.169,80 €
bis	0847	5.455,00 €	2.509,30 €
2018	Summe	234.085,00 €	107.679,10 €

10 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit im Rahmen des Forschungsvorhabens war notwendig um die Ziele zu erreichen. Alle notwendigen Umsetzungen waren angemessen.

Über Voruntersuchungen konnten die Ziele definiert werden. Diese wurden anschließend realisiert und daraufhin auf ihre Funktionalität erprobt. Aus dieser Erprobung heraus konnten weitere Optimierungsmöglichkeiten definiert werden, so dass die geleistete Arbeit eine intensive Analyse als Grundlage hatte. Dabei wurden die Zwischenergebnisse aller Projektpartner im Laufe des Forschungsvorhabens einbezogen. Alle Arbeiten wurden im Forschungsvorhaben abgestimmt und zielgerichtet eingesetzt.

11 Verwertungsmöglichkeiten

Neben den Veröffentlichungen mit den Projektpartnern der TU Berlin und der Universität Kassel in den Fachzeitschriften „Journal of Materials in Civil Engineering“ und „Straße und Autobahn“ wurden langfristig für die alltäglichen Prüfungen folgende Verwertungsmöglichkeiten bereits umgesetzt:

- Die standardisierte Prüfung¹⁸ an unbekanntem oder beanspruchtem Bindemitteln setzt voraus, dass Amplitudensweeps durchgeführt werden. Diese Vorversuche können mit einer reduzierten Version der automatischen Justierung der Verformung bei nur einer Prüffrequenz von 1,59 Hz eingespart werden. Gegenüber der vorgestellten Prüfmethode kann eine zeitliche Einsparung von bis zu 50 % erzielt werden. Diese zeitliche Einsparung ermöglicht einen höheren Durchgang an Prüfungen je Tag bei gleichbleibender Qualität der Messungen. Das Ergebnis der Untersuchungen wird über die Mitarbeiter in die Arbeitsgremien der fgsV eingebracht.
- Die photometrische Bestimmung sichtbarer Gesteinskörnungen ist nicht nur für abgestreute Oberflächen, sondern auch für Asphaltdeckschichten ohne Abstreueung eine wichtige Methode, um den Abrieb des Bindemittels von der Oberfläche zu quantifizieren. Dieses Vorgehen wird bereits im nächsten Forschungsprojekt²⁹ umgesetzt. Dabei erhoffen wir uns eine Verbesserung der Präzision des Verfahrens durch die Möglichkeit einer gezielten Probenvorbereitung durch Sandstrahlung mit nachgeschalteter Texturmessung und optischer Auswertung.
- Die Möglichkeit direkte Prüfungen an den unterschiedlichen Lieferkörnungen durchzuführen, ermöglicht es im Schadensfall bei gutachterlichen Stellungnahmen direkt die eingebaute Körnung bewerten zu können. Dieses Vorgehen führt zu abgesicherten Aussagen bei der Bewertung eines Schadenfalles oder Vorganges.

12 Schlusswort

Die durchgeführten Arbeiten eines jeden Verbundpartners wurden innerhalb des Projektes abgestimmt, sodass jedes Teilvorhaben zum Erreichen des Gesamtzieles einer dauerhaften, griffigen Asphaltdeckschicht mit lärmtechnisch günstigen Eigenschaften und schadstoffreduzierender Wirkung beigetragen hat. Durch den Abbau von Stickoxiden unmittelbar am Ort der Entstehung konnte der Fahrbahndeckschicht eine neue Funktion zugeordnet werden.

Neue und innovative Baustoffgemische erfordern eine stetige Neu- und Weiterentwicklung der Prüfmethoden um die Fragen der Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit zu beantworten. Durch neue Leistungsmerkmale dürfen keine Nachteile für die übrigen Gebrauchseigenschaften einer Fahrbahnbefestigung entstehen. Um dies sicherzustellen, wurden hierfür erforderliche Prüfmethode innerhalb des Teilprojektes entwickelt und optimiert. Begleitend wurden auch die Arbeiten der übrigen Projektpartner unterstützt. Alle Konzepte sowie die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen und angewandten Methoden wurden im Schlussbericht dargestellt.

Für die Entwicklung und Umsetzung der Prüfungen im eigenen Labor war vor allem ein hoher Anteil an Personal mit entsprechender Erfahrung erforderlich. Dies ermöglichte den Bearbeitergruppen schnelle und zielführende Entscheidungen hin zum Konzept des AirClean Granulates, inklusive einer angepassten Einbautechnologie und angepasster Asphaltmischgutkonzeption.

13 Literaturverzeichnis

- AL DSR-Prüfung (BTSV), 2017. *Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) - Teil 4: Durchführung des Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahrens (BTSV)*. s.l.:FGSV Verlag.
- AL DSR-Prüfung (T-Sweep), 2014. *Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltige Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) - Durchführung im Temperatursweep*. s.l.:FGSV Verlag.
- Alisov, 2017. *Typisierung von Bitumen mittels instationärer Oszillationsrheometrie*. Dissertation Hrsg. s.l.:TU Braunschweig.
- Bolte, G. & Flassak, T., 2012. *Immissionsschutz Vol.17*, pp. 54-58.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2019. www.bmbvs.de. [Online].
- Dames, J. & Lindner, J., 1988. Untersuchungen über den Einfluss des Größtkorns in bituminösen Deckschichten auf die Griffigkeit FE 07.109 G83F.
- Dames, J. & Lindner, J., 1989. Ermittlung der Endpolierwerte von im Straßenbau verwendeten Gesteinen FE 6/048G85C.
- Dames, J. & Lindner, J., 1990. Zusammenhang zwischen dem Polierwiderstand von Mineralstoffen und der Griffigkeit von Straßendecken FE 06.049 G86C.
- DIN EN 13589, 2018. *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Streckeigenschaften von modifiziertem Bitumen mit dem Kraft-Duktilitäts-Verfahren*, s.l.: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN 1426, 2015. *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Nadelpenetration*. s.l.:Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN 1427, 2015. *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des Erweichungspunktes - Ring- und Kugel-Verfahren*. s.l.:Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN 52013, 2007. *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Duktilität*. s.l.:Beuth Verlag GmbH.
- Dudenhöfer / Rückert, 2016. *Bewertungshintergrund für den Widerstand gegen Polieren von Gesteinskörnungen nach dem PWS-Verfahren*. s.l.:Bericht zum Forschungsprojekt FE-Nr. 06.0098/2012/DG.
- Dudenhöfer / Rückert, 2018. *Überprüfung der Praxisrelevanz "Friction after Polishing" (FAP-Verfahren)*. s.l.:laufendes Forschungsprojekt FE 06.0117_2017_DRB.
- Dudenhöfer, B. & Lindner, J., 2004. Auswertung der Ergebnisse von ersten Vergleichsmessungen mit PWS-Anlagen der 2. Baureihe.
- Duthie, 1972. Spezifikationsvorschläge für Bitumen aufgrund exakt-rheologischer Eigenschaftsmerkmale, Übersetzung von Zenke. in *Sonderdruck Bitumen-Teere-Asphalta-Peche Heft 11, S. 1-8*.
- Einführung der TL Min-StB 94 In Berlin (1994)*.
- Feix, 1979. *Untersuchungen von Sanden zur Ermittlung der auf die Qualität bituminöser Mörtel wirksamen Einflussfaktoren*. s.l.:forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 275/1979.
- Friedrich-Ebert-Stiftung, 2012. Managerkreis.
- Helm, M., 2011. *Steinbruch und Sandgrube*, August, pp. 62-65.
- Kirchmaier, L. & Pfeifer, A., 2009. Griffigkeit von Betonstraße, Qualität durch neue Prüftechnik, Zement und Beton. Mai.
- Merkblatt für die Herstellung von Oberflächentexturen auf Fahrbahndecken aus Beton (2000)*.

- Radenberg / Gehrke, 2012. Rheologische Charakterisierung bitumenhaltiger Bindemittel im Temperaturbereich von -10 bis 150°C. *Straße und Autobahn Heft 7, S. 417-424.*
- Rückert, 2015. *Erstellung eines mechanisch-physikalischen Fingerprints für Straßenbaubitumen.* Masterarbeit Hrsg. s.l.:Beuth Hochschule für Technik - Berlin.
- Schulze / Benninghoff, 2018. *Praxisgerechte Anforderung an den Polierwiderstand feiner Gesteinskörnungen.* s.l.:laufendes Forschungsprojekt FE 06.0116_2017_DRB.
- Statistische Bundesamt, 2019. *www.destatis.de.* [Online].
- TL Bitumen-StB 07/13, 2013. *Technische Lieferbedingungen für Straßenbitumen und gebrauchsfertige Polymermodifizierte Bitumen.* s.l.:FGSV Verlag.
- Wellner / Kayser, 2007. Grundlagen zur Erfassung der Temperaturbedingungen für eine analytische Bemessung von Asphaltbefestigungen. *Schlussbericht des Forschungsprojektes FE 04.198/2004/ARB im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen.*

14 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Beständigkeit gegen mechanogene Beanspruchung.....	16
Tabelle 2:	Beständigkeit gegen kryogene Beanspruchung.....	17
Tabelle 3:	Erosionsbeständigkeit von Fahrbahnoberflächen mit applizierter Gesteinskörnung	19
Tabelle 4:	Zusammenfassung der Grundcharakterisierung an den Bitumen	21
Tabelle 5:	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	32

15 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Arbeits- und Zeitplan.....	5
Abbildung 2:	exemplarischer Amplitudensweep bei 30°C und 10 Hz	7
Abbildung 3:	Zusammenhang zwischen dem Phasenwinkel und der Verformung, unabhängig von der Prüftemperatur und der Frequenz (Temperatur zwischen 0 und 90°C, Frequenz zwischen 0,1 und 10 Hz, n=35)	8
Abbildung 4:	Ablaufschema der automatisierten Prüfung mit dem DSR.....	9
Abbildung 5:	exemplarische Isochronen einer DSR Messung an einem Straßenbaubitumen 50/70..	10
Abbildung 6:	eingespannter Bitumenstab bei offenem Konvektionsofen (CTD 180)	10
Abbildung 7:	Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Dynamischen Scherrheometer im Bezug zur Kälteflexibilität der Ausgangsbitumen	11
Abbildung 8:	Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Dynamischen Scherrheometer zum Gebrauchsverhalten bei hohen Temperaturen an Ausgangsbitumen (1. Punkt, links: Ausgangszustand) und gealterten Bitumen (2. Punkt, Mitte: nach RTFOT; 3. Punkt, rechts: nach RTFOT und PAV)	12
Abbildung 9:	Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Dynamischen Scherrheometer zur Frequenzempfindlichkeit von Bitumen (o.B. – frisches Ausgangsbitumen, RTFOT, PAV – nach Laboralterung)	12
Abbildung 10:	Bewitterungsstand mit abgestreutem Bitumen in einer Schichtdicke von 0,41 mm inkl. Referenzblech ohne Abstreuerung	14
Abbildung 11:	Konzept der Bindemittelalterung und Zugabe von Titandioxid.....	14
Abbildung 12:	Umgebauter RTFOT-Ofen mit UV-LED Panel (links: vordere Seitenansicht, Mitte: LED Panel hinter dem Einfachsicherheitsglas, Rechts: Seitenansicht mit Lüftern)	15

Abbildung 13:	Ergebnisse der Untersuchung nach TP Gestein – Teil 5.4.2 vor dem Bewertungshintergrund aus	18
Abbildung 14:	exemplarische Prüfkörperoberfläche nach der Stufe [6]	20
Abbildung 15:	Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Dynamischen Scherrheometer im Bezug zur Kälteflexibilität der Probe 50/70-1 und der zugehörigen Modifikationen.....	22
Abbildung 16:	Korngrößenverteilung, spezifische Oberfläche (m^2/g) und Dichte des T7050 und der Füller.....	22
Abbildung 17:	Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Dynamischen Scherrheometer im Bezug zum Gebrauchsverhalten bei hohen Temperaturen der Probe 50/70-1 und der zugehörigen Modifikationen	23
Abbildung 18:	Versteifende Wirkung (Abszisse) und Veränderung durch fortschreitende Kurzzeitalterung (Ordinate) der Probe 50/70-1 und der zugehörigen Modifikationen ...	23
Abbildung 19:	Veränderung der Frequenzempfindlichkeit ggü. dem Grundbindemittel und fortschreitender Kurzzeitalterung der Probe 50/70-1 und der zugehörigen Modifikationen	24
Abbildung 20:	Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Dynamischen Scherrheometer im Bezug zum Gebrauchsverhalten bei hohen Temperaturen der Probe 50/70-1 und der zugehörigen Modifikationen bei unterschiedlichen Alterungsstufen (BW - Bewitterungsstand).....	25
Abbildung 21:	Veränderung der Äquisteifigkeitstemperatur ggü. dem Grundbindemittel und fortschreitender Alterung auf dem Bewitterungsstand der Probe 50/70-1 und der zugehörigen Abstreungen	26
Abbildung 22:	Veränderung der Kälteflexibilität ggü. dem Grundbindemittel und fortschreitender Alterung auf dem Bewitterungsstand der Probe 50/70-1 und der zugehörigen Abstreungen	26
Abbildung 23:	Veränderung der Frequenzempfindlichkeit ggü. dem Grundbindemittel und fortschreitender Alterung auf dem Bewitterungsstand der Probe 50/70-1 und der zugehörigen Abstreungen	27
Abbildung 24:	Wetterstatistik für Berlin aus dem Jahr 2018 (www.meteoblue.com).....	27
Abbildung 25:	Zusammenhang zwischen der Abstreumenge und der prozentual sichtbaren Gesteinskörnung des Basalt ($3,06 g/cm^3$) und dem AirClean Granulat ($2,55g/cm^3$)	28
Abbildung 26:	Zusammenhang zwischen dem Anteil an Betongranulat in der polierten Oberfläche und dem Polierwert unabhängig von der Polierstufe	29
Abbildung 27:	Ergebnisse der im Labor doppelten applizierten Gesteinskörnung mit unterschiedlichen Mengen an Bitumenemulsion und Zeitpunkten des Verdichtungsgrades (B-Bindemittelmenge in kg/m^2 _Korngruppe 1/3 in kg/m^2 _ Korngruppe 0,25/1 in kg/m^2 _Verdichtungsgrad zum Zeitpunkt der Applikation)	29
Abbildung 28:	Vergleich der Erosionsbeständigkeit und Griffigkeitsentwicklung der Proben aus dem abschließendem Demonstrator von 2018 und den ersten Versuchen aus 2017.....	30