

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt  
Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen

Möglichkeiten der Optimierung des  
Wehner/Schulze-Verfahrens zur Prognose  
der Griffigkeitsentwicklung von Asphalten

Thomas Michael Patzak

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der Techni-  
schen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. Detlef Heinz

Prüfende der Dissertation: 1. Prof. Dr. Christoph Gehlen  
2. Prof. Dr. Stephan Freudenstein

Die Dissertation wurde am 07.02.2018 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt am 18.06.18 ange-  
nommen.

## Danksagung

Bei der Erstellung der Arbeit, haben mich eine Vielzahl von Arbeits- und Fachkollegen unterstützt, mir hilfreiche Hinweise gegeben und mich motiviert. An dieser Stelle bedanke ich mich bei allen recht herzlich.

Mein Dank gilt insbesondere meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen für die Betreuung und Begleitung meiner Arbeit, seine Förderung und große Unterstützung.

Ebenfalls danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Freudenstein für die Übernahme der Zweitkorrektur, für das Interesse an meiner Arbeit und die Bereitschaft sich mit ihr auseinanderzusetzen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Ein ganz besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Thomas Wörner, der mich an den Themenkomplex Griffigkeit heranführte, mir den Zugang zu dieser Thematik öffnete und mich letztlich zu dieser Doktorarbeit motivierte. Die professionelle und kritische Begleitung in jeder Phase der Dissertation, die wertvollen Anregungen, den konstruktiven Austausch, seine stete Diskussionsbereitschaft und die große Freiheit, die er mir während der gesamten Arbeit gewährte, zeichneten die Betreuung aus.

Meine spezielle Anerkennung gebührt Frau Dr.rer.nat. Sara Neidinger. Durch ihre konstruktiven, kritischen und inhaltlich wertvollen Anmerkungen sowie Ihre jederzeitige Diskussionsbereitschaft trug sie zum Gelingen dieser Arbeit bei. Des Weiteren danke ich Herrn Dr.rer.nat. Erhard Westiner für die kritische Auseinandersetzung und die wertvollen Anregungen.

Den Kollegen und Kolleginnen des cbm, insbesondere den Mitarbeitern der Fachgruppe Asphalt danke ich, für die Unterstützung und Durchführung der Versuche. Namentlich erwähne ich hier die Herren Stefan Kandler, Thomas Strzelczyk, Michael Mittermayr bzw. Gregor Asenov-Barabunov, die mich bei der Planung und Durchführung der asphalttechnologischen Laboruntersuchungen bzw. der Griffigkeitsmessungen tatkräftig unterstützt haben. Ein Dank geht auch an Herrn Armin Skowronek, der mich beim Design unterstützte.

Ein besonderes Dankeschön möchte ich auch an die Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr und ihren zugeordneten Autobahndirektionen und staatlichen Bauämtern aussprechen. Sie stellten mir die benötigten Versuchstrecken, Daten und zugehörigen Auswertung unbürokratisch und kooperativ zur Verfügung.

Tief verbunden und dankbar bin auch meinen ehemaligen Arbeitskollegen Herrn Ing. Hermann Schmid, Hermann Köck und Fritz Grossauer. Sie brachten mich, vor nunmehr fast 25 Jahren, zum ersten Mal mit der „schwarzen Materie Asphalt“ in Berührung und gaben mir uneingeschränkt ihr fachliches Wissen, ihre Erfahrungen und Erkenntnisse weiter.

Mein außerordentlicher Dank gilt Herrn Johannes Siwik. Erst durch seine Anregung, Intervention und Motivation habe ich den akademischen Bildungsweg eingeschlagen.

Letztlich danke ich meinen Eltern, die mir durch ihre Erziehung, Unterstützung und Weitsicht, meinen bisherigen Lebensweg bzw. meine berufliche Ausbildung ermöglichten und somit den Grundstock für meinen akademischen Werdegang legten.

---

## Hinweis

Dieser Dissertation liegen Teile der im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, unter FE 07.253/2011/ERB [77] durchgeführten Forschungsarbeit zugrunde. Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein beim Autor. Die Ausführungen zur Griffigkeit erfolgten hierbei durch den Verfasser dieser Arbeit.

Sie enthält zudem Ergebnisse, Textteile und Auswertungen, des beim 6th Euroasphalt & Eurobitume Congress eingereichten Beitrags Nummer 256 mit dem Titel „Friction of different surface courses“ [78].

Des Weiteren greift die Arbeit auf Ergebnisse und Textpassagen der nicht veröffentlichten „Auswertung der Griffigkeitsmessdaten aus der laufenden Straßenzustandserfassung zur Erweiterung des bisherigen Erfahrungshintergrundes im Hinblick auf den Widerstand gegen Polieren von feinen Gesteinskörnungen“, welche vom Freistaat Bayern vertreten durch die Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern [79] sowie die Ergebnisse meiner Diplomarbeit „Einfluss der feinen Gesteinskörnungen auf die Griffigkeitsentwicklung von Asphaltdeckschichten“ [24] zurück.

---

## Inhalt

Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen .....	VII
a) Formelzeichen .....	VII
b) Abkürzungen .....	VIII
1    Einleitung .....	1
2    Stand der Wissenschaft und Technik .....	2
2.1    Allgemeines .....	2
2.1.1    Straßenaufbau .....	2
2.1.2    Textur, Rauheit .....	2
2.1.3    Messung der Textur.....	5
2.1.4    Griffigkeit .....	6
2.1.5    Reibungskoeffizient .....	9
2.2    Widerstand gegen Polieren .....	9
2.2.1    Allgemeines .....	9
2.2.2    Entwicklung der Anforderungen an die Gesteinskörnungen.....	10
2.3    Griffigkeitsmessung.....	12
2.3.1    Allgemeines .....	12
2.3.2    Griffigkeitsmessungen in situ .....	13
2.3.3    Polierbeanspruchung und Griffigkeitsmessungen im Labor.....	13
2.3.4    Bewertung der Straßengriffigkeit.....	14
3    Asphalt - Griffigkeit nach Polierung .....	15
3.1    Allgemeines .....	15
3.2    Probenvorbereitung.....	15
3.3    Überprüfung / Kalibrierung des Prüfgerätes .....	16
3.4    Poliervorgang.....	17
3.5    Griffigkeitsmessung.....	18
3.5.1    Ermittlung des Reibungskoeffizienten $\mu_m$ .....	19
3.5.2    Einflussfaktoren auf den Reibungskoeffizienten $\mu_m$ .....	20
3.5.3    Berechnung des Griffigkeitwertes $\mu_{PWS}$ .....	22
3.6    Griffigkeitsprognose .....	23
3.6.1    Prüfsystematik nach Huschek / TU Berlin.....	23
3.6.2    Prüfsystematik TU München .....	24
4    Vorgehensweise .....	24
5    Bewertungshintergrund.....	26

---

5.1	Untersuchungen des Griffigkeitsverhaltens .....	26
5.1.1	Ergebnisse in den Phasen EP, MW und BK.....	27
5.1.2	Splittmastixasphalt .....	31
5.1.2.1	Splittmastixasphalt SMA 8 S.....	31
5.1.2.2	Splittmastixasphalt SMA 11 S.....	36
5.1.2.3	Lärmarmes Splittmastixasphalt SMA 8 LA.....	37
5.1.3	Asphaltbeton .....	38
5.1.3.1	Asphaltbeton AC 11 D S .....	38
5.1.3.2	Asphaltbeton AC 11 D N .....	39
5.1.4	Gussasphalt.....	39
5.1.5	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse .....	40
5.1.5.1	Griffigkeitsuntersuchungen .....	40
5.1.5.2	Texturuntersuchungen.....	42
5.2	Untersuchungen an beanspruchten Strecken .....	42
5.2.1	Allgemeines .....	42
5.2.2	Vergleich der Phasen BK bzw. BK-3J.....	44
5.2.3	Ergebnisse .....	45
6	Kontrollplatten für hohes Griffigkeitsniveau .....	46
6.1	Allgemeines .....	46
6.2	Kontrollplatten aus industriell hergestellten Oberflächen .....	49
6.3	Kontrollplatten aus natürlichen Oberflächen.....	54
6.4	Ergebnisse .....	56
7	Variationen in der Asphaltzusammensetzung .....	57
7.1	Splittmastixasphalt SMA 8 S.....	58
7.2	Asphaltbeton AC 11 D S .....	63
7.3	Ergebnisse .....	66
8	Probekörpervorbereitung .....	68
8.1	Allgemeines .....	68
8.2	Mechanische Beanspruchung durch Sandstrahlen .....	68
8.2.1	Variationen der Sandstrahldauer bei unterschiedlichen Temperaturen.....	70
8.2.1.1	Splittmastixasphalt SMA 8 S.....	73
8.2.1.2	Asphaltbeton AC 11 D S .....	73
8.2.2	Ergebnisse .....	75
8.3	Frost-Tausalzbeanspruchung.....	75

---

8.4	Zielführende Probenvorbereitung mit anschließender Griffigkeitsprognose .....	77
8.4.1	Allgemeines .....	77
8.4.2	Splittmastixasphalt SMA 8 S.....	78
8.4.3	Asphaltbeton AC 11 D S .....	79
8.4.4	Ergebnisse .....	80
9	Griffigkeitsprognose mit der neu entwickelten Oberflächenbeanspruchung .....	81
9.1	Allgemeines .....	81
9.2	Splittmastixasphalt SMA 8 S.....	82
9.3	Asphaltbeton AC 11 D S .....	85
9.4	Ergebnisse .....	88
10	Erforderliche Anpassungen in der Prüfvorschrift .....	89
11	Ausblick / offene Fragen.....	91
12	Zusammenfassung .....	92
13	Literatur .....	95
	Abbildungsverzeichnis.....	100
	Tabellenverzeichnis .....	102

## Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

### a) Formelzeichen

$d$	Durchmesser
$DTV^{(KFZ)}$	durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke für den Gesamtverkehr
$DTV^{(SV)}$	durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke für Lkw > 2,8 t
FAP	Friction After Polishing
$F_x$	Horizontalkraft
$F_z$	Normalkraft, einwirkende Vertikalkraft, Reifenauflast
$M_x$	Drehmoment
$m_{s,n}$	Masseverlust nach n Frost-Tau-Wechseln
$m_{v,n}$	aufsummierter Masseverlust nach n Frost-Tau-Wechseln
$n$	Anzahl
NaCl	Natriumchlorid
$r$	Radius
$R^2$	Bestimmtheitsmaß
$U$	Umdrehungen
$v$	Geschwindigkeit
$V$	Hohlraumgehalt
$V_{min}$	minimaler Hohlraumgehalt
$V_{max}$	maximaler Hohlraumgehalt
$x$	Anzahl der Überrollungen
$\mu$	Kraftschlussbeiwert
$\mu_{km}$	gemittelttes Messergebnis der Kontrollplatte vor und nach der Griffigkeitsmessung
$\mu_m$	gemessener Reibungskoeffizient der ersten Messkurve bei 60 km/h
$\mu_{ref}$	Griffigkeitswert der Kontrollplatte bzw. -fläche
$\mu_{SCRIM, 80}$	Seitenkraftbeiwert gemessen bei 80 km/h
$\mu_y$	Seitenkraftbeiwert
$\mu_{PWS}$	Griffigkeitswert bezogen auf eine Kontrollfläche mit der Griffigkeit 0,1
$\alpha$	Irrtumswahrscheinlichkeit
$\Delta\mu_{PWS}$	Griffigkeitsdifferenz
$\sigma$	Standardabweichung

---

## b) Abkürzungen

ETD	Estimated Texture Depth, geschätzte Texturtiefe
FAP <sub>min</sub>	Mindest-Griffigkeit nach Polierung
LFC	Longitudinal Friction Coefficient
LSD-Test	Least significant difference-Test
MPD	Mean Profile Depth, Mittlere Profiltiefe
MPD <sub>0</sub>	Mittlere Profiltiefe nach 0 Überrollungen (sandgestrahlter Zustand)
MPD <sub>270</sub>	Mittlere Profiltiefe nach 270.000 Überrollungen
MTD	mittlere Oberflächentexturtiefe
PSV	Polished Stone Value, Polierwert der groben Gesteinskörnung
PSV <sub>fGK</sub>	Polierwert der feinen Gesteinskörnung
PSV <sub>angegeben(51)</sub>	Zwischenwert der Kategorien des PSV
PWS	Polierwert Wehner/Schulze
PWS <sub>0</sub>	Anfangsgriffigkeit (0 Überrollungen)
PWS <sub>90</sub>	Polierwert Wehner/Schulze nach 90.000 Überrollungen
PWS <sub>180</sub>	Polierwert Wehner/Schulze 180.000 Überrollungen
PWS <sub>270</sub>	Polierwert Wehner/Schulze / Endgriffigkeit nach 270.000 Überrollungen
R <sub>P</sub>	größte Profilspitze
μ <sub>PWS180</sub>	Griffigkeitswert bezogen auf eine Kontrollfläche mit der Griffigkeit 0,1 nach 180.000 Überrollungen
μ <sub>PWS270</sub>	Griffigkeitswert bezogen auf eine Kontrollfläche mit der Griffigkeit 0,1 nach 270.000 Überrollungen

# 1 Einleitung

Jeder Verkehrsteilnehmer erwartet eine griffige Fahrbahnoberfläche, die ihm bei Nässe einen ausreichend kurzen Bremsweg bietet. Vom Bundesminister für Verkehr wurden erstmals in den ZTV Asphalt-StB 01 [86] und den ZTV Beton-StB 01 [87] Anforderungen an die Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen festgelegt, welche sich auf den Zeitpunkt der Abnahme und auf den gesamten Zeitraum bis zum Ende der Verjährungsfrist für Gewährleistungsansprüche beziehen. Die Überprüfung dieser Anforderungen im Rahmen von Kontrollprüfungen erfolgt im Regelfall durch in situ Messungen mit dem Seitenkraftmessverfahren (SKM). Im Vorfeld einer Baumaßnahme können jedoch mit Hilfe dieser Messmethode keine Aussagen zur Griffigkeitsentwicklung unterschiedlicher Fahrbahndecken getroffen werden.

Mit dem in DIN EN 12697-49 [54] beschriebenen Prüfverfahren Wehner/Schulze steht ein genormtes Laborverfahren zur Verfügung, welches das Griffigkeitsverhalten eines Asphaltes im Labormaßstab prognostizieren kann. Für eine Griffigkeitsprognose [69] ist es notwendig, den Griffigkeitsverlauf (Griffigkeitsverhalten) in Abhängigkeit von der Anzahl an Überrollungen (Beanspruchungsdauer) bis zum Erreichen der „Endgriffigkeit (Endpolierwert)“ zu erfassen. Die DIN EN 12697-49 [54] sehen vor, den Poliervorgang i. d. R. nach 90.000 Überrollungen zu beenden und die Griffigkeitsmessung durchzuführen; diese Beanspruchungsdauer erscheint nach derzeitigem Wissensstand jedoch als nicht ausreichend. Die „Prüfung der Griffigkeit nach Polierung“ ist in den derzeit gültigen Fassungen der DIN EN 13108-1; -5 und -6: „Asphaltemischgut - Mischgutanforderungen“ [82, 83, 84] ohne belegbaren Anforderungswert enthalten. Eine Überprüfung dieser Anforderungen im Rahmen von Kontrollprüfungen erfolgt in Deutschland bislang nicht.

Kontrollprüfungen können an repräsentativen Proben, an in Labor hergestellten Probekörpern aus Asphaltemischgut oder an Ausbauproben (Bohrkernen) durchgeführt werden. Die im Labor hergestellten Asphaltflächen bedürfen üblicherweise einer Vorbereitung. Forschungsarbeiten [69, 70] zeigen auf, dass die Art der Probekörpervorbereitung einen wesentlichen Einfluss auf das Griffigkeitsverhalten ausübt. Es ist deshalb zwingend erforderlich, für das Prüfverfahren Wehner/Schulze eine praxisgerechte Probenvorbereitung zu entwickeln, die eine realitätsnahe Prüfung des Griffigkeitsverhaltens ermöglicht und zu identischen Endgriffigkeiten führt.

Um die Aussagekraft des Prüfverfahrens steigern zu können, muss die Probenvorbereitung zudem die tatsächlichen Beanspruchungen der Straße durch Umwelt und Verkehr - z.B. durch Frost-Tau-Wechsel oder mechanische Beanspruchungen - zeitraffend simulieren. Zur Verifizierung bzw. Absicherung der Messergebnisse muss darüber hinaus die Griffigkeitsmesseinrichtung des Prüfverfahrens Wehner/Schulze insbesondere im Bereich hoher Griffigkeitswerte durch Kalibrierflächen überprüft bzw. kontrolliert werden. Hierfür sind entsprechende Kalibrierflächen, deren Griffigkeitsniveau die in situ auftretenden Griffigkeiten abdeckt, zu entwickeln.

Ziel der Arbeit ist daher die Entwicklung einer Prüfsystematik, die praxisgerechte und reproduzierbare Ergebnisse mit dem Prüfverfahren Wehner/Schulze liefert.

## 2 Stand der Wissenschaft und Technik

### 2.1 Allgemeines

#### 2.1.1 Straßenaufbau

Eine Asphaltbefestigung ist aus mehreren Schichten, einer Asphalttragschicht, gegebenenfalls einer Asphaltbinderschicht und einer Asphaltdeckschicht, aufgebaut [48]. Die oberste Schicht einer Asphaltbefestigung ist i.d.R. die Asphaltdeckschicht, welche die durch den Verkehr eingebrachten Belastungen aufnehmen, in die darunterliegenden Asphalttschichten übertragen und verteilen soll. Im Zusammenspiel mit dem Reifen übt die Oberfläche der Asphaltdeckschicht den entscheidenden Einfluss auf die Verkehrssicherheit aus.

Die Asphaltoberfläche lässt sich durch die Textur (Rauheit), die Ebenheit und die lichttechnischen Eigenschaften beschreiben (Abbildung 2-1) [2]. Die für den Straßennutzer relevanten Gebrauchseigenschaften (funktionalen Eigenschaften) Griffbarkeit, Helligkeit/Reflexion, Reifen/Fahrbahngeräusch und Wasserabfluss werden von den physikalischen Eigenschaften (Textur, Ebenheit, lichttechnische Eigenschaften) maßgebend beeinflusst. Während der Nutzungsdauer können sich die funktionalen Eigenschaften durch äußere Einflüsse (Witterung, Verkehr) in ihrer Ausprägung verändern.

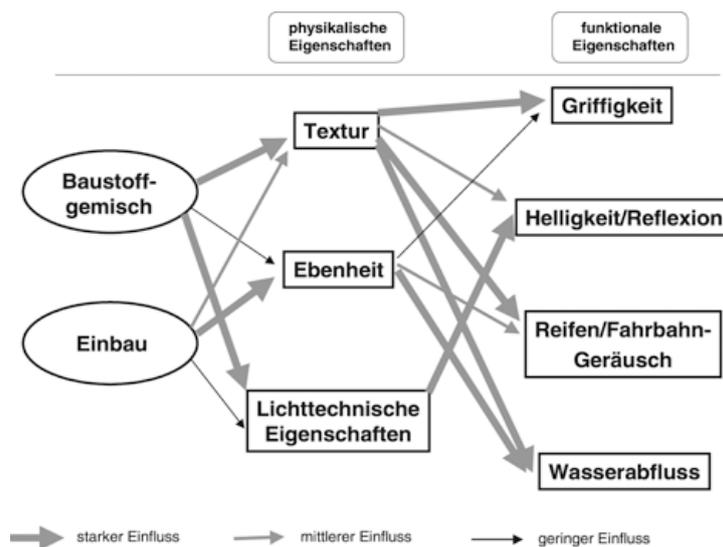


Abbildung 2-1: Einflüsse der physikalischen Eigenschaften auf die funktionalen Eigenschaften [2]

#### 2.1.2 Textur, Rauheit

Die Textur (Rauheit) einer Fahrbahnoberfläche beschreibt ihre geometrische Gestalt, im Wellenlängenbereich von wenigen Mikrometern bis maximal 0,5 m [3], als Abweichung von der planen Oberfläche. Der Begriff Oberflächentextur ist im Asphaltstraßenbau gleichbedeutend mit der Rauheit [4, 5]. Die Textur von Fahrbahnoberflächen wird nach ihren Wellenlängenbereichen in Mikro-, Makro-, Megatextur und Unebenheiten unterschieden (Abbildung 2-2), die Übergänge sind hierbei fließend. Die Mikrotextrur ist notwendig, um den bei Nässe vorhandenen dünnen Wasserfilm zu durchbrechen und so trockene Berührungspunkte zwischen Fahrzeugreifen und den Profilsitzen der Fahrbahnoberfläche herzustellen und den Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn zu ermöglichen. Die Makrorauheit / Makrotextrur beeinflusst die Griffbarkeit aufgrund ihrer entwässernden und damit drainagfördernden Wirkung [7].

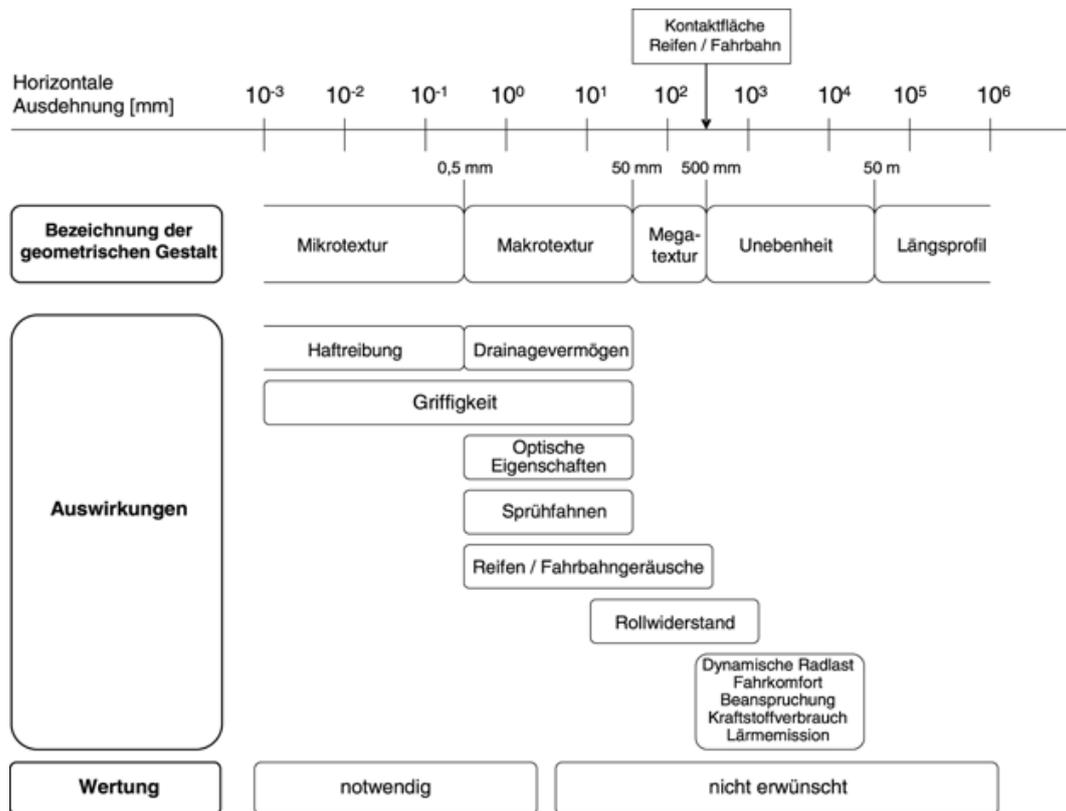


Abbildung 2-2: Texturlängenspektrum der Fahrbahnoberfläche und ihre Auswirkungen [2]

Bei hohen Fahrgeschwindigkeiten ist der Makrorauheit, aufgrund ihres maßgeblichen Einflusses auf den geschwindigkeitsabhängigen Reibbeiwert eine höhere Bedeutung beizumessen.

Megatexturen können entscheidenden Einfluss auf die Reifen / Fahrbahngeräusche, den Rollwiderstand und auf die Bildung von Wasseransammlungen auf der Fahrbahnoberfläche, insbesondere in Bodensenken und Spurrinnen haben.

Jede Asphaltoberfläche weist Abweichungen von einer ideal ebenen Oberfläche auf. Dies ist abhängig von:

- den Einbaubedingungen,
- der Einbautechnik (Straßenfertiger, Walzenart, Prinzip der Verdichtung),
- den durchgeführten Abstumpfungsmaßnahmen (Streuemenge, Lieferkörnung),
- der verwendeten Asphaltart und -sorte,
- der gewählten Korngrößenverteilung des Gesteinskörnungsgemisches,
- der Bindemittelart, -sorte und -menge,
- der Gesteinsart und den granulometrischen Eigenschaften der Lieferkörnungen.

Bereits beim Bau der Fahrbahndeckschicht ist eine dauerhafte und möglichst gute Textur herzustellen [9]. Mörtelanreicherungen an der Oberfläche der Asphaltdeckschicht, hervorgerufen durch ungünstige Einbaubedingungen, zu hohlraumarm konzipiertes Asphaltmischgut oder eine zu geringe Mörtelsteifigkeit, wirken sich negativ auf die Griffigkeitsentwicklung aus.

Die qualitative Auswirkung der Mikro- und Makrorautextur der Fahrbahnoberfläche auf den Reibungskoeffizienten  $\mu$  in Abhängigkeit der Geschwindigkeit  $v$  und des Straßenzustands „nass bzw. trocken“ hat Zipkes [14] in Abbildung 2-3 dargestellt.

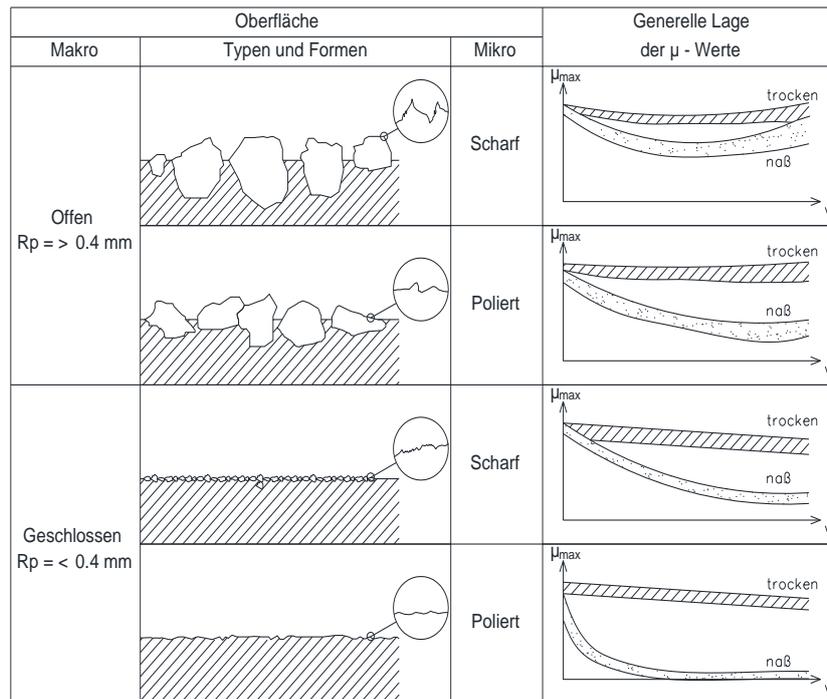


Abbildung 2-3: Auswirkungen der Oberflächenstruktur auf die Höhe des Reibungskoeffizienten nach [14]

Ausgehend von der Höhe der größten Profilspitze  $R_p$ , welche als eine Kenngröße für die Makrotextur angesehen wird, unterteilt Zipkes zwei Niveaus - größer bzw. kleiner 0,4 mm.

- Eine Profilspitze  $R_p > 0,4 \text{ mm}$  ermöglicht das Abführen des Wassers zwischen den Gesteinskörnungen in der Kontaktfläche Reifen / Fahrbahnoberfläche.
- Der Reibungskoeffizient bei der nassen Fahrbahnoberfläche liegt auf einem höheren Niveau als bei einer geschlossenen Fahrbahnoberfläche mit  $R_p < 0,4 \text{ mm}$ .
- Selbst bei geringen Geschwindigkeiten ist im polierten Zustand eine deutliche Abnahme des Reibungskoeffizienten, welcher bei höheren Geschwindigkeiten weiter abnimmt, erkennbar.
- Im trockenen Zustand bei einer geschlossenen und offenen Fahrbahn zeigt sich, dass der Unterschied zwischen der scharfen und polierten Mikrotextur gering ist.

Die Mikrotextur wird maßgeblich von der Wahl der Gesteinsart sowie deren Kanten- und Flächenschärfe beeinflusst. Die Gesteinskörnungen sind nach der Asphaltmischgutproduktion und dem Einbau i.d.R. immer vollständig mit Bitumen umhüllt, erst durch die einwirkende Witterung und Verkehrsbeanspruchung erfolgt ein Abtrag des Bindemittelfilms und die vollständige Ausbildung der Mikrotextur.

Die Makrotextur hingegen ist deutlich von der Wahl des Größtkorns und von der Einbettung und Verteilung der an der Oberfläche befindlichen Gesteinskörnungen abhängig [10]. Sie wirkt bereits direkt nach dem Einbau.

Höhere Makrotexturen können bei größerem Größtkorndurchmesser und gleichzeitig sinkendem Anteil an feinen Gesteinskörnungen erzielt werden [62].

Die Mikro- und Makrotexturen verändern sich im Laufe der Nutzung. Durch Verkehr, welcher immer mit einer Polierbeanspruchung einhergeht, kommt es zu einem Abbau der Mikrotextur (Kanten- und Flächenschärfe). Die Makrotextur kann sich durch die Verkehrsbeanspruchung, in Abhängigkeit von

der Einbauqualität und der Asphaltmischgutkonzeption, vor allem im Bereich der Rollspuren verringern. Aber auch eine Zunahme der Makrotextur durch die Verringerung des Mörtelanteils bzw. durch Kornausbrüche kann auftreten. Gleichzeitig bewirken diese Witterungs- und Umgebungseinflüsse, durch chemische und physikalische Angriffe, ein Aufrauen der Mikrotextur. Bühlmann [12] hat nachgewiesen, dass diese Prozesse für die jahreszeitlichen Griffigkeitsschwankungen mitverantwortlich sind.

### 2.1.3 Messung der Textur

Die „Technische Prüfvorschrift für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau, Teil: Messverfahren SRT“ (TP Griff-STB (SRT)) [4] beschreibt die Messung der Mikrotextur mit dem **Skid Resistance Tester (SRT)** und verweist zur Messung der Makrotextur auf die DIN EN 13036-3 [46], in welcher die Ausflussmessung nach Moore (AM) geregelt ist. Die Messungen sind stets gemeinsam durchzuführen und die Messergebnisse werden kombiniert bewertet.

Beim SRT-Pendel reibt die Kante des am Pendelarm befindlichen Gleitkörpers unter bekanntem Anpressdruck, mit einer Reibgeschwindigkeit von ca. 10 km/h, über die angenässte Prüfoberfläche. Der von der Mikrorauheit der Fahrbahnoberfläche beeinflusste Energieverlust, den das Pendel durch das Gleiten der Gummikante über die zuvor mit Wasser benetzte Prüfoberfläche erfährt, gilt als Maß für die Griffigkeit. Der ermittelte Messwert wird mittels des Schleppzeigers am Skalenschild in SRT-Einheiten abgelesen. Es können nur Aussagen über die Griffigkeit bei geringen Geschwindigkeiten und damit über die Mikrorauheit getroffen werden.

Bei höheren Geschwindigkeiten muss zur Gewährleistung eines ausreichenden Kraftschlusses durch die Makrorauheit das Oberflächenwasser aus der Kontaktzone zwischen Reifen und Fahrbahn abgeleitet werden. Als Kennwert für die Makrorauheit dient hierbei die Ausflusszeit, welche mit dem **Ausflussmesser nach Moore (AM)** ermittelt wird.

Der Ausflussmesser nach Moore wird bei der Versuchsdurchführung auf die angenässte Prüfoberfläche aufgesetzt, ein hydrostatischer Druck durch das Auffüllen des Mantelroheres mit Wasser erzeugt, und die Ausflusszeit, die der Wasserspiegel in Abhängigkeit der Grobrauheit der Prüfoberfläche benötigt, um von der oberen zur unteren Kalibriermarke an der Zylinderwand abzusinken, gemessen.

Die Makrotextur von Fahrbahnoberflächen kann alternativ zum Ausflussmesser nach Moore (DIN EN 13036-3) [46] auch manuell mit dem **Sandfleck-Verfahren** gemäß den DIN EN 13036-1 [57] bestimmt werden.

Beim Sandfleck-Verfahren werden die Vertiefungen zwischen den Rauheitselementen der Fahrbahnoberfläche durch ein Prüfmedium (Glaskugeln) mit einer vorgegebenen Korngröße aufgefüllt. Ein definiertes Glaskugelvolumen wird dazu auf die Fahrbahnoberfläche aufgebracht und mit einem Verteilwerkzeug kreisförmig verteilt und so in die Rautiefen der Fahrbahnoberfläche gebracht.

Die mittlere Oberflächentexturtiefe MTD entspricht dem Verhältnis von verwendetem Volumen der Glaskugeln und der sich ergebenden Kreisfläche des „Sandflecks“ und wird auch Sandeinfülltiefe genannt. Durch das Sandfleckverfahren können Fahrbahnoberflächen mit wenig Grobrauheit von jenen mit viel Grobrauheit mit homogener, gleichartiger Struktur [4] unterschieden werden.

Beide nur punktuell anwendbare Verfahren haben den Nachteil, dass sie einerseits Verbrauchsmaterialien (Wasser bzw. Sand) benötigen und andererseits ihre Durchführung sehr zeitintensiv ist. Durch die manuelle Versuchsdurchführung können zudem Einflüsse durch den Prüfer auftreten. Bei der Bestimmung der Makrorauheit ist zu beachten, dass die Griffigkeit nicht alleine von der Größe der Rauheitselemente und von den Zwischenräumen hinsichtlich ihrer Breite und Tiefe abhängt, sondern auch von einer gleichmäßigen Verteilung der Rauheitselemente über die Fahrbahnoberfläche [4].

Heutzutage kann die Erfassung der geometrischen Gestalt der Fahrbahnoberfläche schnell mit berührungslosen Messverfahren gemäß DIN EN ISO 13473-1 [6], die auf dem Prinzip der Triangulationsmessung (Laser) beruhen, ermittelt werden. Beim **Messgerät ELAtextur®** tastet ein Lasersensor zweidimensional die Fahrbahnoberfläche kreisend mit hoher Auflösung ab.

Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Messgerät ELAtextur® wurde auf einen Messkreis mit einem Durchmesser von 180 mm modifiziert und entspricht somit dem Durchmesser des Messkopfes mit den drei rotierenden Gleitschuhen, der während der Griffigkeitsmessung mit dem Prüfgerät Wehner/Schulze (PWS) auf die zu prüfende Oberfläche abgesenkt wird (konventionelle ELAtextur®-Messgeräte haben einen Messkreis mit einem Durchmesser von 150 mm).

Die durch den Messvorgang ermittelte Oberflächenkurve ermöglicht die Berechnung des MPD (Mean Profile Depth; Mittlere Profiltiefe), angegeben in Millimetern, auf der Grundlage eines Halbkreis-segments der Textur. Die mittlere Profiltiefe gibt den Mittelwert der Profiltiefe über eine bestimmte Strecke (Grundlinie) an.

Durch die Anwendung einer Transformationsgleichung kann der MPD-Wert in die geschätzte Texturtiefe ETD (Estimated Texture Depth, vergleichbar mit MTD des Sandfleckverfahrens gemäß DIN EN ISO 13473-1 [6]) umgerechnet werden.

Das Messgerät ELAtextur® ist weitgehend frei von Bedienerinflüssen, kann zur Messung der Mikro- und Makrorauheit verwendet werden und arbeitet mit einem deutlich geringeren Zeitaufwand. Nachteilig ist jedoch, dass stets nur die Fahrbahnoberfläche als Profilschnitt und nicht wie bei den vorgenannten Messgeräten eine flächenhafte Beschreibung der Textur möglich ist.

#### **2.1.4 Griffigkeit**

Die Griffigkeit kennzeichnet die Wirkung der Textur (Rauheit) und der stofflichen Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche auf den Kraftschluss zwischen Fahrzeugreifen und Fahrbahn unter festgelegten Bedingungen [8]. Befindet sich zwischen der Kontaktfläche Fahrzeugreifen und Fahrbahnoberfläche ein Zwischenmedium z.B. Wasser, so verhindert dieses einen vollständigen Kontakt, wodurch der Reibungswiderstand reduziert und der Bremsweg verlängert wird.

Das jeweils vorhandene Griffigkeitsniveau hat somit direkte Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit und gilt nach Huschek [41] als die wichtigste funktionale Eigenschaft von Fahrbahnoberflächen.

Die Griffigkeit verändert sich im Laufe der Zeit, sie wird maßgeblich durch den Verkehr sowie die Umwelt- und Witterungseinflüsse geprägt. In den Herbst- und Wintermonaten führen die überwiegend feuchten Witterungsbedingungen zusammen mit dem auf der Straße vorhandenen Abrieb zu einer rauerer Oberfläche und somit zu einem Griffigkeitsanstieg (Abbildung 2-4).

Der Griffigkeitsverlust in den Sommermonaten wird durch die polierende Eigenschaft des „trockenen“ Abriebs mit verursacht [71, 72].

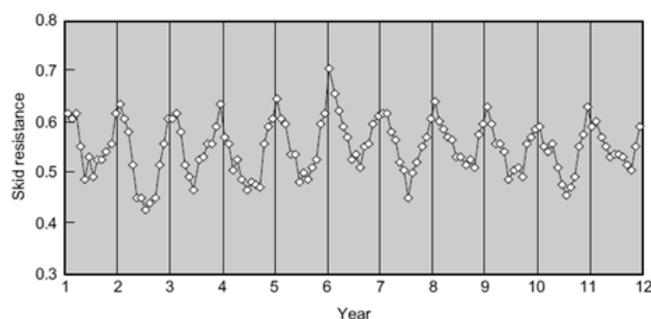


Abbildung 2-4: Verlauf der Griffigkeitseigenschaften einer in England mit der SCRIM untersuchten Fahrbahnoberfläche über einen Messzeitraum von 12 Jahren [nach 72 aus 71]

Im trockenen Zustand sind die Griffigkeiten von Fahrbahndecken meist ausreichend hoch. Bei nassen, feuchten Oberflächen wird die Griffigkeit maßgeblich durch die Rauheit der Straßenoberfläche beeinflusst. Der zwischen Fahrzeugreifen und Fahrbahn befindliche dünne Wasserfilm setzt die Reibung herab bzw. kann sie sogar ganz aufheben, was zu Aquaplaning führen kann.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Untersuchungen von Unfallschwerpunkten im Hinblick auf Straßenglätte als Unfallursache“ wurde 1964 von Beckmann [58] eine Abhängigkeit der Anzahl an „Unfällen bei Nässe“ vom Gleitbeiwert festgestellt. Durch K.-H. Schulze, J. Dames und H. Lange [59] wurden diese Untersuchungen fortgesetzt und ergänzt. Sie stellten das Unfallgeschehen auf Bundesautobahnen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Griffigkeitsniveaus, die sie anhand von Gleitreibungsbeiwerten definierten, dar (Abbildung 2-5). Dabei stellten sie fest, dass das erhöht auftretende Unfallgeschehen bei sehr niedrigen Griffigkeitswerten (kleiner 0,26, bei einer Verkehrsgeschwindigkeit von  $v = 80$  km/h) eindeutig mit Nässe verknüpft ist.

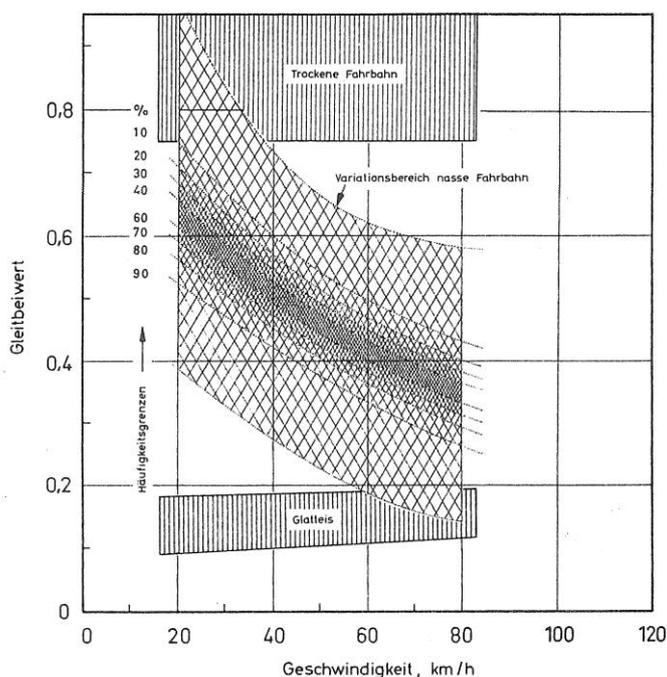


Abbildung 2-5: Häufigkeitsverteilung der Griffigkeitskennwerte im Straßennetz [59]

In den 1980er Jahren führten Schniering [49] und Potschka [61] großflächige Griffigkeitsmessungen auf Autobahnabschnitten mit dem Messverfahren SCRIM (heute SKM) durch und analysierten die

Messungen mit den zugehörigen Unfalldaten. Sie stellten die Gesamtanzahl der Unfälle und die Unfälle bei Nässe für fünf verschiedene Griffigkeitsklassen dar (Abbildung 2-6) und konnten einen Abfall der Gesamtunfälle und der Unfallzahlen bei Nässe bei steigender Griffigkeit, bewertet nach dem Seitenkraftbeiwert, nachweisen. Dabei ist zu beachten, dass nach Kendiziorra et al. [60] der starke Variationsbereich des Reibwertes der nassen Fahrbahn problematisch ist, da er einer vereisten bzw. schneebedeckten aber auch einer trockenen Fahrbahnoberfläche entsprechen kann.

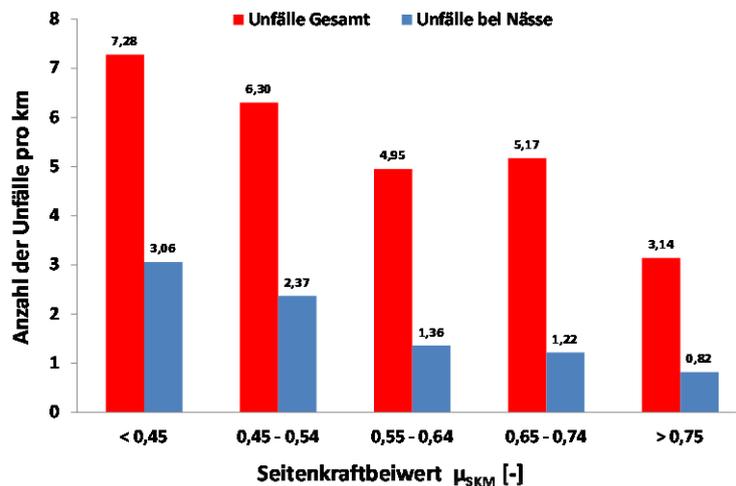


Abbildung 2-6: Anzahl der Unfälle für fünf verschiedene Griffigkeitsklassen [49, 61]

Durch die Forschungsarbeit von Steinauer et al. [62] wurde ebenfalls belegt, dass bei Nässe die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Verkehrsunfalls mit abnehmender Griffigkeit deutlich höher ist (Abbildung 2-7). Die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Trocken-Unfallhäufungsstelle auftritt, ist hingegen nahezu unabhängig vom Griffigkeitsniveau, d.h. trockene Fahrbahnoberflächen stellen im Normalfall kein erhöhtes Unfallrisiko dar.

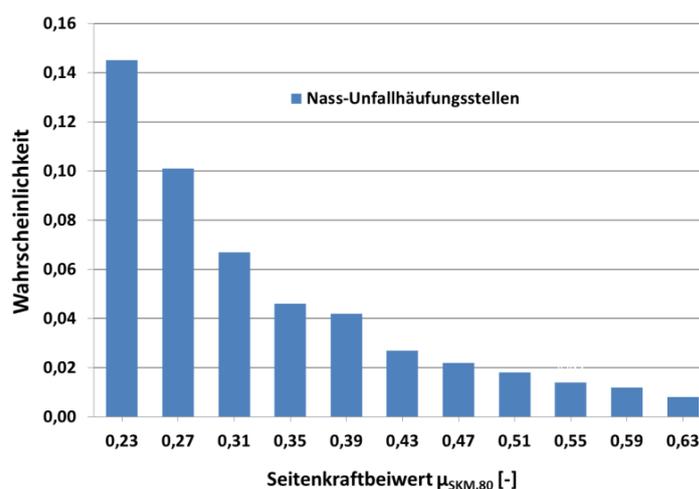


Abbildung 2-7: Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein einer Nass-Unfallhäufungsstelle in Abhängigkeit von der Griffigkeit des rechten Fahrstreifens [62]

Der Fahrzeuglenker kann die Rauheit bzw. die Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche insbesondere bei Nässe nur schwer abschätzen. So kann es vorkommen, dass er trotz angepassten Fahrverhaltens sein Fahrzeug nicht mehr beherrschen kann.

Um den Straßennutzern eine sichere Nutzung der Straßen [9] zu ermöglichen, ist der Baulastträger verpflichtet, auf den Gefahrenpunkt hinzuweisen und Vorkehrungen z.B. durch verkehrsrechtliche Anordnungen (Geschwindigkeitsreduzierung bei Nässe) bzw. durch das Aufstellen von Warntafeln zu treffen.

### 2.1.5 Reibungskoeffizient

Der Reibungskoeffizient  $\mu$  ist vereinfacht ausgedrückt der dimensionslose Quotient aus der durch den Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche aktivierten Reibungskraft (Horizontalkraft  $F_x$ ) und der einwirkenden Normalkraft (einwirkende Vertikalkraft, Reifenauflast  $F_z$ ) unter definierten Messbedingungen [9]. Er ist nahezu unabhängig von der Größe der reibenden Fläche und kann für die reine Festkörperphysik theoretisch maximal den Wert 1 annehmen.

$$\mu = \frac{F_x}{F_z} \quad [-] \quad \text{Formel 1}$$

## 2.2 Widerstand gegen Polieren

### 2.2.1 Allgemeines

Eine Fahrbahnoberfläche ist durch die ständige Verkehrsbeanspruchung einer Polierwirkung ausgesetzt. Die eingesetzten feinen und groben Gesteinskörnungen an der Fahrbahnoberfläche, deren Anteile zudem je nach Asphaltart und -sorte variieren, verlieren durch diese mechanische Beanspruchung sukzessive ihre Flächen- und Kantenschärfe.

Einen großen Einfluss auf die Griffigkeit hat daher der Polierwert der groben Gesteinskörnung (PSV), welcher im Labor durch Simulation der polierenden Wirkung der Verkehrsbeanspruchung ermittelt wird. Je höher der PSV, desto polierresistenter ist das Gestein. Die mineralogische Zusammensetzung der Gesteinsarten wirken sich entscheidend auf das Polierverhalten aus. Durch das Gefüge werden sowohl der Widerstand gegen Polieren, welcher unabhängig von der Aufbereitungsart ist, als auch die Kantenschärfe bzw. Flächenschärfe maßgeblich beeinflusst. Ein hoher Anteil an kristallinen Strukturen im mikrokristallinen Bereich von 0,01 bis 0,1 mm, eine hohe Härte und geringe Spaltbarkeit der Mineralien beeinflussen positiv. Porphyrische Erstarrungsgesteine (Quarzporphyr), metamorphe Gesteine (Amphibolit, Diabas) aber auch unterschiedliche Härte und Spaltbarkeit innerhalb des Gesteins (Granit) und ungleichförmige Sedimentgesteine (Grauwacke) wirken sich positiv auf das Polierverhalten aus [10].

In den Normenteilen der DIN EN 13108 „Asphaltemischgut-Mischgutanforderungen“ [16] und in dem nationalen Umsetzungsdokument, den TL Asphalt-StB 07/13 [85], wurden bislang keine Anforderungen an den Polierwert für die feinen Gesteinskörnungen festgelegt. Es wurde vielmehr der an der groben Gesteinskörnung gemäß DIN EN 1097 Teil 8 [52] ermittelte Polierwert auf die feinen Gesteinskörnungen des gleichen Herstellwerkes übertragen.

Dames [17] konnte nachweisen, dass aufgrund der mineralogischen Zusammensetzung und der Mineralkorngröße nicht vom Polierwiderstand der groben Gesteinskörnungen auf den Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnung geschlossen werden kann. Er stellte u.a. fest, dass Hochofenschlacken und Basalte aufgrund ihrer feinkristallinen Oberflächenstruktur meist nur einen geringen Polierwert in

der groben Gesteinskörnung besitzen, die daraus gewonnenen gebrochenen feinen Gesteinskörnungen jedoch deutlich höhere Polierwerte aufweisen.

Auch die granulometrischen Eigenschaften der feinen Gesteinskörnungen (wie z.B. Kornform, Korngrößenverteilung, Oberflächenrauheit), welche vom Mineralbestand, vom Gefüge des aufzubereitenden Gesteins und von der Aufbereitungsart abhängen, können einen Einfluss auf den Widerstand gegen Polieren ausüben. So ist bekannt, dass sich feine Gesteinskörnungen mit einem hohen Kornanteil zwischen 0,5 mm und 1,0 mm positiv auf die Griffigkeit von Betonfahrbahndecken [36] auswirken.

Lange Zeit existierten für die granulometrischen Eigenschaften von feinen Gesteinskörnungen außer der Bestimmung der Korngrößenverteilung keine Prüfverfahren. Erst basierend auf der Forschungsarbeit [64] steht seit dem Jahr 2015 ein anerkanntes, geeignetes Prüfverfahren zur „Bestimmung der Kornform von feinen Gesteinskörnungen durch Stabsiebung - Plattigkeitskennzahl“ (TP Gestein-StB; Teil 4.3.3) [73] zur Verfügung.

Untersuchungen an Versuchsstrecken in Bamberg [18] und Rottweil [19] bzw. Laborversuche zeigten, dass Asphaltdeckschichten aus Splittmastixasphalt maßgeblich vom Widerstand gegen Polieren der groben Gesteinskörnung (gebrochene gGK) und Asphaltdeckschichten aus Asphaltbeton vom Widerstand gegen Polieren der feinen Gesteinskörnungen (fGK) beeinflusst werden [20, 21]. Untersuchungen aus Österreich [22, 23] und eigene Untersuchungen [24] haben dies bestätigt.

Deshalb sollten bei der Konzeption von Splittmastixasphalten und offenporigen Asphalten stets polierresistente Gesteine in den groben Korngruppen verwendet werden. Bei Asphaltbetonen hingegen sollten kantenscharfe, polierresistente feine Gesteinskörnungen mit berücksichtigt werden. Die Griffigkeit von Gussasphalten wird zuerst durch das verwendete Abstreumaterial, langfristig aber auch durch die im Asphaltmischgut verwendeten Gesteinskörnungen beeinflusst.

## **2.2.2 Entwicklung der Anforderungen an die Gesteinskörnungen**

Die Anforderungen an den Widerstand gegen Polieren (PSV) an Gesteinskörnungen für die Verwendung in Asphaltbetonen für Deckschichten und Splittmastixasphalte haben sich in den letzten Jahren geändert (Abbildung 2-8). Die zwischenzeitlich gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse bzw. die Umstellungen aufgrund der Veröffentlichung der harmonisierten Europäischen Normen flossen dabei immer in die Überarbeitung und Fortschreibung der Regelwerke mit ein.

Im Jahr 1996 führte Bayern (By) [26], für die gebrochenen groben Gesteinskörnungen (gGK), die zur Herstellung der obersten Schicht von Asphaltfahrbahndecken verwendet werden, erstmalig Anforderungswerte hinsichtlich des Widerstands gegen Polieren ein. Für Straßen der Bauklassen SV, I bis II und Straßen der Bauklasse III mit besonderer Beanspruchung wurde ein Mindestwert (Einzelwertbetrachtung) von 50 für den Polierwert PSV der Körnung 8/10 mm vorgeschrieben. In den Bauklassen III mit normaler Beanspruchung bis VI wurde ein PSV von 43 gefordert. Diese Regelungen wurden im Jahr 1999 bundeseinheitlich (Bund) übernommen [27].

Als erstes Bundesland führte Bayern im Jahr 1999 [28] für die gebrochenen feinen Gesteinskörnung (fGK), die in Deckschichten aus Asphaltbeton des Typs S mitverwendet werden einen Anforderungswert mit PSV 43 ein. Für Splittmastixasphalt wurde auf einen Anforderungswert verzichtet.

Bundeseinheitlich hingegen wurden erst im Jahr 2002 Anforderungswerte [86] an den Widerstand gegen Polieren für die feinen Gesteinskörnungen gestellt. Hierbei wurden die Anforderungswerte von den groben auf die feinen Gesteinskörnungen übertragen. Des Weiteren wurde festgelegt [86, 30], dass der Mittelwert aus den letzten drei PSV-Prüfungen der Fremdüberwachung (Mittelwertbetrachtung) einzuhalten ist.

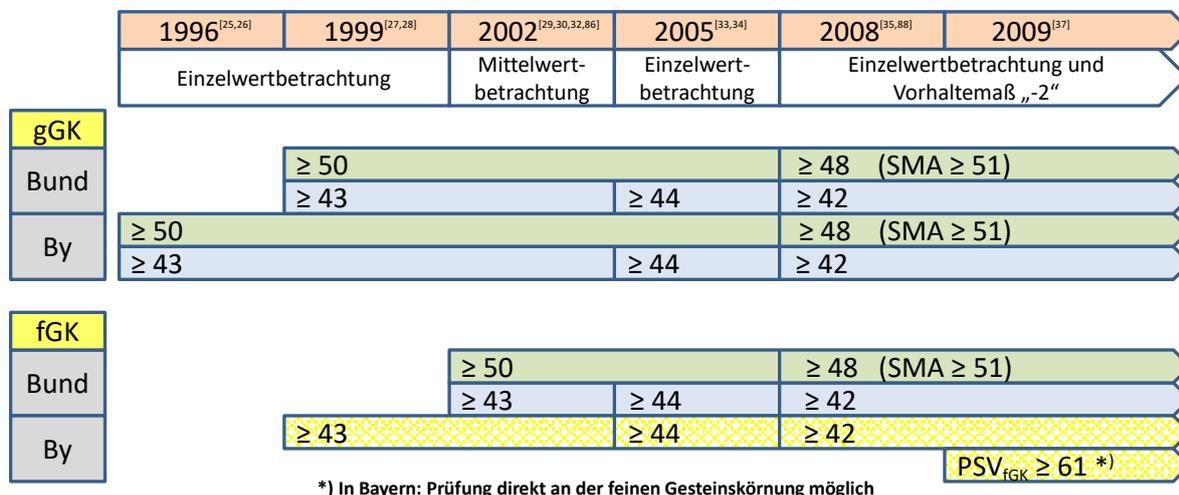


Abbildung 2-8: Entwicklung der Anforderungen an den Widerstand gegen Polieren an Gesteinskörnungen für die Verwendung in Asphaltbetonen für Deckschichten und Splittmastixasphalte. Anforderungen für die Bauklassen SV, I, II, IIIS sind grün, die der BK III bis VI sind blau, die bayerischen Anforderungen sind hellgelb, hinterlegt

Mit der Veröffentlichung der harmonisierten Europäischen Normen für Gesteinskörnungen und Gesteinskörnungsgemische mussten die nationalen Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau [31] angepasst werden. Anstelle eines expliziten Anforderungswertes für die groben Gesteinskörnungen (gGK) wurden nunmehr Kategorien an den Widerstand gegen Polieren ( $PSV_{44}$ ,  $PSV_{50}$ ,  $PSV_{NR}$  und  $PSV_{\text{angegeben}}$ ) eingeführt. Eine Kategorie für den PSV von mindestens 43 war europäisch nicht vorgesehen, deshalb wurde der Anforderungswert für die Gesteinskörnungen, die für Asphaltdeckschichten in Straßen der Bauklassen III mit normaler Beanspruchung bis VI [33] eingesetzt werden, um „Eins“ erhöht und die Kategorie  $PSV_{44}$  gefordert. Für die höheren Bauklassen konnte das Anforderungsniveau beibehalten werden. Jeder durch die PSV-Prüfung bestimmte Einzelwert musste mindestens den Zahlenwert der Kategorie erreichen (Einzelwertbetrachtung), eine Mittelwertbetrachtung war europäisch nicht mehr zulässig.

In den darauffolgenden Jahren wurde festgestellt, dass sich die geforderten Kategorien durch den Hersteller nicht zielsicher einhalten lassen. In der Folge wurden die Kategorien um zwei Punkte (Vorhaltemaß) abgesenkt [35, 88], so dass die ursprünglichen Anforderungen, die aufgrund der Mittelwertbetrachtung für Deutschland gewählt wurden, nun wieder eingehalten werden. Für Splittmastixasphalt des Typs S wurde die Kategorie  $PSV_{51}$  eingeführt.

Mit Umsetzung der europäischen Normung für Asphalt in die TL Asphalt-StB 07 [40] und deren Fortschreibung [85] wurden die bislang geltenden Anforderungen an feine gebrochene Gesteinskörnungen bzw. deren Verwendung in Asphalt deutlich verschärft. Dies hat auch Auswirkungen auf bis dahin praxiserprobte und -bewährte Asphalte bzw. die Verwendungsmöglichkeiten regional vorkommender Gesteinskörnungen.

Für die feinen gebrochenen Gesteinskörnungen wurden deshalb im Zuständigkeitsbereich der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern ergänzende Regelungen festgelegt und eingeführt, deren Geltungsdauer zunächst befristet [37] und anschließend unbefristet [38, 39] bis dato [81] übernommen wurden. Sie lauten: „Gebrochene feine Gesteinskörnungen (fGK), die in den Asphaltmischgutarten AC D, SMA, MA und PA verwendet werden, müssen aus Lieferwerken stammen, deren grobe Gesteinskörnung (gGK) einen Widerstand gegen Polieren der Kategorie  $PSV_{\text{angegeben}}$ (42) aufweisen. Sollen andere gebrochene feine Gesteinskörnungen Verwendung finden, muss mit dem Verfahren nach TP Gestein-StB Teil 5.4.3 [53] nachgewiesen werden, dass der Gesamtanteil an feiner Gesteinskörnung im Gesteinskörnungsgemisch des Asphaltrechnerisch einem Polierwert der feinen Gesteinskörnung ( $PSV_{\text{fGK}}$ ) von mindestens 61 entspricht. Zugleich muss der  $PSV_{\text{fGK}}$  der anteiligen feinen Gesteinskörnungen jeweils mindestens 58 betragen. Erfolgt der Nachweis über  $PSV_{\text{fGK}}$ , so muss die Prüfhäufigkeit im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) mindestens zweimal pro Jahr betragen. Der Hersteller der feinen Gesteinskörnung hat das Prüfmerkmal in seine Herstellererklärung einschließlich Sortenverzeichnis aufzunehmen. Der Hersteller des Asphaltrechnerisch hat den  $PSV_{\text{fGK}}$  der verwendeten feinen Gesteinskörnungen und den rechnerisch resultierenden  $PSV_{\text{fGK}}$  im Erstprüfungsbericht anzugeben.“

## 2.3 Griffigkeitsmessung

### 2.3.1 Allgemeines

Die Griffigkeitsmessung an **Asphaltoberflächen** kann in situ mit schnell fahrenden, kontinuierlich messenden Systemen (Seitenkraftmessverfahren (SKM), LFC-Verfahren (LFC)) oder stationär, mit der kombinierten Griffigkeitsmessung (SRT/AM) erfolgen. Die kombinierte Griffigkeitsmessung (SRT/AM) kann ebenso wie das Prüfverfahren nach Wehner/Schulze (PWS) auch im Labor an entnommenen Ausbauproben angewendet werden (Tabelle 2-1).

Griffigkeitsmessung / Messverfahren			
Asphaltoberfläche		Gesteinskörnungen	
in situ		Labor	Labor
schnell fahrend, kontinuierlich messend	SKM	SRT/AM	PSV
	LFC	PWS	$PSV_{\text{fGK}}$
stationär messend	SRT/AM		PWS

Tabelle 2-1: Griffigkeitsmessverfahren für Asphaltoberflächen bzw. Gesteinskörnungen

Die mit den verschiedenen physikalischen Messverfahren ermittelten Messergebnisse sind aufgrund des unterschiedlichen Messprinzips nicht miteinander vergleichbar bzw. korrelierbar.

So können z.B. mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze nur punktuelle Griffigkeitsmessungen an entnommenen Bohrkernen im Labor ermittelt werden, während mit dem Seitenkraftmessverfahren eine kontinuierliche Erfassung der Griffigkeit in situ über die gesamte Messstrecke hinweg erfolgt. Ein direkter Vergleich bzw. eine Umrechnung der  $\mu_{\text{PWS}}$  und  $\mu_{\text{SKM}}$  Werte kann jedoch aufgrund des unterschiedlichen Bewertungshintergrunds nicht erfolgen. Es konnte lediglich ein Zusammenhang

zwischen den nach aufsteigender Ordnung sortierten Griffigkeitswerten  $\mu_{PWS}$  an den Bohrkernen mit den Seitenkraftbeiwerten  $\mu_{SKM}$  festgestellt werden [70].

Im Vergleich zu den Asphaltoberflächen können die Polierwerte (Griffigkeitswerte) der groben bzw. feinen **Gesteinskörnungen** nur im Labor, mit dem PSV-Verfahren (PSV bzw.  $PSV_{fgk}$ ) oder mit Prüfverfahren nach Wehner/Schulze (PWS) ermittelt werden.

### 2.3.2 Griffigkeitsmessungen in situ

Bei den schnell fahrenden Messsystemen erfolgt eine kontinuierliche Erfassung der Griffigkeit über die gesamte Messstrecke hinweg. Der Kraftschluss zwischen Fahrzeug und Fahrbahn wird durch einen speziellen Messreifen unter vorgegebenen Bedingungen an einer kontinuierlichen Messlinie erfasst. Die Griffigkeit kann somit ohne wesentliche Beeinträchtigung des Verkehrsflusses gemessen werden.

#### Seitenkraftmessverfahren (SKM)

In Deutschland wird aktuell das **Seitenkraftmessverfahren (SKM)** [7] (früher Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine (SCRIM)) angewendet. Bei diesem Messverfahren wird die Seitenkraft auf angrenzender Spur am definiert unter  $20^\circ$  schräg laufenden Messrad (zusätzliches Rad in der rechten Rollspur des Messfahrzeuges) ermittelt. Zur Bewertung der Griffigkeit dient der Seitenkraftbeiwert  $\mu_{SKM}$ .

#### LFC-Messverfahren (Grip Tester)

Beim **LFC-Verfahren** (LFC, **Longitudinal Friction Coefficient**, GripTester) [44] wird nach dem Prinzip des definiert gebremsten Messrades, mit einem kleinen Messreifen und konstantem Schlupf von ca. 15 %, auf einer mit Wasser benetzten Spur der Kraftschlussbeiwert  $\mu_{FLC}$  gemessen. Das LFC-Verfahren kann für Griffigkeitsmessungen im kommunalen Straßennetz, im untergeordneten Außerorts-Straßennetz und auf Verkehrsflächen des ruhenden Verkehrs (Parkplätzen), Rad- und Fußgängerverkehrsflächen und Fahrbahnmarkierungen eingesetzt werden.

#### SRT Pendel (Skid Resistance Tester) / Ausflussmesser nach Moore (AM)

Bei der **kombinierten Griffigkeitsmessung (SRT/AM)** werden gemäß der „Technische Prüfvorschrift für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau, Teil: Messverfahren SRT“ (TP Griff-STB (SRT)) [4] sowohl Messungen mit dem Skid Resistance Tester (SRT) als auch Ausflussmessungen nach Moore (AM) [46] durchgeführt. Mit diesem Messverfahren kann aufgrund der stationär arbeitenden Messsysteme lediglich eine punktuelle Erfassung der Griffigkeit erfolgen. Die kombinierte Griffigkeitsmessung kann auch im Labor an Ausbauproben durchgeführt werden. Die Gerätebeschreibungen und die Messprinzipien der beiden Messverfahren wurden bereits im Abschnitt 2.1.3 erläutert.

### 2.3.3 Polierbeanspruchung und Griffigkeitsmessungen im Labor

Polierbeanspruchungen und Griffigkeitsmessungen im Labor können sowohl an Probekörpern, hergestellt aus feinen bzw. groben Gesteinskörnungen, als auch an Asphaltoberflächen durchgeführt werden.

### **PSV (Polished Stone Value)**

Das PSV-Verfahren nach den TP Gestein-StB Teil 5.4.1 [51] bzw. den DIN EN 1097-8 [52] ist das weltweit am häufigsten eingesetzte Verfahren zur Bewertung der Polierresistenz von Gesteinskörnungen. Der durch das PSV-Verfahren ermittelte PSV (Polished Stone Value) ist ein Maß für die Beständigkeit von Gesteinskörnungen (Prüfkornklasse 8/10 mm) gegen Polieren.

Die Nachahmung der polierenden Wirkung der Fahrzeugreifen erfolgt durch ein Straßenrad (vollgummibereiftes Rad). Zur Verstärkung der Polierwirkung wird unter Wasserzugabe grober und feiner Korund auf die Prüfkörperoberfläche zu dosiert. Anschließend erfolgt die Griffigkeitsmessung am zuvor angehässelten, feuchten Probekörper mit Hilfe des SRT-Pendelgeräts.

Die Vorgehensweise bei der Bestimmung des Polierwertes von feinen Gesteinskörnungen (**PSV<sub>FGK</sub>**) nach TP Gestein-StB Teil 5.4.3 [53] erfolgt weitgehend analog zur Vorgehensweise bei groben Gesteinskörnungen. Es wird jedoch eine nicht kornformbereinigte Prüfkorngröße 0,71/1 mm geprüft. Als Poliermittel für die Polierbeanspruchung wird ausschließlich feiner Naturkorund verwendet.

### **Polierwert Wehner/Schulze**

Alternativ zum PSV-Verfahren kann der Polierwert von groben und feinen Gesteinskörnungen auch mit dem Verfahren nach TP Gestein-StB, Teil 5.4.2 „Bestimmung des Polierwertes mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze“ (PWS) [55] bestimmt werden. Das Verfahren kann auch für die Bestimmung des Polierwerts von Asphaltoberflächen angewendet werden. Der Geräteaufbau, die Unterteilung des Verfahrens in einen Polier- und Griffigkeitsmessvorgang ist für die beiden Anwendungsfälle identisch und wird im Zuge des Schwerpunktes der Arbeit im Abschnitt 3 beschrieben.

## **2.3.4 Bewertung der Straßengriffigkeit**

Das Griffigkeitsniveau der Streckenabschnitte wird sowohl direkt nach dem Bau im Rahmen der Abnahme als auch zum Ablauf der Verjährungsfrist für Mängelansprüche [1] geprüft.

Damit der Straßenbaulastträger seiner Verkehrssicherheitspflicht nachkommen kann, rechtzeitig Informationen über den Zustand des Straßennetzes hat und ggf. Instandsetzungs- sowie Erhaltungsmaßnahmen planen kann, wird seit dem Jahr 1996 [63] das Griffigkeitsniveau in regelmäßigen Abständen im Rahmen der Zustandserfassung [47] systematisch erfasst, überprüft und bewertet.

Die Messung der Griffigkeit kann durch verschiedene Messsysteme auf einer definiert angehässelten Oberfläche erfolgen. Dabei wird die Griffigkeit mit Hilfe des Reibungskoeffizienten des angewandten Griffigkeitsmessverfahrens beschrieben.

Für die Messungen der Griffigkeit im Rahmen der Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) von Bundesautobahnen und Bundesstraßen aber auch von Staatsstraßen wird überwiegend, aufgrund der gleichzeitigen, kontinuierlichen Erfassung der gesamten Messstrecke, das Seitenkraftmessverfahren (SKM) angewendet. Für kleinere Verkehrsflächen und zur punktuellen Überprüfungen der Griffigkeit eignen sich bis heute die kombinierten Griffigkeits- und Rauheitsmessungen mit dem SRT und AM. Die dimensionslosen Zustandswerte für die Zustandsgröße Griffigkeit werden mit Noten von 1 bis 5 belegt, die derzeit durch **drei Kennwerte** (Zielwert, Warnwert, Schwellenwert) beschrieben sind.

Der Zustandswert 1,5 entspricht dem **Zielwert**, ein Zustandswert kleiner 1,5 beschreibt einen sehr guten Zustand. Ein guter Zustand liegt vor, wenn der Zustandswert zwischen 1,5 und 3,5 liegt. Ein ausreichender Zustand ist erreicht, wenn der Zustandswert zwischen 3,5 und 4,5 liegt.

Der Zustandswert von 3,5 wird als **Warnwert** bezeichnet. Wird dieser Wert erreicht bzw. überschritten, ist eine intensive Beobachtung und Analyse der Ursache erforderlich, gegebenenfalls erfolgt die Planung geeigneter Erhaltungsmaßnahmen.

Der Zustandswert von 4,5 wird als **Schwellenwert** bezeichnet. Beim Erreichen oder Überschreiten des Schwellenwerts ist eine Einleitung von baulichen Maßnahmen erforderlich, bis zur Ausführung sind verkehrsbeschränkende Maßnahmen zu veranlassen. Ein schlechter Zustand ist erreicht, wenn der Zustandswert über 4,5 liegt.

Ereignen sich bei Nässe vermehrt Unfälle und liegen die Griffigkeitswerte in den betroffenen Streckenabschnitten unterhalb des Schwellenwerts (Zustandswert  $\leq 4,5$ ) [9], so muss der Straßenbaulastträger ebenfalls geeignete verkehrsrechtliche oder bauliche Maßnahmen treffen, um eine Verbesserung der Griffigkeit zu erreichen und somit die Verkehrssicherheit zu erhöhen.

### 3 Asphalt - Griffigkeit nach Polierung

#### 3.1 Allgemeines

Die Bestimmung des Polierwerts von Asphaltoberflächen mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze ist in den DIN EN 12697-49 „Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 49; Messung der Griffigkeit nach Polierung“ [54] sowie in dem Entwurf der TP Asphalt-StB, Teil 49 „Bestimmung der Griffigkeitsentwicklung von Oberflächen mit dem Prüfverfahren Wehner/Schulze (PWS)“ [56] beschrieben. Forschungsvorhaben [65-70] haben bestätigt, dass sich das Prüfverfahren Wehner/Schulze zur Griffigkeitsprognose eignet, d.h. mit diesem Prüfverfahren lassen sich Erkenntnisse über die Griffigkeitsentwicklung einer Asphaltoberfläche bis zum Ende ihrer Gebrauchsdauer gewinnen. Das Prüfgerät (Abbildung 3-1) für das Verfahren Wehner/Schulze besteht aus einer Polier- und einer Griffigkeitsmessstation.

Die Bestimmung des Polierwerts bzw. die Griffigkeitsprognose an Asphaltoberflächen wird an Ausbauproben (Bohrkernen) oder an walzsektorverdichteten Asphaltplatten bzw. daraus herausgebohrten Bohrkernen mit einem Durchmesser von 225 mm durchgeführt.

#### 3.2 Probenvorbereitung

Die im Labor hergestellten Probekörper bzw. die in situ entnommenen Bohrkern (Originalzustand - keine Verkehrsbeanspruchung) sind i.d.R. aktuell durch einen definierten Sandstrahlvorgang (mechanische Beanspruchung) weitestgehend vom Asphaltmörtel zu befreien, so dass die aufgeraute Oberfläche dem Zustand nach dem Einbau und dem Abwittern des Bindemittelfilms entspricht.

Das Sandstrahlen erfolgt mit einer runden Strahldüse ( $d \sim 6,3$  mm) und einem Strahlmittel aus Korund (0,5/1) mm mittels Druckluft bei  $(6,0 \pm 0,3)$  bar. Der Strahlwinkel beträgt  $75^\circ$ , der Abstand zwischen Strahldüse und Prüfoberfläche ist mit  $(70 \pm 5)$  mm festgelegt.

Vor der Durchführung des Sandstrahlvorgangs ist der Probekörper auf einer ebenen Unterlage für mindestens 120 min bei  $(5 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$  zu temperieren. Mittels Druckluft ist nach der Entnahme der Probekörper aus der Kältekammer, die Prüfkörperoberfläche von der auskondensierten Luftfeuchte zu befreien. Gemäß den DIN EN 12697-49 [54] ist anschließend die zu prüfende Oberfläche solange gleichmäßig zu sandstrahlen, bis sämtliche Bindemittelrückstände von der Asphaltoberfläche entfernt sind. Als geeignete Strahldauer wird eine Zeitspanne von  $(120 \pm 10) \text{ s}$  angeführt.

Die an den Laborprobekörpern ermittelten Griffigkeiten stimmen allerdings nicht immer mit denen an den Ausbauproben überein. Vielmehr zeigten Forschungsarbeiten [69, 70], dass die Art der Probekörpervorbereitung einen wesentlichen Einfluss auf die Griffigkeitsentwicklung und den Griffigkeitsendwert ausübt.

Um die Vergleichbarkeit weiter zu verbessern bzw. gewährleisten zu können, muss die Vorbereitung der Probekörper präziser definiert werden. Hierzu ist festzustellen, in welchem Maß das Polierergebnis von der Probekörpervorbereitung beeinflusst wird.

Die Vorbereitung der im Labor hergestellten Probekörper ist daher entsprechend anzupassen und eine praxisgerechte Probenvorbereitung, mit reproduzierbaren Ergebnissen, für die Griffigkeitsprognose ist zu entwickeln.



Abbildung 3-1: Prüfgerät Wehner/Schulze

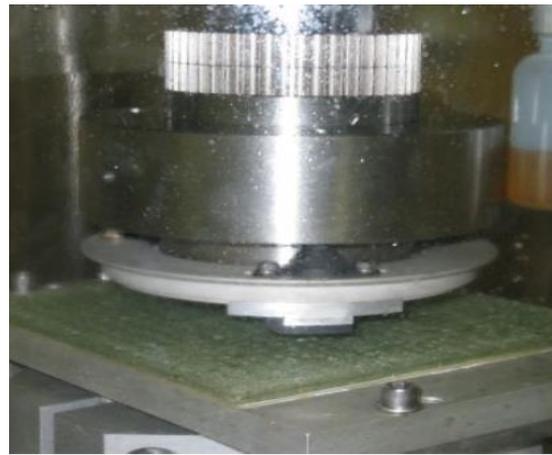


Abbildung 3-2: Kalibriervorgang auf der Glasplatte

### 3.3 Überprüfung / Kalibrierung des Prüfgerätes

Vor jeder Inbetriebnahme des Prüfgerätes ist eine Kontrolle der Massenströme und der Geräteparameter (insbesondere die Dosierungsparameter des Wasser-Quarzmehl-Gemisches, die Temperatur und die Geschwindigkeitsparameter beim Polier- und Messvorgang) durchzuführen.

Vor und nach der eigentlichen Griffigkeitsprognose ist eine Funktionskontrolle der Griffigkeitsmess-einrichtung und des zu verwendenden Messgummisatzes mittels einer Kontrollplatte (Abbildung 3-2) zu überprüfen.

Die Kontrollplatte muss eine, durch den Messvorgang in ihrer Griffigkeit unveränderliche Oberfläche und somit ein konstantes Griffigkeitsniveau aufweisen. Im Regelwerk [54] ist aktuell eine Kontrollplatte aus Glas mit strukturierter Oberfläche (Drahtnormenglas 521 mm - 7 mm) verankert.

Das Messergebnis der Kontrollplatte darf maximal 10 % vom angegebenen Referenzwert  $\mu_{\text{ref}}$  (bekannter Griffigkeitswert) abweichen. Der durchschnittliche berechnete Referenzwert  $\mu_{\text{ref}}$  (Mittelwert aus mindestens 50 Messungen auf der Kontrollplatte aus Glas) liegt i.d.R. im Bereich von 0,090 bis 0,110 und damit weit unter den in situ an den Asphaltoberflächen auftretenden Griffigkeiten. Interne Untersuchungen zeigen, dass die an Asphaltprobekörpern gemessenen Anfangsgriffigkeiten bei Werten über 0,600 liegen können.

Zur Absicherung der Messergebnisse ist es deshalb notwendig, die Griffigkeitsmesseinrichtung über den gesamten Messbereich hinweg zu überprüfen / kalibrieren. Wird lediglich eine Kontrollplatte mit einem spezifischen Griffigkeitsniveau zur Funktionskontrolle verwendet, so können nur die von der Messeinrichtung ermittelten Reibungskoeffizienten  $\mu$ , die sich in der Nähe dieses spezifischen Griffigkeitsniveaus  $\mu_{\text{ref}}$  befinden, verifiziert werden. Die Qualität von Messergebnissen, die sich in einem deutlich höheren Messbereich befinden, kann nicht garantiert bzw. abgebildet werden.

Zur Gewährleistung sicherer Messwerte über den gesamten Messbereich hinweg, insbesondere im hohen Messbereich, ist es deshalb notwendig Kalibrieroberflächen mit unterschiedlichen Griffigkeitsniveaus vorzuhalten.

### 3.4 Poliervorgang

Die Polierstation besteht aus einem Polierkopf, an welchem drei konische Polierrollen (Abbildung 3-3) angebracht sind. Die Polierrollen bestehen aus einem kreiskegelförmigen Metallträgergehäuse, auf dessen Oberfläche eine 8,8 mm starke Gummischicht (Shorehärte  $(65 \pm 3)$  Shore A) aufgebracht ist. Je acht Profilrillen mit einer Tiefe bzw. Breite von 4,5 mm bzw. 3,5 mm werden in diese Gummischicht eingeschnitten.



Abbildung 3-3: Detail Polierrollen mit Profilrillen



Abbildung 3-4: Messkopf (Griffigkeitsmessung)

Für den Poliervorgang wird der Polierkopf auf die Prüfkörperoberfläche abgesenkt. Durch die Auflast  $((392 \pm 3) \text{ N})$  des Polierkopfes wird zwischen den Polierrollen und der Prüfkörperoberfläche ein mittlerer Kontaktdruck von  $0,40 \text{ N/mm}^2$  erzeugt. Dabei können Spitzenkontaktdrücke, vergleichbar mit dem eines LKW-Reifens, mit bis zu  $0,6$  bis  $0,7 \text{ N/mm}^2$  auftreten. Durch die drei mit Schlupf rotierenden Polierrollen wird ein Kreisring der Prüfkörperoberfläche von ca.  $305 \text{ cm}^2$  beansprucht. Die für den Poliervorgang zu verwendende Drehzahl des Polierkopfes beträgt  $500 \text{ U/min}$ , was einer Bahngeschwindigkeit von  $17 \text{ km/h}$  entspricht. Dies führt zu  $90.000$  Überrollungen innerhalb einer Stunde.

Während des Poliervorganges erfolgt die Polierbeanspruchung zum einem durch den durch die Lagerreibung erzeugten Schlupf der Polierrollen (0,5 bis 1,0 %), zum anderen verstärkt ein Wasser-Quarzmehl-Gemisch - bestehend aus  $(60 \pm 2)$  g Quarzmehl Typ „Milisil W6“ auf einen Liter Wasser - die Polierwirkung. Die Temperatur des Wasser-Quarzmehl-Gemisches muss während des Poliervorganges permanent kontrolliert werden und darf  $25\text{ °C}$  nicht überschreiten.

Nach der Polierbeanspruchung müssen die in den Zwischenräumen verbleibenden Rückstände aus Materialabtrag und Quarzmehl zur Vermeidung falscher Messergebnisse entfernt werden.

### 3.5 Griffigkeitsmessung

Die Griffigkeitsmessstation besteht aus einem kuppelbaren Messkopf (Rotationskopf), an dem drei an einem Kreisring befestigte Messgummis (Abbildung 3-4) angebracht sind.

Die Messgummis bestehen aus einem kreisringsegmentförmigen Metallträger, auf dem eine Gummischicht, mit einer Shorehärte von  $(65 \pm 3)$  Shore A und einer Dicke von  $(5 \pm 1)$  mm aufgebracht ist. Die mittlere Länge des Messgummis beträgt  $(30 \pm 1)$  mm, die Breite  $(14,5 \pm 0,1)$  mm. Die Aufstandsfläche eines Messgummis beträgt ca.  $4,35\text{ cm}^2$  und entspricht der Aufstandsfläche eines Stollens eines durchschnittlichen PKW-Reifens.

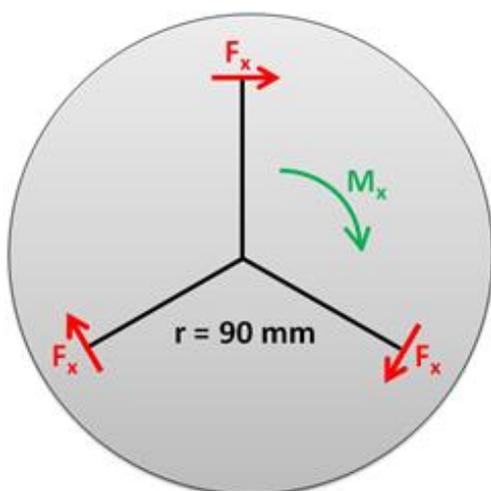
Bei der Griffigkeitsmessung wird der Messkopf im angehobenen Zustand auf eine Umlaufgeschwindigkeit von  $(100 \pm 5)$  km/h beschleunigt. Nach Erreichen der Höchstgeschwindigkeit wird auf die Prüfkörperoberfläche ein Wasserfilm von ca. 1 mm Dicke aufgebracht. Die Temperatur des Wassers beträgt hierbei  $(12 \pm 4)\text{ °C}$ , die Aufbringungsmenge bis zum Ende der Griffigkeitsmessung  $(20 \pm 2)$  l/min. Nach Abschalten des Antriebes wird der Messkopf mit den drei rotierenden Messgummis durch das Eigengewicht auf die bewässerte, zu prüfende Oberfläche abgesenkt.

Das auf die Prüfkörperoberfläche aufgegebene Prüfwasser, dient zum einen der Kühlung der Messgummis (die während des Bremsvorgangs erzeugte Reibungsenergie wird größtenteils in Wärmeenergie umgewandelt) und zum anderen gewährleistet es, dass die aufgebrachte Wassermenge bei allen Prüfkörperoberflächen konstant ist, wodurch es die unterschiedlichen Texturausprägungen (insbesondere das Drainageverhalten) bei der Griffigkeitsmessung berücksichtigt.

Durch die Auflast (Vertikalkraft  $F_z$ ) des Messkopfes  $(253 \pm 3)$  N wird ein mittlerer Kontaktdruck von ca.  $0,2\text{ N/mm}^2$  zwischen den Messgummis und der Prüfkörperoberfläche erzeugt. Dieser Wert entspricht annähernd dem mittleren Reifendruck von 2 bar beim PKW-Reifen. Der Kontaktdruck bei der ersten flächigen Berührung der Messgummis auf die Probekörperfläche ist deutlich höher und schwankt bis die Messgummis gleichmäßig über die Prüfkörperoberfläche gleiten.

Pro Messkopfumdrehung gleiten die drei am Kreisring ( $d = 180\text{ mm}$ ) befestigten Messgummis über die zu prüfende, polierte Oberfläche und werden durch die auftretende Reibung innerhalb kurzer Zeit bis zum Stillstand abgebremst. Aus der 565 mm langen Kreisbahn ergibt sich eine Prüffläche von ca.  $82\text{ cm}^2$ . Diese Prüffläche ist lediglich für regelmäßige, nahezu plane Oberflächen repräsentativ. Bei Prüfkörperoberflächen mit einer ausgeprägten Makrotextur berühren die Messgummis die Prüfoberfläche nicht zur Gänze, was z.B. bei dem zu prüfenden zweiten Probekörper zu abweichenden Prüfergebnissen führen kann.

Die während des Abbremsvorgangs zwischen den Messgummis und der Prüfoberfläche auftretenden horizontalen Reibungskräfte ( $F_x$ ), welche ein Drehmoment ( $M_x$ ) erzeugen, werden über den gesamten Geschwindigkeitsbereich bis zum Stillstand aufgezeichnet. Das Drehmoment ( $M_x$ ) wird über die Probeneinspannvorrichtung auf den Probentisch übertragen, mit der Referenzdrehmoment-Scheibe abgeglichen und ausgelesen. Mit dem Abstand ( $r$ ) der Messgummis zum Drehmittelpunkt und der bekannten Auflast ( $F_z$ ) kann der Reibungsbeiwert  $\mu$  berechnet werden. Die Zusammenhänge lassen sich wie folgt graphisch und rechnerisch darstellen (Abbildung 3-5):



$$M_x = 3 * r * F_x \quad [\text{Nm}] \quad \text{Formel 2}$$

$$\mu = \frac{3 * F_x}{F_z} \quad [-] \quad \text{Formel 3}$$

$$\mu = \frac{M_x}{r * F_z} \quad [-] \quad \text{Formel 4}$$

- $\mu$ : Reibungsbeiwert
- $F_x$ : aktivierte Horizontalkraft eines Messgummis
- $F_z$ : Vertikalkraft (aus der Auflast 253 N)
- $M_x$ : Drehmoment
- $r$ : Abstand zum Drehmittelpunkt
- $\mu$ : Reibungsbeiwert

Abbildung 3-5: Schema der Griffigkeitsmessung, Formelmäßiger Zusammenhang

### 3.5.1 Ermittlung des Reibungskoeffizienten $\mu_m$

Bei einer Griffigkeitsmessung werden die Reibungsbeiwerte  $\mu$  über den gesamten Geschwindigkeitsbereich (100 bis 0 km/h) berechnet und der Reibungsverlauf graphisch dargestellt (Abbildung 3-6).

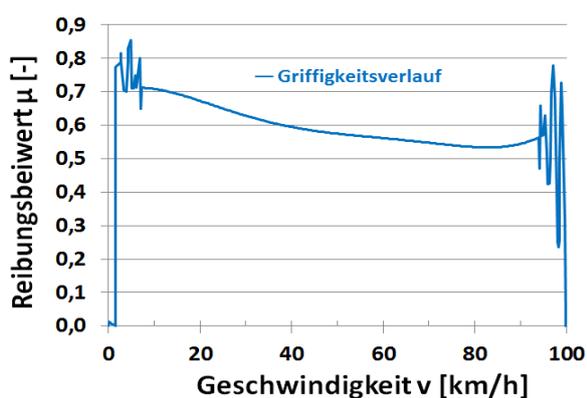


Abbildung 3-6: Reibungsverlauf einer Einzelmessung

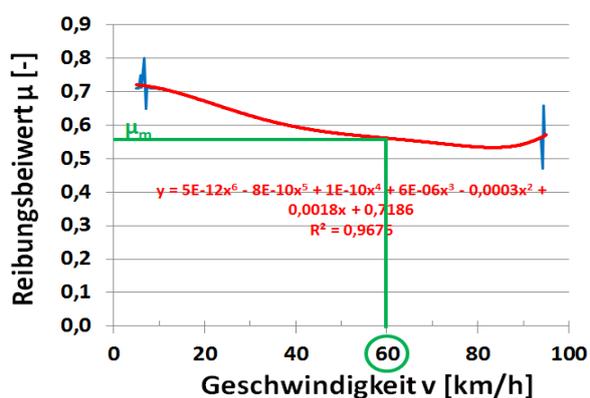


Abbildung 3-7: Näherung Polynom 6ten Grades

Der Reibungsverlauf zeigt im Bereich der Anfangsgeschwindigkeit (100 km/h) sowie kurz vor dem völligen Stillstand (0 km/h) deutliche Schwankungen der Reibungsbeiwerte auf. Diese Bereiche können nicht zur Auswertung herangezogen werden.

Mit ursächlich hierfür ist der sogenannte „Hüpf-Effekt“, der daraus resultiert, dass der rotierende Messkopf schlagartig aus konstanter Höhe auf die Prüfkörperoberfläche abgesetzt wird. Unmittelbar nach dem Aufsetzen erzeugt der an den Messgummis anliegende 100 %-ige Schlupf (Prinzip des blockierenden Messrades) durch den Übergang der Haftreibung in eine Gleitreibung und wieder zurück, zusätzliche Schwankungen. Bei niedrigen Geschwindigkeiten, kurz vor dem Stillstand, können sich zudem die Messgummis teilweise in die Prüfkörperoberfläche verzahnen, was kurzzeitig zu einem deutlichen Anstieg bzw. nach dem Loslösen zu einem Abfall der Reibungsbeiwerte führt.

Der Reibungsverlauf eines Messvorgangs wird durch ein Polynom 6ten Grades (Formel 5) angenähert. Die Anwendungssoftware des Prüfgerätes berücksichtigt für die Näherungsfunktion Reibungsbeiwerte im Geschwindigkeitsbereich von 95 bis 5 km/h.

$$P(x) = \sum_{i=0}^{n=6} a_{i*} * x^i \quad \text{Formel 5}$$

Der Reibungskoeffizient  $\mu_m$  wird anschließend für die Geschwindigkeit von 60 km/h mit der Näherungsfunktion bestimmt (Abbildung 3-7).

### 3.5.2 Einflussfaktoren auf den Reibungskoeffizienten $\mu_m$

Die Ermittlung des Reibungskoeffizienten mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze erfolgt nahezu vollautomatisch. Die Versuchsbedingungen für den Polier- bzw. Messvorgang wurden in Abschnitt 3.4 bzw. 3.5 bereits ausführlich erläutert.

Es gibt jedoch eine Vielzahl Einflussfaktoren, die sich auf das Ergebnis auswirken können. Für die meisten Versuchsparameter wurden deshalb Sollwerte mit Angabe einer zulässigen Toleranz in den DIN EN 12697-49 [54] definiert. Durch die regelmäßig durchzuführende Überprüfung bzw. Kalibrierung dieser Versuchsparameter wird sichergestellt, dass identische bzw. vergleichbare Rahmenbedingungen für sämtliche Versuche vorherrschen. Die Versuchsparameter, die sich nicht eindeutig bzw. umfassend in der Prüfvorschrift beschreiben lassen, sind die eigentlichen Einflussfaktoren und üben mitunter einen entscheidenden Einfluss auf das Endergebnis aus.

#### **Einflussfaktoren auf den Poliervorgang**

Die Polierbeanspruchung wird maßgeblich vom **Oberflächenzustand der Polierrollen** beeinflusst. Die verwendeten Polierrollen unterliegen während des Poliervorganges in Abhängigkeit von der **Oberflächenbeschaffenheit der Prüfkörper** einem Verschleiß. So können sich aus der Oberfläche der Polierrollen größere Gummipartikel ablösen, so dass diese nicht mehr vollständig auf der Polieroberfläche aufliegen. Die Innenabmessungen der Profilirillen der Polierrollen können durch anhaftende Gummipartikel bzw. Abrieb aus der Prüfoberfläche eingeengt, in selteneren Fällen sogar verstopft werden. Dies hat zur Folge, dass das Poliermedium über die Profilirillen nicht mehr gleichmäßig auf die Polieroberfläche verteilt wird. Ein anderes Phänomen, das an den Kanten der Profilirillen auftreten kann, ist eine sogenannte Wulstbildung. Exakte Vorgaben, wann die Polierrollen im Zuge der Abnutzung zu erneuern sind, existieren in den DIN EN 12697-49 [54] mit Ausnahme der beschriebenen Vorgehensweise bei klebrigen Gummierollen bislang nicht.

Der **Gummiabrieb der Polierrollen** und der durch die Polierbeanspruchung hervorgerufene **Abrieb aus der Prüfkörperoberfläche** verunreinigt das Poliermedium (Wasser-Quarzmehl-Gemisch). Des

Weiteren kann sich die **Konzentration des Quarzmehls im Poliermedium**, durch die vor der Griffigkeitsmessung vorzunehmende Reinigung der Prüfoberfläche vom Abrieb und des in der Polierstation verbleibenden Quarzmehls durch den Waschvorgang, verringern. Das Poliermedium ist deshalb vor der Prüfung zu kontrollieren. Eine Ergänzung des Quarzmehls ist ggf. vorzunehmen bzw. das Poliermedium ist zu tauschen. Gemäß Prüfvorschrift ist das Poliermedium in regelmäßigen Intervallen zu erneuern.

**Konzentrationsschwankungen** des Poliermediums (Wasser-Quarzmehl-Gemisch) hervorgerufen durch eine **verminderte Rührleistung** im Wasser-Quarzmehl-Behälter sind zu unterbinden. Deshalb ist das Wasser-Quarzmehl-Gemisch zu Beginn des Poliervorganges für eine Zeitdauer von mindestens 60 s gleichmäßig zu suspendieren. Eine einwandfreie Funktion des Rührwerks während der Polierbeanspruchung ist sicherzustellen.

Die sich in den Polierrollen befindlichen Kugellager verschleifen im Laufe der Zeit durch die mechanische Beanspruchung. Zusätzlich kann sich Quarzmehl in den Lagern festsetzen. Die **freie Beweglichkeit der Kugellager** ist deshalb regelmäßig zu überprüfen. Schwergängige Kugellager sind zu ersetzen. Sie können das durch den Poliervorgang erzeugte **Drehmoment** erhöhen und somit die Polierbeanspruchung verstärken. Zudem kann die zusätzlich erzeugte Reibungswärme das Poliermedium über die maximal zulässige Temperatur von 25 °C erwärmen.

### Einflussfaktoren auf den Messvorgang

Einen wesentlichen Einfluss, des automatisiert ablaufenden Griffigkeitsmessvorganges, übt die **Oberflächenbeschaffenheit des Probekörpers** und die **Qualität des Messgummis** aus. Für die Griffigkeitsmessung und zur Überprüfung der Messeinrichtung mittels Kontrollplatte sind nur vollkommen intakte, konditionierte (d.h. auf den Prüfoberflächentyp angepasste) Messgummisätze einzusetzen. Die Messgummis sind nach jeder Messung auf Verschleiß, Verformungen, Rillenbildung bzw. mechanische oder thermische Beschädigung hin zu überprüfen. Der Zustand der Messgummis beeinflusst maßgeblich die horizontalen Reibungskräfte ( $F_x$ ). Weist nur ein einzelner Messgummi eine ausgeprägte Rillenbildung, einen deutlichen Abriebskeil (Schwanzbildung) oder eine Blasenbildung auf, so ist der ganze Satz auszusondern (Abbildung 3-8).

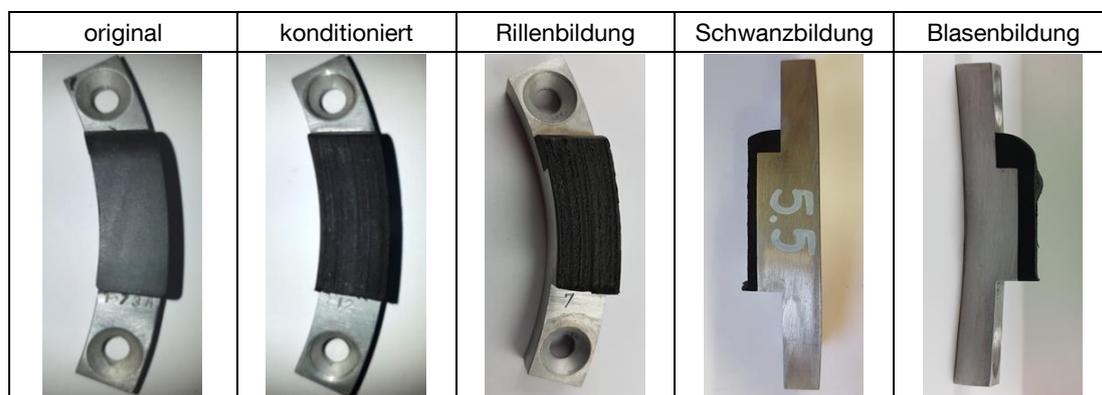


Abbildung 3-8: Oberflächen bzw. -strukturen von Messgummis

Die an den **Messgummis** anliegende **Oberflächen- bzw. Kerntemperatur** kann während des Messvorgangs nicht bestimmt werden. Durch den Abbremsvorgang wird die in der Kontaktzone Messgummi / Prüfkörper erzeugte **Reibungsenergie in Wärmeenergie** umgewandelt. Das auf die

Prüfkörperoberfläche aufgegebene Prüfwasser, soll einerseits gewährleisten, dass die aufgebrachte Wassermenge bei allen Prüfkörperoberflächen konstant ist, wodurch es die unterschiedlichen Texturausprägungen (insbesondere das Drainageverhalten) bei der Griffigkeitsmessung berücksichtigt und andererseits zur Kühlung der Messgummis beitragen.

Unter Umständen kann die erzeugte Wärmeenergie, insbesondere bei sehr hohen Griffigkeiten, nicht mehr ausreichend schnell aus dem Inneren bzw. von der Oberfläche der Messgummis abgeführt werden. Als Folge erwärmen sich die Messgummis, die **Elastizität der Gummimischung** steigt an, was eine Erniedrigung des Messwertes bewirken kann. Höhere Temperaturen können zum punktuellen Verbrennen des Messgummis führen, welches sich mitunter über eine Blasenbildung ausdrückt.

### 3.5.3 Berechnung des Griffigkeitswertes $\mu_{PWS}$

Vor und nach der eigentlichen Griffigkeitsmessung ist eine Funktionskontrolle der Griffigkeitsmeseinrichtung und des zu verwendenden Messgummisatzes mittels einer Kontrollplatte aus Glas durchzuführen. Die dabei gemessenen Kontrollwerte  $\mu_{km1}$  und  $\mu_{km2}$  sind zu bestimmen.

Durch diesen Vorgang wird festgestellt, ob der Zustand der Griffigkeitsmeseinrichtung den vorgegebenen Anforderungen entspricht und die mit der Kontrollplatte bestimmten Messergebnisse das ausgewählte Griffigkeitsniveau (Soll-Wert) um nicht mehr als die festgelegte, absolute Messabweichung über- oder unterschreiten. Gleichzeitig werden die während der Griffigkeitsmessung ggf. durch Aufrauung bzw. Abnutzung auftretenden Veränderungen der Messgummis erfasst und berücksichtigt.

Die Kontrollwerte  $\mu_{km1}$  und  $\mu_{km2}$  dürfen dabei maximal 10 % voneinander abweichen. Wird diese Anforderung eingehalten, so sind die Kontrollwerte  $\mu_{km1}$  und  $\mu_{km2}$  zu mitteln, und der mittlere Kontrollwert  $\mu_{km}$  zu berechnen.

$$\mu_{km(i)} = \frac{\mu_{km1(i)} + \mu_{km2(i)}}{2} \quad \text{Formel 6}$$

Für die Berechnungen des Griffigkeitswertes  $\mu_{PWS}$  wird der unter Laborbedingungen bei 60 km/h bestimmte Reibungskoeffizient  $\mu_m$  herangezogen, mit dem mittleren Kontrollwert  $\mu_{km}$  der Kontrollplatte korrigiert und um den Referenzwert  $\mu_{ref}$  (bekannter Wert der Kontrollplatte unter Laborbedingungen) erhöht. Der durchschnittliche Referenzwert  $\mu_{ref}$  (mit neuen Messgummis auf einer Kontrollplatte aus Glas mit texturierter Oberfläche) kann mit 0,1 angesetzt werden.

Der Griffigkeitswert  $\mu_{PWS(i)}$  einer Einzelmessprobe (i) ergibt sich gemäß der Formel:

$$\mu_{PWS(i)} = \mu_m(i) - \mu_{km(i)} + \mu_{ref} \quad \text{Formel 7}$$

Der Griffigkeitswert  $\mu_{PWS}$  berechnet sich aus dem Mittelwert von mindestens zwei Einzelmessproben  $\mu_{PWS(i)}$ . Wenn die Differenz zwischen den Einzelwerten größer als 0,03 [-] ist, ist ein weiterer Probekörper zu prüfen und der Mittelwert aus den verträglichen Einzelwerten zu berechnen. Der Griffigkeitswert  $\mu_{PWS}$  (Mittelwert) wird auf drei Stellen nach dem Komma angegeben.

$$\mu_{PWS} = \frac{\mu_{PWS(1)} + \mu_{PWS(2)}}{2} \quad \text{Formel 8}$$

## 3.6 Griffigkeitsprognose

### 3.6.1 Prüfsystematik nach Huschek / TU Berlin

Als Ergebnis zahlreicher Untersuchungen an der TU Berlin wurde unter Mitwirkung von Herrn Prof. Huschek die nachfolgend erläuterte Prüfsystematik einer Griffigkeitsprognose (Griffigkeitsentwicklung) für eine Verkehrssimulation erarbeitet [13].

Die Veränderung der Griffigkeit einer Oberfläche kann entsprechend dieses Prüfschemas in folgende Beanspruchungsstufen (Griffigkeitszustände) unterteilt werden (Tabelle 3-1). Für die Griffigkeitsprognose einer unbeanspruchten Straßenoberfläche oder eines im Labor hergestellten Asphaltprobekörpers ist die Prüfkörperoberfläche durch einen definierten Sandstrahlvorgang zu beanspruchen ([2]-Zustand), so dass die aufgeraute Oberfläche weitestgehend dem Zustand nach dem Einbau und dem Abwitern des Bindemittelfilms entspricht.

Der ermittelte Griffigkeitsmesswert im [4]-Zustand (Beanspruchungsstufe) wird definitionsgemäß als „Endpolierwert“ betrachtet [42].

Beanspruchungsstufe / Griffigkeitszustand	
[0]	Griffigkeitsmessung im Ausgangszustand (unbeanspruchter, unbehandelter, nicht vorbereiteter Probekörper)
[1]	Griffigkeitsmessung nach einer Polierbeanspruchung mit 90.000 Überrollungen
[2]	Aufrauen der Prüfkörperoberfläche durch einen definierten Sandstrahlvorgang, Griffigkeitsmessung nach einem definierten Sandstrahlvorgang
[3]	Griffigkeitsmessung nach einer weiteren Polierbeanspruchung mit 90.000 Überrollungen
[4]	Griffigkeitsmessungen ohne weitere Polierbeanspruchung, bis ein konstantes Niveau erreicht ist

Tabelle 3-1: Definition der Beanspruchungsstufen ([0] bis [4])

Die Griffigkeitsmessung in der jeweiligen Beanspruchungsstufe gibt lediglich punktuell die Griffigkeit bei unterschiedlicher Beanspruchungsdauer (steigende Anzahl an Überrollungen) wieder, jedoch nicht einen kontinuierlichen Verlauf der Griffigkeitsentwicklung einer Oberfläche (Griffigkeitsprognose) im Laufe der Beanspruchungsdauer (Abbildung 3-9).

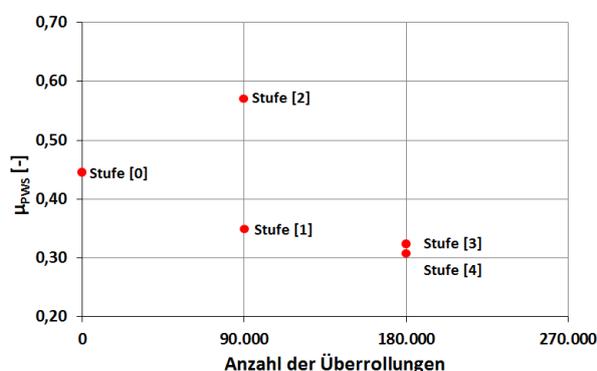


Abbildung 3-9: Beanspruchungsstufe / Griffigkeitszustand

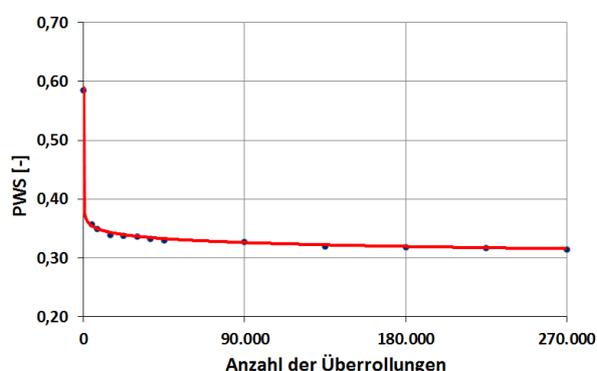


Abbildung 3-10: Logarithmische Regressionskurve des kontinuierlichen Griffigkeitsverlaufs

### 3.6.2 Prüfsystematik TU München

Untersuchungen der TU München zeigten [69], dass die in Abschnitt 3.6.1 beschriebene Vorgehensweise für die Prognose von Griffigkeitswerten, im Hinblick auf die Ermittlung der Griffigkeitsentwicklung einer Probekörperoberfläche (Griffigkeitsprognose) nicht ausreichend ist.

Es wurde festgestellt, dass:

- die Probekörpervorbereitung einen wesentlichen Einfluss auf die Griffigkeitsentwicklung und das Ergebnis (den „Endpolierwert (Endgriffigkeit“) ausübt.
- es für die Prognose der Griffigkeit einer Asphaltoberfläche zu einem bestimmten Zeitpunkt notwendig ist, den gesamten Verlauf der Griffigkeitsentwicklung bis zum Erreichen der „Endgriffigkeit“ zu erfassen.
- die Griffigkeitsmesswerte  $\mu_{PWS}$  während einer Prognoseuntersuchung, sind insbesondere am Anfang des Griffigkeitsverlaufs, bei deutlich kürzen Beanspruchungsintervallen zu ermitteln. Die Messungen sind nach den einzelnen Beanspruchungsstufen (4.500, 7.500, 15.000, 22.500, 30.000, 37.500, 45.000, 90.000, 135.000, 180.000, 225.000 und 270.000 Überrollungen) durchzuführen.
- für die Ermittlung eines „Endpolierwertes“ sind mindestens 270.000 Überrollungen beim Polieren erforderlich. (Anmerkung: Die DIN EN 12697-49 [54] sehen nur 90.000 Überrollungen vor.)
- der durch die Griffigkeitsprognose ermittelte Griffigkeitsverlauf durch eine Logarithmusfunktion angenähert werden kann.

Der kontinuierliche Griffigkeitsverlauf (Abbildung 3-10) wird in Abhängigkeit von der Anzahl der Überrollungen (Beanspruchungsdauer) bis zum Erreichen der Beanspruchungsstufe nach 270.000 Überrollungen ( $PWS_{270}$ ) mit einer Logarithmusfunktion ( $PWS = a \cdot \ln(x) + b$ ) beschrieben, wobei die Anzahl der Überrollungen  $x$  ist und die Koeffizienten  $a$  und  $b$  durch Korrelation bestimmt werden.

Aufgrund der zuvor dargestellten Ergebnisse des Forschungsvorhabens [69], werden in der vorliegenden Arbeit, die Griffigkeitsmessungen jeweils nach den aufgeführten Beanspruchungsstufen gemäß [56] durchgeführt. Die Hauptauswertungen erfolgen für die Beanspruchungsstufe nach 270.000 Überrollungen, welche im Rahmen der Arbeit als Endgriffigkeit nach 270.000 Überrollungen definiert wird.

## 4 Vorgehensweise

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer Prüfsystematik, die praxisgerechte und reproduzierbare Ergebnisse mit dem Prüfverfahren Wehner/Schulze liefert (Abbildung 4-1).

Im Rahmen der europäisch harmonisierten Prüfnormen für Asphalt liegt die EN 12697-49 „Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 49: Messung der Griffigkeit nach Polierung“ [54] vor, mit der eine Bewertung der Griffigkeit von Asphalt im Labor möglich ist. Grundlage für diese Norm bildet das vor ca. 50 Jahren entwickelte Prüfverfahren Wehner/Schulze. Mit diesem Prüfverfahren lassen sich Erkenntnisse über die Griffigkeitsentwicklung einer Asphaltoberfläche bis zum Ende ihrer Gebrauchsdauer gewinnen.

Für die in Deutschland eingesetzten Asphaltarten und -sorten existiert hinsichtlich ihres Griffigkeitsverhaltens bislang kein **Bewertungshintergrund**. Weder die erzielbaren Endgriffigkeiten (Griffigkeitsniveau), noch die Einflussfaktoren, die sich aus der Probekörperherstellung bzw. Asphalzzusammensetzung ergeben können, wurden bislang umfassend ermittelt bzw. abgeklärt.



Abbildung 4-1: Untersuchungsprogramm für die Entwicklung einer praxisgerechten Probenvorbereitung

Zur Schaffung eines Bewertungshintergrundes werden an 21 über Deutschland verteilten Strecken [77] die Griffigkeiten und Oberflächenzustände der Asphaltdeckschichten in drei unterschiedlichen Phasen (Nachfahren der Erstprüfung im Labor (EP), großtechnische Asphaltmischgutproduktion (MW) und fertig eingebaute Asphaltenschicht (BK)) in Abhängigkeit der Asphaltart bzw. -art ermittelt. Anhand der Untersuchungsergebnisse wird überprüft, ob die Oberflächeneigenschaften und -beschaffenheit der im Labor mit identischem Asphalt hergestellten Probekörper mit denen der Bohrkerne aus der nicht dem Verkehr ausgesetzten Straße übereinstimmen und zu den gleichen Griffigkeitseindwerten führen.

Im Rahmen der Untersuchungen wird abgeklärt, ob die Oberflächenzustände der im Labor beanspruchten Probekörper die tatsächlichen Beanspruchungen der Straße durch die Umwelt und den Verkehr zeitraffend simulieren. Hierfür werden aus den Versuchsstrecken nach einer dreijährigen Verkehrsbeanspruchung erneut Bohrkerne (BK-3J) entnommen und die Oberflächeneigenschaften bestimmt.

Liegen die im Zuge der Untersuchungen ermittelten Anfangs- und Endgriffigkeiten der Asphalte deutlich oberhalb des Griffigkeitsniveaus der bislang verwendeten **Kontrollplatte / Kalibrieroberfläche** aus Glas, ist zu überprüfen, ob diese geeignet ist, die Aussagekraft der Messwerterfassung auch im Bereich hoher Messwerte sicher gewährleisten zu können. Andernfalls ist es zwingend erforderlich, eine Kontrolloberfläche zu finden, welche reproduzierbare Eigenschaften / Merkmale in diesem hohen

Griffigkeitsmessbereich aufweist. Diese Kalibrieroberfläche ist dann zusätzlich zur Überprüfung der Griffigkeitsmesseinrichtung mit heranzuziehen und in die Prüfvorschrift zu integrieren.

In einem nächsten Schritt ist zu überprüfen, welchen Einfluss die **Asphaltzusammensetzung** (Fülleranteil, Bindemittelgehalt, Anteil an feiner und grober Gesteinskörnung, Grobkornanteil) auf die Griffigkeitswerte ausübt.

Des Weiteren ist zu hinterfragen, ob die aktuell in den DIN EN 12697-49 [54] beschriebene **Probenvorbereitung zur Griffigkeitsprognose** ausreichend ist oder ob diese durch eine zusätzliche mechanische, physikalische bzw. chemische Beanspruchung anzupassen bzw. zu modifizieren ist.

Die sich aus den Untersuchungen ergebende, als zielführend erachtete **Probekörpervorbereitung** wird anschließend an Asphaltprobekörpern, deren Herstellung im Labor aus Asphaltmischgut erfolgte, hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und Eignung hin überprüft.

Hat sich die durchgeführte Probenvorbereitung als geeignet erwiesen, wird sie an noch vorhandenen Ausbauproben (Rückstellproben) der nicht dem Verkehr ausgesetzten Straße und an in Labor hergestellten Probekörpern angewendet. Ergibt die statistische Auswertung, dass die an den unterschiedlich hergestellten Asphaltprobekörpern ermittelten Griffigkeitswerte nahezu identisch bzw. als gleichwertig anzusehen sind, ist die **neu entwickelte, praxisorientierte Probenvorbereitung** zukünftig für das Prüfverfahren Wehner/Schulze anzuwenden und die Prüfvorschrift anzupassen.

## 5 Bewertungshintergrund

### 5.1 Untersuchungen des Griffigkeitsverhaltens

Um Erfahrungen mit den deutschen Asphaltoberflächen zu sammeln und einen Bewertungshintergrund generieren zu können, wurden an 21 über Deutschland verteilten Strecken [77] die Griffigkeiten der Asphaltdeckschichten untersucht. Die Strecken wurden im Rahmen eines konventionellen Bauvertrages erstellt, Einflussnahmen z.B. auf die Asphaltkonzeptionen erfolgten nicht.

Als Asphaltmischgutart für die Asphaltdeckschichten kam in 16 Fällen Splittmastixasphalt zur Anwendung (5 x SMA 11 S, 2 x SMA 8 LA, 9 x SMA 8 S), bei vier Untersuchungsstrecken kam ein Asphaltbeton für Deckschichten (3 x AC 11 D S, 1 x AC 11 D N) und einmal ein Gussasphalt MA 5 S zur Anwendung.

Für die „Messung der Griffigkeit nach Polierung“ können im Labor hergestellte oder aus Bohrkernen gewonnene Probekörper verwendet werden. Des Weiteren kann das Asphaltmischgut für die im Labor hergestellten Probekörper entweder ebenfalls im Labor oder großtechnisch in einer Asphaltmischanlage produziert werden.

Die Oberflächen der Asphaltprobekörper werden derzeit mit einer Sandstrahleinrichtung vom Bindemittelfilm und Teilen des Asphaltmörtels befreit. Die aufgeraute Asphaltoberfläche soll hierbei dem Zustand nach dem Einbau und dem Abwittern des Bindemittelfilmes entsprechen. Bohrkern aus bereits längere Zeit dem Verkehr ausgesetzten Straßen bedürfen dieser Vorbereitung nicht.

Über mögliche Unterschiede und Veränderungen des Griffigkeitsverhaltens zwischen im Labor hergestellten Asphalten und in situ eingebauten Asphaltsschichten gibt es bislang keine fundierten Kenntnisse.

Daher wurden für jede Untersuchungsstrecke die **drei nachfolgenden Phasen** untersucht:

- Die **Phase EP** (Erstprüfung) repräsentiert die Asphaltmischgutkonzeption. Die Probekörper im Labor wurden aus Labormischgut hergestellt.
- Die **Phase MW** (Mischwerk) untersucht die großtechnische Asphaltmischgutproduktion. Hierfür wurde das an der Asphaltmischanlage produzierte Asphaltmischgut während des Einbaus entnommen und daraus Probekörper im Labor hergestellt.
- In der **Phase BK** (Bohrkerne) wurden Bohrkerne mit einem Durchmesser von 225 mm an den Stellen entnommen, an denen das Asphaltmischgut für die Untersuchungen in Phase MW entnommen worden war.

Die Texturmessung erfolgte mittels ELAtextur®.

### 5.1.1 Ergebnisse in den Phasen EP, MW und BK

Die Griffigkeitsentwicklung wurde entgegen den Festlegungen der DIN EN 12697-49 [54], die 90.000 Überrollungen vorgibt, bis zum Erreichen der Endgriffigkeit nach 270.000 Überrollungen für die Asphaltdeckschichtvarianten jeweils für die Phasen EP, MW und BK ermittelt. Hierbei wurden folgende Unterteilungen vorgenommen:

- Splittmastixasphalt (SMA),
  - SMA 8 S
  - SMA 11 S
- Asphaltbeton (AC),
  - AC 11 D S
  - AC 11 D N
- Gussasphalt (MA) und
- lärmarmes Splittmastixasphalt (SMA LA).

Die ermittelten Griffigkeiten nach 90.000 Überrollungen ( $PWS_{90}$ ) und die Endgriffigkeit nach 270.000 Überrollungen ( $PWS_{270}$ ) der 21 Versuchsstrecken, jeweils in den Phasen EP, MW und BK sind in Abbildung 5-1 dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  nach 270.000 Überrollungen (Einzelwerte) um 0,004 bis 0,029 Einheiten unterhalb der ermittelten Griffigkeiten  $PWS_{90}$  nach 90.000 Überrollungen liegen. Nur bei einzelnen Strecken wurde ein unterschiedliches Ranking der Phasen nach 90.000 bzw. 270.000 Überrollungen festgestellt.

Die ermittelten Profiltiefen  $MPD_0$  (sandgestrahlter Zustand (ohne Polierbeanspruchung)) bzw. nach 270.000 Überrollungen ( $MPD_{270}$ ) der 21 Versuchsstrecken in den Phasen EP, MW und BK sind in Abbildung 5-2 dargestellt. Die Walzasphalte aus lärmarmem Splittmastixasphalt zeigen erwartungsgemäß die größten Profiltiefen.

Es zeigte sich, dass die Profiltiefen  $MPD_{270}$  nach 270.000 Überrollungen um 0,005 mm bis 0,229 mm unterhalb der Profiltiefen  $MPD_0$  im sandgestrahlten Zustand liegen, d.h. erwartungsgemäß hat eine

Einebnung der Probekörperoberflächen durch den Poliervorgang stattgefunden. Nur bei einzelnen Strecken wurde ein unterschiedliches Ranking der Phasen festgestellt.

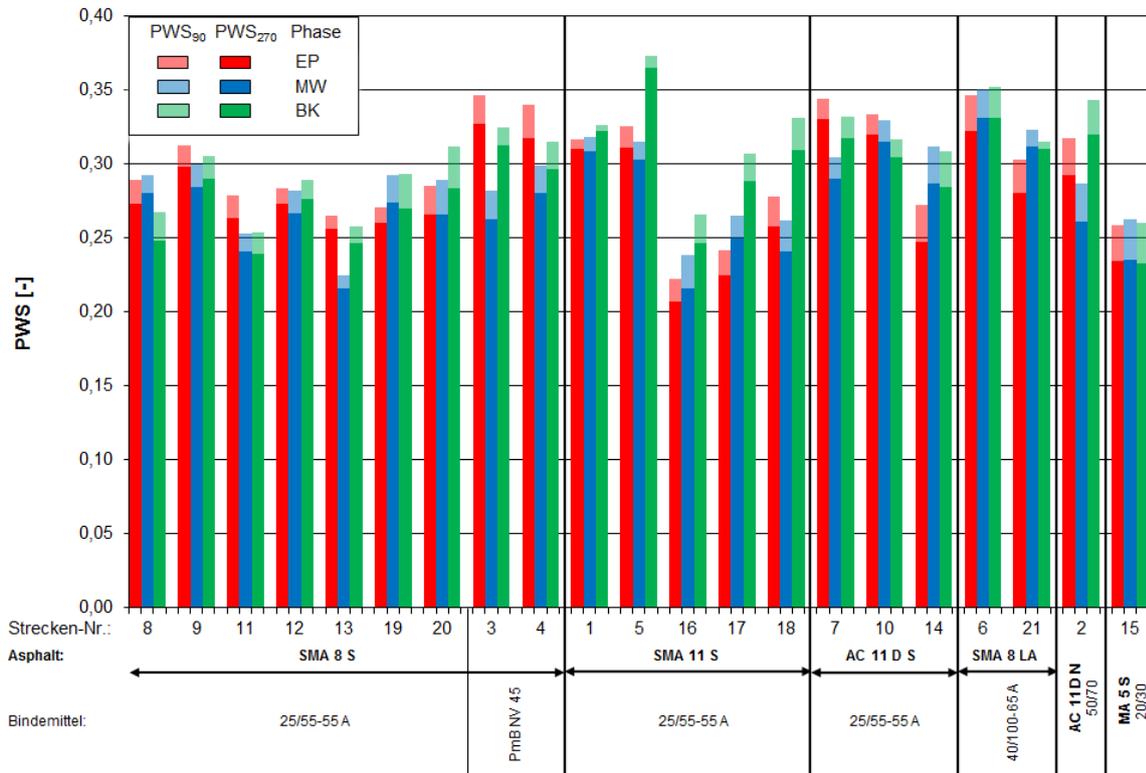


Abbildung 5-1: Darstellung der Griffigkeiten nach 90.000 ( $PWS_{90}$ ) bzw. 270.000 Überrollungen ( $PWS_{270}$ ) an Asphaltdeckschichten gruppiert nach Asphalten für alle Untersuchungsstrecken in Anlehnung an [77]

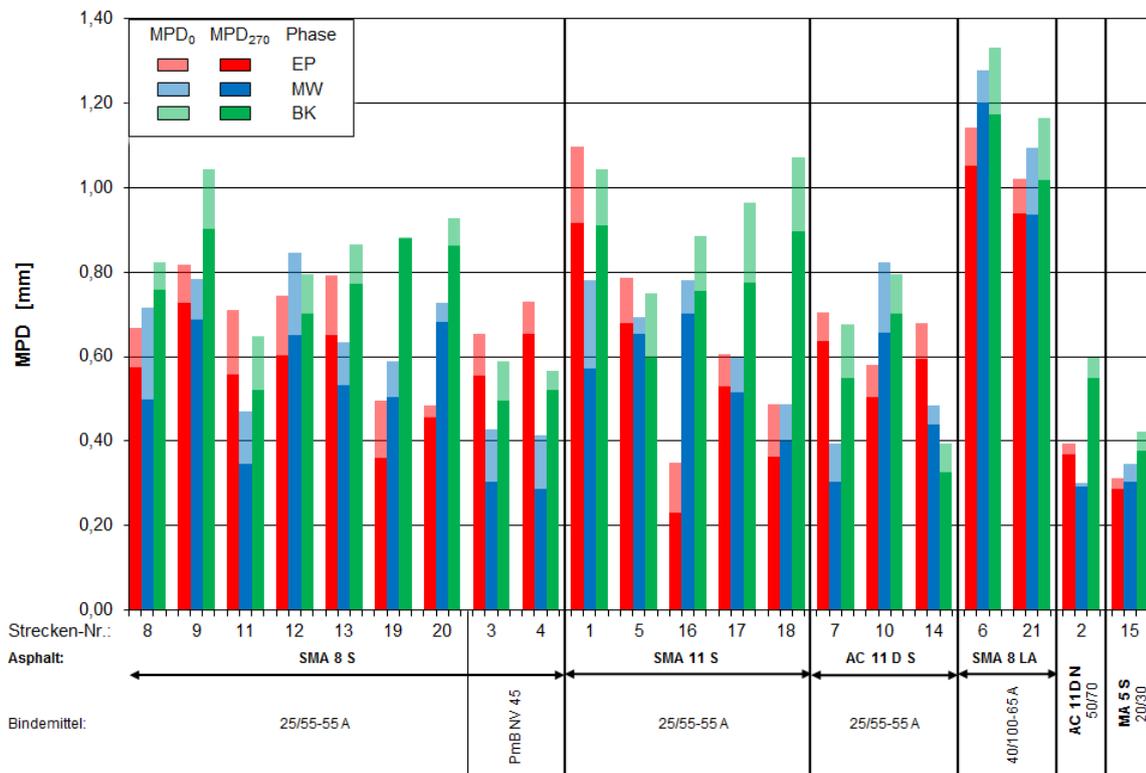


Abbildung 5-2: Darstellung der mittleren Profiltiefen  $MPD_0$  (sandgestrahlter Zustand) bzw. nach 270.000 Überrollungen  $MPD_{270}$  an Asphaltdeckschichten gruppiert nach Asphalten für alle Untersuchungsstrecken in Anlehnung an [77]

Die Mittelwerte und Spannweiten für die 21 untersuchten Asphaltstrecken in den drei Phasen EP, MW und BK (Griffigkeiten nach 90.000 Überrollungen  $PWS_{90}$ , die Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  nach 270.000 Überrollungen und Profiltiefen  $MPD_0$  im sandgestrahlten Zustand und nach 270.000 Überrollungen  $MPD_{270}$ ) sind in den Abbildungen 5-3 bis 5-6 wiedergegeben.

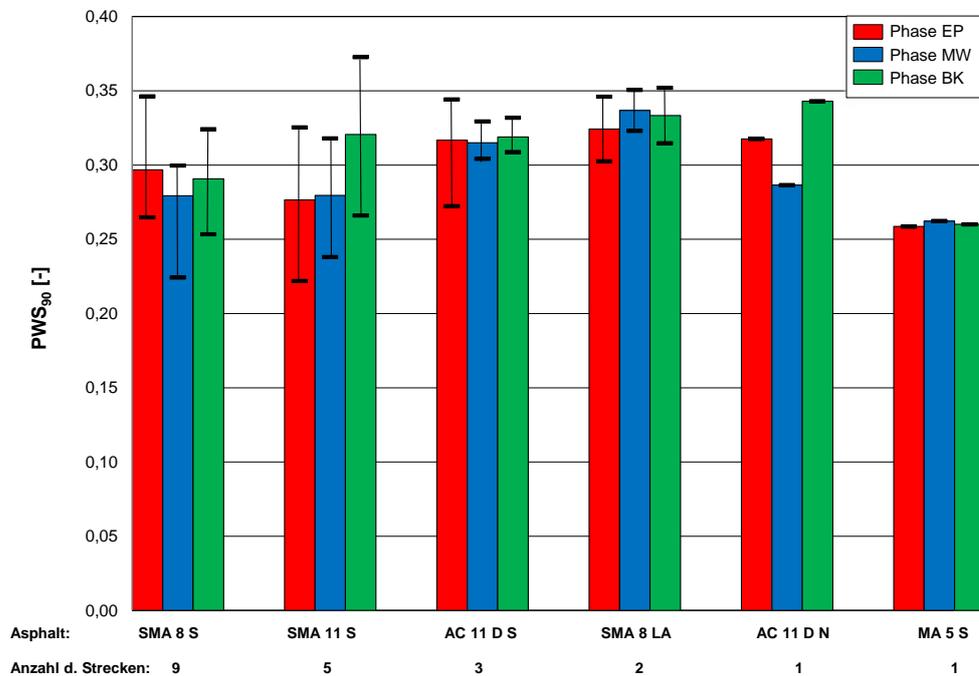


Abbildung 5-3: Darstellung der Griffigkeiten nach 90.000 Überrollungen ( $PWS_{90}$ ) an Asphaltdeckschichten gruppiert nach Asphalten [77]

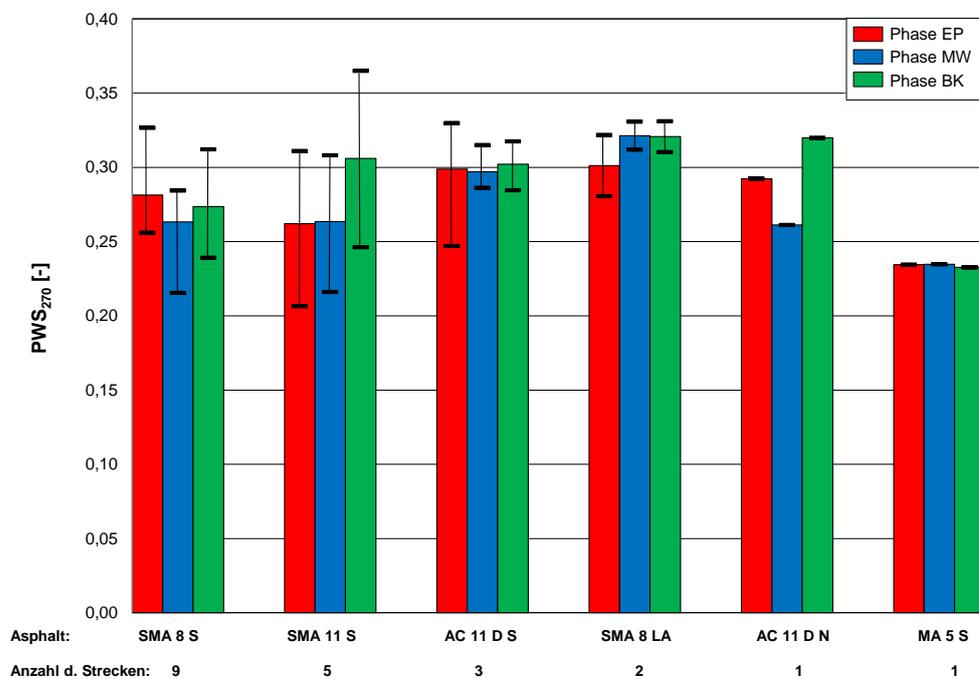


Abbildung 5-4: Darstellung der Griffigkeiten nach 270.000 Überrollungen ( $PWS_{270}$ ) an Asphaltdeckschichten gruppiert nach Asphalten [77]

Die Endgriffigkeiten nach 270.000 Überrollungen  $PWS_{270}$  (Mittelwerte) liegen um 0,013 bis 0,027 Einheiten unterhalb der ermittelten Griffigkeiten nach 90.000 Überrollungen ( $PWS_{90}$ ). Bei den Mittelwerten ergeben sich gegenüber den Einzelwerten für die einzelnen Strecken geringere Unterschiede.

Die Mittelwerte für die mittleren Profiltiefen  $MPD_{270}$  für die 21 untersuchten Asphaltstrecken in den drei Phasen EP, MW und BK nach 270.000 Überrollungen liegen um 0,01 bis 0,16 mm unterhalb der Werte im sandgestrahlten Zustand ( $MPD_0$ ).

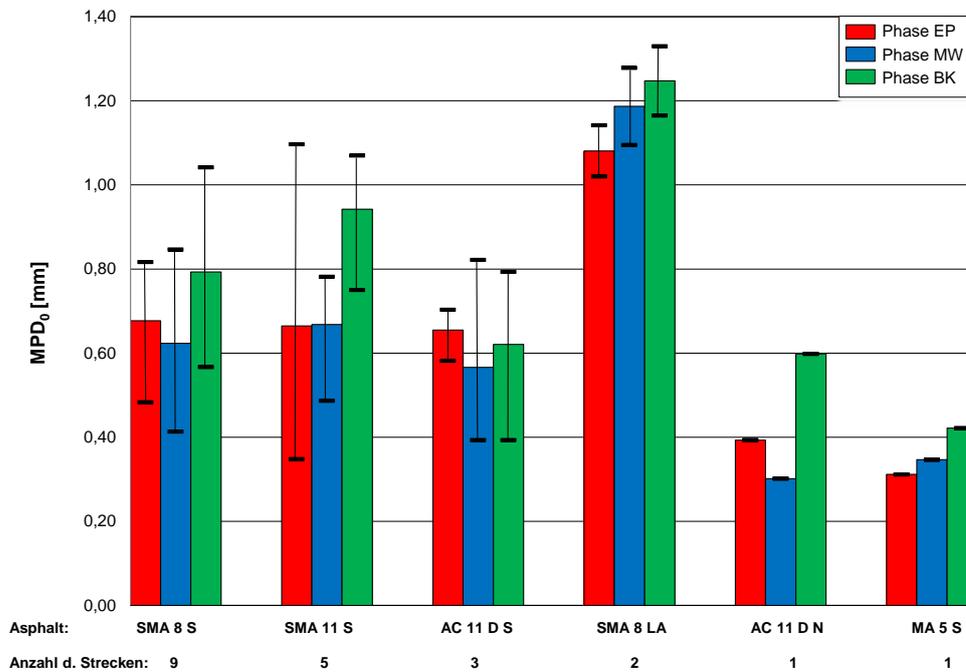


Abbildung 5-5: Darstellung der mittleren Profiltiefen  $MPD_0$  (sandgestrahlter Zustand) an Asphaltdeckschichten gruppiert nach Asphalten [77]

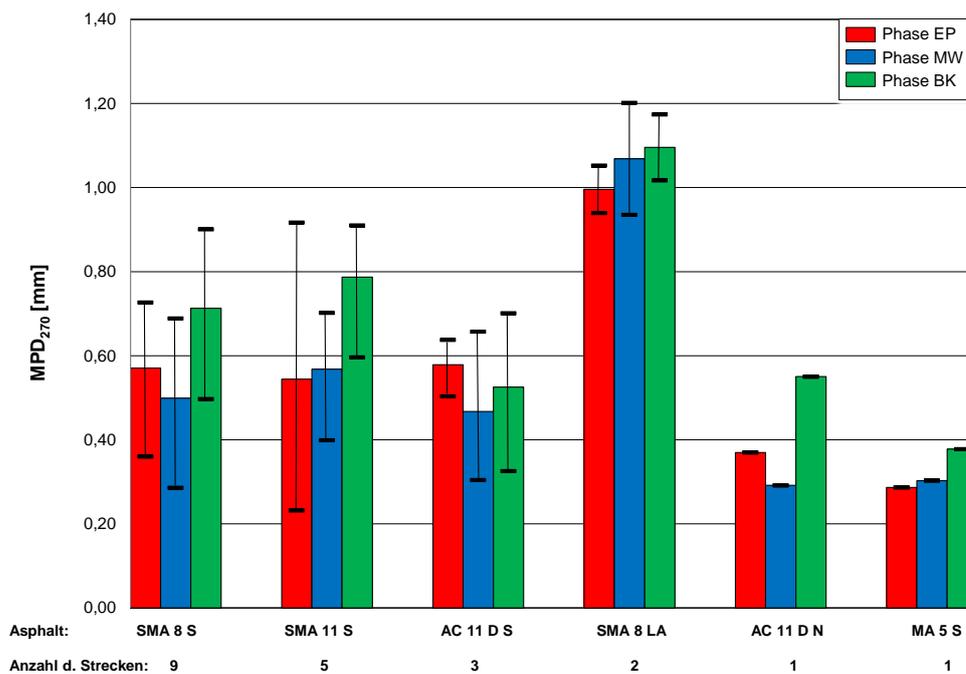


Abbildung 5-6: Darstellung der mittleren Profiltiefen  $MPD_{270}$  (nach 270.000 Überrollungen) an Asphaltdeckschichten gruppiert nach Asphalten

Zwischen den Griffigkeitswerten  $PWS_{90}$  bzw.  $PWS_{270}$  nach 90.000 bzw. 270.000 Überrollungen wurde eine Korrelation mittels einer linearen Regression durchgeführt. Das berechnete Bestimmtheitsmaß für alle Phasen ( $R^2$ ) beträgt 0,97, d.h. die bestimmten Griffigkeitswerte  $PWS_{90}$  bzw.  $PWS_{270}$  korrelieren in hohem Maße miteinander. Für die einzelnen Phasen (EP, MW und BK) ergeben sich vergleichbar hohe Werte für die Bestimmtheitsmaße. Der graphische Zusammenhang und die Regressionsgleichungen mit den berechneten Bestimmtheitsmaßen sind in Abbildung 5-7 wiedergegeben.

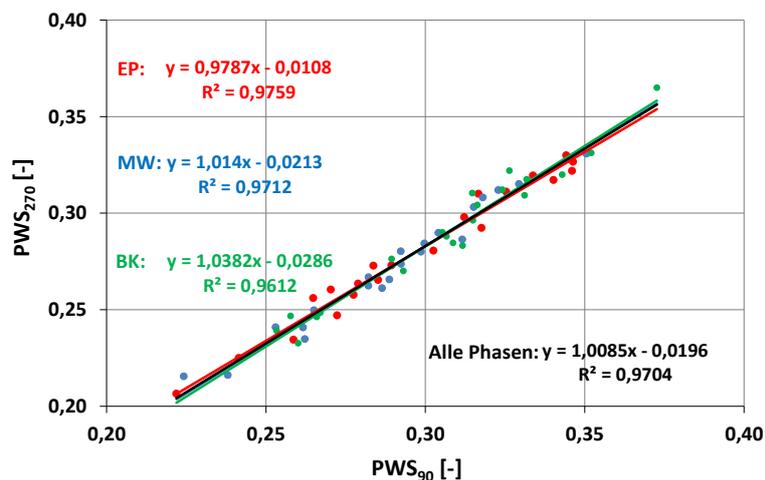


Abbildung 5-7: Korrelation der Griffigkeitswerte nach 90.000 und 270.000 Überrollungen für die Phasen EP, MW und BK

Entgegen dem Ergebnis aus einer älteren Forschungsarbeit [69] konnte für die hier ausgewählten Versuchsstrecken ein direkter Zusammenhang ermittelt werden. Eine Verallgemeinerung kann aktuell aufgrund der geringen Anzahl der 21 Versuchsstrecken nicht vorgenommen werden.

Um die Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  nach 270.000 Überrollungen und die ermittelte Texturoberflächen der Probekörper in den einzelnen Phasen einer Asphaltart bzw. -sorte näher quantifizieren und miteinander vergleichen zu können, wurden die Mittelwerte für die Phasen EP, MW und BK in den folgenden Abschnitten als Linie für die jeweilige Phase dargestellt. Liegen die an den Phasen einer Strecke ermittelten Griffigkeitsendwerte  $PWS_{270}$  bzw. die mittleren Profiltiefen mehr als 0,010 Einheiten bzw. 0,10 mm voneinander entfernt, werden die Phasen unterschiedlichen Niveaus zugeordnet.

In [77] sind für jede Versuchsstrecke, die Streckeninformationen, die Asphaltzusammensetzung und die Griffigkeitsverläufe in den Phasen EP, MW und BK bis zum Endwert in Abhängigkeit von der Anzahl der Überrollungen wiedergegeben. Die statistische Analyse der Griffigkeitswerte hierin erfolgte mit den Einzelwerten  $\mu_{PWS}$  nach 270.000 Überrollungen. Die Messergebnisse zur mittleren Profiltiefe befinden sich im Anhang A1.

## 5.1.2 Splittmastixasphalt

### 5.1.2.1 Splittmastixasphalt SMA 8 S

#### Vergleich der Endgriffigkeiten $PWS_{270}$

Die Mittelwerte der Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  (Abbildung 5-8) der neun untersuchten Splittmastixasphalte SMA 8 S in den Phasen EP, MW und BK liegen unabhängig von dem eingesetzten Binde-

mittel mit 0,281, 0,263 und 0,274 auf einem nahezu identischen Niveau. Die Spannweite zwischen maximaler und minimaler Endgriffigkeit innerhalb der Phasen EP, MW bzw. BK liegt bei 0,071, 0,069 bzw. 0,073.

Die SMA 8 S mit Polymermodifiziertem Bindemittel 25/55-55 A zeigen Mittelwerte der Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  der Phasen EP, MW und BK zwischen 0,261 und 0,270. Selbst bei den Strecken 3 und 4, welche nach identischer Erstprüfung hergestellt (SMA 8 S mit PmB 45 NV) konzipiert wurden, schwanken die Mittelwerte der Endgriffigkeiten der Phasen EP, MW und BK zwischen 0,271 und 0,322.

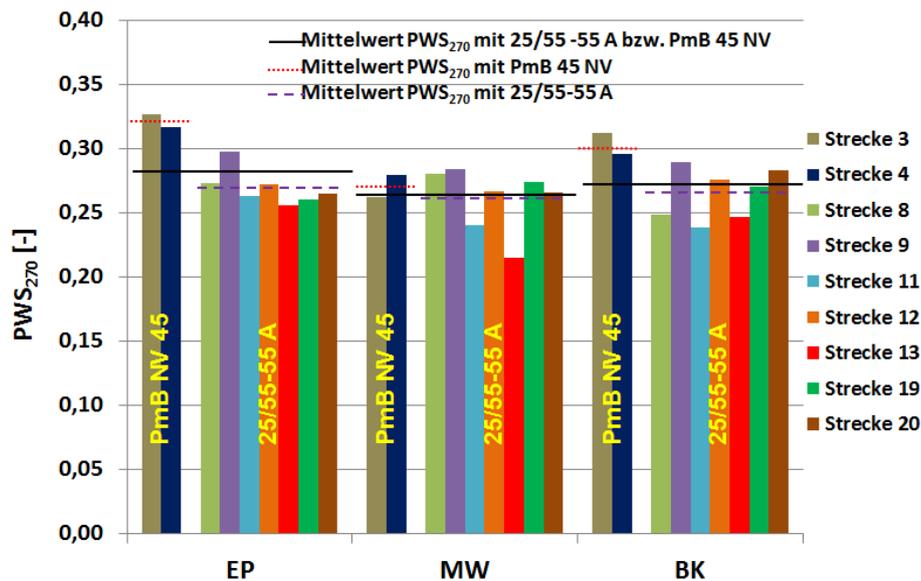


Abbildung 5-8: Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  der Strecken mit SMA 8 S

In den Phasen einer Strecke differieren die Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  aufgrund der unterschiedlichen Asphaltzusammensetzung (Tabelle 5-1).

Beim Splittmastixasphalt wird das Griffigkeitsverhalten (neben dem Fülleranteil, Bindemittelgehalt und dem daraus resultierenden Hohlraumgehalt) hauptsächlich durch die groben Gesteinskörnungen insbesondere durch den Grobkornanteil beeinflusst. Die feinen Gesteinskörnungen spielen beim Splittmastixasphalt eine untergeordnete Rolle [18, 19].

Im Folgenden werden beispielhaft die Auswirkungen der Schwankungen in den einzelnen Phasen für den Grobkornanteil, Fülleranteil, Bindemittel- und Hohlraumgehalt gegenüber gestellt.

Das Asphaltdeckmischgut für die Strecke 3 und 4 wurde nach identischer Erstprüfung hergestellt. Somit sind die Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  (nach 270.000 Überrollungen) für die Phasen EP, MW und BK direkt miteinander vergleichbar. Die Endgriffigkeiten der Strecke 3 und 4 unterscheiden sich in den Phasen EP, MW und BK jeweils um 0,010, 0,018 und 0,016.

Auffallend in Tabelle 5-1 sind die relativ geringen Endgriffigkeiten der Phase MW für die Strecken 3 und 13. Sie liegen mit einer Abweichung von größer 0,040 unterhalb der ermittelten Werte der Phasen EP und BK.

Tendenziell zeichnet sich ab, dass ein erhöhter Grobkornanteil (z.B. Phase EP der Strecke 4, 9, 11 und 13) zu einer Erhöhung der Endgriffigkeit  $PWS_{270}$  führt.

Strecke [-]	Phase [-]	Bindemittel- gehalt [M.-%]	Grobkorn- anteil [M.-%]	> 2 mm [M.-%]	0,063 – 2 mm [M.-%]	< 0,063 mm [M.-%]	Hohlraum- gehalt [Vol-%]	$PWS_{270}$ [-]
3	Angabe lt. EP	7,6	49,6	72,8	16,7	10,5	2,6	--
	EP	7,7	52,8	72,8	15,3	11,9	2,4	0,327
	MW	7,4	55,3	71,6	18,8	9,6	1,1	0,262
	BK	7,3	49,1	71,7	18,2	10,1	1,8	0,312
4	Angabe lt. EP	7,6	49,6	72,8	16,7	10,5	2,6	--
	EP	7,5	52,2	73,3	15,5	11,2	2,7	0,317
	MW	7,6	51,3	71,7	18,5	9,8	2,0	0,280
	BK	7,2	49,8	70,1	18,4	11,5	0,9	0,296
8	Angabe lt. EP	7,2	54,5	73,8	16,7	9,5	2,8	--
	EP	7,3	52,2	73,6	15,8	10,6	3,4	0,273
	MW	7,2	51,3	72,4	15,9	11,7	1,8	0,280
	BK	7,3	50,5	70,5	17,0	12,5	3,6	0,248
9	Angabe lt. EP	7,2	55,5	75,6	13,6	10,8	2,9	--
	EP	7,3	52,9	74,7	13,1	12,2	3,3	0,298
	MW	7,3	51,7	74,8	14,6	10,6	3,0	0,284
	BK	7,2	48,8	73,0	16,1	10,9	7,5	0,290
11	Angabe lt. EP	7,2	55,2	74,3	16,8	8,9	2,7	--
	EP	7,3	52,3	73,6	16,1	10,3	1,8	0,264
	MW	7,5	48,6	73,3	16,2	10,5	2,1	0,241
	BK	7,2	47,6	73,0	17,5	9,5	3,5	0,239
12	Angabe lt. EP	7,2	56,1	76,9	13,2	9,9	2,8	--
	EP	7,3	52,0	76,4	12,3	11,3	2,4	0,273
	MW	7,6	52,8	76,4	13,6	10,0	3,3	0,267
	BK	7,5	44,6	72,6	16,7	10,7	4,6	0,276
13	Angabe lt. EP	7,2	57,0	75,1	14,7	10,2	2,8	--
	EP	7,4	54,7	74,8	13,9	11,3	3,2	0,256
	MW	7,1	47,9	69,8	19,3	10,9	1,0	0,215
	BK	6,8	48,7	69,0	19,8	11,2	3,6	0,247
19	Angabe lt. EP	7,0	47,9	73,9	16,3	9,8	2,6	--
	EP	7,0	47,8	73,8	15,4	10,8	2,7	0,260
	MW	7,0	44,7	73,6	16,2	10,2	3,6	0,274
	BK	7,2	40,9	71,7	18,0	10,3	2,0	0,270
20	Angabe lt. EP	6,9	40,8	67,5	19,5	13,0	2,7	--
	EP	6,8	40,3	68,2	18,4	13,4	3,1	0,265
	MW	6,9	47,1	70,3	17,9	11,8	4,2	0,266
	BK	6,9	42,7	68,5	20,0	11,5	4,9	0,283

Tabelle 5-1: Asphaltzusammensetzung und Endgriffigkeiten SMA 8 S

Beim Fülleranteil lassen sich keine eindeutigen Einflüsse hinsichtlich der Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  erkennen. Ein erhöhter Fülleranteil (z.B. Phase BK der Strecke 8 bzw. EP der Strecke 19) und hohe Bindemittelgehalte (z.B. Phase BK der Strecke 8) führen zu einer Erhöhung des Mörtelvolumens und als Folge zu niedrigeren Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$ . Beim Hohlraumgehalt der untersuchten Strecken zeichnet sich ein vergleichbares Bild ab; so weisen z.B. die Phasen MW der Strecke 3 und 13 den niedrigsten Hohlraumgehalt und zugleich die geringste Endgriffigkeit  $PWS_{270}$  auf.

Auch die eingesetzten Gesteinsarten bzw. ihre variierenden Anteile im Gesteinskörnungsgemisch üben einen maßgeblichen Einfluss auf die erzielbaren Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  aus. So kommen z.B. bei Strecke 13 gemäß Erstprüfung Lieferkörnungen 2/5 und 5/8, welche aus den Gesteinsarten Granit und Kies mit einem Massenanteil von jeweils 50 % bestehen, zum Einsatz. Der Massenanteil der Gesteinsart Granit im Gesteinskörnungsgemisch > 5,6 mm weist hingegen in den Phasen MW bzw. BK Werte mit 26 M.-% bzw. 35 M.-% auf. Erwartungsgemäß weist die Phase EP mit dem höchsten bzw. die Phase MW mit dem niedrigsten Massenanteil an Granit, die höchste bzw. geringste Endgriffigkeit  $PWS_{270}$  auf.

In der Phase MW steigt bei den Strecken 3, 4, 11 und 13, während des Poliervorgangs Bitumen bzw. Mörtel in unterschiedlichem Ausmaß auf. In Abbildung 5-9 sind exemplarisch für die Strecke 4 die Prüfkörperoberflächen der Phase MW im sandgestrahlten Zustand (keine Überrollungen) und nach 270.000 Überrollungen dargestellt.

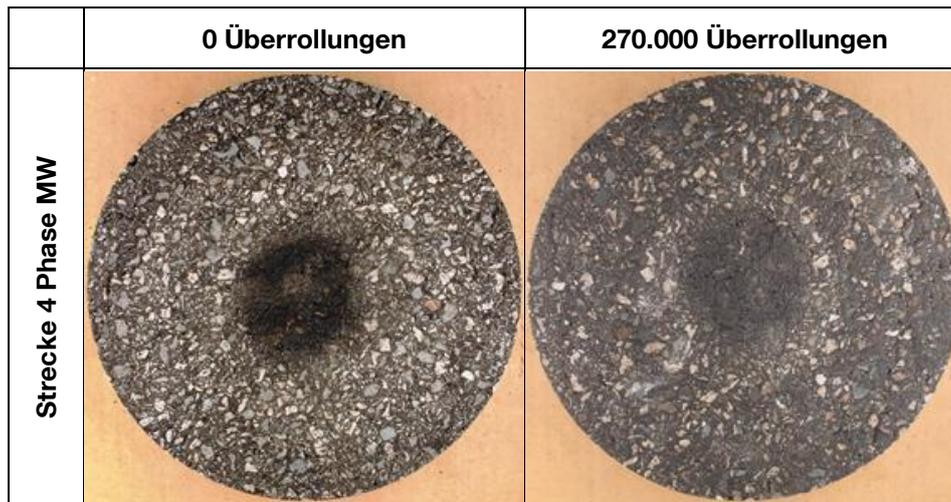


Abbildung 5-9: Prüfkörperoberflächen der Strecke 4, Phase MW, bei 0 und 270.000 Überrollungen

Für die jeweiligen Strecken zeigt sich, dass die einzelnen Phasen teilweise schwankende Asphaltzusammensetzungen in mehreren Merkmalen aufweisen, was wiederum zu unterschiedlichen asphalt-technologischen Kennwerten führt. Die Schwankungen einzelner Merkmale überlagern sich und wirken sich in ihrer Summe verschiedenartig (neutral, vermindern, erhöhend) auf die Endgriffigkeiten aus.

### Statistische Auswertung

Zur Interpretation der Versuchsergebnisse wurden die ermittelten Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS270}$  nach 270.000 Überrollungen mathematisch-statistisch ausgewertet. Um mögliche, signifikante Unterschiede zwischen den untersuchten Phasen (EP, MW, BK) erkennen zu können, werden einfache Varianzanalysen mit nachgeschaltetem modifiziertem LSD-Test (Least Significant Difference Test) für die ermittelten Kenngrößen durchgeführt. In der statistischen Auswertung (Tabelle 5-2) ist erkennbar, dass die Phasen EP, MW und BK der Strecken 4, 9, 11, 12, 13 und 19 jeweils einer homogenen Gruppe angehören. Die drei Phasen beeinflussen das Ergebnis der Endgriffigkeiten nicht, eine konstante Reihung der Ergebnisse der Phasen in den homogenen Gruppen ist nicht erkennbar. Dies spiegelt sich auch in den Ergebnissen der multiplen Varianzanalyse bei den Griffigkeitswerten  $\mu_{PWS270}$  nach 270.000 Überrollungen wieder, wonach die Phase mit ca. 3 % einen sehr geringen Einfluss auf die Versuchsergebnisse hat. Die einzelne Strecke, d.h. die Zusammensetzung des jeweiligen Asphalttes, weist mit 51 % den größten Einfluss auf.

Berücksichtigt man bei der multiplen Varianzanalyse das eingesetzte Bindemittel, so ändert sich die Größe der Einflussfaktoren bei der multiplen Varianzanalyse deutlich. Die Phasen haben bei dem Bindemittel 25/55-55 A keinerlei Einfluss mehr auf die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS270}$  nach 270.000 Überrollungen, die Strecke übt mit 22 % einen geringeren und die Wechselwirkung zwischen Phase und Strecke einen erhöhten Einfluss auf die Griffigkeitsmesswerte aus.

Bei dem PmB 45 NV ergibt sich kein Einfluss der Strecke, aber mit 32 % ein deutlicher Einfluss der Phase. Die Ergebnisse zur multiplen Varianzanalyse bestätigen, dass bei den Strecken 3 und 4 ein identisches Asphaltmischgut verwendet wurde, sich aber die Einbaubedingungen bzw. Probekörperherstellung bei niedrigviskosen Bindemitteln einen Einfluss auf die Phasen ausüben können. Es zeigt

sich zudem, dass beim SMA 8 S eine getrennte statistische Auswertung für PmB NV, aufgrund der geringen Anzahl der Strecken nicht zielführend ist.

SMA 8 S				einfache Varianz- analyse	LSD-Test									multiple Varianzanalyse			multiple Varianzanalyse		
					EP	MW	BK	Ranking der homogenen Gruppen			Faktor	Verwerf.	%	Faktor	Verwerf.	%			
				1. Gruppe			2. Gruppe			3. Gruppe			H0-Hypo.			H0-Hypo.			
μ <sub>PWS</sub> nach 270.000 Überrollungen	3	SMA 8 S	PmB NV 45	signifi.	■	■	■										Phase	ja	31,47
	4	SMA 8 S	PmB NV 45	n. signifi.	■	■	■										Strecke	ja	-
																	Phase/ Strecke	ja	58,74
																	Fehler		9,79
	13	SMA 8 S	25/55-55 A	n. signifi.	■	■	■										Phase/ Strecke	ja	-
	8	SMA 8 S	25/55-55 A	signifi.	■	■	■										Strecke	ja	22,07
	9	SMA 8 S	25/55-55 A	n. signifi.	■	■	■										Fehler		12,38
	11	SMA 8 S	25/55-55 A	n. signifi.	■	■	■										Phase/ Strecke	ja	49,79
	12	SMA 8 S	25/55-55 A	n. signifi.	■	■	■										Fehler		28,14
	19	SMA 8 S	25/55-55 A	signifi.	■	■	■												
	20	SMA 8 S	25/55-55 A	n. signifi.	■	■	■												

Tabelle 5-2: Ergebnisse der statistischen Analyse Griffigkeitswert  $\mu_{PWS270}$  nach 270.000 Überrollungen an SMA 8 S [77]

Im nächsten Schritt werden die Strecken, die in einer oder mehreren Phasen die Toleranzen der ZTV Asphalt-StB 07/13 [1] an die Sollzusammensetzung nicht einhalten (Bindemittelgehalt, Anteil an feiner oder grober Gesteinskörnung, Fülleranteil und Grobkornanteil), als Ausreißer gekennzeichnet und bei der statistischen Auswertung nicht mehr berücksichtigt.

Beim SMA 8 S mit Zugabebindemittel 25/55-55 wird der Grobkornanteil bei den Strecken 12 und 13 in der Phase BK und bei Strecke 12 zusätzlich in der Phase MW um mehr als die zulässige Toleranz gemäß den ZTV Asphalt-StB 07/13 [1] von maximal 8,0 M.-% gegenüber dem Sollwert der Erstprüfung überschritten. Diese beiden Strecken werden deshalb als Ausreißer gekennzeichnet.

Bei der multiplen Varianzanalyse (Tabelle 5-3) ergibt sich, dass für die Zugabebindemittel 25/55-55 und PmB NV kein Einfluss der Phase festzustellen ist.

SMA 8 S				multiple Varianzanalyse			multiple Varianzanalyse		
				Faktor	Verwerf.	%	Faktor	Verwerf.	%
				H0-Hypo.			H0-Hypo.		
μ <sub>PWS</sub> nach 270.000 Überrollungen	3	SMA 8 S	PmB NV 45				Phase	ja	31,47
	4	SMA 8 S	PmB NV 45				Strecke	ja	-
							Phase/ Strecke	ja	58,74
							Fehler		9,79
	13	SMA 8 S	25/55-55 A				Phase/ Strecke	ja	36,97
	8	SMA 8 S	25/55-55 A				Phase	nein	-
	9	SMA 8 S	25/55-55 A				Strecke	ja	30,00
	11	SMA 8 S	25/55-55 A				Phase/ Strecke	ja	47,41
	12	SMA 8 S	25/55-55 A				Fehler		22,59
	19	SMA 8 S	25/55-55 A						
	20	SMA 8 S	25/55-55 A						

Tabelle 5-3: Ergebnisse der statistischen Analyse Griffigkeitswert  $\mu_{PWS270}$  nach 270.000 Überrollungen an SMA 8 S nach Ausschluss der Ausreißer [77]

Für das Zugabebindemittel 25/55-55 steigt der prozentuale Einfluss der Strecke um 8 % auf 30 % an. Der Einfluss der Wechselwirkung von Phase und Strecke nimmt um 2 % auf 47 %, der Anteil des Fehlers um 5 % auf 23 % ab.

**Vergleich der mittleren Profiltiefen MPD**

Der höchste Mittelwert der mittleren Profiltiefe (MPD<sub>0</sub>, sandgestrahlter Zustand) für die neun SMA 8 S (Abbildung 5-10) wurde mit 0,79 mm für die Phase BK, gefolgt von der Phase EP und MW mit

0,68 mm und 0,62 mm ermittelt. Die Phasen EP und MW liegen auf einem ähnlichen Niveau. Eine konstante Reihung der Strecken in den jeweiligen Phasen ist nicht erkennbar. Die Spannweite zwischen maximaler und minimaler mittlerer Profiltiefe innerhalb der Phasen EP, MW bzw. BK liegt bei 0,33 mm, 0,43 mm bzw. 0,48 mm.

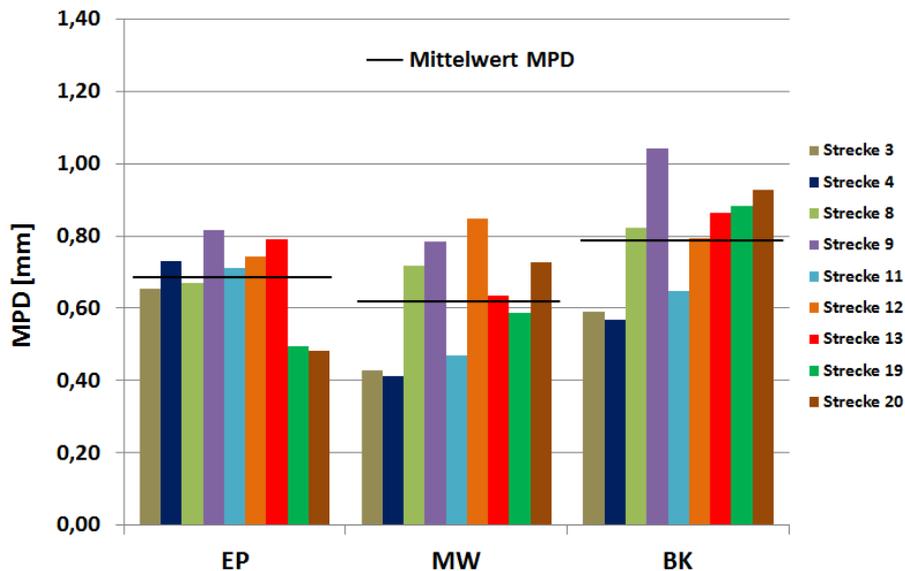


Abbildung 5-10: Mittlere Profiltiefe  $MPD_0$  der Strecken mit SMA 8 S (sandgestrahlter Zustand)

### 5.1.2.2 Splittmastixasphalt SMA 11 S

Die fünf untersuchten Splittmastixasphalte SMA 11 S (Strecken 1, 5, 16, 17 und 18) wurden analog der Vorgehensweise der SMA 8 S mit folgenden Ergebnis ausgewertet:

- Die mittleren Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  der Phase BK liegen mit 0,306 unabhängig von ihrer Asphaltzusammensetzung (Gesteinsart, Bindemittelgehalt) stets über den Mittelwerten der Phasen EP bzw. MW, welche mit 0,262 bzw. 0,264 berechnet wurden und ein ähnliches Niveau aufweisen.
- Die Spannweite zwischen maximaler und minimaler Endgriffigkeit innerhalb der Phasen EP, MW bzw. BK liegt bei 0,105, 0,092 bzw. 0,119.
- Gegenüber den SMA 8 S weisen die untersuchten Splittmastixasphalte SMA 11 S in der Phase BK stets die höchsten Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  auf. Die der Phasen EP und MW liegen teilweise deutlich darunter.
- Analog zum SMA 8 S weisen die Asphaltzusammensetzungen der Phasen der einzelnen Strecken Schwankungen auf. Die beim SMA 8 S gewonnenen Aussagen können aufgrund der identischen Asphaltart auf die Asphaltart SMA 11 S übertragen werden.
- Bei vier untersuchten Strecken (Strecke 5, 16, 17 und 18) steigt in den Phasen EP und MW analog zum SMA 8 S während des Poliervorgangs Bitumen bzw. Mörtel auf.
- Die statistischen Auswertungen an den Griffigkeitswerten  $\mu_{PWS_{270}}$  nach 270.000 Überrollungen ergeben, dass die Phasen das Ergebnis der Endgriffigkeit beeinflussen. Nur bei Strecke 1 gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Phasen. Die Phase BK der anderen Strecken liegen jeweils in einer eigenen homogenen Gruppe. Bei drei von fünf Stre-

cken (Strecke 5, 17 und 18) können die Phasen MW und EP in eine homogene Gruppe zusammengefasst werden, d.h. die Phasen MW und EP liefern vergleichbare Ergebnisse.

- Die Ergebnisse der multiplen Varianzanalyse zeigen, dass die Phase mit 19 % einen Einfluss auf die Versuchsergebnisse ausübt. Die einzelne Strecke übt mit 73 % den größten, die Wechselwirkung von Phase und Strecke mit 5 % einen sehr geringeren Einfluss aus.
- Wird der bei Strecke 17 in der Phase BK aufgetretene Ausreißer (Unterschreitung des Grobkornes) nicht mehr berücksichtigt, so ist eine Abnahme des Einflusses der Phase um 5 % auf 14 % festzustellen. Der prozentuale Einfluss der Strecke steigt um 4 % auf 77 % an. Der Einflüsse der Wechselwirkung von Phase und Strecke bzw. des Fehlers liegen nahezu unverändert bei 6 % bzw. 3 %.
- Die Phase BK weist analog zum SMA 8 S den höchsten Mittelwert der mittleren Profiltiefe MPD (sandgestrahlter Zustand) mit 0,94 mm auf. Abweichend zum SMA 8 S folgen anschließend die Phase MW und EP mit 0,67 mm und 0,66 mm.
- Die Spannweite zwischen maximaler und minimaler mittlerer Profiltiefe innerhalb der Phase EP ist mit 0,75 mm deutlich erhöht. Dies kann ggf. auf den erhöhten bzw. geringeren Füllanteil der Phase EP der Strecke 1 (Maximum) bzw. 16. (Minimum) zurückzuführen sein. Die mittleren Profiltiefen der Phasen MW bzw. BK liegen bei 0,30 mm bzw. 0,32 mm. Übereinstimmend zum SMA 8 S ist eine konstante Reihung der mittleren Profiltiefe der Strecken in den jeweiligen Phasen nicht erkennbar.

### 5.1.2.3 Lärmarmen Splittmastixasphalt SMA 8 LA

Bei den lärmarmen Splittmastixasphalten ist der Anteil an feinen Gesteinskörnungen und der Füllanteil gegenüber der Regelbauweise SMA 8 S und SMA 11 S zur Erzielung höherer Hohlraumgehalte und einer günstigeren Makrotextur abgesenkt worden. Die Mikrotextur wird nahezu ausschließlich von der Oberfläche der groben Gesteinskörnung (insbesondere vom Grobkorn) beeinflusst.

Die zwei untersuchten lärmarmen Splittmastixasphalte SMA 8 LA (Strecke 6 und 21) wurden analog der Vorgehensweise der konventionellen Splittmastixasphalte mit folgendem Ergebnis ausgewertet:

- Die Mittelwerte der Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  liegen in den einzelnen Phasen oberhalb derer der konventionellen Splittmastixasphalte (SMA 8 S, SMA 11 S). Die Phasen MW und BK weisen mit 0,321 einen identischen Mittelwert der Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  auf, der Mittelwert der Phase EP liegt mit 0,301 darunter.
- Die Spannweite zwischen maximaler und minimaler Endgriffigkeit  $PWS_{270}$  innerhalb der Phasen EP, MW bzw. BK liegt bei 0,041, 0,019 bzw. 0,021.
- Die beim SMA 8 S getroffenen Aussagen hinsichtlich der groben Gesteinskörnung können somit auch auf den SMA 8 LA übertragen werden.
- Analog zum SMA 8 S und SMA 11 S weisen die Asphaltzusammensetzungen der Phasen der einzelnen Strecken Schwankungen auf. Inwieweit sich die einzelnen Schwankungen in ihrem Zusammenspiel auf die Endgriffigkeit  $PWS_{270}$  einer Phase auswirken, ist aufgrund der geringen Anzahl der untersuchten Strecken nicht nachweisbar.
- Die statistische Auswertung des LSD-Tests an den Griffigkeitswerten  $\mu_{PWS_{270}}$  nach 270.000 Überrollungen zeigt auf, dass eine Reihung der Phasen nicht eindeutig erkennbar ist. Dieser

Sachverhalt spiegelt sich auch in den Ergebnissen bei den Griffigkeitswerten  $\mu_{PWS_{270}}$  nach 270.000 Überrollungen zur multiplen Varianzanalyse wieder. So liegt der Einfluss der Phase bei 16 %, mit 64 % übt die Strecke den maßgebenden Einfluss aus. Der Einflüsse der Wechselwirkung von Phase und Strecke bzw. des Fehlers liegen bei 7 % bzw. 12 %.

- Die Mittelwerte der mittleren Profiltiefen MPD für den SMA 8 LA liegen erwartungsgemäß in den einzelnen Phasen oberhalb derer der konventionellen Splittmastixasphalte. Die Phase BK weist analog zum SMA 8 S und SMA 11 S den höchsten Mittelwert (sandgestrahlter Zustand) mit 1,25 mm auf, gefolgt von der Phase MW und EP mit 1,19 mm und 1,08 mm.
- Die Spannweiten zwischen maximaler und minimaler mittlerer Profiltiefe liegen innerhalb der Phasen MW bzw. BK bei 0,18 mm bzw. 0,17 mm und weisen höhere Werte als die Phase EP mit 0,12 mm auf.

### 5.1.3 Asphaltbeton

#### 5.1.3.1 Asphaltbeton AC 11 D S

Asphaltbetone bestehen aus einem Gesteinskörnungsgemisch (aus groben und feinen Gesteinskörnungen sowie Füller) mit abgestufter Korngrößenverteilung. Die Griffigkeit wird maßgeblich von den feinen Gesteinskörnungen beeinflusst [20-24]. Die drei untersuchten Asphaltbetone AC 11 D S (Strecken 7, 10 und 14), hergestellt mit Polymermodifizierten Bitumen 25/55-55 A, wurden mit folgendem Ergebnis ausgewertet:

- Die Mittelwerte der Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  in den Phasen EP, MW und BK liegen mit 0,299, 0,297 und 0,302 auf einem identischen Niveau.
- Die Spannweite zwischen maximaler und minimaler Endgriffigkeit innerhalb der Phasen EP, MW bzw. BK liegen bei 0,083, 0,029 bzw. 0,033.
- Analog zu den Splittmastixasphalten weisen die Asphaltzusammensetzungen der Phasen der einzelnen Strecken Schwankungen auf, die zu unterschiedlichen Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  führen.
- Die geringsten Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  konnte jeweils für die Phase mit dem geringsten Anteil an feinen Gesteinskörnungen (Strecke 7 Phase MW, Strecke 10 Phase BK und Strecke 14 Phase EP) ermittelt werden. Es zeichnet sich ab, dass die eingesetzten feinen Gesteinskörnungen eine hohe Polierresistenz (hohe Kantenschärfe) besitzen und durch eine Verringerung ihres Anteils der Einfluss der geringeren Schärfe der groben Gesteinskörnung überwiegt, was zu geringeren Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  führt.
- Tendenziell zeigen die Ergebnisse beim Fülleranteil, dass die Phase mit dem geringsten Fülleranteil, die höchste Endgriffigkeit  $PWS_{270}$  aufweist. Die Fülleranteile der Strecke 10 in den Phasen EP und MW sind als identisch anzusehen.
- Bei den Asphaltbetonen erzeugen höhere Fülleranteile ein größeres Mörtel- bzw. Mastixvolumen, welches die Griffigkeit herabsetzen kann. In Widerspruch stehen hierbei die ermittelten Bindemittel- und Hohlraumgehalte. So weisen die Phasen mit dem höchsten Bindemittelgehalt und niedrigsten Hohlraumgehalt die höchsten Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  auf. Als mögliche Gründe für diesen Effekt können die Überlagerung der Schwankungen der einzelnen Merkmale, vor allem im Anteil der feinen Gesteinskörnungen, herangezogen werden.

Unter Umständen kann die Ursache auch im Messprinzip des Prüfverfahrens nach Wehner/Schulze zu suchen sein. So steht bei dichteren Asphaltoberflächen eine größere Bremsfläche für die Messgummis zur Verfügung.

- Die statistischen Auswertungen (Anhang A2) ergaben, dass eine Reihung der Phasen bei den Griffigkeitswerten  $\mu_{PWS_{270}}$  nach 270.000 Überrollungen nicht erkennbar ist. Dies spiegelt sich auch in den Ergebnissen der multiplen Varianzanalyse bei den Griffigkeitswerten  $\mu_{PWS_{270}}$  nach 270.000 Überrollungen wider. Den maßgebenden Einfluss hat die Wechselwirkung aus Phase und Strecke mit 52 %, gefolgt von der Strecke mit 44 %.
- Sämtliche Strecken wiesen einen oder mehrere Ausreißer in der Phase BK auf. Für die weitergehenden statistischen Auswertungen verblieben somit keine Strecken mehr.
- Der höchste Mittelwert (sandgestrahlter Zustand) der mittleren Profiltiefe wurde mit 0,66 mm für die Phase EP, gefolgt von den Phasen BK und MW mit 0,62 mm und 0,57 mm ermittelt.
- Die Spannweiten zwischen maximaler und minimaler Profiltiefe der Phasen EP, MW bzw. BK liegen mit 0,31 mm, 0,24 mm bzw. 0,29 mm auf einem vergleichbaren Niveau. Übereinstimmend zu den Splittmastixasphalten zeigt sich auch hier keine konstante Reihung der mittleren Profiltiefe der Strecken in den jeweiligen Phasen.

### 5.1.3.2 Asphaltbeton AC 11 D N

Der Asphaltbeton AC 11 D N wurde nur bei der Strecke 2 eingesetzt und enthält als Zugabebindemittel ein Straßenbaubitumen 50/70. Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  der Phasen EP, MW und BK liegen mit 0,292, 0,261 und 0,320 auf unterschiedlichen Niveaus.
- Die beim AC 11 D S bezüglich des Anteils an feinen Gesteinskörnungen getroffenen Aussagen können aufgrund der identischen Asphaltart auf die Asphaltart AC 11 D N übertragen werden.
- In der Phase MW steigt während des Poliervorgangs Bitumen teilweise bis zur Prüfkörperoberfläche auf. Bei der Phase EP trat dieses Phänomen nicht auf. Als Ursache kann bei der Phase MW der erhöhte Grobkornanteil und der geringere Anteil an feinen Gesteinskörnungen gegenüber den Phasen EP und BK aufgeführt werden.
- Die höchste mittlere Profiltiefe MPD (sandgestrahlter Zustand) wurde mit 0,60 mm für die Phase BK, gefolgt von der Phase EP und MW mit 0,39 mm und 0,30 mm ermittelt. Die Phasen EP und MW liegen auf einem ähnlichen Niveau. Dies kann ggf. auf die unterschiedliche Probekörperherstellung bzw. -vorbereitung der Phasen EP, MW und BK aber auch auf den hohen Hohlraumgehalt der Phase BK gegenüber den Phasen EP und MW zurückzuführen sein.

### 5.1.4 Gussasphalt

Die Bestimmung der Endgriffigkeit  $PWS_{270}$  des Gussasphalts MA 5 S (Strecke 15) nimmt eine Sonderstellung ein, da hier bei der Griffigkeitsmessung in der Phase BK der beim Einbau aufgebrauchte Abstreusplitt vorhanden war und die Messgummis während der Griffigkeitsmessung zerstört hätte.

Die im Labor hergestellten Probekörper der Phasen EP und MW wurden ohne Abstreusplitt hergestellt, was wiederum eine gewisse Mastixanreicherung an der Oberfläche zur Folge hatte.

Um die einzelnen Phasen dennoch miteinander vergleichen zu können, wurden die Oberflächen der Probekörper geschliffen (bei der Phase BK bis unterhalb des Abstreusplitts, bei den Phasen EP und MW unterhalb der Mastixanreicherung) und anschließend in Anlehnung an die TP Gestein-StB, Teil 5.4.2 [55] so lange sandgestrahlt, bis die Gesteinsoberflächen herausgearbeitet waren.

Für die Auswertung lag nur eine Strecke vor, die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  der Phasen EP, MW und BK liegen mit 0,234, 0,235 und 0,233 auf einem vergleichbaren Niveau und bestätigen, dass für die drei Phasen die gleichen Gesteinskörnungen bei der Asphaltmischgutproduktion verwendet wurden.
- Die Schwankungen in der Asphaltzusammensetzung üben keinen Einfluss auf die Endgriffigkeiten aus. Das Griffigniveau wird durch die Polierresistenz der eingesetzten groben Gesteinskörnungen geprägt.
- Die Bestimmung der Endgriffigkeit  $PWS_{270}$  des Gussasphalts MA 5 S kann in die Gesamtbewertung nicht einbezogen werden, da Griffignismessungen auf der tatsächlichen Oberfläche nicht möglich waren.
- Die mittlere Profiltiefe MPD (sandgestrahlter Zustand) der Phasen EP, MW und BK betragen nach dem Sandstrahlen (ohne Polierbeanspruchung) 0,31 mm, 0,35 mm und 0,42 mm.

## 5.1.5 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

### 5.1.5.1 Griffignisuntersuchungen

Griffignisuntersuchungen an den Asphaltdeckschichten wurden an insgesamt 21 Baumaßnahmen durchgeführt [77].

Hierzu wurden die Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  nach 270.000 Überrollungen in den Phasen der Asphaltmischgutkonzeption (Phase EP), der Asphaltmischgutproduktion (Phase MW) und nach dem Asphalt einbau (Phase BK) herangezogen. Zur Interpretation der Versuchsergebnisse wurden die ermittelten Griffigniswerte  $\mu_{PWS_{270}}$  nach 270.000 Überrollungen mathematisch-statistisch ausgewertet.

Die Ergebnisse der ermittelten Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  der 21 Versuchstrecken in den drei Phasen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Sämtliche Mittelwerte der Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  der Phasen EP, MW und BK für die **Walzasphalte** liegen über 0,250.
- Der **Gussasphalt** (MA) weist eine geringere Endgriffigkeit  $PWS_{270}$  auf, was auf die unterschiedliche Probekörpervorbereitung zurückzuführen ist.
- Die Mittelwerte der Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  der Phase MW der untersuchten Splittmastixasphalte SMA 8 S bzw. SMA 11 S und Asphaltbetone AC D 11 S liegen unterhalb der Phase BK. Die Mittelwerte der beiden Phasen liegen beim Splittmastixasphalt SMA 8 S bzw. Asphaltbeton AC 11 D S um 0,011 bzw. 0,005 Einheiten auseinander. Dies kann ggf. mit auf die unterschiedliche Probekörperherstellung bzw. -vorbereitung der Phasen EP, MW und BK zurückzuführen sein. Für die Probekörper in den Phasen EP und MW wurden Asphalt-

Probepplatten mittels des Walzsektor-Verdichtungsgerätes hergestellt und anschließend Ausbaustücke mit einem Durchmesser von 225 mm ausgebohrt. Die Ausbaustücke der Phase BK wurden hingegen nach dem Einbau, einschließlich des aufgetragenen Abstreusplittes (Ausnahme SMA LA) aus der Asphaltbefestigung entnommen.

- Die Ergebnisse bestätigen die bisherigen Forschungsarbeiten [18-19], indem das Griffigkeitsverhalten von **Splittmastixasphalten** maßgeblich vom Widerstand gegen Polieren der groben Gesteinskörnung geprägt wird.
- Es konnte bei Splittmastixasphalten erneut nachgewiesen werden [10], dass sich ein hoher Grobkornanteil günstig auf das Drainagevermögen auswirkt und dass die Verwendung von polierresistenten groben Gesteinskörnungen, aufgrund ihrer Mikrorauheit, das Griffigkeitsverhalten positiv beeinflusst.
- Daneben wurde der maßgebliche Einfluss der feinen Gesteinskörnungen auf das Griffigkeitsverhalten der **Asphaltbetone** nachgewiesen und bestätigt [20-24].
- Die Verwendung von höher viskosen Bindemitteln gegenüber Straßenbaubitumen kann sich positiv auf die Griffigkeit auswirken, und bestätigt den bisherigen Kenntnisstand [10].

Nimmt man eine Unterteilung der Versuchstrecken hinsichtlich der **Asphaltart und -sorte** vor, so lassen sich folgende Tendenzen erkennen:

- Die Phasen EP, MW und BK des **AC 11 D S** liegen auf einem nahezu identischen Niveau. Ein Einfluss der Phase konnte bei der statistischen Auswertung nicht ermittelt werden.
- Die mittleren Endgriffigkeiten der Phasen EP, MW und BK der Asphaltart **SMA 8 S** liegen nahezu auf einem identischen Niveau. Die statistische Auswertung zur multiplen Varianzanalyse zeigt keinen Einfluss der Phase.
- Beim SMA 8 S können somit bereits im Vorfeld der Baumaßnahme, sowohl die Phasen EP und MW zur Ermittlung der Endgriffigkeit  $PWS_{270}$  herangezogen werden.
- Nur die Phasen EP und MW weisen beim **SMA 11 S** ein annähernd vergleichbares Niveau auf, die mittlere Endgriffigkeit der Phase BK liegt deutlich darüber. Die Phasen haben somit einen signifikanten Einfluss auf die Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$ .
- Beim SMA 11 S konnte ein statistischer Einfluss der Phase auf die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  nach 270.000 Überrollungen nachgewiesen werden.
- Die Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  können beim SMA 11 S zukünftig sowohl an der Phase EP als auch MW mit einer ausreichenden Sicherheit bestimmt werden.

Die **Strecken einer Asphaltart** haben mit 22 % bis 77 % einen nicht zu vernachlässigenden statistischen Einfluss auf die Endgriffigkeiten. Dieser Sachverhalt ist nicht verwunderlich, denn es lagen unterschiedliche Asphaltkonzeptionen vor.

Die Prüfung der Griffigkeit nach Polierung ist in den derzeit gültigen Fassungen der DIN EN 13108-1; -5 und -6 [82, 83, 84] mit aufgeführt.

Die im Rahmen der Erstprüfung an den Laborplatten (ohne Abstreuerung) ermittelten Griffigkeitskennwerte liegen tendenziell unterhalb der an den Bohrkernen festgestellten und beinhalten somit eine ausreichende Sicherheit.

### 5.1.5.2 Texturuntersuchungen

Die mittleren Profiltiefen der Strecken wurden jeweils im sandgestrahlten Zustand in den Phasen EP, MW und BK ermittelt. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Mittelwerte der mittleren Profiltiefen der Phasen EP, MW und BK für die Asphaltarten und -sorten Splittmastixasphalt (SMA), lärmarmes Splittmastixasphalt (SMA LA) und Asphaltbeton (AC 11 D S) liegen oberhalb von 0,50 mm.
- Die niedrigste mittlere Profiltiefe wurde bei der Phase MW der Strecke 2 (AC 11 D N) mit 0,30 mm, die höchste bei der Phase BK der Strecke 6 (SMA 8 LA) mit 1,33 mm ermittelt.
- Ein allgemeingültiger Zusammenhang zwischen den Endgriffigkeiten  $\mu_{PWS_{270}}$  und den mittleren Profiltiefen zwischen den Strecken und den unterschiedlichen Asphaltarten und -sorten lässt sich nicht ableiten.

## 5.2 Untersuchungen an beanspruchten Strecken

### 5.2.1 Allgemeines

Seit einigen Jahren wird das Griffigkeitsniveau sowohl direkt nach dem Bau im Rahmen der Abnahme und zum Ablauf der Verjährungsfrist für Mängelansprüche [1] als auch in regelmäßigen Abständen im Rahmen der Zustandserfassung [47] systematisch erfasst, überprüft und bewertet. Für die Strecken 8 bis 14 wurde die Griffigkeit der fertigen Oberfläche zum Zeitpunkt der Abnahme gemäß den ZTV Asphalt-StB 07/13 [1] mit dem Seitenkraftmessverfahren (SKM) bei 60 km/h (Strecke 8, 10, 11 und 13) bzw. 80 km/h (Strecke 9, 12 und 14) bestimmt. Die berechneten geschwindigkeits- und temperaturkorrigierten 20 m Einzelwerte (Seitenkraftbeiwert)  $\mu_{SKM}$  sind in Tabelle 5-4 aufgeführt. Die Ergebnisse im Rahmen der Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) bzw. zum Ablauf der Verjährungsfrist (nach 4 bzw. 5 Jahren) für Mängelansprüche liegen aktuell noch nicht vor.

Strecke	DTV <sup>(KFZ)</sup>	DTV <sup>(SV)</sup>	$\mu_{SKM}$	Anfangsgriffigkeit $\mu_{PWS}$		$\Delta\mu_{PWS}$
				Phase BK	Phase BK-	
8	10.923	2.962	0,68	0,441	0,387	0,054
9	40.200	9.000	0,85	0,450	0,385	0,065
10	6.075	295	0,87	0,449	0,436	0,013
11	6.290	1.258	0,62	0,397	0,360	0,037
12	47.633	9.422	0,62	0,404	0,380	0,024
13	10.562	663	0,61	0,374	0,319	0,055
14	8.700	1.300	0,66	0,547	0,441	0,106

Tabelle 5-4: DTV<sup>(KFZ)</sup> bzw. DTV<sup>(SV)</sup>,  $\mu_{SKM}$  und  $\mu_{PWS}$  der sieben Untersuchungsstrecken

Mit Ausnahme eines 400 m langen Teilstückes der Strecke 12 liegen keine Unterschreitungen der im Einführungserlass zu den ZTV Asphalt-StB 07/13 vom 24. April 2014, Nr. II D9-43415-004/08 [50] bei 60 km/h bzw. bei 80 km/h angegebenen Grenzwerte  $\mu_{SKM}$  (mit 0,51 bzw. 0,49) vor.

Unmittelbar nach dem Bau (Phase BK) und nach 2 bis 3 Jahren (Phase BK-3J) wurden Bohrkerne in der Rollspur der sieben Versuchsstrecken [77] entnommen. An den Bohrkerne der Phase BK-3J wurde ohne weitere Probenvorbereitung die Anfangsgriffigkeiten  $\mu_{PWS}$  nach 0 Überrollungen mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze bestimmt und mit denen der nicht dem Verkehr, aber durch einen Standstrahlzyklus vorbeanspruchten Probekörper der Phase BK verglichen.

Sämtliche Anfangsgriffigkeiten  $\mu_{PWS}$  bei 0 Überrollungen der Phase BK-3J liegen unterhalb der ermittelten Anfangsgriffigkeiten  $\mu_{PWS}$  der Phase BK (Tabelle 5-4).

Die Griffigkeitsabnahmen  $\Delta\mu_{PWS}$  - hervorgerufen durch die zwei- bis dreijährigen Gebrauchsdauer - sind für die einzelnen Strecken unterschiedlich groß. Die einzelnen Strecken waren während ihrer bis zu dreijährigen Gebrauchsdauer einer unterschiedlichen Verkehrsbelastung ausgesetzt. Die Verkehrsstärke [74] übt hierbei (wie die Anzahl der Überrollungen beim Verfahren nach Wehner/Schulze) einen maßgeblichen Einfluss auf die Griffigkeit aus.

Die durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärken  $DTV^{(KFZ)}$  in Kfz/24 h bzw. für den Schwerverkehr  $DTV^{(SV)}$ , Lkw > 2,8 t in Lkw/24 h, angegeben als Mittelwert über alle Tage des Jahres, schwanken für die einzelnen Strecken hinsichtlich des Wertes und des Anteils an  $DTV^{(SV)}$  stark.

Eine Korrelation zwischen den Griffigkeitsabnahmen  $\Delta\mu_{PWS}$  und den Verkehrsstärken bzw. dem Anteil des Schwerverkehrs am Gesamtverkehr konnte nicht festgestellt werden.

Neben den in den letzten drei Jahren vorherrschenden Verkehrsstärken müssen auch andere Faktoren wie z.B. die Asphaltmischgutkonzeption, die verwendeten Gesteinskörnungen und die Einbaubedingen einen Einfluss auf die Griffigkeitswerte ausgeübt haben.

Die Anfangsgriffigkeiten  $\mu_{PWS}$  (Phase BK) mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze und die in situ ermittelten Seitenkraftbeiwerte  $\mu_{SKM}$  der Griffigkeitsmessungen SKM für die Splittmastixasphalte (ohne Strecke 10 und 14 jeweils Asphaltbetone AC 11 D S) sind zum Vergleich in Abbildung 5-11 dargestellt.

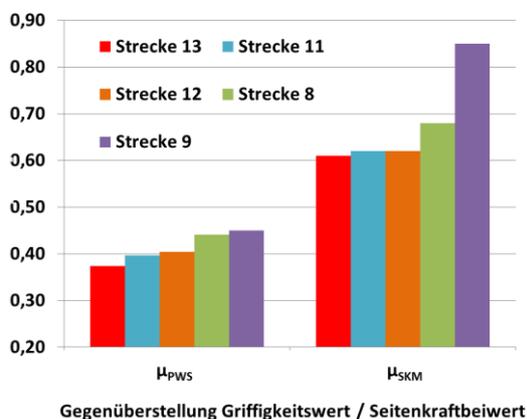


Abbildung 5-11: Vergleich  $\mu_{PWS}$  der Phase BK und  $\mu_{SKM}$  der Splittmastixasphalte (aufsteigend sortiert)

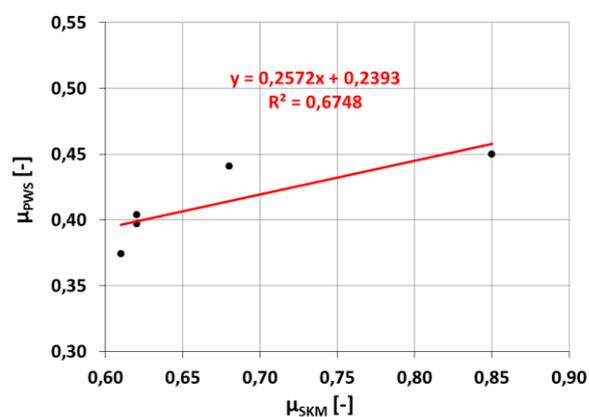


Abbildung 5-12: Korrelation  $\mu_{SKM}$  mit  $\mu_{PWS}$

Für die Phase BK ergibt sich für die Anfangsgriffigkeiten  $\mu_{PWS}$  nach 0 Überrollungen und die bei einer Geschwindigkeit von 60 km/h bzw. 80 km/h gemessenen Seitenkraftbeiwerte  $\mu_{SKM}$  eine gleiche Reihung der Strecken untereinander. Diese Ergebnisse decken sich mit den Erkenntnissen der Forschungsarbeit [70].

Darüber hinaus konnte für die untersuchten Strecken aus Splittmastixasphalt nur ein schlechter Zusammenhang (Abbildung 5-12) zwischen dem Seitenkraftbeiwert  $\mu_{SKM}$  und dem Anfangsgriffigkeitswert  $\mu_{PWS}$  (Phase BK) festgestellt wurde. Eine Verallgemeinerung ist jedoch aufgrund der geringen Anzahl der untersuchten Strecken nicht möglich.

## 5.2.2 Vergleich der Phasen BK bzw. BK-3J

Für jede Versuchstrecke (Strecke 8 bis 14) in der Phase BK-3J wurden die Griffigkeitsverläufe bzw. ermittelten Texturänderungen bis zum Endwert in Abhängigkeit von der Anzahl der Überrollungen ermittelt (Anhang A3). Die Probenvorbereitung für die Phasen BK und BK-3J wurde gemäß DIN EN 12697-49 [54] vorgenommen.

Die Splittmastixasphalte der Strecken 9, 12 und 13 bzw. der Asphaltbeton der Strecke 14 weisen vergleichbare Griffigkeitsverläufe auf. Die berechneten Griffigkeitswerte PWS der Phase BK liegen bei diesen Strecken stets oberhalb der Phase BK-3J. Bei den Splittmastixasphalten der Strecken 8 bzw. 11 hingegen liegen die Griffigkeiten PWS der Phase BK nur nach 7.500 bzw. 4.500 Überrollungen (Beanspruchungsstufe) oberhalb der Phase BK-3J. Ab dieser Beanspruchungsstufe kehrt sich jeweils, wie auch beim Asphaltbeton der Strecke 10 nach 4.500 Überrollungen, die Reihenfolge um, d.h. die Griffigkeitswerte PWS der Phase BK liegen unterhalb der an den Bohrkernen nach ca. drei Jahren Verkehrsbeanspruchung festgestellten Griffigkeiten der Phase BK-3J und spiegeln so eine ausreichende Sicherheit wider.

Exemplarisch werden für den Splittmastixasphalt SMA 8 S (Strecke 9) nach jeder Beanspruchungsstufe die Griffigkeitswerte und mittleren Profiltiefen miteinander verglichen und graphisch dargestellt (Abbildung 5-13).

### Splittmastixasphalt SMA 8 S (Strecke 9)

Die **mittleren Profiltiefen** der Phasen BK bzw. BK-3J (Strecke 9) bei 0 Überrollungen liegen mit 1,04 mm bzw. 0,77 mm auf unterschiedlichen Niveaus. Die größte Abnahme der mittleren Profiltiefe der Phase BK ist nach 4.500 Überrollungen mit 0,11 mm auf 0,93 mm festzustellen. Die Abnahme der mittleren Profiltiefe in dem Bereich zwischen 7.500 und 270.000 Überrollungen ist nur noch gering. Nach 270.000 Überrollungen betragen die mittleren Profiltiefen 0,90 mm (Phase BK) bzw. 0,72 mm (Phase BK-3J). Die Texturen der Oberflächen wurden durch den Poliervorgang nicht maßgeblich verändert.

Der **Griffigkeitswert**  $\mu_{PWS}$  bei 0 Überrollungen der Phase BK-3J liegt mit 0,385 zwischen den mit 0,450 bzw. 0,367 ermittelten Werten der Phase BK bei 0 bzw. 4.500 Überrollungen. Durch eine Polierbeanspruchung der Phase BK mit maximal 4.500 Überrollungen kann in diesem Beispiel die durch die dreijährige Verkehrsbeanspruchung verursachte Griffigkeitsabnahme der Phase BK-3J im Labor simuliert werden. Zwischen 4.500 und 135.000 Überrollungen liegen die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  der Phase BK mit bis zu 0,033 Einheiten über denen der Phase BK-3J. Mit steigender Anzahl der Überrollungen wird dieser Abstand geringer. Die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS270}$  nach 270.000 Überrollungen der Phase BK bzw. BK-3J mit 0,271 bzw. 0,274 sind vergleichbar.

Die **Griffigkeiten PWS** der Phase BK liegen bis zum Erreichen der Endgriffigkeit nach 270.000 Überrollungen oberhalb der Phase BK-3J. Die größere Griffigkeitsabnahme zwischen 0 und 270.000 Überrollungen der Phase BK gegenüber der Phase BK-3J ist an der größeren Steigung der Geraden im logarithmischen Griffigkeitsverlauf erkennbar. Die Endgriffigkeit  $PWS_{270}$  nach 270.000 Überrollungen der Phase BK bzw. BK-3J liegen mit 0,290 bzw. 0,284 auf einem vergleichbaren Niveau. Dieser Sachverhalt ist in der logarithmischen Darstellung durch einen scheinbaren Schnittpunkt nach 270.000 Überrollungen erkennbar.

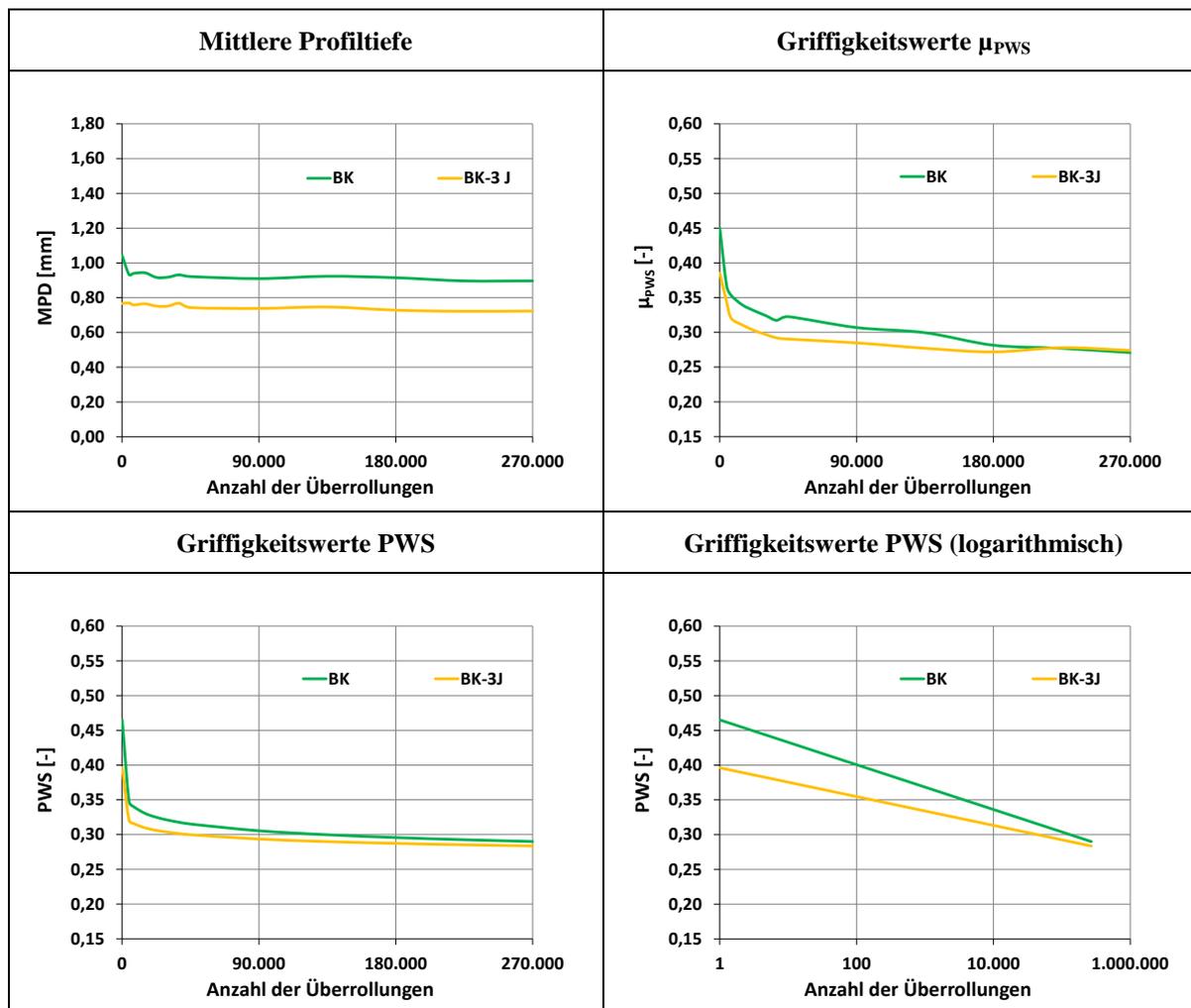


Abbildung 5-13: Mittlere Profiltiefen, Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  und Griffigkeitsverlauf PWS der Strecke 9 für die Probekörper in den Phasen BK-3J und BK

### 5.2.3 Ergebnisse

Nach drei Jahren Verkehrsbeanspruchung liegen die **mittleren Profiltiefen** der Phase BK-3J der sieben untersuchten Strecken stets oberhalb der Phase BK (keine Verkehrsbeanspruchung, sandgestrahlte Oberfläche). Diese Reihenfolge wird mit Ausnahme der Strecke 14 (vergleichbare Werte) bis zum Erreichen der Endgriffigkeit nach 270.000 Überrollungen beibehalten.

Die mittleren Profiltiefen der Phasen BK bzw. BK-3J nehmen im Bereich zwischen 0 und 270.000 Überrollungen, mit Ausnahme von gewissen Schwankungen, linear ab. Die Abnahme der mittleren Profiltiefe zwischen 0 und 270.000 Überrollungen der Phase BK ist stets größer als bei der Phase BK-3J ist. Durch die mechanische Beanspruchung (Überrollungen) wird der Asphaltmastix, der noch nicht polierten Oberfläche der Phase BK zunehmend abgetragen und führt so zu einer größeren Abnahme der mittleren Profiltiefe.

Es kann festgestellt werden, dass die vorhandenen Texturen der Oberflächen durch die Polierbeanspruchung nicht nachhaltig verändert wurden, d.h. eine Einebnung der Oberfläche erfolgte nicht. Ein allgemeingültiger Zusammenhang zwischen den Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  und den mittleren Profiltiefen der Strecken in den unterschiedlichen Phasen der verschiedenen Asphaltarten und -sorten lässt sich nicht ableiten.

Die **Griffigkeitswerte**  $\mu_{PWS}$  bei 0 Überrollungen der Phase BK-3J liegen immer zwischen den ermittelten Werten der Phase BK bei 0 bzw. 4.500 Überrollungen. Eine Aussage zur Griffigkeit zu einem konkreten Zeitpunkt z.B. dem Ablauf der Verjährungsfrist für Mängelansprüche [1] kann jedoch nicht getroffen werden. Zum einen existiert kein Bewertungshintergrund zur Umrechnung der Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  bzw. PWS in  $\mu_{SKM}$  und zum anderen können im Labor, die in situ für eine spezielle Baumaßnahme vorherrschenden Beanspruchungen durch den Verkehr, sowie die Umwelt- und Witterungseinflüsse nicht nachgestellt bzw. eine Verallgemeinerung durchgeführt werden.

Durch eine Polierbeanspruchung der Phase BK mit maximal 4.500 Überrollungen kann jedoch die durch eine dreijährige Verkehrsbeanspruchung verursachte Griffigkeitsabnahme der Phase BK-3J im Labor simuliert werden. Mit steigender Anzahl der Überrollungen nehmen die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  i.d.R. weiter ab. Eine eventuell kurzzeitig auftretende Erhöhung des Griffigkeitswerts nach einer Beanspruchungsstufe ist u. a. auf das Freilegen von neuen Gesteinskörnungen auf der Probenkörperoberfläche zurückzuführen.

Größtenteils liegen nach 270.000 Überrollungen in den Phasen BK und BK-3J vergleichbare Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS_{270}}$  vor, der Abstand zwischen den Phasen beträgt weniger als 0,010 Einheiten. Die **Endgriffigkeiten**  $PWS_{270}$  verhalten sich analog.

## 6 Kontrollplatten für hohes Griffigkeitsniveau

### 6.1 Allgemeines

Die Untersuchungen in Abschnitt 5 für die in Deutschland eingesetzten Asphalte haben gezeigt, dass die Anfangsgriffigkeiten  $PWS_0$  nach 0 Überrollungen zwischen 0,316 und 0,608 liegen. Die Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  nach 270.000 Überrollungen weisen Werte zwischen 0,207 und 0,365 auf. Sowohl die Anfangs- und Endgriffigkeiten liegen deutlich oberhalb des durchschnittlichen Referenzwerts  $\mu_{ref}$  der aktuell verwendeten Kontrollplatte aus Glas mit 0,100. Wie in Abschnitt 3.3 bereits dargestellt, ist es deshalb zur Überprüfung der Griffigkeitsmesseinrichtung zwingend erforderlich, auch für das hohe Griffigkeitsniveau eine entsprechende Kontrollplatte vorzuhalten.

Um einen Zusammenhang zwischen den von einer Messeinrichtung bzw. einem Messgerät ausgegebenen Werten (Signal, Reibungskoeffizienten  $\mu_m$ ) und den zugehörigen, festgelegten Werten einer Messgröße (Referenzwert der Kontrollplatte  $\mu_{ref}$ ) unter vorgegebenen Bedingungen ermitteln zu können, sind selbst im Idealfall, bei einem geradlinigen linearen Zusammenhang (Regressionsgerade,  $y = ax + b$ ) mindestens zwei Kalibrierflächen nötig (Abbildung 6-1). Wobei  $y$  die abhängige Größe, den Reibungskoeffizienten  $\mu_m$  darstellt,  $x$  für die unabhängige Größe (Referenzwert der Kontrollplatte  $\mu_{ref}$ ),  $a$  für die Steigung der Geraden und  $b$  für den Ordinatenabschnitt steht.

Eine Kalibrierfläche mit einem Referenzwert von  $\mu_{ref} = 0$  und eine daraus resultierende Ursprungsgerade  $b = 0$  existiert nicht. Oftmals liegt nur in einem gewissen Bereich des Messbereiches, innerhalb des Proportionalitätsbereiches, ein linearer Zusammenhang vor.

Zur Erhöhung der Genauigkeit des Messverfahrens, welche gemäß DIN ISO 5725-1:1997-11 [89] den Grad der Übereinstimmung zwischen Messergebnis und dem „Wahren Wert“ widerspiegelt, ist es

notwendig, über Kalibrieroberflächen mit unterschiedlichem Griffigkeitsniveau zu verfügen, die den gesamten Messbereich abdecken können.

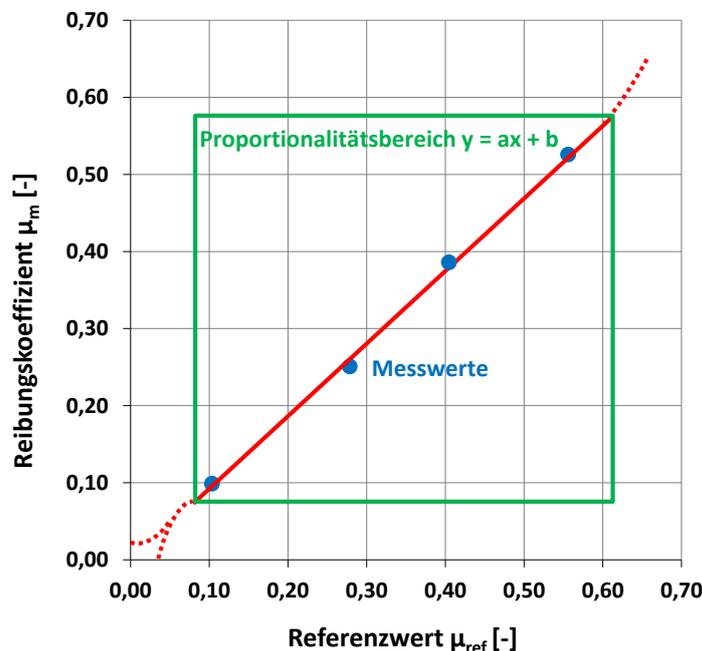


Abbildung 6-1: Exemplarisches Beispiel eines linearen Zusammenhangs der mit dem Messgerät ermittelten Reibungskoeffizienten  $\mu_m$  in Abhängigkeit der Referenzwerte  $\mu_{ref}$

Bereits im Jahr 2003 versuchte Böhnisch [69] Kalibrieroberflächen (Prüfmuster), die reproduzierbare Eigenschaften, in der Praxis auftretenden Griffigkeiten und ein gleichbleibendes Griffigkeitsniveau widerspiegeln, zu finden.

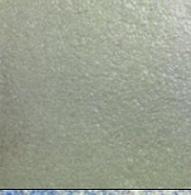
Die Prüfmuster wurden in zwei Gruppen, in natürliche und industriell hergestellte Oberflächen, unterteilt. Es zeigte sich, dass unterschiedlich vorbehandelte Natursteinproben und auch die untersuchten industriell hergestellten Kalibrieroberflächen nur niedrige Griffigkeitsniveaus ergaben.

Kirchmaier [23] konstruierte und verwendete eine Riffelplatte aus gehärtetem Stahl, welche ein regelmäßiges, gefrästes, quadratisches Noppenprofil mit konstanter Rautiefe aufwies. Es stellt sich ein gleichmäßiges Griffigkeitsniveau im Bereich von 0,280 bis 0,300 ein.

Im Zuge dieser Arbeit werden erneut industriell hergestellte Oberflächen aus Glas, Kunststoff, Metall, Fliesen, Schleifscheiben und natürliche Oberflächen aus Naturstein und feinen sowie groben Gesteinskörnungen (Tabelle 6-1) untersucht. Eine Einteilung bezüglich ihrer Eignung als Kalibrierplatte (geeignet, bedingt geeignet bzw. nicht geeignet) wurde anhand der folgenden Eigenschaften / Merkmale vorgenommen:

- Reproduzierbare Eigenschaften
- Hohes Griffigkeitsniveau
- Konstantes Griffigkeitsniveau
- Beanspruchung der Messgummis

Die an den Oberflächen der Kontrollplatten ermittelten Reibungskoeffizienten  $\mu_m$  und die zugehörigen Auswertungen sind im Anhang B dargestellt.

künstliche Kontrollplatten aus:	Glas	Schleifscheiben	Bodenbelag (Kunststoff)	Bodenbelag (Fliesen)	kunststoffgeb. Materialien (grobkörnig)	kunststoffgeb. Materialien (feinkörnig)	Vaudit-Verbundplatte m. Chromcarbid	Hartmetallschicht m. Wolframcarbid
Bild (beispielhaft):								
Reproduzierbare Eigenschaften	+	+	+	-	+	+	-	o/+
Hohes Griffigniveau	-	+	-	-	+	-	+	+
Konstantes Griffigniveau	+	-	-	-	o/+	+	o/+	+
Zerstörung Messgummis	+	o	+	+	-	+	-	+

natürliche Kontrollplatten aus:	Naturstein	gGk (Mastix-Platte)	fGk (Sandplatte)
Bild (beispielhaft):			
Reproduzierbare Eigenschaften	-	o	+
Hohes Griffigniveau	-	-	+
Konstantes Griffigniveau	-	o	+
Zerstörung Messgummis	+	+	+

+ geeignet    o bedingt geeignet    - nicht geeignet

Tabelle 6-1: Zusammenstellung der Eigenschaften der untersuchten natürlich und industriell hergestellten Kalibrieroberflächen (Auszug)

## 6.2 Kontrollplatten aus industriell hergestellten Oberflächen

Folgende industriell hergestellte Oberflächen (vgl. Tabelle 6.1) wurden bezüglich ihrer Eignung als Kalibrierplatte in den Untersuchungen berücksichtigt:

- Glas
- Schleifscheiben
- Bodenbeläge aus Kunststoff
- Kunststoffverbundmaterialien
- Metallplatten

Bei den industriell hergestellten Oberflächen weisen nur die Schleifscheiben, die kunststoffgebundenen Materialien (grobkörnig) und die Metallplatten mit einer Beaufschlagung aus Chrom- bzw. Wolframcarbid Griffigkeitswerte über 0,400 auf.

Bei den untersuchten **Kalibrieroberflächen aus Glas**, stellten sich jeweils niedrige, konstante Griffigkeitsniveaus im Bereich von 0,050 bis 0,103 ein. Die geprüften **Bodenbeläge** (Kunststoff bzw. Fliesen) weisen weder ein hohes noch konstantes Griffigkeitsniveau auf.

Die auf den Originaloberflächen der **Schleifscheiben** ermittelten Griffigkeitsmesswerte nahmen mit steigender Anzahl der Griffigkeitsmessungen signifikant ab, d.h. ein konstantes Griffigkeitsniveau konnte aufgrund der Wechselwirkungen zwischen Scheibe und Messgummis und der unterschiedlich starken drainierenden Wirkung der verschiedenen Schleifscheiben nicht ermittelt werden. Teilweise (Schleifscheibe 20C 24/36 LB (aufgeraut)) wurden die drei Messgummis so stark beansprucht, dass die geforderte Mindestdicke des Gummibelags nicht mehr vorhanden war und keine weiteren Messungen durchgeführt werden konnten.

Die **grobkörnig kunststoffgebundenen Musterplatten** (grob bzw. zweifach abgestreut) weisen ein sehr hohes Griffigkeitsniveau auf. Die drei Messgummis werden allerdings bei der Griffigkeitsmessung in sehr starkem Maße abgenutzt bzw. beschädigt und weisen tiefe Riefen bzw. Furchen auf, so dass der Versuch nach wenigen Griffigkeitsmessungen abgebrochen werden musste. Selbst durch eine aufgebrauchte Vorbeanspruchung der Musterplatten konnte dieser Effekt nicht vermieden werden.

Auch bei der **Kontrollplatte aus Vaudit** (mit Auftragsschweißwerkstoff Chromkarbid) zeigen die Messgummis nach zehn Griffigkeitsmessungen deutliche Beschädigungen, so dass die Vorversuche abgebrochen wurden.

Einzig die industriell hergestellte Kontrollplatte mit einer hochverschleißfesten **Hartmetallschicht aus Wolframcarbid** („CC 6,5 mm, normal“) weist auch noch nach 540.000 Überrollungen ein sehr hohes Griffigkeitsniveau, mit einem nahezu konstanten Reibungskoeffizienten mit einem Wert von 0,650 auf.

Vorversuche zeigten, dass sich trotz der Verwendung von konditionierten Messgummis, ab vier, kurz hintereinander durchgeführten Griffigkeitsmessungen die Reibungskoeffizienten leicht vermindern. Eine Schädigung, bzw. verstärkte Abnutzung der Messgummis konnte nach der jeweiligen Griffigkeitsmessung nicht festgestellt werden.

Die durch den Bremsvorgang während der Griffigkeitsmessung erzeugte Reibungswärme wird demzufolge nicht vollständig an die Umgebung abgegeben, was offensichtlich zu einer kurzzeitig, veränderten Elastizität der Messgummis führt.

Aufgrund der leicht unterschiedlichen Verteilung des Hartmetalls auf der Oberfläche muss sich die Kontrollplatte für die Griffigkeitsmessung immer in derselben, unverrückbaren Position und Ausrichtung befinden. Angesichts der gewonnenen Erkenntnisse wurden weitergehende Untersuchungen wie folgt vorgenommen.

Fünf ungebrauchte Messgummisätze (3, 1212, 7, 1412, 11G) wurden vor der ersten Griffigkeitsmessung durch drei Messungen auf einer feinrauen Oberfläche konditioniert. Die Messgummisätze entstammten aus zwei unterschiedlichen Fertigungschargen. Anschließend wurden die Messgummis im Kühlschrank bei 4 bis 10 °C für vier Stunden gelagert und vor Durchführung der Griffigkeitsmessung auf Raumtemperatur temperiert. Mit jedem Messgummisatz wurde der Reibungskoeffizient der Kalibrierplatte dreimal, unmittelbar hintereinander bestimmt. Nach diesen drei Griffigkeitsmessungen lagerten die Messgummis wiederum gekühlt für mindestens vier Stunden. Die Griffigkeitsmessungen 1 bis 3, 4 bis 6 und 7 bis 9 mit einem Messgummisatz erfolgten je an einem unterschiedlichen Tag, die Messungen 10 bis 15 und 16 bis 21 am gleichen Tag. Mit den Messgummisätzen konnten 21 Griffigkeitsmessungen durchgeführt werden bevor die zulässige Mindestdicke des Gummibelags der Messgummis von 2 mm unterschritten war. Nach insgesamt 105 Griffigkeitsmessungen stellte sich ein arithmetischer Mittelwert von 0,6513 ein. Der maximale bzw. minimale gemessene Reibungskoeffizient betrug 0,6625 bzw. 0,6385 (Abbildung 6-2).

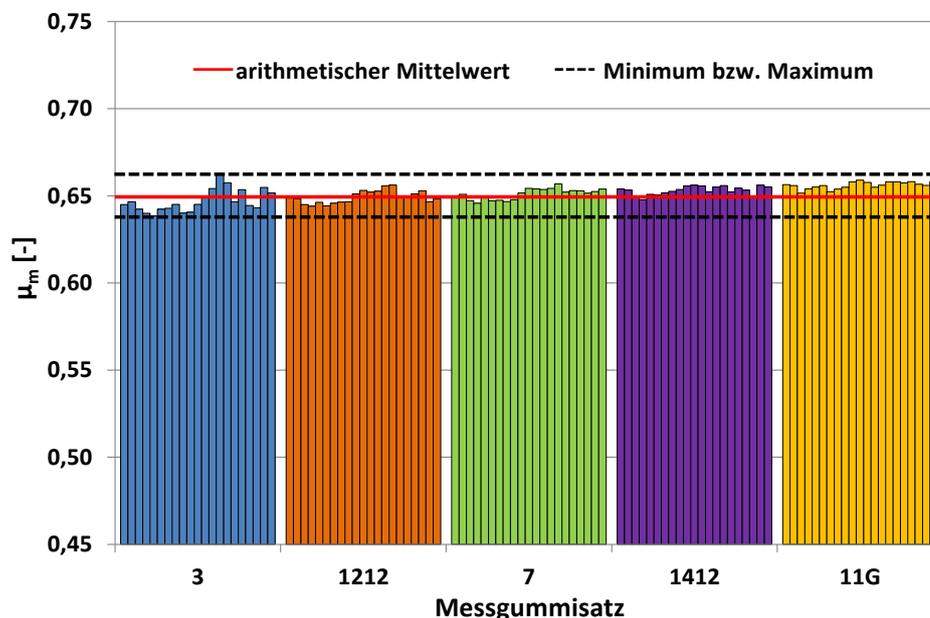


Abbildung 6-2: Graphische Darstellung der jeweils 21 gemessenen Reibungskoeffizienten  $\mu_m$  der fünf Messgummisätze, auf der Kontrollplatte „CC 6,5 mm, normal“

Es zeigt sich, dass die ermittelten Reibungskoeffizienten der Messgummisätze 3, 1212 und 7 aus einer Fertigungscharge einen ähnlichen Verlauf aufweisen. Die Griffigkeitsmessungen 1 bis 3, 4 bis 6 und 7 bis 9 liegen meist unterhalb des Mittelwerts. Bei den weiteren Messungen ist ein leichter Anstieg des Reibungskoeffizienten bemerkbar, der anschließend wieder abfällt. Mit den Messgummisät-

zen 1412 und 11G hingegen wurden mit Ausnahme von drei Messungen stets Reibungskoeffizienten ermittelt die größer gleich dem Mittelwert waren. Es konnte somit nachgewiesen werden, dass Messgummisätze aus unterschiedlichen Fertigungschargen mitunter zu abweichenden Messergebnissen führen und die in den DIN EN 12697-49 [54] aufgeführten Anforderungen an die Messgummisätze aktuell nicht ausreichend sind und zukünftig detaillierter beschrieben werden müssen. Demzufolge lassen sich durch die Anwendung dieser Kontrollplatte, zukünftig verschiedene Fertigungschargen der Messgummisätze unterscheiden. Die Untersuchungen zeigten zudem, dass die vorherrschenden Umgebungsbedingungen (z.B. Raumtemperatur) einen Einfluss bei der Prüfung haben.

Mit dem statistischen Test nach Anderson Darling [75] zeigte sich, dass die ermittelten Reibungskoeffizienten eines Reibgummisatzes einer Normalverteilung folgen.

Im nächsten Schritt wurde der Ausreißertest nach Grubbs [76] (Signifikanz 0,05, zweiseitiger Test) für jeden Messgummisatz durchgeführt. Dieser Test kann gemäß DIN 32645 [15] für die Kalibrierung von Analyseverfahren verwendet werden und überprüft Normalverteilungen auf Ausreißer. Der Ausreißertest nach Grubbs ergab, dass keine signifikanten Ausreißer vorliegen.

Mittels der einfachen Varianzanalyse kann die Gleichheit von mehreren Mittelwerten (mittlerer Reibungskoeffizient je Messgummisatz) getestet werden. Dazu werden die Varianzen (Streuungen) von Datengruppen (Messgummisätze) miteinander verglichen.

Für die Durchführung müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Die Messwerte müssen normalverteilt sein.
- Es sind keine Ausreißer vorhanden.
- Mit jedem Messgummisatz werden gleichviele Messungen durchgeführt (vereinfacht die Auswertung).
- Mit jedem Messgummisatz erhält man annähernd gleiche Varianzen (Streuungen).

Mit fünf verschiedenen Messgummisätzen wurde der Reibungskoeffizient  $\mu_m$  jeweils 21 Mal ermittelt, und für jeden Messgummisatz der Mittelwert  $\mu$  berechnet. Die zu untersuchende Nullhypothese lautet:  $H_0 : \mu_1 = \dots = \mu_i$ , d.h. es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen den Mittelwerten (mittleren Reibungskoeffizienten) je Messgummisatz.

Für die einfache Varianzanalyse wurde ein mittleres Signifikanzniveau von 5 % festgelegt. Die Anzahl der Messungen des Reibungskoeffizienten wird hierbei durch die t-Verteilung berücksichtigt.

Die einfache Varianzanalyse ergab, dass die Prüfgröße (F) mit 17,4 größer ist als der kritische F-Wert (Vergleichsgröße) mit 2,46 (Tabelle 6-2). Die aufgestellte Hypothese ist somit zu verwerfen, es liegen statistisch gesehen signifikante, systematische Unterschiede zwischen den einzelnen Messgummisätzen vor.

ZUSAMMENFASSUNG				
Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
Messgummisatz 3	21	13,5857575	0,6469408	0,0000419
Messgummisatz 1212	21	13,6342916	0,6492520	0,0000130
Messgummisatz 7	21	13,6726312	0,6510777	0,0000098
Messgummisatz 1412	21	13,7149984	0,6530952	0,0000060
Messgummisatz 11 G	21	13,7782753	0,6561083	0,0000041

ANOVA						
Streuungsursache	Quadratsummen (SS)	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quadratsumme (MS)	Prüfgröße (F)	P-Wert	kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	0,0010414	4	0,0002603	17,4167489	0,0000000	2,4626149
Innerhalb der Gruppen	0,0014948	100	0,0000149			
Gesamt	0,0025361	104				

Tabelle 6-2: Einfache Varianzanalyse (Anova) für die jeweils 21 ermittelten Reibungskoeffizienten  $\mu_m$  der fünf Messgummisätze, auf der Kontrollplatte „CC 6,5 mm, normal“

Mit Hilfe des Boxplot-Diagramms (Box-Whisker-Plot) lassen sich graphisch verschiedene Streuungs- und Lagemaße von einem oder mehreren Datensätzen in einer Darstellung zusammenfassen und vergleichen. Ein Boxplot vermittelt schnell einen Eindruck, in welchem Bereich sich die Daten befinden und wie sie sich über diesen Bereich verteilen. Der Bereich, in dem mindestens 50 % der Daten liegen, wird als Box gekennzeichnet. Sie wird durch das untere und obere Quartil begrenzt. Der Zentralwert (Medianwert) innerhalb der Box wird als Linie dargestellt. Die Länge der Box wird als Interquartilsabstand bezeichnet. Für die Whisker (Antennen) gibt es unterschiedliche Definitionen. In der gewählten Darstellung wird der kleinste und größte Datenwert des Datensatzes je durch einen Whisker gekennzeichnet, und deckt so die gesamte Spannweite der Daten ab.

Es ist erkennbar, dass die Mediane der Messgummisätze (3, 1212 und 7) unterhalb der Mediane aus der zweiten Fertigungscharge (1412, 11G) liegen (Abbildung 6-3). Mit dem Messgummisatz 3 wurde sowohl der minimale als auch maximale Reibungskoeffizient ermittelt.

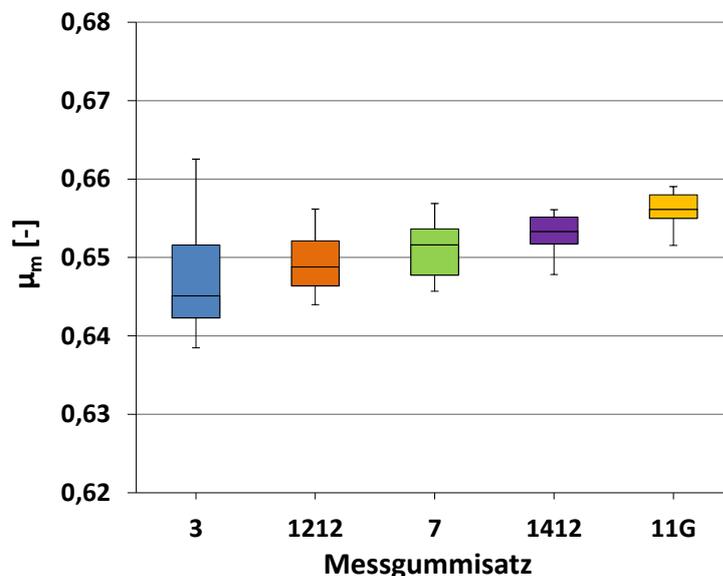


Abbildung 6-3: Boxplot-Diagramme der Reibungskoeffizienten  $\mu_m$  unterteilt für die fünf Messgummisätze

Anscheinend liegt bei diesem Messgummisatz eine gewisse, unvermeidbare Produktionsschwankung innerhalb einer Fertigungscharge vor.

Die Messbereiche der weiteren Messgummisätze, liegen trotz ggf. unterschiedlicher Fertigungscharge, innerhalb der Spannweite des Messbereichs des Messgummisatzes 3. Diese Spannweite könnte ggf. zukünftig als möglicher Anforderungswert diskutiert werden, innerhalb welcher sich die Messwerte der Messgummisätze von unterschiedlichen Fertigungschargen befinden müssen.

In rechtschiefen (linkssteifen) Verteilungen ist der Median kleiner als der berechnete arithmetische Mittelwert. Bei linksschiefen Verteilungen liegt der umgekehrte Fall vor. Entspricht der arithmetische Mittelwert gleich dem Median so liegt eine symmetrische Verteilung mit einer Schiefe von Null vor. Die Messgummisätze 1212, 1412 und 11G weisen eine symmetrische, die Messgummisätze 3 bzw. 7 eine nahezu symmetrische Verteilung auf (Abbildung 6-3). Bei ausgeprägten rechtsschiefen bzw. linksschiefen Verteilungen müssten andere Verteilungen, z.B. die Poisson- bzw. die Binomialverteilung (Voraussetzung hier:  $p > 0,5$ ) gewählt werden. Bei symmetrischen Verteilungen kann die t- oder die Normalverteilung verwendet werden.

Bei einem hohen Stichprobenumfang  $n$  nähert sich die t-Verteilung einer Normalverteilung an. Für  $n = 105$ , mit einer Sicherheit von 95 % (zweiseitig), d.h. Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 5\%$  ergibt sich für den normalverteilten Reibungskoeffizienten  $\mu_m$  ein Mittelwert von 0,6513 und eine Standardabweichung  $\sigma$  von 0,0049. Für die ausgewertete Normalverteilung erhält man die folgende Dichtefunktion (Abbildung 6-4) bzw. Summenkurve (Abbildung 6-5).

Hierbei bestimmt die Standardabweichung  $\sigma$  die Form der Dichtefunktion. Die sehr kleine Standardabweichung von  $\sigma = 0,0049$  lässt den Graphen der Normalverteilung um den Erwartungswert herum steil verlaufen. Die niedrige Standardabweichung impliziert somit eine gute Repräsentativität des Mittelwerts. Mit Wahrscheinlichkeit von 95 % liegen die Werte der Reibungskoeffizienten innerhalb des Bereiches von 0,6416 bis 0,6610, was einer Spannweite von 0,0194 entspricht.

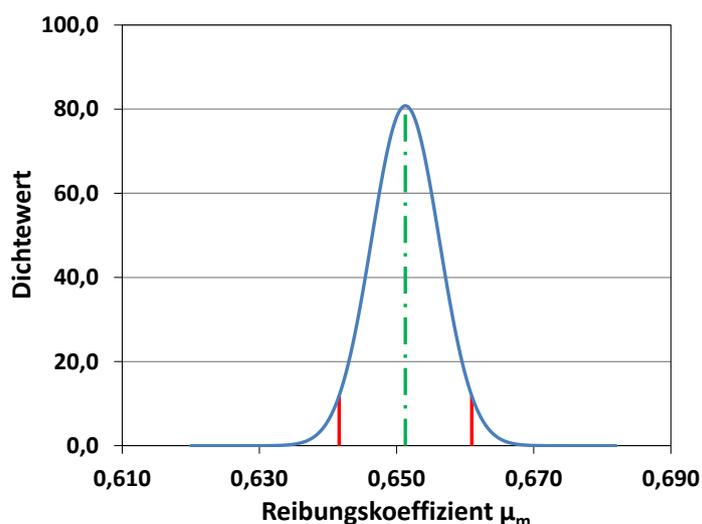


Abbildung 6-4: Dichtefunktion der Normalverteilung für die Reibungskoeffizienten  $\mu_m$

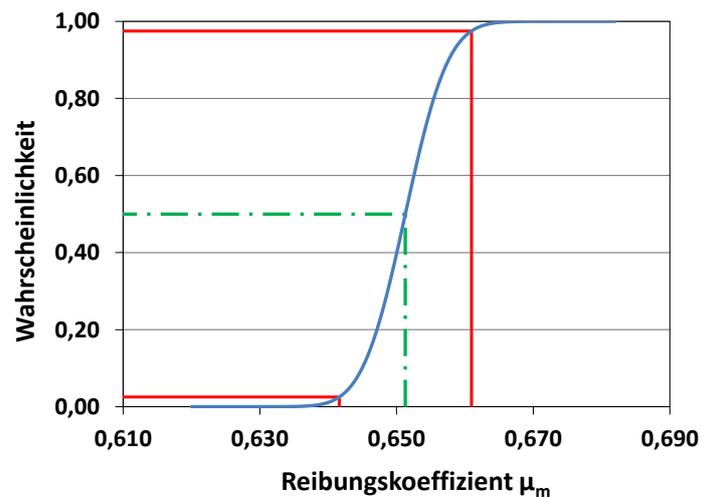


Abbildung 6-5: Summenkurve (Wahrscheinlichkeit) der Normalverteilung für die Reibungskoeffizienten  $\mu_m$

Für die Kontrollplatten aus Glas sind in den DIN EN 12697-49 [54] keine Vorgaben für die Standardabweichung angegeben. Es wurde nur festgelegt, dass das Messergebnis der Kontrollplatte vor und nach jeder Prognoseprüfung um maximal 10 % vom bekannten Griffigkeitswert  $\mu_{ref}$  der Kontrollplatte abweichen darf.

Wird diese 10 %-Regelung auf die Kontrollplatte mit einer hochverschleißfesten Hartmetallschicht aus Wolframcarbid („CC 6,5 mm, normal“) übertragen, so müssten bei einem bekannten Griffigkeitswert (Referenzwert  $\mu_{ref}$ ) mit 0,6513 Einzelmesswerte vor und nach jeder Prognoseprüfung akzeptiert werden, die sich maximal um die Spannweite von 0,0651 unterscheiden.

Die Differenz bei diesem hohen Griffigkeitsniveau zwischen dem maximal und dem minimal gemessenen Reibungskoeffizienten bei einer Stichprobenanzahl von  $n = 105$  beträgt lediglich 0,0241 (Anhang B5). Wird die Spannweite prozentual auf den arithmetischen Mittelwert mit 0,6513 bezogen, so ergibt sich eine Abweichung von 3,7 %, die Vorgaben der DIN EN 12697-49 wären somit eingehalten.

Mit der untersuchten Kontrollplatte können somit Fertigungschargen von Messgummisätzen, aber auch einzelne Messgummisätze innerhalb einer Fertigungscharge hinsichtlich ihres Messniveaus unterschieden werden. Liegt das ermittelte Messniveau eines Messgummisatzes außerhalb der Anforderungsspanne, so ist dieser für die Griffigkeitsmessung auszuschließen. Die Kontrollplatte weist ein nahezu gleichbleibendes und unveränderliches Griffigkeitsniveau in einem hohen Messbereich auf und kann somit zur Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der Griffigkeitsmesseinrichtung verwendet werden.

### 6.3 Kontrollplatten aus natürlichen Oberflächen

Zu den natürlichen Oberflächen werden Probekörper aus Natursteinen oder aus feinen bzw. groben Gesteinskörnungen gezählt.

Bei der ausgewählten **Natursteinplatte** (Warthauer Sandstein) nahmen die ermittelten Griffigkeitsmesswerte  $\mu_m$  mit steigender Anzahl der Griffigkeitsmessungen signifikant ab, d.h., ein konstantes Griffigkeitsniveau konnte nicht erzielt werden.

Mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze können neben Griffigkeitsmessungen bzw. -prognosen an Asphaltprobekörpern auch Polierwerte an feinen und groben Gesteinskörnungen [55] bestimmt werden.

Die Bestimmung des Polierwerts von **groben Gesteinskörnungen** erfolgt nach den TP Gestein-StB, Teil 5.4.2 [55]. Für die Prüfungen wurde als grobe Gesteinskörnung ein Herrnholzer Granit in der Lieferkörnung 5/8 mm Granit verwendet. Dieser Granit wird aktuell auch als Kontrollgestein zur Bestimmung des Polierwertes von groben Gesteinskörnungen nach den TP Gestein-StB Teil 5.4.1 [51] eingesetzt. Die Probekörperherstellung und -vorbereitung erfolgte nach dem Mastix-Eingussverfahren [55]. Nach dem Poliervorgang wurde die Griffigkeitsmessung durchgeführt, die Probekörper erneut geschliffen und vorbereitet. Selbst für eine Prüfkörperoberfläche schwanken die Reibungskoeffizienten stark, so dass ein konstantes Griffigkeitsniveau nur bedingt gegeben war. Von weiteren Messungen wurde deshalb abgesehen.

Die Bestimmung des Polierwertes von **feinen Gesteinskörnungen** erfolgt nach den TP Gestein-StB Teil 5.4.2 [55]. Als Proben für die Prüfung von feinen Gesteinskörnungen dienen im Labor mittels Aufklebeverfahren hergestellte Probekörper. Die Einflussfaktoren der Probenaufbereitung, Probekörperherstellung und Poliersimulation hat Kirchmaier [23] weitergehend untersucht und beschrieben.

Für die Untersuchungen wurde eine **ungebrochene feine Gesteinskörnung** aus Quarz (feuertrocknet), der Lieferkörnung 0,1/0,6 mm ausgewählt. Dieser Quarzsand zeichnet sich durch eine sehr hohe Abriebbeständigkeit, Verschleißfestigkeit und Härte aus und weist somit einen hohen Widerstand gegen Polieren auf. Zudem ist der Sand in gleichbleibender, hoher Qualität langfristig verfügbar. Insgesamt wurden 50 Sandplatten hergestellt und geprüft.

Der Poliervorgang und die Griffigkeitsmessung erfolgen analog zu den groben Gesteinskörnungen. Auf zehn Sandplatten wurden jeweils mit einem Satz neuer Messgummis (F23A, 9, F73C, F73B und F73H) je vier Griffigkeitsmessungen durchgeführt. Nach jeder Griffigkeitsmessung verbleibt ein Gummiabrieb auf der Prüfkörperoberfläche, zudem werden einzelne Sandkörner durch die Bremsbeanspruchung aus der Matrix herausgelöst. Hierdurch sinkt mit zunehmender Anzahl an Griffigkeitsmessungen das Griffigkeitsniveau der Probekörperoberfläche.

Die weiteren statistischen Auswertungen für die erste bzw. zweite durchgeführte Griffigkeitsmessung auf jeweils zehn Sandplatten erfolgten analog der industriell hergestellten Kontrollplatte „CC 6,5 mm, normal“. Es konnten folgende Ergebnisse ermittelt werden:

- Die nach der ersten Griffigkeitsmessung ermittelten Reibungskoeffizienten eines Messgummisatzes folgen einer Normalverteilung.
- Für die Messgummisätze F23A, F73C und F73H liegt nach der zweiten Griffigkeitsmessung keine Normalverteilung vor.
- Signifikante Ausreißer (zweiseitiger Test) für die Reibkoeffizienten nach der ersten Griffigkeitsmessung liegen nicht vor.
- Es sind keine signifikanten, systematischen Unterschiede zwischen den einzelnen Messgummisätzen vorhanden.
- Die Messgummisätze 9 und F73C weisen eine symmetrische, die Messgummisätze F73B und F73H bzw. F73A eine nahezu symmetrische Verteilung auf.

- Für den normalverteilten Reibungskoeffizienten (Sicherheit von 95 %, zweiseitig) ergibt sich für die erste Griffigkeitsmessung ein Mittelwert von 0,6885. Die Standardabweichung  $\sigma$  beträgt 0,0093 (Anhang B16).
- Mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % liegen für die erste Griffigkeitsmessung die Werte der Reibungskoeffizienten innerhalb des Bereiches von 0,6703 bis 0,7068, was einer Spannweite von 0,0364 entspricht.
- Wird die bei einer Stichprobenanzahl von  $n = 50$  berechnete Spannweite mit 0,0434 prozentual auf den Mittelwert mit 0,6885 bezogen, so ergibt sich für die erste Griffigkeitsmessung eine Abweichung von 6,3 % (Anhang B11). Dieser Wert liegt deutlich unterhalb der zulässigen Abweichung, die die DIN EN 12697-49 [54] für die Messergebnisse der Kontrollplatte aus Glas vor und nach jeder Prognoseprüfung, bezogen auf den bekannten Griffigkeitswert  $\mu_{ref}$  der Kontrollplatte von maximal 10 %, vorsieht.
- Die Kontrollplatten können nur einmalig (für die erste Griffigkeitsmessung) eingesetzt werden.
- Die Kontrollplatte weist nahezu gleichbleibende, unveränderliche Griffigkeitsmesswerte in einem sehr hohen Griffigkeitsmessbereich auf und kann zur Überprüfung des Zustands der Griffigkeitsmesseinrichtung im hohen Griffigkeitsmessbereich verwendet werden.
- Die Messgummis werden bei der Griffigkeitsmessung kaum beansprucht, was zu einer Minimierung der Prüfmittelkosten beiträgt.

## 6.4 Ergebnisse

Für den hohen Griffigkeitsmessbereich konnte je eine natürliche und eine industriell hergestellte Oberfläche gefunden werden, welche sich als Kontrollplatten eignen.

Die industriell hergestellte Kontrollplatte, bestehend aus einer hochverschleißfesten Hartmetallschicht aus Wolframcarbid („CC 6,5 mm, normal“) ist in der Anschaffung kostenintensiver als die ungebrochene feine Gesteinskörnung, die zur Herstellung der Sandplatten benötigt wird. Der Verschleiß des Gummibelags je Griffigkeitsmessung ist bei der Hartmetallschicht deutlich höher.

Aufgrund des in den Vorversuchen ermittelten Sachverhaltes, dass bei mehrmaligen Griffigkeitsmessungen die erzeugte Reibungswärme gegebenenfalls nicht vollständig an die Umgebung abgegeben und zu einer Veränderung der Elastizität der Messgummis führen kann, können maximal vier Griffigkeitsmessungen unmittelbar hintereinander ausgeführt werden. Die Kontrollplatte zeichnet sich durch ein gleichbleibendes, unveränderliches, spezifisches Griffigkeitsniveau in einem hohen Messbereich aus. Für die Griffigkeitsmessungen muss sie sich immer in derselben, unverrückbaren Position befinden. Selbst kleine Positionsabweichungen führen aufgrund der unterschiedlichen Verteilung des Hartmetalls auf der Oberfläche zu unterschiedlichen Messergebnissen. Jede gefertigte Kontrollplatte stellt somit ein Einzelstück dar, d.h. sie sind nicht in größeren Stückzahlen mit gleichen Eigenschaften herstellbar, reproduzierbare Eigenschaften sind nicht ohne weiteres gegeben.

Die Herstellung der Kontrollplatten aus Sand gestaltet sich als kostengünstig, einfach und kann durch jeden Anwender selbst vorgenommen werden. Nachteilig wirkt sich aus, dass für die Kontrolle der Funktionstüchtigkeit vor und nach der eigentlichen Messung jeweils eine separate Sandplatte geprüft werden muss. Allerdings können diese Sandplatten in großen Stückmengen, mit reproduzierbaren Eigenschaften bei einem hohen gleichbleibenden Griffigkeitsniveau erzeugt werden. Zusätzlich kann

beim durchzuführenden Poliervorgang, das am Rotationskopf der Poliereinheit durch die Überrollungen erzeugte Moment, nach einer gewissen Anlaufzeit mit überprüft werden.

Beide ermittelten Standardabweichungen weisen sehr niedrige Werte auf. Die berechnete Standardabweichung der Kontrollplatte aus der Hartmetallschicht liegt unterhalb der der Sandplatten, d.h. die gemessenen Reibungskoeffizienten liegen enger um den Mittelwert.

Mit den Kontrollplatten lassen sich zudem unterschiedliche Fertigungschargen von Messgummisätzen, aber auch einzelne Messgummisätze innerhalb einer Fertigungscharge differenzieren. Zur Vermeidung falscher Prüfwerte sollten zukünftig in den Prüfvorschriften geeignete Regelungen für die Prüfung der Messgummisätze getroffen werden. Zur Gewährleistung einheitlicher Messgummis mit gleichmäßigen, reproduzierbaren Gummieigenschaften und zur Vermeidung unterschiedlicher Produktions- bzw. Herstellungsbedingungen sollten zukünftig die Messgummis durch eine zentrale Stelle hergestellt werden.

Die Funktionstüchtigkeit der Griffigkeitsmesseinrichtung für das Prüfgerät nach Wehner/Schulze kann durch die Kontrollplatte bestehend aus einer hochverschleißfesten Hartmetallschicht aus Wolframcarbid oder durch die Sandplatte aus der ungebrochenen feinen Gesteinskörnung aus Quarz zielicher überprüft werden. Aufgrund der geringeren Standardabweichung wäre der Kontrollplatte aus einer hochverschleißfesten Hartmetallschicht aus Wolframcarbid („CC 6,5 mm, normal“) der Vorzug zu geben.

## 7 Variationen in der Asphaltzusammensetzung

Die bisherigen Ergebnisse zeigten Schwankungen in der Asphaltzusammensetzung auf, es ist abzuklären, wie sich diese auf die Endgriffigkeit  $PWS_{270}$  auswirken.

Für die zwei Asphaltarten SMA 8 S bzw. AC 11 D S der Strecken 9 bzw. 14, hergestellt mit polymermodifizierten Bitumen 25/55-55 A als Zugabebindemittel, wurden für die Phase EP je neun Varianten (inkl. Ausgangszusammensetzung) mit unterschiedlicher Asphaltzusammensetzung untersucht. Die Asphaltmischgutkonzeption für die Varianten erfolgte jeweils an den berechneten Randwerten der Merkmale, welche sich aus der Ausgangszusammensetzung und den Toleranzen (Tabelle 7-1) der ZTV Asphalt-StB 07/13 [1] ergeben.

Merkmal	SMA 8 S		AC 11 D S	
	-	+	-	+
Bindemittelgehalt	- 0,4 M.-%	+ 0,4 M.-%	- 0,4 M.-%	+ 0,4 M.-%
Fülleranteil	- 3,0 M.-%	+ 3,0 M.-%	- 3,0 M.-%	+ 3,0 M.-%
Anteil an feinen bzw. groben GK	- 8,0 M.-%	+ 8,0 M.-%	- 8,0 M.-%	+ 8,0 M.-%
Grobkornanteil	- 8,0 M.-%	+ 8,0 M.-%	- 5,0 M.-%	+ 5,0 M.-%

Tabelle 7-1: Toleranzen für SMA 8 S und AC 11 D S gemäß den ZTV Asphalt-StB 07/13

Für die Asphaltmischungen wurden Rückstellproben der bereits für die Phase EP eingesetzten Gesteinskörnungen, Asphaltgranulate und Zugabebindemittel verwendet.

Als Grundlage für die durchzuführenden Asphaltvariationen, wurde auf die in den Erstprüfungen angegebenen Asphaltzusammensetzungen zurückgegriffen.

Die Herstellung des Asphaltmischgutes aus den einzelnen Baustoffkomponenten erfolgte nach den TP Asphalt-StB, Teil 35 [11] maschinell im Labor. Aus dem hergestellten Asphaltmischgut wurden jeweils Teilproben entnommen und Probekörper hergestellt.

Die Asphalt-Probepplatten wurden für jede Variante mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät gem. TP Asphalt-StB, Teil 33 hergestellt, daraus Ausbaustücke mit einem Durchmesser von 225 mm ausgebohrt und die Oberflächen der Bohrkern mit dem in den DIN EN 12697-49 [54] definierten Sandstrahlvorgang vorbereitet.

Anschließend wurde an den Probekörpern die Griffigkeitsentwicklung bis zum Erreichen der Endgriffigkeit nach 270.000 Überrollungen ermittelt und die Texturveränderungen mittels ELAtextur<sup>®</sup> erfasst. Die Messergebnisse können dem Anhang C1 entnommen werden.

Für den SMA 8 S bzw. AC 11 D S wurden jeweils neun Varianten gemäß Tabelle 7-2 hergestellt und bezeichnet. Veränderungen im Fülleranteil wurden im Anteil der feinen Gesteinskörnungen bzw. Veränderungen im Grobkornanteil im Anteil der groben Gesteinskörnungen kompensiert.

Bezeichnung	Asphaltart	Asphaltvariation
9-0	SMA 8 S	Ausgangszusammensetzung
9-1		+ 0,4 M.-% Bindemittel
9-2		- 0,4 M.-% Bindemittel
9-3		+ 3,0 M.-% Füller
9-4		- 3,0 M.-% Füller
9-5		+ 8,0 M.-% feine Gesteinskörnung
9-6		- 8,0 M.-% feine Gesteinskörnung
9-7		+ 8,0 M.-% Grobkorn
9-8		- 8,0 M.-% Grobkorn
14-0	AC 11 D S	Ausgangszusammensetzung
14-1		+ 0,4 M.-% Bindemittel
14-2		- 0,4 M.-% Bindemittel
14-3		+ 3,0 M.-% Füller
14-4		- 3,0 M.-% Füller
14-5		+ 8,0 M.-% feine Gesteinskörnung
14-6		- 8,0 M.-% feine Gesteinskörnung
14-7		+ 5,0 M.-% Grobkorn
14-8		- 5,0 M.-% Grobkorn

Tabelle 7-2: Zusammenstellung der Asphaltvariationen für die Asphaltarten SMA 8 S und AC 11 D S

## 7.1 Splittmastixasphalt SMA 8 S

Die beim Splittmastixasphalt SMA 8 S vorgenommenen Änderungen gegenüber der Ausgangszusammensetzung (9-0) im Bindemittelgehalt, Fülleranteil, Anteil an feinen und groben Gesteinskörnungen und Grobkornanteil sind in der Tabelle 7-3 farblich hervorgehoben. Mit steigendem Fülleranteil (9-3) oder Bindemittelgehalt (9-1) erniedrigt sich erwartungsgemäß der Hohlraumgehalt gegenüber der Ausgangszusammensetzung (9-0). Eine ausgeprägte Änderung des Hohlraumgehalts lässt sich bei den Asphaltvariationen 9-5 bzw. 9-6 durch eine Variation im Anteil an feinen Gesteinskörnungen in Höhe von 8,0 M.-% erzielen. Der Hohlraumgehalt erniedrigt sich auf 1,4 Vol.-% bzw. steigt auf

9,5 Vol.-% an. Eine Erhöhung bzw. Erniedrigung des Grobkornanteils um 8,0 M.-% bewirkt eine geringfügigere Änderung im Hohlraumgehalt.

Bezeichnung	9-0	9-1	9-2	9-3	9-4	9-5	9-6	9-7	9-8
Bindemittelgehalt: [M.-%]	7,2	7,6	6,8	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2
Korngröße: 16,0 [mm]	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
11,2 [mm]	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
8,0 [mm]	92,6	92,6	92,6	92,6	92,6	93,3	91,8	91,4	93,7
5,6 [mm]	44,6	44,6	44,6	44,6	44,7	50,4	38,7	36,6	52,6
2,0 [mm]	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	32,4	16,4	24,4	24,4
1,0 [mm]	20,5	20,5	20,5	21,8	19,2	25,8	15,2	20,5	20,4
0,25 [mm]	15,0	15,0	15,0	17,8	12,2	16,6	13,4	15,0	15,0
0,125 [mm]	12,5	12,5	12,5	15,5	9,5	13,0	12,0	12,5	12,5
0,063 [mm]	10,8	10,8	10,8	13,8	7,8	10,8	10,8	10,8	10,8
Rohdichte: [g/cm <sup>3</sup> ]	2,394	2,387	2,418	2,401	2,402	2,396	2,408	2,390	2,401
Raumdichte: [g/cm <sup>3</sup> ]	2,322	2,324	2,302	2,338	2,280	2,362	2,180	2,256	2,303
Hohlraumgehalt: [Vol.-%]	3,0	2,6	4,8	2,6	5,1	1,4	9,5	5,6	4,1

Tabelle 7-3: Asphaltzusammensetzung der Asphaltvariationen für die Asphaltart SMA 8 S

In den TL Asphalt-StB 07/13 [85] sind als Grenzwerte für den Hohlraumgehalt am Marshall-Probe-körper ein minimaler bzw. maximaler Hohlraumgehalt von  $V_{\min} = 2,5$  Vol.-% bzw.  $V_{\max} = 3,0$  Vol.-% festgelegt. Gemäß den ZTV Asphalt-StB 07/13 [1] darf beim SMA 8 S bei Kontrollprüfungen der Hohlraumgehalt des Marshall-Probekörpers, hergestellt aus der Asphaltmischgutprobe, die Grenzen der TL Asphalt-StB 07/13 um nicht mehr als 1,0 Vol.-% über- bzw. unterschreiten, d.h. die ermittelten Hohlraumgehalte sollten zwischen 1,5 Vol.-% bis 4,0 Vol.-% liegen.

Diese Grenzwerte werden von den Asphaltvariationen 9-2, 9-4, 9-5, 9-6, 9-7 und 9-8 nicht eingehalten. Hervorzuheben ist hierbei der signifikante Einfluss des Anteils an feinen Gesteinskörnungen auf den Hohlraumgehalt.

### Griffigkeitsentwicklung der Splittmastixasphalte SMA 8 S

In Abbildung 7-1 sind die auf eine Kontrollfläche mit der Griffigkeit 0,1 bezogenen Verläufe der Griffigkeitswerte (Mittelwerte)  $\mu_{PWS}$  dargestellt. Bei einigen Varianten ist ein kurzzeitiger Anstieg des Griffigkeitswerts zwischen zwei Beanspruchungsstufen (Anzahl der Überrollungen) festzustellen, dieser ist gegebenenfalls auf das Freilegen von Gesteinsoberflächen zurückzuführen.

Den höchsten Griffigkeitswert nach 270.000 Überrollungen mit  $\mu_{PWS270} = 0,310$  (Tabelle 7-4) zeigt überraschenderweise die Asphaltvariation 9-1 auf, bei der der Bindemittelgehalt gegenüber der Ausgangszusammensetzung um 0,4 M.-% erhöht wurde. Die Asphaltvariation 9-5 (Erhöhung Anteil feiner Gesteinskörnung um 8,0 M.-%) weist mit  $\mu_{PWS270} = 0,248$  mit Abstand den niedrigsten Griffigkeitswert auf. Die Spannweite der Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS270}$  nach 270.000 Überrollungen beträgt 0,062.

Gemäß dem Entwurf der Technischen Prüfvorschrift „Bestimmung der Griffigkeitsentwicklung von Oberflächen mit dem Prüfverfahren Wehner/Schulze (PWS), Entwurf Ausgabe 2009“ [56] ist die kontinuierliche Griffigkeitsentwicklung durch eine Logarithmusfunktion ( $PWS = a \ln(x) + b$ ) anzunähern (Abbildung 7-2). Bei allen Asphaltvariationen liegt mit Ausnahme von Variante 9-2 ( $R^2 = 0,87$ ), das Bestimmtheitsmaß über 0,90. Demnach liegt eine sehr gute Übereinstimmung mit der gewählten

Regressionskurve vor. Die Bestimmtheitsmaße und die durch logarithmische Korrelation gewonnenen Koeffizienten a und b können dem Anhang C2 entnommen werden.

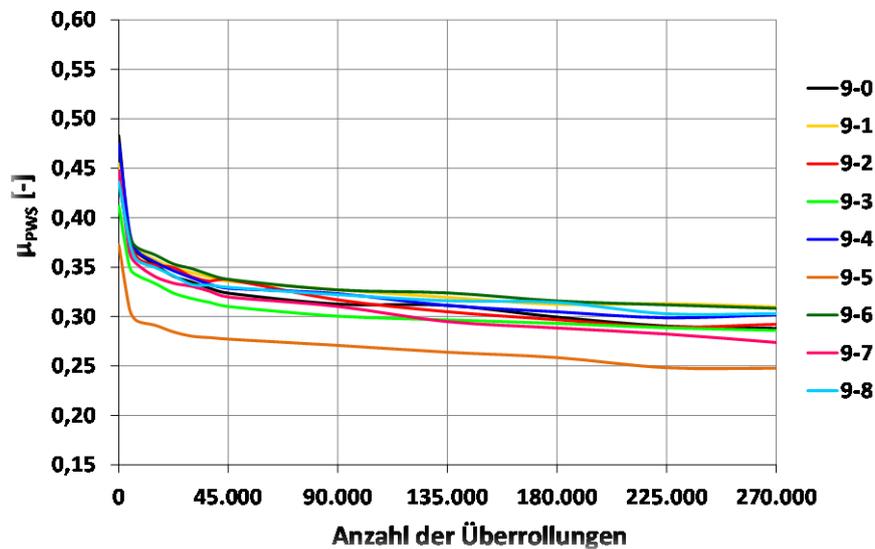


Abbildung 7-1: Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  der Asphaltvariationen SMA 8 S

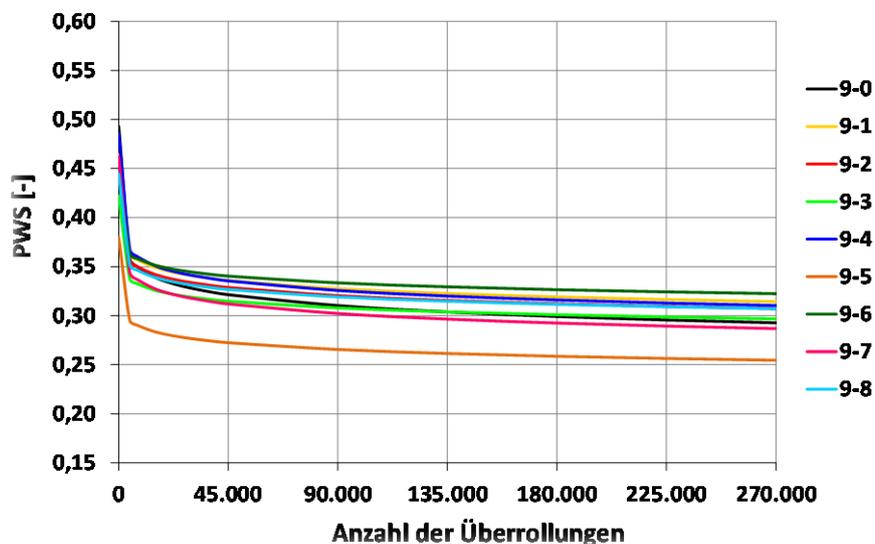


Abbildung 7-2: Griffigkeitsverlauf PWS der Asphaltvariationen SMA 8 S

Es zeigte sich, dass die berechneten Endgriffigkeiten nach 270.000 Überrollungen  $PWS_{270}$  um 0,004 bis 0,015 Einheiten oberhalb der ermittelten Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS_{270}}$  liegen (Tabelle 7-4). Dieser Sachverhalt ist mitunter der Tatsache geschuldet, dass die Anfangsgriffigkeiten  $PWS_0$ , gemessen an der sandgestrahlten Oberfläche verstärkt in die Regressionsberechnungen miteinfließen und sich vor allem im Koeffizienten b widerspiegeln. Die niedrigste bzw. höchste Endgriffigkeit  $PWS_{270}$  mit 0,255 bzw. 0,322 wurde an der Asphaltvariation 9-5 bzw. 9-6 gemessen, welche mit 1,4 Vol.-% den niedrigsten bzw. mit 9,6 Vol.-% den höchsten Hohlraumgehalt aufweist. Die Spannweite der Griffigkeitswerte beträgt 0,067 (Maximum: 0,322; Minimum: 0,255).

Variante	$\mu_{PWS_0}$	$\mu_{PWS_{180}}$	$\mu_{PWS_{270}}$	$PWS_0$	$PWS_{270}$	$MPD_0$	$MPD_{270}$
9-0	0,483	0,299	0,288	0,493	0,293	0,73	0,60
9-1	0,454	0,312	0,310	0,464	0,314	0,77	0,63
9-2	0,439	0,297	0,292	0,457	0,307	0,91	0,76
9-3	0,412	0,293	0,286	0,422	0,297	0,85	0,68
9-4	0,475	0,305	0,302	0,485	0,310	0,92	0,79
9-5	0,373	0,259	0,248	0,380	0,255	0,29	0,25
9-6	0,434	0,316	0,308	0,448	0,322	1,04	0,93
9-7	0,448	0,288	0,274	0,462	0,287	1,09	0,98
9-8	0,436	0,314	0,303	0,445	0,307	1,00	0,87
Mittelwert	0,439	0,298	0,290	0,451	0,299	0,84	0,72
Spannweite	0,110	0,057	0,062	0,113	0,067	0,80	0,73
Mittelwert <sup>1)</sup>	0,448	0,303	0,295	0,460	0,305	0,91	0,78
Spannweite <sup>1)</sup>	0,071	0,028	0,036	0,071	0,035	0,36	0,38

<sup>1)</sup> ohne Berücksichtigung der Variante 9-5

Tabelle 7-4: Griffigkeitswerte und mittlere Profiltiefe der Asphaltvariationen SMA 8 S nach 0, 180.000 bzw. 270.000 Überrollungen

Wird die Asphaltvariation 9-5 bei der Mittelwert- und Spannweitenberechnung ausgeklammert (Tabelle 7-4), so liegt der Mittelwert der Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  der verbleibenden acht Asphaltvariationen unabhängig von der Asphaltzusammensetzung bei 0,305. Die Spannweite der Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  hat sich auf 0,035 verringert.

Die logarithmische Darstellung der kontinuierlichen Griffigkeitsverläufe (Abbildung 7-3) der Asphaltvariationen zeigt, dass die Anfangsgriffigkeiten bei 0 Überrollungen ( $PWS_0$ ) deutlich schwanken und somit stark von der Zusammensetzung des Asphaltmischguts beeinflusst werden.

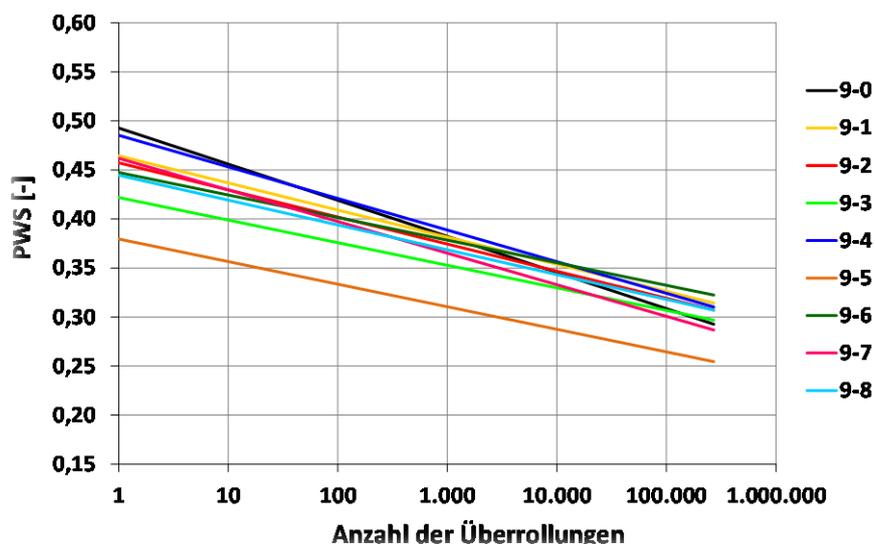


Abbildung 7-3: Logarithmischer Griffigkeitsverlauf PWS der Asphaltvariationen SMA 8 S

Bei den Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  wirkt sich mit Ausnahme von der Asphaltvariation 9-5 dieser Einfluss deutlich geringer aus. Die Asphaltvariation 9-5 (Erhöhung des Anteils von feinen Gesteinskörnung um 8,0 M.-%) weist mit Abstand sowohl die geringste Anfangsgriffigkeit ( $PWS_0$ ), Endgriffigkeit ( $PWS_{270}$ ) als auch mittlere Profiltiefe  $MPD_0$  bzw.  $MPD_{270}$  (Tabelle 7-4) auf.

Hingegen weist die Asphaltvariation 9-6 (Erniedrigung des Sandanteils um 8,0 M.-%) die höchste Endgriffigkeit  $PWS_{270}$  mit 0,322 Einheiten aber nur eine mäßige Anfangsgriffigkeit  $PWS_0$  mit 0,448 Einheiten auf. Der Griffigkeitsabfall bei 9-6 ist am geringsten und besitzt somit die kleinste Steigung im logarithmischen Griffigkeitsverlauf.

Die höchsten Anfangsgriffigkeiten  $PWS_0$  weist mit 0,493 Einheiten die Asphaltvariation 9-0 (Ausgangszusammensetzung) auf. Anscheinend wurde bei der Mischgutkonzeption ein verstärktes Augenmerk auf die Anfangsgriffigkeit gelegt. Mit einer steigenden Anzahl an Überrollungen nehmen jedoch die Griffigkeitswerte stärker als bei den anderen Varianten ab.

In der logarithmischen Darstellung (Abbildung 7-3) äußert sich dieser Sachverhalt durch die größte Steigung der Geraden 9-0. Nach 270.000 Überrollungen weist die Asphaltvariation 9-0 mit 0,293 Einheiten die „dritt schlechteste“ Endgriffigkeit auf.

Die Geraden für die Asphaltvariationen 9-5 und 9-2 verlaufen nahezu parallel und besitzen somit vergleichbare Steigungen und Griffigkeitsabnahme, sie enden jedoch auf einem unterschiedlichen Niveau.

Es kann festgestellt werden, dass eine unterschiedliche Asphaltzusammensetzung die Anfangsgriffigkeit ( $PWS_0$ ) bzw. Endgriffigkeit ( $PWS_{270}$ ) beeinflusst und somit zu unterschiedlichen Griffigkeitsabnahmen führt.

### **Betrachtung der Präzisionsdaten der Splittmastixasphalte SMA 8 S**

In den DIN EN 12697-49 [54] sind Präzisionsdaten für die Wiederholpräzision und Vergleichpräzision der Griffigkeit vor dem Polieren und nach 180.000 Überrollungen bezogen auf einen Asphaltbeton für sehr dünne Schichten (BBTM - Béton Bitumineux Mince) gemäß Tabelle 7-5 angegeben.

Asphaltart	FAP vor dem Polieren		FAP nach 180.000 Durchgängen	
	Wiederholpräzision	Vergleichpräzision	Wiederholpräzision	Vergleichpräzision
BBTM	0,026	0,052	0,024	0,074

Tabelle 7-5: Wiederhol- und Vergleichpräzision (Erfahrungswerte) gemäß den DIN EN 12697-49

Für die durchgeführten Asphaltvariationen ergibt sich für die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS180}$  nach 180.000 Überrollungen (Tabelle 7-4) ein Mittelwert von 0,298. Die Spannweite zwischen maximalen (0,316) und minimalen (0,259) Griffigkeitswerten liegt bei 0,057.

Durch Weglassen der Asphaltvariation 9-5, bei der deutlich geringere Griffigkeitswerte gemessen wurden, ergibt sich ein Mittelwert von 0,303. Das Maximum bzw. Minimum liegt bei 0,316 bzw. 0,288, die Spannweite beträgt 0,028 und ist nun halb so groß.

Für die weitere Auswertung wird für die Vergleichpräzision  $FAP$  nach 180.000 Überrollungen gemäß den DIN EN 12697-49 ein Wert von 0,074 herangezogen (vgl. Tabelle 7-5). Es zeigt sich, dass die berechnete Spannweite ohne 9-5 deutlich unterhalb der Vergleichpräzision liegt.

Anscheinend haben die Asphaltvariationen mit Ausnahme der Erhöhung des Anteils an feiner Gesteinskörnung beim Splittmastixasphalt SMA 8 S nur einen geringen Einfluss auf die Endgriffigkeiten.

### Mittlere Profiltiefe der Splittmastixasphalte SMA 8 S

Die geringen Griffigkeitswerte bei der Asphaltvariation 9-6 gehen mit der sehr geringen mittleren Profiltiefe bei 0 Überrollungen ( $MPD_0$ ) von 0,29 mm und dem sehr niedrigen Hohlraumgehalt von 1,4 Vol.-% einher.

Die höchste mittlere Profiltiefe wurde mit 1,09 mm für die Asphaltvariation 9-7 bei einem Hohlraumgehalt von 5,6 Vol.-% ermittelt.

Die mittleren Profiltiefen  $MPD_{270}$  nach 270.000 Überrollungen (Tabelle 7-4) für die untersuchten Asphaltvariationen liegen um 0,04 mm bis 0,17 mm unterhalb derer im sandgestrahlten Zustand bei 0 Überrollungen ( $MPD_0$ ). Es zeigt sich, dass die mittleren Profiltiefen relativ gleichmäßig abnehmen. Eine deutliche Einebnung der Prüfkörperoberfläche ist nicht erkennbar.

## 7.2 Asphaltbeton AC 11 D S

Bei der Mischgutsorte AC 11 D S wurden neun Asphaltvariationen (Tabelle 7-6) durchgeführt. Die vorgenommenen Änderungen gegenüber der Ausgangszusammensetzung (14-0) im Bindemittelgehalt, Fülleranteil, Anteil an feinen und groben Gesteinskörnungen und im Grobkornanteil sind jeweils farblich hervorgehoben.

Bezeichnung	14-0	14-1	14-2	14-3	14-4	14-5	14-6	14-7	14-8
<b>Bindemittelgehalt:</b> [M.-%]	6,2	<b>6,6</b>	<b>5,8</b>	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2
<b>Korngröße:</b> 16,0 [mm]	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
11,2 [mm]	98,9	98,9	98,9	98,9	98,9	99,1	98,8	98,6	99,3
8,0 [mm]	81,5	81,5	81,5	81,8	81,8	84,4	79,2	<b>76,5</b>	<b>86,5</b>
5,6 [mm]	67,5	67,5	67,5	67,8	67,8	72,4	63,2	67,7	67,7
2,0 [mm]	44,0	44,0	44,0	44,0	44,0	<b>52,0</b>	<b>36,0</b>	44,0	44,0
1,0 [mm]	30,7	30,7	30,7	32,2	29,3	35,8	25,7	30,8	30,7
0,25 [mm]	16,6	16,6	16,6	19,6	13,6	18,3	15,0	16,7	16,6
0,125 [mm]	11,7	11,7	11,7	15,1	8,4	12,3	11,2	11,8	11,7
0,063 [mm]	7,9	7,9	7,9	<b>10,9</b>	<b>4,9</b>	7,9	7,9	7,9	7,9
<b>Rohdichte:</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	2,399	2,389	2,408	2,395	2,406	2,403	2,399	2,398	2,408
<b>Raumdicke:</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	2,343	2,351	2,343	2,381	2,266	2,310	2,360	2,340	2,325
<b>Hohlraumgehalt:</b> [Vol.-%]	2,3	1,6	2,7	0,6	5,8	3,9	1,6	2,4	3,4

Tabelle 7-6: Asphaltzusammensetzung der Asphaltvariationen für die Asphaltart AC 11 D S

Mit steigendem Fülleranteil (14-3) oder Bindemittelgehalt (14-1) bzw. geringerem Anteil an feinen Gesteinskörnungen (14-5) erniedrigt sich der Hohlraumgehalt gegenüber der Ausgangszusammensetzung (14-0). Die größten Änderungen im Hohlraumgehalt gegenüber der Ausgangszusammensetzung (14-0) weisen die Asphaltvariationen 14-3 und 14-4 auf. Der Fülleranteil beim AC 11 D S wirkt sich somit signifikant auf den Hohlraumgehalt aus.

Eine Erhöhung des Grobkornanteils bzw. eine Verringerung des Anteils an feinen Gesteinskörnungen von 5,0 M.-% bzw. 8,0 M.-% bewirkt eine Erniedrigung des Hohlraumgehalts.

In den TL Asphalt-StB 07/13 [85] sind als Grenzwerte für den Hohlraumgehalt am Marshall-Probe-körper ein minimaler bzw. maximaler Hohlraumgehalt von  $V_{\min} = 2,5$  Vol.-% bzw.  $V_{\max} = 3,5$  Vol.-% festgelegt. Diese Werte dürfen um nicht mehr als 1,0 Vol.-% über- bzw. unterschritten werden [1],

d.h. die ermittelten Hohlraumgehalte sollten beim AC 11 D S zwischen 1,5 Vol.-% und 4,5 Vol.-% liegen. Diese Grenzwerte werden nur von den Asphaltvariationen 14-3 und 14-4, bei denen Veränderungen im Fülleranteil durchgeführt wurden, nicht eingehalten.

Die weiteren Auswertungen wurden analog zum Splittmastixasphalt durchgeführt. Für die graphische Darstellung der Griffigkeitswerte wurde die halblogarithmische Darstellung gewählt. Hier lassen sich die Anfangs- und Endgriffigkeiten der Asphaltvariationen besser differenzieren und übersichtlicher darstellen. Zudem gibt die Steigung der Geraden (Griffigkeitsverlauf zwischen 0 und 270.000 Überrollungen) die Griffigkeitsabnahme der Asphaltvariationen wieder.

### Griffigkeitsentwicklung der Asphaltbetone AC 11 D S

Die Verläufe der Griffigkeitswerte (Mittelwerte)  $\mu_{PWS}$  sind in Abbildung 7-4 wiedergegeben. Im Gegensatz zu den Verläufen beim Splittmastixasphalt verlaufen diese innerhalb einer deutlich engeren Bandbreite, nahezu parallel, leicht nach oben bzw. unten versetzt.

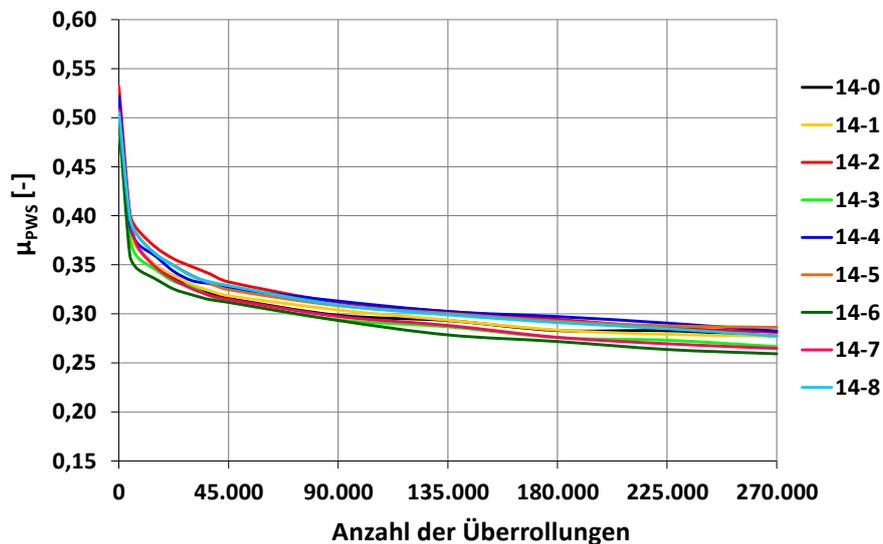


Abbildung 7-4: Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  der Asphaltvariationen AC 11 D S

Den höchsten bzw. niedrigsten Griffigkeitswert  $\mu_{PWS270}$  nach 270.000 Überrollungen (Tabelle 7-7) weisen die Asphaltvariationen 14-5 bzw. 14-6 mit 0,286 bzw. 0,259 auf. Bei diesen Asphaltvariationen wurde der Anteil an feinen Gesteinskörnungen um 8,0 M.-% erhöht bzw. erniedrigt. Es zeichnet sich ab, dass der Anteil an feinen Gesteinskörnungen bei Asphaltbetonen einen maßgeblichen Einfluss auf die Griffigkeit ausübt. Die Spannweite der Griffigkeitswerte nach 270.000 Überrollungen beträgt 0,027.

Übereinstimmend zum Splittmastixasphalt liegen die berechneten Endgriffigkeiten nach 270.000 Überrollungen  $PWS_{270}$  um 0,004 bis 0,022 Einheiten oberhalb der ermittelten Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS270}$  (Tabelle 7-7). Die unterschiedliche Reihenfolge der Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  gegenüber den ermittelten Griffigkeitswerten  $\mu_{PWS270}$  nach 270.000 Überrollungen konnte ebenfalls festgestellt werden. Für die Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  nach 270.000 Überrollungen ergibt sich ein Mittelwert von 0,288. Die niedrigste bzw. höchste Endgriffigkeit  $PWS_{270}$  mit 0,272 bzw. 0,300 wurde an der Asphaltvariation 14-6

bzw. 14-5 gemessen, welche den niedrigsten bzw. höchsten Anteil an feinen Gesteinskörnungen aufweist. Die Spannweite zwischen Maximum und Minimum ergibt sich zu 0,028.

Variante	$\mu_{PWS0}$	$\mu_{PWS180}$	$\mu_{PWS270}$	$PWS_0$	$PWS_{270}$	$MPD_0$	$MPD_{270}$
14-0	0,521	0,283	0,277	0,531	0,281	0,62	0,59
14-1	0,516	0,283	0,277	0,527	0,290	0,51	0,45
14-2	0,532	0,294	0,281	0,550	0,299	0,58	0,50
14-3	0,491	0,276	0,267	0,506	0,281	0,35	0,29
14-4	0,522	0,297	0,282	0,533	0,295	0,77	0,71
14-5	0,508	0,293	0,286	0,525	0,300	0,74	0,65
14-6	0,499	0,272	0,259	0,509	0,272	0,67	0,63
14-7	0,508	0,276	0,265	0,528	0,278	0,64	0,59
14-8	0,505	0,291	0,277	0,524	0,299	0,69	0,62
Mittelwert	0,511	0,285	0,275	0,526	0,288	0,62	0,56
Spannweite	0,041	0,025	0,027	0,044	0,028	0,42	0,42

Tabelle 7-7: Griffigkeitswerte und mittlere Profiltiefe der Asphaltvariationen SMA 8 S nach 0, 180.000 bzw. 270.000 Überrollungen

In der Abbildung 7-5 wird der kontinuierliche Griffigkeitsverlauf bis zum Endwert in Abhängigkeit von der Anzahl der Überrollungen durch die Logarithmusfunktion ( $PWS = a \ln(x) + b$ ) halblogarithmisch dargestellt. Bei allen Asphaltvariationen liegt das Bestimmtheitsmaß über 0,94 (Anhang C2). Demnach liegt eine sehr gute Übereinstimmung mit der gewählten Regressionskurve vor. Die Anfangsgriffigkeiten ( $PWS_0$ ) liegen zwischen 0,506 bis 0,550 Einheiten.

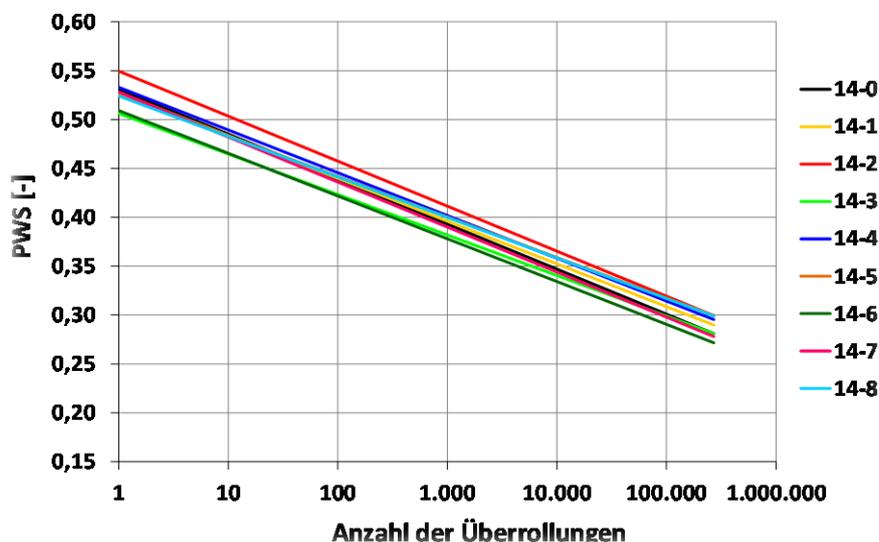


Abbildung 7-5: halblogarithmischer Griffigkeitsverlauf PWS der Asphaltvariationen AC 11 D S

Die Asphaltvariation 14-2, mit dem niedrigsten Bindemittelgehalt weist mit 0,550 Einheiten die höchste Anfangsgriffigkeit  $PWS_0$  auf. Bei dieser Variation sind die groben und feinen Gesteinskörnungen somit durch einen dünneren Bindemittelfilm umhüllt. Durch die normativ vorzunehmende Probenvorbereitung könnte dieser gegenüber den anderen Asphaltvariationen leichter abgetragen bzw. die Gesteinskörnungsoberflächen verstärkt freigelegt worden sein, so dass die wirksame Kanten- und Flächenschärfe der Gesteinskörnungen zu einer Steigerung der Anfangsgriffigkeit ( $PWS_0$ ) führt.

Die niedrigsten Anfangsgriffigkeiten  $PWS_0$  weisen die Asphaltvariationen 14-3 bzw. 14-6 mit 0,506 bzw. 0,509 auf. Bei diesen Asphaltvariationen wurde der Fülleranteil erhöht bzw. der Anteil der feinen Gesteinskörnungen um 8,0 M.-% erniedrigt.

Durch die Erhöhung des Fülleranteils (14-3) nimmt das Mastixvolumen zu. Die Oberfläche der Asphaltprobekörper wird deutlich dichter und weist die geringste mittlere Profiltiefe  $MPD_0$  (Tabelle 7-7) auf, was hier mit der geringsten Anfangsgriffigkeit  $PWS_0$  einhergeht. Durch die mechanische Beanspruchung (Überrollungen) wird der Asphaltmastix zunehmend abgetragen. Die ermittelte Endgriffigkeit  $PWS_{270}$  liegt mit 0,281 Einheiten im unteren Drittel des Wertebereichs der Endgriffigkeiten von 0,272 bis 0,300 Einheiten. Es zeigt sich, dass sich ein erhöhter Fülleranteil bis zum Erreichen der Endgriffigkeit  $PWS_{270}$  auswirkt.

Zudem kann festgestellt werden, dass die Reduzierung des Anteils an polierresistenter feiner Gesteinskörnung (14-6) sowohl einen maßgeblichen Einfluss auf die Anfangsgriffigkeit  $PWS_0$  als auch auf die Endgriffigkeit  $PWS_{270}$  ausübt und somit zu deutlich niedrigere Griffigkeitswerten führt.

Die Griffigkeiten nehmen bei allen durchgeführten Asphaltvariationen augenscheinlich gleichmäßig ab. Dieser Sachverhalt spiegelt sich auch in der logarithmischen Darstellung der Griffigkeitsverläufe in Form von nahezu parallel verlaufenden Geraden wider (Abbildung 7-5).

#### **Betrachtung der Präzisionsdaten der Asphaltbetone AC 11 D S**

Analog zur Auswertung des SMA 8 S wurden für die durchgeführten Asphaltvariationen beim AC 11 D S der Mittelwert (Tabelle 7-7) mit 0,285, das Maximum bzw. Minimum mit 0,297 bzw. 0,272 und die Spannweite für die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS_{180}}$  nach 180.000 Überrollungen mit 0,025 berechnet. Die berechnete Spannweite liegt wiederum deutlich unterhalb der Vergleichpräzision (Tabelle 7-5).

Es zeichnet sich ab, dass beim Asphaltbeton AC 11 D S nur ein Einfluss des Anteils an feinen Gesteinskörnungen auf die Endgriffigkeiten festzustellen ist.

#### **Mittlere Profiltiefe der Asphaltbetone AC 11 D S**

Ein Zusammenhang zwischen den Griffigkeitsendwerten und der mittleren Profiltiefe bei 0 Überrollungen ( $MPD_0$ ) lässt sich bei den durchgeführten Asphaltvariationen nicht ableiten.

Die geringste bzw. höchste mittlere Profiltiefe  $MPD_0$  wurde mit 0,35 mm bzw. 0,77 mm (Tabelle 7-7) an den Asphaltvariationen 14-3 bzw. 14-4, welche den niedrigsten bzw. höchsten Hohlraumgehalt von 0,6 Vol.-% bzw. 5,8 Vol.-% aufweisen, ermittelt. Die mittleren Profiltiefen  $MPD_{270}$  nach 270.000 Überrollungen für die untersuchten Asphaltvariationen liegen um 0,03 mm bis 0,09 mm unterhalb derer im sandgestrahlten Zustand. Es zeigt sich, dass die mittleren Profiltiefen relativ gleichmäßig abnehmen. Eine deutliche Einebnung der Prüfkörperoberfläche ist nicht erkennbar.

### **7.3 Ergebnisse**

Anhand der Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen beim SMA 8 S und AC 11 D S kann gezeigt werden, dass hinsichtlich der Merkmale Bindemittelgehalt, Fülleranteil, Anteile an feinen bzw. groben Gesteinskörnungen und Grobkornanteil nur der Anteil an feiner Gesteinskörnung einen nennenswerten Einfluss auf die Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  hat. Beim SMA 8 S war dieser Einfluss größer als beim AC 11 D S.

Es wurde nachgewiesen, dass unterschiedliche Asphaltzusammensetzungen eine Änderung der mittleren Profiltiefe bewirken. Für die Asphaltarten SMA 8 S bzw. AC 11 D S ergeben sich jedoch abweichende Einflüsse hinsichtlich der unterschiedlichen Zusammensetzung.

Zur Beschreibung und Interpretation der berechneten Griffigkeitsverläufe ( $PWS = a \ln(x) + b$ ) ist der logarithmischen Darstellung der Vorzug einzuräumen. Die Steigung der Geraden gibt die Griffigkeitsabnahme zwischen 0 und 270.000 Überrollungen wieder. Die Anfangs- und Endgriffigkeiten der Asphaltvariationen lassen sich zudem besser differenzieren und übersichtlicher darstellen.

In den DIN EN 12697-49 [54] sind Präzisionsdaten für die Vergleichpräzision für die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS180}$  nach 180.000 Überrollungen (Tabelle 7-5) angegeben. Bei den durchgeführten Griffigkeitsprognosen lagen immer deutlich verschiedenartige Asphaltvariationen vor, umso erstaunlicher ist es, dass die Spannweite für die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS180}$  nach 180.000 Überrollungen unterhalb der in den DIN EN 12697-49 [54] angegebenen Werte für die Vergleichpräzision FAP liegen, bzw. beim AC 11 D S und SMA 8 S (ohne 9-5) deutlich unterschritten werden.

Zur Absicherung der Versuchsergebnisse wurden im Nachgang die ermittelten Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS270}$  nach 270.000 Überrollungen mathematisch-statistisch ausgewertet [80].

Beim Splittmastixasphalt (Strecke 9) liegen mit Ausnahme von 9-5 alle Asphaltvariationen in einer eigenen homogenen Gruppe, d.h. die Asphaltvariationen liefern vergleichbare Ergebnisse. Die untersuchten Asphaltvariationen beeinflussen somit (mit Ausnahme von 9-5) das Ergebnis der Endgriffigkeit beim SMA 8 S nicht (Tabelle 7-8). Die statistischen Auswertungen bestätigen, dass beim Splittmastixasphalt eine Erhöhung des Anteils an feinen Gesteinskörnungen zu einer signifikant geringeren Endgriffigkeit führt, hingegen eine Erniedrigung keinen signifikanten Einfluss auf die Endgriffigkeit ausübt.

einfache	LSD-Test									
Varianz-	■ 9-0	■ 9-1	■ 9-2	■ 9-3	■ 9-4	■ 9-5	■ 9-6	■ 9-7	■ 9-8	
analyse	Ranking der homogenen Gruppen									
	1. Gruppe		2. Gruppe			3. Gruppe			4. Gruppe	
n. signifi.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Tabelle 7-8: Ergebnisse der statistischen Analyse Griffigkeitswert  $\mu_{PWS270}$  nach 270.000 Überrollungen an Asphaltvariationen des SMA 8 S (Strecke 9) aus [80]

Beim Asphaltbeton (Tabelle 7-9) liegen alle Asphaltvariationen in einer eigenen homogenen Gruppe, d.h. die durchgeführten Asphaltvariationen liefern trotz unterschiedlicher Asphaltzusammensetzung vergleichbare Ergebnisse. Die Asphaltvariationen beeinflussen die Ergebnisse der Endgriffigkeit beim AC 11 D S nicht.

einfache	LSD-Test									
Varianz-	■ 14-0	■ 14-1	■ 14-2	■ 14-3	■ 14-4	■ 14-5	■ 14-6	■ 14-7	■ 14-8	
analyse	Ranking der homogenen Gruppen									
	1. Gruppe		2. Gruppe			3. Gruppe			4. Gruppe	
n. signifi.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Tabelle 7-9: Ergebnisse der statistischen Analyse Griffigkeitswert  $\mu_{PWS270}$  nach 270.000 Überrollungen an Asphaltvariationen des AC 11 D S (Strecke 14) aus [80]

Aufgrund dieser Erkenntnisse zeichnet sich ab, dass andere Faktoren wie z.B. die Genauigkeit des Messverfahrens, die Probekörperherstellung und -vorbereitung einen größeren Einfluss auf die End-

griffigkeiten  $PWS_{270}$  ausüben könnten. Der Einfluss von unterschiedlichen Gesteinsarten und Bindemittelsorten bzw. -arten wurde hierbei nicht berücksichtigt.

Für die Asphaltarten SMA 8 S und AC 11 D S wird deshalb untersucht, wie die im Labor hergestellten Asphaltprobenplatten zu beanspruchen sind um eine ähnliche Oberflächenbeschaffenheit wie die verkehrsbelastete Straße nach 2 bzw. 3 Jahren zu erhalten.

## **8 Probekörpervorbereitung**

### **8.1 Allgemeines**

Es wird nachfolgend untersucht, ob die gemäß den DIN EN 12697-49 [54] beschriebene mechanische Beanspruchung der Oberfläche von im Labor hergestellten Probekörpern ausreichend ist bzw. verbessert werden kann und wie eine Oberflächenbeschaffenheit erreicht werden kann, die der einer verkehrsbelasteten Straße nach 2 bzw. 3 Jahren entspricht.

Neben der ganzjährigen Beanspruchung durch den rollenden Verkehr sind die Asphaltdeckschichten im Winter beim zusätzlichen Einsatz von Taumitteln einer Frost-Tausalzbeanspruchung ausgesetzt, welche in Abhängigkeit von der Anzahl an Frost-Tau-Wechseln zu einer Veränderung der Mikro- und Makrotextur führen kann. An sandgestrahlten Asphaltprobekörpern wird untersucht, ob sich durch Frost-Tausalzbeanspruchungen Kornausbrüche bzw. Abwitterungen an der Asphaltoberfläche feststellen lassen.

Beanspruchungen, hervorgerufen durch Umwelteinflüsse, z.B. sauren Regen, welche bei Betonoberflächen durch einen Essigsäureangriff im Labor simuliert werden, wirken sich bei Asphaltdeckschichten durch die Verwendung von kalkarmen Gesteinen (z.B. Diabas, Granit, Basalt, Gabbro) kaum aus und werden deshalb nicht weiterverfolgt.

Alterungsprozesse werden aufgrund der erforderlichen langen Beanspruchungsdauern nicht berücksichtigt.

### **8.2 Mechanische Beanspruchung durch Sandstrahlen**

Die Anforderungen an die Lagerung der Probekörper vor dem eigentlichen Sandstrahlen, sowie die Vorgehensweise für den Sandstrahlvorgang nach den DIN EN 12697-49 [54] wurde bereits im Abschnitt 3.2 erläutert.

Augenscheinlich konnte weder beim SMA 8 S noch beim AC 11 D S durch nur einen Sandstrahlzyklus mit einer Strahldauer von  $(120 \pm 10)$  s die gemäß Regelwerk geforderte Oberfläche, bei der sämtliche Bindemittelrückstände von der zu prüfenden Fläche entfernt sein müssen, (vgl. Abbildung 8-1) erreicht werden.

Bei bisherigen Forschungsvorhaben [69, 70] wurden für unbeanspruchte Probekörper bereits deutlich längere Sandstrahldauern als  $(120 \pm 10)$  s gewählt bzw. empfohlen. Zudem konnte festgestellt werden, dass sich in Abhängigkeit von der Sandstrahldauer unterschiedliche Griffigkeitsentwicklungen einstellen [70].

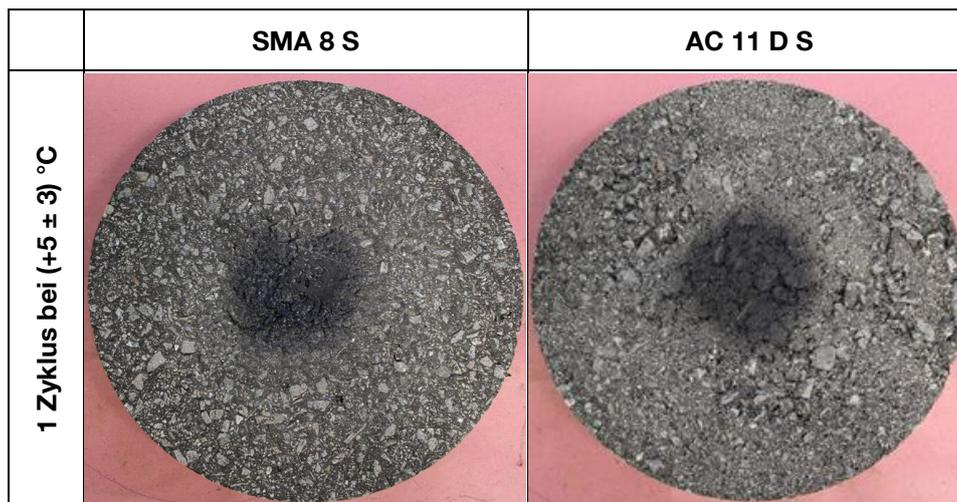


Abbildung 8-1 Prüfkörperoberflächen SMA 8 S bzw. AC 11 D S nach einem Sandstrahlzyklus bei (5±3) °C

Aus sieben Versuchstrecken (SMA 8 S bzw. AC 11 D S, vgl. Abschnitt 5.2.1) [77] wurden nach 2 bis 3 Jahren die Texturen in der Rollspur (RS) bzw. zwischen den Rollspuren (z. RS) mit dem Messgerät ELAtextur® bestimmt und zwei Ausbauproben (Bohrkerne d = 225 mm) in der rechten Rollspur entnommen (Phase BK-3J).

Die Bohrkernoberflächen wurden durch intensives Ausbürsten mittels Wasser vom Abrieb bzw. Schmutz gereinigt. Danach erfolgte die Bestimmung der Textur der Oberfläche der Phase BK-3J.

Für jeden Oberflächenzustand wurde an je zwei Asphaltprobekörpern die mittlere Profiltiefe bestimmt. Durch Drehen des Messgerätes um jeweils 120 Grad, dreimal gemessen und der Mittelwert berechnet, als Balken visualisiert und die Ergebnisse, exemplarisch für die Strecken 9 und 14, an welchen im vorangegangenen Kapitel die Variationen in der Asphaltmischgutzusammensetzung erfolgten, miteinander verglichen.

Die Originaltexturen (mittlere Profiltiefen MPD) der im Labor hergestellten Probekörper bzw. der Bohrkern, die kurz nach dem Einbau der Asphaltdeckschicht entnommen wurden und an denen keine Probenvorbereitung durch Sandstrahlen erfolgte, sind in den Abbildungen 8-2 mit EP-O, MW-O und BK-O bezeichnet. Vergleichend dazu sind die Texturen der Probekörper (EP; MW und BK), deren ursprüngliche Oberfläche durch einen Sandstrahlvorgang verändert wurde und die nach 2 bis 3 Jahren zwischen Rollspuren (Phase z. RS) bzw. in der rechten Rollspur (Phase RS) gemessenen mittleren Profiltiefen dargestellt.

Eine konstante Reihung der mittleren Profiltiefe hinsichtlich des jeweiligen vorliegenden Oberflächenzustandes ist nicht erkennbar. Als mögliche Gründe sind die unterschiedlichen Asphaltkonzeptionen, die verwendeten Gesteinskörnungen, Abweichungen in der Sollzusammensetzung, die Probekörperherstellung bzw. -vorbereitung, aber auch die unterschiedliche Verkehrsbeanspruchung aufzuführen. Es lassen sich aber folgende Tendenzen erkennen:

- Erwartungsgemäß liegen nach 2 bis 3 Jahren Verkehrsbeanspruchung die mittleren Profiltiefen (Mittelwerte) in der rechten Rollspur (Phase RS) bzw. der aus der Rollspur entnommenen und gesäuberten Bohrkern der Phase BK-3J auf einem vergleichbaren Niveau.

- Die gemessenen Profiltiefen zwischen den Rollspuren (Phase z. RS) liegen mit Ausnahme von Strecke 10 stets über den Werten in der rechten Rollspur. Oberhalb befinden sich jene der Phase BK (keine Verkehrsbeanspruchung, sandgestrahlte Oberfläche).
- Die mittleren Profiltiefen der Originaloberflächen der Bohrkernphase BK-O (keine Verkehrsbeanspruchung, keine Probenvorbereitung) liegen unterhalb der Phase BK.
- Bei den zwei untersuchten Asphaltbetonen AC 11 D S (Strecken 10 und 14) ist durch den vorgenommenen Sandstrahlvorgang ein Anstieg der mittleren Profiltiefe in den Phasen EP, MW, BK gegenüber den Oberflächen EP-O, MW-O und BK-O erkennbar.
- Bei den Splittmastixasphalten in der Phase EP gegenüber Phase EP-O ergibt der Sandstrahlvorgang eine geringere Rautiefe. Ähnlich verhalten sich auch die mittleren Profiltiefen der Phase MW-O zur Phase MW der Strecken 8, 9, 11 und 13.

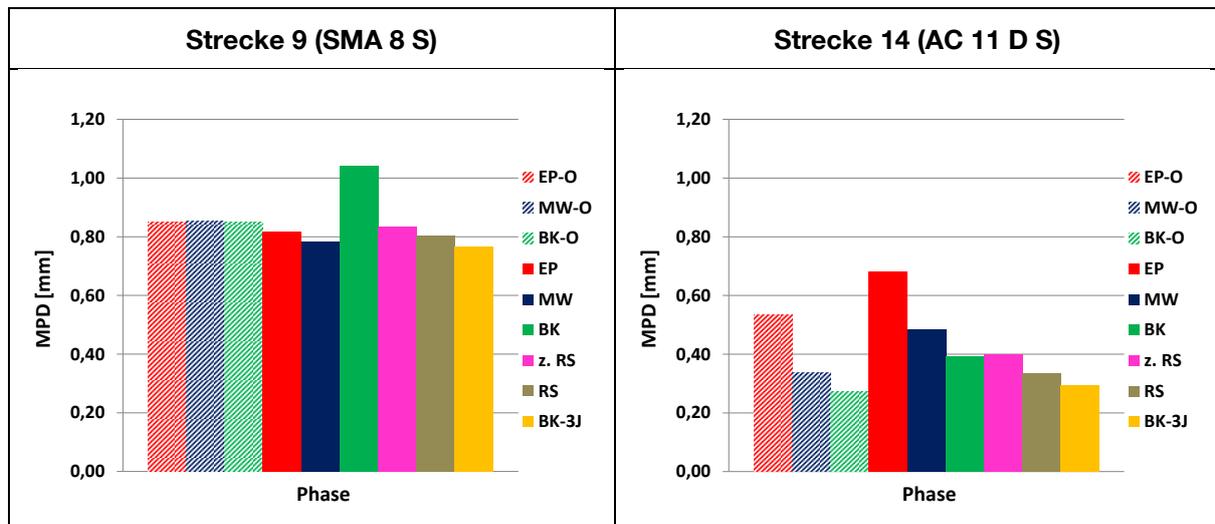


Abbildung 8-2: Mittlere Profiltiefen MPD für die unterschiedlichen Oberflächenzustände der Strecken 9 und 14

### 8.2.1 Variationen der Sandstrahldauer bei unterschiedlichen Temperaturen

Die Untersuchungen für den Splittmastixasphalt SMA 8 S und Asphaltbeton AC 11 D S zeigten, dass sich die gemäß Regelwerk geforderte Oberfläche durch einen Sandstrahlzyklus nicht erzeugen lässt und sich die Rautiefen der Oberflächen unterschiedlich entwickelt haben.

Um diese Effekte näher untersuchen und einen möglichen Einfluss der Gesteinsarten bzw. Lieferkörnungen ausschließen zu können, wurden ein Splittmastixasphalt SMA 8 S und ein Asphaltbeton AC 11 D S mit identischer Gesteinsart Granit und einem polymermodifizierten Bitumen 25/55-55 A großtechnisch an einer Asphaltmischanlage produziert.

Die Asphaltzusammensetzung kann Anhang D1 entnommen werden. Aus dem Asphaltmischgut wurden 40 mm dicke Asphalt-Probepplatten mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät hergestellt und daraus Ausbaustücke mit einem Durchmesser von 225 mm entnommen.

An den Asphaltprobekörpern wurden die Veränderung der mittleren Profiltiefe und die aufsummierten Masseverluste in Abhängigkeit von der Sandstrahldauer (Anzahl der Sandstrahlzyklen) untersucht. Des Weiteren wurde überprüft wie sich die mechanische Beanspruchung durch das Sandstrahlen bei unterschiedlicher Lagerungs- und Probenvorbereitungstemperatur auswirkt, denn Asphalt weist bekanntlich bei niedrigeren Temperaturen eine höhere Steifigkeit auf.

Durch eine Lagerung der Asphaltprobekörper bei tieferen Temperaturen vor dem eigentlichen Sandstrahlvorgang wird so ein steiferer Asphaltmörtel / Asphalt bzw. ein härterer / spröderer Bindemittelfilm an den Oberflächen der groben Gesteinskörnungen erzeugt, der sich theoretisch durch die gleichbleibende mechanische Beanspruchung (Sandstrahlvorgang) leichter entfernen lässt.

Zusätzlich zu der in den DIN EN 12697-49 geforderten Lagerungs- und Probenvorbereitungstemperatur von  $(+5 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$  wurden für den SMA 8 S und AC 11 D S zwei Versuchsserien (bestehend aus drei Probekörpern) bei  $(-10 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$  bzw.  $(-20 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$  geprüft (Tabelle 8-1).

Lagerungstemperatur	SMA 8 S	AC 11 D S
$(+5 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$	SMA +5	AC +5
$(-10 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$	SMA -10	AC -10
$(-20 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$	SMA -20	AC -20

Tabelle 8-1: Bezeichnung der Versuchsserien

Die Oberflächen von je drei Probekörpern wurden anschließend durch insgesamt zwölf Sandstrahlzyklen (Strahldauer je Zyklus  $(120 \pm 10 \text{ s})$ ) mechanisch beansprucht.

Vor dem ersten Sandstrahlvorgang erfolgte eine Temperierung für 24 Stunden, nach jedem Zyklus wurde eine erneute Temperierung für mindestens 120 min durchgeführt.

Beträgt die Zeitspanne zwischen dem Herausnehmen der Probekörper aus der Temperiereinrichtung bis zur Beendigung des Sandstrahlvorganges mehr als 10 Minuten, so muss die Temperierzeit vor dem nächsten durchzuführenden Sandstrahlzyklus erhöht werden. Zur Sicherstellung und Kontrolle der Lagerungstemperatur hat sich die Verwendung von Dummys als zweckmäßig erwiesen.

Die Ermittlung der veränderten mittleren Profiltiefe und der durch den Sandstrahlvorgang hervorgerufenen aufaddierten Masseverluste in Prozent erfolgte nach jedem Sandstrahlvorgang (Anhang D2). Der Verlauf der mittleren Profiltiefe und des Masseverlusts der unterschiedlich temperierten Proben in Abhängigkeit von der Strahldauer (Anzahl Sandstrahlzyklen) ist in Abbildung 8-3 zusammengestellt.

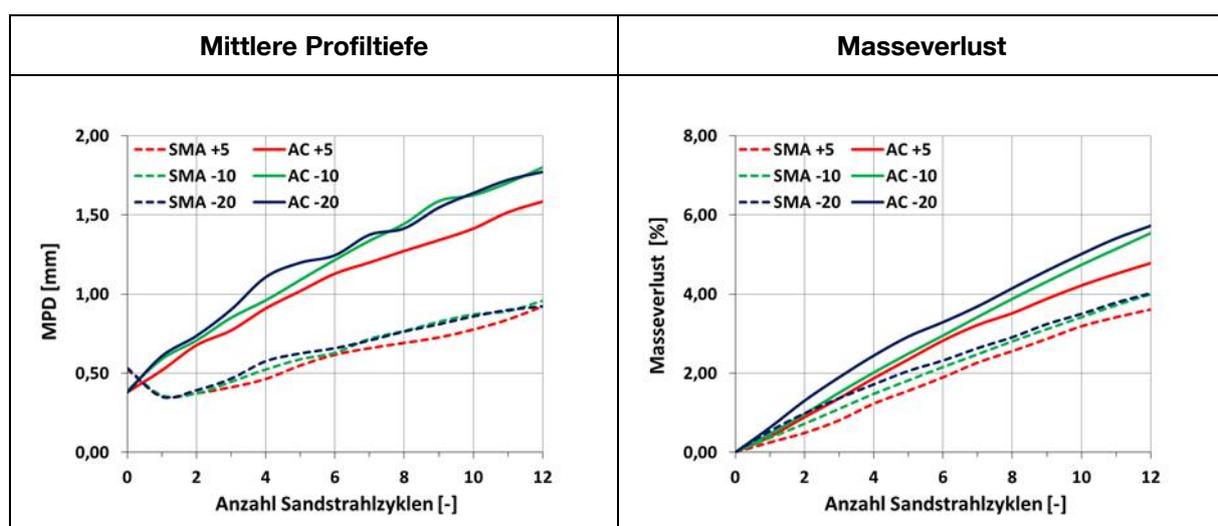


Abbildung 8-3: Veränderung der mittleren Profiltiefen MPD und des Masseverlusts in Abhängigkeit der Anzahl der Sandstrahlzyklen, bei verschiedenen Lagerungstemperaturen

Die Probekörper, deren mechanische Beanspruchung bis zum zwölften Sandstrahlzyklus bei niedrigeren Lagerungstemperaturen als  $(+5 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$  vorgenommen wurden, weisen i. d. R. unabhängig von

der Asphaltart stets höhere mittlere Profiltiefen auf. Die mittleren Profiltiefen der Asphaltbetone sind deutlich höher als die der Splittmastixasphalte. Bis zum sechsten (bei SMA 8 S) bzw. siebten Sandstrahlzyklus (bei AC 11 D S) liegen die mittleren Profiltiefen der Variante  $(-20 \pm 3)^\circ\text{C}$  immer oberhalb der Werte der Varianten  $(+5 \pm 3)^\circ\text{C}$  und  $(-10 \pm 3)^\circ\text{C}$ . Ab diesem Zeitpunkt verlaufen die mittleren Profiltiefen der Varianten  $(-10 \pm 3)^\circ\text{C}$  und  $(-20 \pm 3)^\circ\text{C}$ , gekennzeichnet durch einen Abstand von max. 0,04 mm, vergleichbar.

Die Massenverluste, hervorgerufen durch die im Anschluss an eine Lagerung bei  $(-20 \pm 3)^\circ\text{C}$  vorgenommenen Strahlzyklen, liegen etwas über den bei  $(-10 \pm 3)^\circ\text{C}$  und deutlich über den bei  $(+5 \pm 3)^\circ\text{C}$  bestimmten und steigen mit zunehmender Strahldauer stetig an.

Beim Asphaltbeton AC 11 D S ist bei den verschiedenen Lagerungstemperaturen nach dem ersten Zyklus ein deutlicher Mörtelabtrag aus der Oberfläche feststellbar. Aus den unterschiedlichen Geradensteigung ist erkennbar, dass ein Mörtelabtrag verstärkt aus dem mörtelreichen Asphaltbeton erfolgt. Beim mörtelarm konzipierten Splittmastixasphalt SMA 8 S ist nahezu kein Mörtelabtrag nach dem ersten Sandstrahlzyklus erkennbar. Hier wird der die groben Gesteinskörnungen umgebende Bindemittelfilm abgetragen. Der Masseverlust nach dem zweiten bzw. dritten Zyklus ist deutlich geringer als beim AC 11 D S.

Für die nach jedem Sandstrahlzyklus ermittelten Masseverluste und die gemessenen mittleren Profiltiefen wurde für die untersuchten Varianten eine Korrelation mittels einer linearen Regression durchgeführt (Abbildung 8-4).

Für die Splittmastixasphalte SMA 0/8 S erfolgte die Korrelation erst ab dem zweiten Sandstrahlzyklus - im Bereich des linearen Anstiegs. Die berechneten Bestimmtheitsmaße ( $R^2$ ) betragen über 0,98, d.h. die mittlere Profiltiefe und der Masseverlust für die Probekörperoberfläche korrelieren in hohem Maße miteinander.

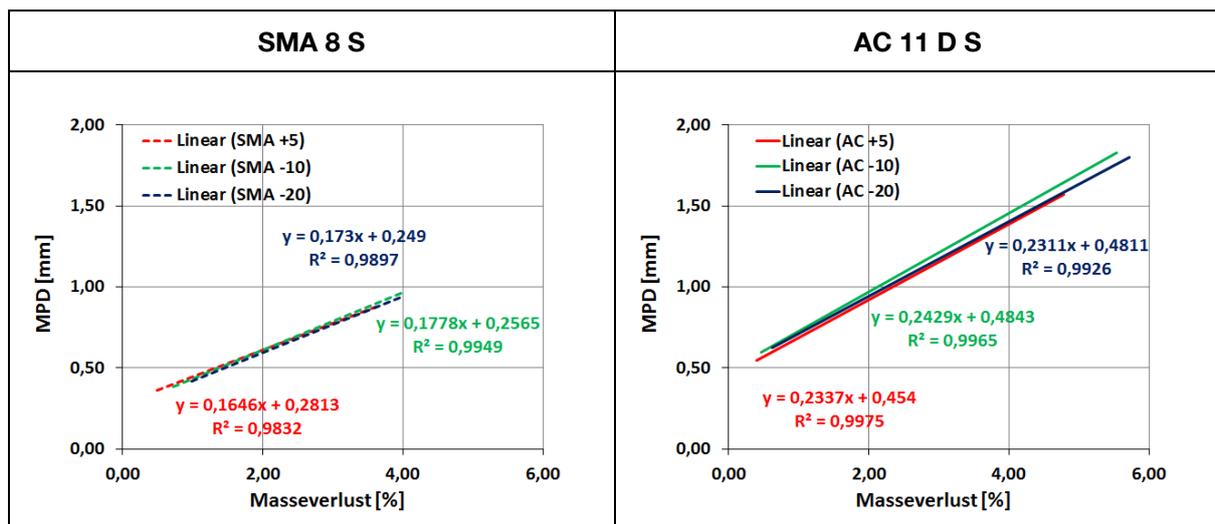


Abbildung 8-4: Korrelation zwischen mittleren Profiltiefen MPD und Masseverlusten für SMA 8 S und AC 11 D S

Die Verläufe der mittleren Profiltiefen und die Masseverluste werden für den Splittmastixasphalt SMA 8 S und AC 11 D S getrennt beschrieben.

### 8.2.1.1 Splittmastixasphalt SMA 8 S

Beim Splittmastixasphalt SMA 8 S liegen die mittleren Profiltiefen nach einem Sandstrahlzyklus, unabhängig von der Lagerungs- und Probenvorbereitungstemperatur, auf einem Niveau und kennzeichnen jeweils das Minimum (Abbildung 8-3). Ab dem zweiten Zyklus ist ein linearer Anstieg der mittleren Profiltiefe erkennbar. Nach zwei Sandstrahlzyklen weisen die mittleren Profiltiefen der Varianten SMA +5 und SMA -10 identische Werte auf. Die mittlere Profiltiefe der Variante SMA -20 liegt geringfügig darüber, jedoch auf vergleichbarem Niveau.

Der berechnete aufsummierte Masseverlust bei Variante SMA -20 mit 1,0 % liegt oberhalb der Werte der Varianten SMA -10 bzw. SMA +5 mit 0,7 % bzw. 0,5 %. Aufgrund der vergleichbaren mittleren Profiltiefen der drei Varianten, aber des größeren Masseverlusts der Variante SMA -20, wurde demzufolge bei dieser Variante verstärkt der Bindemittelfilm bzw. der Asphaltmastix aus der Oberfläche des Probekörpers abgetragen. Der Bindemittelfilm auf den groben Gesteinskörnungen bei der Variante SMA -20 ist durch zwei Sandstrahlzyklen bei  $(-20 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$  vollständig entfernt worden. Die erzeugte Oberflächenbeschaffenheit des Probekörpers entspricht augenscheinlich jener der durch drei Sandstrahlzyklen bei  $(+5 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$  (vgl. Abbildung 8-5) beanspruchten.

Nach zwölf Sandstrahlzyklen wurde beim Splittmastixasphalt SMA 8 S das typische Gesteinskörnungsgerüst oberflächlich freigelegt und einzelne grobe Gesteinskörnungen aus der Oberfläche herausgelöst.

### 8.2.1.2 Asphaltbeton AC 11 D S

Erwartungsgemäß konnte beim Asphaltbeton AC 11 D S nach dem ersten bzw. zweiten Sandstrahlzyklus (AC +5, AC -10 und AC -20) eine Zunahme der mittleren Profiltiefen von im Mittel 0,38 mm auf 0,52 mm, 0,59 mm und 0,61 mm bzw. auf 0,68 mm, 0,71 mm und 0,74 mm festgestellt werden. Aus den Abbildungen 8-3 ist erkennbar, dass bei allen drei Varianten die mittleren Profiltiefen und der aufaddierte Masseverlust in Abhängigkeit von der Strahldauer ab dem ersten Sandstrahlzyklus linear zunehmen.

Beim AC 11 D S ist bereits nach dem ersten Zyklus ein deutlicher Mörtelabtrag aus der Oberfläche feststellbar. Nach zwei Sandstrahlzyklen beträgt der Masseverlust bei Variante AC -20 1,3 %. Die Werte der Varianten AC -10 bzw. AC +5 mit 1,0 % bzw. 0,9 % liegen auf vergleichbarem Niveau deutlich darunter. Der Bindemittelfilm auf den groben Gesteinskörnungen bei der Variante AC -20 ist nach zwei Sandstrahlzyklen vollständig entfernt. Bei der Variante AC +5 hingegen werden drei Zyklen benötigt. Eine Verlängerung der Strahldauer über zwei Zyklen hinaus erscheint aufgrund des Mörtelabtrags als nicht zielführend.

Nach zwölf Sandstrahlzyklen ist die Abtragung des Asphaltmörtels an der Oberfläche des Asphaltbetons AC 11 D S so stark, dass sich teilweise einzelne grobe Gesteinskörner aus der Oberfläche herauslösten. Stellenweise liegen grobe Gesteinskörner  $> 8 \text{ mm}$  in unmittelbarer Nachbarschaft vor, die nur noch mit ihren unteren 60 % des Gesamtvolumens in die tieferen Schichten des Probekörpers eingebunden sind. Zwischen ihnen bildeten sich teilweise zusammenhängende Hohlräume aus.

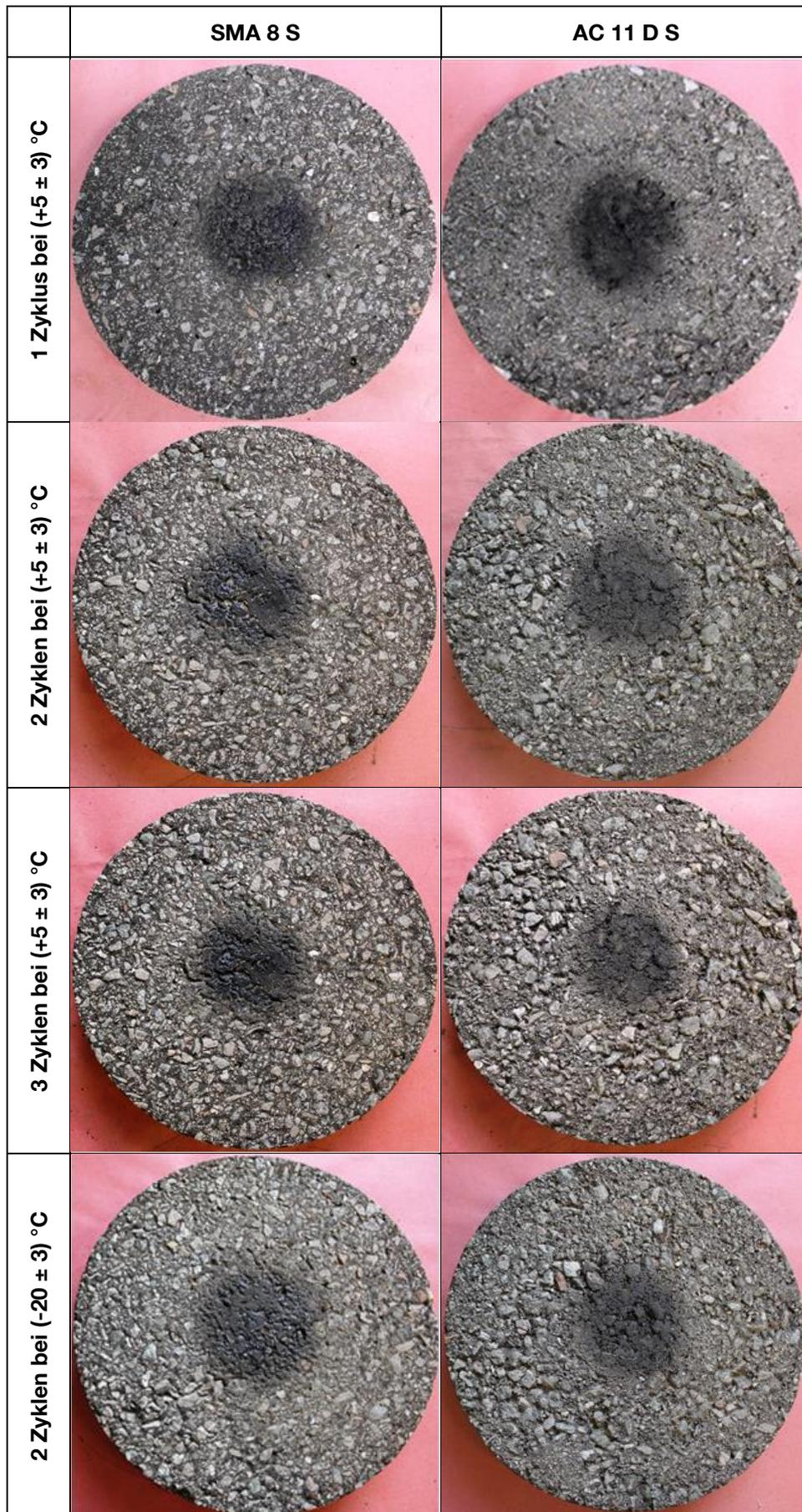


Abbildung 8-5: Prüfkörperoberflächen SMA 8 S bzw. AC 11 D S nach einem, zwei bzw. drei Sandstrahlzyklen bei (+5 ± 3) bzw. nach zwei Zyklen bei (-20 ± 3) °C

## 8.2.2 Ergebnisse

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich die Bindemittelrückstände der untersuchten Asphalte SMA 8 S und AC 11 D S durch die gemäß DIN EN 12697-49 [54] vorzunehmende Probenvorbereitung nicht wie gefordert vollständig von der zu prüfenden Fläche entfernen lassen. Erst durch die mehrmalige Beanspruchung mittels drei bzw. zwei Sandstrahlzyklen bei  $(+5 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$  bzw.  $(-20 \pm 3)$  konnte ein nahezu vollständiges Entfernen des Bindemittelfilms von den groben Gesteinskörnungen erzielt werden. Ähnliche mittlere Profiltiefen wie nach drei Sandstrahlzyklen bei  $(+5 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$  lassen sich durch zwei Zyklen bei  $(-20 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$  beim AC 11 D S bzw. SMA 8 S erzeugen. Beide Verfahren sind somit prinzipiell für die Probenvorbereitung anwendbar.

Hinsichtlich der nachfolgenden Aspekte ist die Probenvorbereitung durch zwei Sandstrahlzyklen (Strahldauer je Zyklus  $(120 \pm 10 \text{ s})$ ) bei  $(-20 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$  beim Splittmastixasphalt SMA 8 S bzw. Asphaltbeton AC 11 D S als zielführend zu bewerten:

- Vollständiges Entfernen des Bindemittelfilms von den groben Gesteinskörnungen.
- Durchschreiten des Minimums der mittleren Profiltiefen beim Splittmastixasphalt.
- Bereich des linearen Anstiegs der mittleren Profiltiefen und des Masseverlusts.
- Größter erzeugbarer Massenverlust bei annähernd gleicher mittlerer Profiltiefe gegenüber der Variante SMA +5 bzw. SMA -10 beim Splittmastixasphalt.
- Reduzierung des Masseverlust beim Asphaltbeton AC 11 D S. Eine Verlängerung der Strahldauer über zwei Zyklen hinaus ist aufgrund des Mörtelabtrags nicht sinnvoll.
- Das Risiko, dass während des Poliervorgangs Bindemittel an die Prüfkörperoberfläche aufsteigt, wird durch die längeren Strahldauern, einhergehend mit größeren mittleren Profiltiefen und einem verstärkten Mörtelabtrag minimiert.

## 8.3 Frost-Tausalzbeanspruchung

Es gibt aktuell kein Prüfverfahren, welches die Auswirkung von Frost-Tausalzbeanspruchung auf Asphalt simuliert.

Die bei der Asphaltherstellung zum Einsatz kommenden Gesteinskörnungen werden vor ihrer Verwendung hinsichtlich ihres Widerstandes gegen Frost- bzw. Frost-Tausalzbeanspruchung geprüft. Dabei wird festgestellt, ob sie die geforderten gesteinspezifischen Anforderungen erfüllen und somit verwendet werden dürfen.

Asphalt kann sich bei Frost- bzw. Frost-Tausalzbeanspruchung völlig anders als die zur Asphaltherstellung verwendeten Gesteinskörnungen verhalten. Die Gesteine werden bei der Asphaltherstellung zusätzlich durch Hitze beansprucht, was zu einer Veränderung im Gefüge führen und den Widerstand gegen Frost- bzw. Frost-Tausalzbeanspruchung ändern kann [45].

Für Betonoberflächen wurden die Schadensmechanismen durch Frost- bzw. Frost-Tausalz-Angriff weitgehend erforscht und geeignete Prüfverfahren entwickelt. Die Bestimmung der Abwitterungsbeständigkeit unter Einwirkung von Frost-Tau-Wechseln mit Wasser bzw. NaCl-Lösung kann mit dem Plattenprüfverfahren (Referenzverfahren) gemäß DIN CEN/TS 12390-9: „Prüfung von Festbeton – Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand – Abwitterung“ [43] erfolgen. Plattenförmige Probekörper werden durch Frost-Tau-Wechsel unter einer 3 mm dicken Schicht mit Wasser (entionisiert) oder

einer 3 %igen NaCl-Lösung beansprucht und die Masse der Abwitterung nach 56 Tagen als Kriterium für Widerstand gegen Frost- bzw. Frost-Tausalzbeanspruchung ermittelt.

Dieses Verfahren wird nun für den Bereich Asphalt angewandt. Dabei wurde die Frost-Tausalzbeanspruchung mit einer 3%igen NaCl-Lösung gewählt.

Als zusätzliche Probenvorbereitung gegenüber der Vorgehensweise bei Beton, erfolgte eine zusätzliche Beanspruchung, der freigelegten Gesteinskörnungen der Asphaltprobekörper aus SMA 8 S bzw. AC 11 D S, durch zwölf Sandstrahlzyklen bei  $(+5 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$  bzw.  $(-20 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$ .

Analog zum Plattenprüfverfahren erfolgte die Abdichtung und Isolierung der Seitenflächen der vorbehandelten Probekörper. Die beanspruchte Oberfläche wurde mit einer 3 mm dicken Flüssigkeitsschicht, bestehend aus einer 3 %igen NaCl Lösung, überdeckt.

Unter den Randbedingungen des Plattenprüfverfahrens wurden die Versuche mit insgesamt 56 Frost-Tau-Wechseln gefahren. (Eine Messung der mittleren Profiltiefe konnte aufgrund der elastischen Gummiabdichtung, welche über die Probekörper hinausragte, nicht vorgenommen werden.)

Nach 7, 14, 21, 28 und 56 Frost-Tau-Wechseln erfolgte jeweils die Bestimmung der Masse des abgewitterten Materials  $m_{s,n}$  und die Berechnung des aufsummierten Masseverlusts  $m_{v,n}$  in Prozent, bezogen auf die ursprüngliche Masse des sandgestrahlten Probekörpers (Tabelle. 8-2).

Temperatur	SMA 8 S				AC 11 D S			
	$(+5 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$		$(-20 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$		$(+5 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$		$(-20 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$	
n	$m_{s,n}$ [g]	$m_{v,n}$ [%]	$m_{s,n}$ [g]	$m_{v,n}$ [%]	$m_{s,n}$ [g]	$m_{v,n}$ [%]	$m_{s,n}$ [g]	$m_{v,n}$ [%]
7	0,3	0,008	0,2	0,005	0,3	0,008	0,4	0,011
14	0,5	0,013	0,5	0,013	0,7	0,018	0,7	0,019
28	0,9	0,024	0,8	0,021	1,0	0,026	1,1	0,029
42	1,1	0,029	1,0	0,026	1,3	0,034	1,4	0,037
56	1,4	0,037	1,2	0,031	1,6	0,042	1,7	0,045

Tabelle 8-2: Masse des abgewitterten Materials  $m_{s,n}$  bzw. des aufsummierten Masseverlusts  $m_{v,n}$  bei steigender Anzahl an Frost-Tau-Wechseln

Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass die aufsummierten Masseverluste mit einer steigenden Anzahl an Frost-Tau-Wechseln zunehmen. Nach 56 Frost-Tau-Wechseln betragen sie für die Asphaltarten SMA 8 S und AC 11 D S weniger als 0,05 %.

Unterschiedliche Masseverluste zwischen den Asphaltarten lassen sich ableiten. Die Lagerungs- bzw. Probenvorbereitungstemperatur der Probekörper vor dem Sandstrahlvorgang wirkt sich nicht eindeutig auf die durch die Frost-Tausalzbeanspruchung erzeugten Masseverluste aus.

Die berechneten Werte der aufsummierten Masseverluste  $m_{v,n}$  (mit kleiner 0,05 %) nach 56 Frost-Tau-Wechseln sind deutlich geringer als jene, die durch einen einmaligen Sandstrahlvorgang innerhalb von  $(120 \pm 10) \text{ s}$  beim SMA 8 S bzw. AC 11 D S (mit Werten zwischen 0,5 bzw. 0,2%) erzeugt wurden.

Aufgrund der nachfolgenden Aspekte ist diese Probenvorbereitung als nicht zielführend zu bewerten, und wurde daher nicht weiterverfolgt:

- lange Prüfdauer

- hohe Arbeits- und Kostenintensivität (inkl. Vorhaltung der Klimakammern)
- sehr geringer Masseverlust nach 56 Frost-Tau-Wechseln / geringfügige Änderung in der Oberflächenbeschaffenheit
- Gummiabdichtung kann nach der Frostbeanspruchung nur unvollständig bzw. unter deutlich erhöhtem Arbeitsaufwand entfernt werden um eine anschließende Griffigkeitsmessung durchführen zu können

## 8.4 Zielführende Probenvorbereitung mit anschließender Griffigkeitsprognose

### 8.4.1 Allgemeines

Da durch die in den DIN EN 12697-49 [54] festgelegte Probenvorbereitung nicht sicher gewährleistet wird, dass der Bindemittelfilm an der Oberfläche der groben Gesteinskörnungen vollständig abgetragen wird, ist diese zu verbessern.

Anhand einer Griffigkeitsprognose an den durch zwei Sandstrahlzyklen bei  $(-20 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$  vorbereiteten Probekörpern (zielführend ermittelte Probenvorbereitung) ist abzuklären, ob sich die Griffigkeitswerte und mittleren Profiltiefen gegenüber den in den DIN EN 12697-49 [54] verändert haben bzw. ob sie gleichwertig sind.

Eine zusätzliche Vorbeanspruchung der Probekörper durch 56 Frost-Tausalz-Wechsel mit 3%iger NaCl Lösung erscheint aufgrund des geringen Masseverlusts und der daraus resultierenden geringen Änderung der Oberflächenbeschaffenheit als nicht zweckmäßig.

Je zwei Asphaltprobekörper aus SMA 8 S und AC 11 D S wurden für 24 Stunden bei  $(+5 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$  bzw.  $(-20 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$  temperiert. Anschließend wurde die zu prüfende Fläche mit einem Sandstrahlzyklus beansprucht. Die Probekörper der Variante  $(-20 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$  wurden für den nächsten durchzuführenden Sandstrahlzyklus erneut für mindestens 120 min temperiert (Tabelle 8-3). Die Temperierung erfolgte hier analog zu Abschnitt 8.2.1.

Lagerungstemperatur	Strahlvorgang	SMA 8 S	AC 11 D S
$(+5 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$	1 Zyklus	SMA +5 1Z	AC +5 1Z
$(-20 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$	2 Zyklen	SMA -20 2Z	AC -20 2Z

Tabelle 8-3: Bezeichnung der Versuchsserien

An den durch einen bzw. zwei Sandstrahlzyklen vorbereiteten Oberflächen der Probekörper wurde anschließend die gemäß Abschnitt 3.6.2 beschriebene Griffigkeitsprognose bis zum Erreichen der Endgriffigkeit nach 270.000 Überrollungen durchgeführt. Nach jeder Beanspruchungsstufe erfolgte die Messung der mittleren Profiltiefen und der Griffigkeitswerte.

In der Abbildung 8-6 sind die Verläufe der Mittleren Profiltiefen (MPD), der Griffigkeitswerte  $\mu_{\text{PWS}}$  und die durch logarithmische Näherung ( $\text{PWS} = a \cdot \ln(x) + b$ ) gewonnenen Griffigkeitswerte (PWS) für die Versuchsserien dargestellt. Für die Griffigkeitswerte (PWS) wurde zur besseren Unterscheidung der Verläufe (Steigung der Gerade gibt die Griffigkeitsabnahmen wider) die Darstellung mit logarithmierter Abszisse (Anzahl der Überrollungen) gewählt. Die Auswertung für die Asphaltarten SMA 8 S und AC 11 D S erfolgten getrennt.

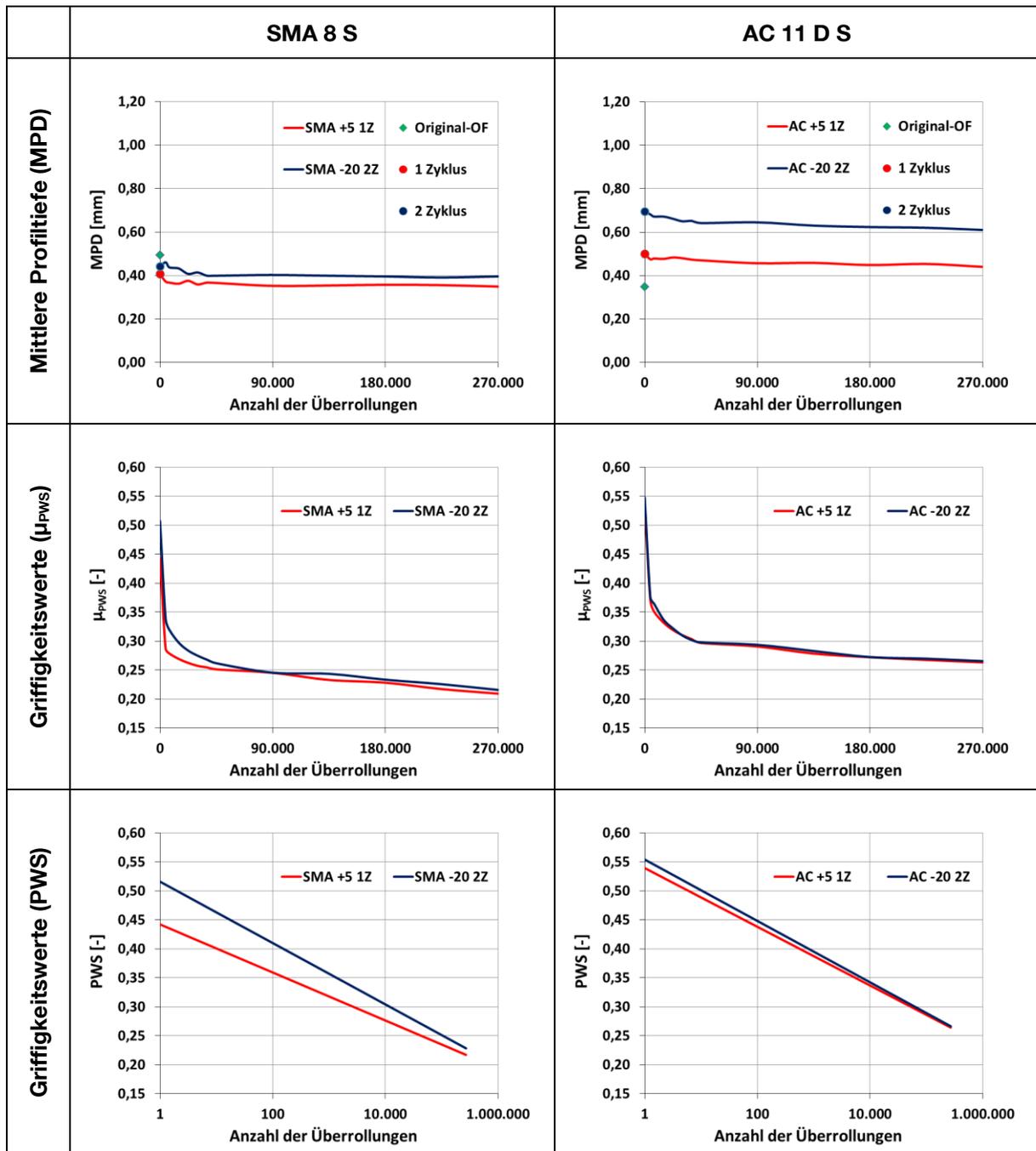


Abbildung 8-6: Mittlere Profiltiefen, Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  und Griffigkeitswerte PWS der Versuchsserien

#### 8.4.2 Splittmastixasphalt SMA 8 S

Die mittlere Profiltiefe der Originaloberfläche bei der Variante SMA +5 1Z liegt mit 0,49 mm etwas unterhalb der Variante SMA -20 2Z mit 0,51 mm. Diese Unterschiede sind marginal.

Nach dem ersten Sandstrahlzyklus erniedrigen sich die mittleren Profiltiefen auf 0,41 mm bzw. 0,38 mm, nach dem zweiten Sandstrahlzyklus steigt sie bei der Variante SMA -20 2Z auf 0,44 mm an.

An den durch einen bzw. zwei Sandstrahlzyklen vorbereiteten Oberflächen der Probekörper SMA +5 1Z bzw. SMA -20 2Z erfolgt anschließend die Griffigkeitsprognose. Die sich aus der Polierbeanspruch ergebende Änderungen der mittlere Profiltiefe wird ermittelt.

Die größte Abnahme der mittleren Profiltiefe (0,04 mm) wird für die Variante SMA +5 1Z nach 4.500 Überrollungen bestimmt. Bei der Variante SMA -20 2Z wird eine kurzzeitige Erhöhung festgestellt. Von 90.000 bis 270.000 Überrollungen findet keine Abnahme der mittleren Profiltiefe mehr statt. Nach 270.000 Überrollungen betragen die mittleren Profiltiefen für die Varianten SMA +5 1Z bzw. SMA -20 2Z 0,35 mm bzw. 0,40 mm und liegen unterhalb jener der Originaloberfläche mit 0,49 mm bzw. 0,51 mm. Die Abnahme der mittleren Profiltiefen zwischen 0 und 270.000 Überrollungen der Varianten SMA +5 1Z mit 0,06 mm bzw. SMA -20 2Z mit 0,04 mm sind vergleichbar, d.h. die unterschiedliche Probenvorbereitung wirkt sich nicht auf die Profiltiefe aus.

Es kann festgestellt werden, dass die durch den Sandstrahlvorgang erzeugten Texturen nach einer Polierbeanspruchung mit 270.000 Überrollungen noch vorhanden sind, d.h. eine Einebnung der Oberfläche bzw. ein verstärkter Abrieb erfolgte nicht.

#### **Griffigkeitswerte $\mu_{PWS}$**

Die Anfangsgriffigkeit der Variante SMA -20 2Z bei 0 Überrollungen liegt mit 0,507 über dem Wert der Variante SMA +5 1Z mit 0,443. Durch den zweiten Sandstrahlvorhang hat eine deutliche Aufrauung der Oberflächen der groben Gesteinskörnung stattgefunden, die zu einer höheren Anfangsgriffigkeit führt. Bis 90.000 Überrollungen weisen die beiden Varianten ein unterschiedliches Griffigkeitsverhalten auf. Mit steigender Anzahl der Überrollungen wird dieser Abstand geringer. Nach 270.000 Überrollungen liegen die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS270}$  der Varianten SMA +5 1Z bzw. SMA -20 2Z bei 0,209 bzw. 0,216.

#### **Griffigkeitswerte PWS**

Die Bestimmtheitsmaße  $R^2$  der logarithmischen Näherung ( $PWS = a \cdot \ln(x) + b$ ) liegen über 0,98. Die Anfangsgriffigkeiten  $PWS_0$  mit 0,442 bzw. 0,516 als auch die Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  mit 0,217 bzw. 0,228 verhalten sich analog zu den Griffigkeitswerten  $\mu_{PWS}$ . Die berechneten Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  liegen um 0,008 bzw. 0,012 Einheiten oberhalb der ermittelten Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS270}$ .

Aus der logarithmischen Darstellung der Griffigkeitswerte ist abzulesen, dass sich die unterschiedliche Probenvorbereitung (Lagerungstemperaturen, Sandstrahlzyklen) der im Labor aus großtechnisch produziertem Asphaltmischgut hergestellten Probekörper vor allem auf die Anfangsgriffigkeit ( $PWS_0$ ), aber auch beim Erreichen der Endgriffigkeit  $PWS_{270}$  auswirkt. Mit einer steigenden Anzahl an Überrollungen, nähern sich die beiden Geraden nur langsam an. Ein Schnittpunkt ist im Bereich von 800.000 Überrollungen erkennbar. Nach 270.000 Überrollungen weist die Variante SMA -20 2Z eine um 0,011 Einheiten größere Endgriffigkeit  $PWS_{270}$  und eine um 0,17 mm größere Profiltiefe auf.

### **8.4.3 Asphaltbeton AC 11 D S**

Der Asphaltbeton wurden analog der Vorgehensweise der SMA 8 S mit folgendem Ergebnis ausgewertet:

- Die mittleren Profiltiefen der Originaloberfläche der Asphaltprobekörper liegen bei den Varianten AC -5 1Z bzw. AC -20 2Z mit 0,35 mm bzw. 0,36 mm auf einem vergleichbaren Niveau. Im Gegensatz zum SMA 8 steigen sie durch den ersten Sandstrahlzyklus (auf 0,50 mm bzw. 0,51 mm) an. Bei der Variante AC -20 2Z beträgt sie nach dem zweiten Sandstrahlzyklus 0,70 mm.

- Analog zur Variante SMA +5 1Z konnte die größte Abnahme der mittleren Profiltiefe nach 4.500 Überrollungen festgestellt werden. Sie beträgt für die Varianten jeweils 0,02 mm. Die durch den Sandstrahlvorgang neu entstandenen Profilschneidkanten sind weitgehend abgetragen.
- Im Gegensatz zum SMA 8 S liegen nach 270.000 Überrollungen die mittleren Profiltiefen der Varianten AC +5 1Z bzw. AC -20 (mit 0,44 bzw. 0,61 mm) noch oberhalb jener der Originaloberfläche (mit 0,35 bzw. 0,36 mm).
- Insgesamt gesehen nehmen die Profiltiefen im Bereich zwischen 0 und 270.000 Überrollungen der Varianten AC -20 2Z und AC +5 1Z (mit 0,09 bzw. 0,06 mm) etwas stärker ab als die Varianten des SMA 8 S.
- Identisch zum SMA 8 S kann auch beim AC 11 D S festgestellt werden, dass die durch den Sandstrahlvorgang erzeugten Texturen durch den Poliervorgang nicht maßgeblich verändert werden.
- Übereinstimmend zum SMA 8 S liegt Anfangsgriffigkeit  $\mu_{PWS}$  bei 0 Überrollungen der Variante AC -20 2Z (mit 0,547) über dem Wert der Variante AC +5 1Z (mit 0,534). Durch den zweiten Sandstrahlvorgang hat neben der Erhöhung der mittleren Profiltiefe auch eine verstärkte Aufrauung der Gesteinskörnungsoberflächen stattgefunden.
- Nach 15.000 bis 270.000 Überrollungen weisen im Gegensatz zum SMA 8 S die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  nahezu identische Werte auf. Die Griffigkeitswerte der Variante AC -20 2Z zeigen hierbei (analog zu SMA -20 2Z) immer geringfügig höhere Werte. Nach 270.000 Überrollungen liegen die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS270}$  auf einem identischen Niveau (0,263 bzw. 0,265).
- Beim AC 11 D S verhalten sich die Anfangsgriffigkeiten  $PWS_0$  (mit 0,539 bzw. 0,554) als auch die Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  (mit 0,264 bzw. 0,266) analog zu den Griffigkeitswerten  $\mu_{PWS}$ . Die berechneten Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  weisen nahezu identische Werte wie die ermittelten Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS270}$  auf.
- Die unterschiedlichen mittleren Profiltiefen der Varianten AC +5 1Z bzw. AC -20 2Z wirken sich nicht auf die Endgriffigkeiten nach 270.000 Überrollungen  $PWS_{270}$  aus.

#### 8.4.4 Ergebnisse

Um ein nahezu vollständiges Entfernen des Bindemittelfilms von den groben Gesteinskörnungen der zu prüfenden Fläche gewährleisten zu können, ist ein zweimaliger Sandstrahlzyklus (Strahldauer je Zyklus  $(120 \pm 10 \text{ s})$ ) bei  $(-20 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$  durchzuführen.

Die gemessenen mittleren Profiltiefen und Anfangsgriffigkeiten der durch zwei Sandstrahlzyklen bei  $(-20 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$  vorbereiteten Probekörper liegen oberhalb jener, der durch einen Zyklus bei  $(+5 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$  vorbereiteten Probekörper. Die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  und die berechneten Griffigkeiten  $PWS$  verhalten sich i.d.R. analog.

Die unterschiedliche Probenvorbereitung (Lagerungstemperaturen, Sandstrahlzyklen) der im Labor, aus großtechnisch produziertem Asphaltmischgut hergestellten Probekörper wirkt sich vor allem auf die Anfangsgriffigkeit ( $PWS_0$ ) aus. Beim SMA 8 S zeigte sich zudem, dass ein Einfluss der Probenvorbereitung bis zum Erreichen der Endgriffigkeit  $PWS_{270}$  nach 270.000 Überrollungen gegeben ist, welcher aber mit steigender Anzahl an Überrollungen absinkt.

Die durch den Sandstrahlvorgang erzeugten Texturen sind nach der Polierbeanspruchung weiterhin vorhanden, d.h. eine Einebnung der Oberfläche bzw. ein verstärkter Abrieb erfolgte nicht.

Beim AC 11 D S liegen nach 270.000 Überrollungen trotz unterschiedlicher Probenvorbereitungen nahezu identische Griffigkeitswerte vor. Hingegen weist beim SMA 8 S die Variante SMA -20 2Z eine um 0,011 Einheiten größere Endgriffigkeit  $PWS_{270}$  gegenüber der Variante SMA +5 1Z auf. Die Erhöhung der Endgriffigkeit ist beim SMA 8 S als positiv zu bewerten, denn es zeigte sich (vgl. Abschnitt 5.1.2.1), dass die Mittelwerte der Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  für im Labor aus großtechnisch produziertem Asphaltmischgut hergestellte Probekörper (Phase MW) oftmals unter jenen der an den Bohrkerne (Phase BK) ermittelten liegen.

An Asphaltprobekörpern, welche im Labor aus Asphaltmischgut hergestellt wurden bzw. an noch vorhandenen Ausbauproben (Rückstellproben) der nicht dem Verkehr ausgesetzten Straße, wurde diese neu entwickelte Probenvorbereitung (Oberflächenbeanspruchung) für Asphaltarten SMA 8 S und AC 11 D S überprüft. Die Ergebnisse wurden gemeinsam mit jenen der beanspruchten Strecken (vgl. Abschnitt 5-2) ausgewertet.

## **9 Griffigkeitsprognose mit der neu entwickelten Oberflächenbeanspruchung**

### **9.1 Allgemeines**

An vorhandenen Rückstellproben der Asphaltarten Splittmastixasphalt und Asphaltbeton der Phasen EP-O, MW-O und BK-O der Strecken 9 bzw. 14 wird nun die neu entwickelte Probenvorbereitung wie folgt angewendet.

Die im Labor hergestellten Probekörper (EP-O; MW-O) bzw. die kurz nach dem Einbau der Asphaltdeckschicht entnommenen Bohrkerne (BK-O), wurden abweichend von der DIN EN 12697-49 [54] für 24 Stunden bei  $(-20 \pm 3) ^\circ\text{C}$  temperiert. Mittels Druckluft ist, nach der Entnahme der Probekörper aus der Kältekammer, die Prüfkörperoberfläche von der auskondensierten Luftfeuchte zu befreien. Anschließend erfolgt für die zu prüfende Fläche der erste Sandstrahlzyklus mit einer Zeitdauer von  $(120 \pm 10)$  Sekunden. Vor dem zweiten Sandstrahlzyklus erfolgt eine erneute Temperierung der Probekörper für mindestens zwei Stunden bei  $(-20 \pm 3) ^\circ\text{C}$ .

Beträgt die Zeitspanne zwischen dem Herausnehmen der Probekörper aus der Temperiereinrichtung bis zur Beendigung des Sandstrahlvorganges mehr als 10 Minuten, so muss die Temperierzeit vor dem nächsten durchzuführenden Sandstrahlzyklus erhöht werden. Zur Sicherstellung und Kontrolle der Lagerungstemperatur hat sich die Verwendung von Dummys als zweckmäßig erwiesen.

Die Bezeichnung der Proben wurde nach dem zweiten Sandstrahlzyklus auf EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z festgelegt. Es waren augenscheinlich keine Bindemittelrückstände auf den groben Gesteinskörnungen mehr erkennbar. An den Probekörpern (EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z) wurde anschließend eine kontinuierliche Griffigkeitsentwicklung bis zum Erreichen der Endgriffigkeit nach 270.000 Überrollungen durchgeführt. Nach jeder Beanspruchungsstufe erfolgte die Messung der mittleren Profiltiefen und der Griffigkeitswerte (Anhang E1).

Da die vorangegangenen Untersuchungen zeigten, dass sich ein allgemeingültiger Zusammenhang zwischen den Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  und den mittleren Profiltiefen der Strecken in den unterschiedlichen Phasen für die Splittmastixasphalte und Asphaltbetone nicht ableiten lässt und die Abnahme der mittleren Profiltiefe während der Beanspruchungsdauer gering ist, werden hier keine weiteren Auswertungen zur mittleren Profiltiefe mehr durchgeführt.

Die für die statistischen Auswertungen benötigten Ergebnisse der Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS_{270}}$  und die durch Näherung ermittelten Griffigkeitswerte  $PWS_{270}$  nach 270.000 Überrollungen werden für die Probekörper der Phasen EP; MW und BK mit der Phase BK-3J (nach 2 bis 3 Jahren entnommenen Bohrkernen) gegenübergestellt.

Die Darstellung der durch logarithmische Näherung gewonnenen Griffigkeitswerte (PWS) erfolgt nur noch mit logarithmierter Abszisse (Anzahl der Überrollungen). Die Steigung der Gerade beschreibt hierbei die Griffigkeitsabnahme. Die Auswertung erfolgte für die Asphaltarten SMA 8 S (Strecke 9) und AC 11 D S (Strecke 14) getrennt.

## 9.2 Splittmastixasphalt SMA 8 S

### Griffigkeitswerte $\mu_{PWS}$

Die Anfangsgriffigkeiten  $\mu_{PWS}$  bei 0 Überrollungen der Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z liegen immer oberhalb der Phasen EP, MW und BK (Abbildung 9-1).

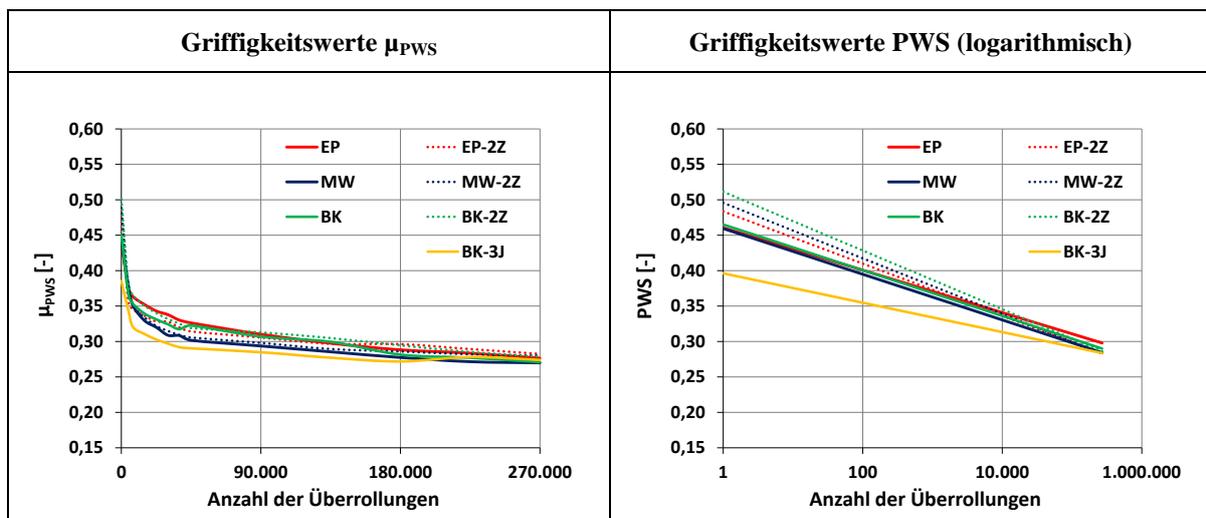


Abbildung 9-1: Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  und Griffigkeitsverlauf PWS, SMA 8 S der Strecke 9

Die Anfangsgriffigkeit der Phase BK-3J liegt mit 0,385, (immer) zwischen den nach 0 bzw. 4.500 Überrollungen ermittelten Griffigkeiten  $\mu_{PWS}$  der anderen Phasen (Anhang E3). Durch die modifizierte Probenvorbereitung wurden bei der Phase BK-2Z gegenüber Phase BK geringfügig höhere Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  gemessen.

Die Spannweite aller untersuchten Phasen zwischen maximaler und minimaler Griffigkeit nach 4.500 bis 90.000 Überrollungen beträgt bis zu 0,045 Einheiten. Mit steigender Anzahl der Überrollungen wird dieser Abstand geringer. Die Spannweite nach 270.000 Überrollungen zwischen maximaler und minimaler Griffigkeit beträgt 0,013 Einheiten. Der Mittelwert liegt bei 0,276 Einheiten (Tabelle 9-1).

Phase	Griffigkeitswerte $\mu_{PWS270}$			Griffigkeitswerte $\mu_{PWS180}$		
	Ergebnis	Mittelwert	Spannweite	Ergebnis	Mittelwert	Spannweite
EP	0,276	0,272	0,006	0,288	0,282	0,011
MW	0,270			0,277		
BK	0,271			0,281		
BK-3J	0,274	-	-	0,272	-	-
EP-2Z	0,283	0,280	0,004	0,296	0,292	0,010
MW-2Z	0,280			0,286		
BK-2Z	0,279			0,295		
alle Phasen	-	0,276	0,013	-	0,285	0,024

Tabelle 9-1: Zusammenstellung der Griffigkeiten  $\mu_{PWS}$  nach 180.000 bzw. 270.000 Überrollungen für die untersuchten Phasen des SMA 8 S

Die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS270}$  nach 270.000 Überrollungen der Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z liegen im Mittel um 0,008 Einheiten oberhalb der Phasen EP, MW und BK. Die Spannweite zwischen den Phasen bei EP, MW und BK beträgt 0,006 Einheiten. Durch die modifizierte Probenvorbereitung (Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z) konnte sie auf 0,004 Einheiten verringert werden.

In den DIN EN 12697-49 [54] sind Präzisionsdaten für die Wiederhol- und Vergleichpräzision für die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS180}$  nach 180.000 Überrollungen (Tabelle 7-5) angegeben. Für die weitere Auswertung wird für die Wiederholpräzision FAP nach 180.000 Überrollungen mit einem Wert von 0,024 herangezogen.

Für die Phasen EP, MW und BK ergibt sich für die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS180}$  nach 180.000 Überrollungen ein Mittelwert von 0,282 (Tabelle 9-1). Die Spannweite zwischen maximalen (0,288) und minimalen (0,277) Griffigkeitswerten liegt bei 0,011.

Die Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z weisen bei einem Mittelwert von 0,292 eine Spannweite von 0,010 (Maximum: 0,296, Minimum 0,286) auf.

Die berechneten Spannweiten liegen unterhalb des Werts der Wiederholpräzision auf identischem Niveau. Es konnte nachgewiesen werden, dass sich durch die Probekörpervorbereitung mittels zwei Sandstrahlzyklen bei  $(-20 \pm 3) ^\circ\text{C}$ , die Präzisionsdaten für die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS180}$  nach 180.000 Überrollungen zielsicher einhalten lassen.

### Endgriffigkeiten $PWS_{270}$

Wie bereits im Abschnitt 5-1 dargelegt, liegen die berechneten Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  stets oberhalb der ermittelten Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS270}$  nach 270.000 Überrollungen.

Bei den Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z, an denen die neu entwickelte Oberflächenbeanspruchung durchgeführt wurde, zeichnete sich eine geringere Erhöhung der Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  (im Mittel 0,004 Einheiten) als bei den Phasen EP, MW und BK mit 0,019 Einheiten ab.

Dieser Sachverhalt spiegelt sich auch in den Bestimmtheitsmaßen der kontinuierlichen Griffigkeitsentwicklung wider, welche gemäß dem Entwurf der TP Asphalt-StB, Teil 49 [56] durch die Logarithmusfunktion ( $PWS = a \cdot \ln(x) + b$ ) darzustellen ist. Die Bestimmtheitsmaße (Tabelle 9-2) konnten durch die modifizierte Probenvorbereitung (Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z) gegenüber den Phasen EP, MW und BK z.T. deutlich erhöht werden. Bei den Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z liegen die

Bestimmtheitsmaße über 0,97. Demnach liegt eine sehr gute Übereinstimmung mit der gewählten Regressionskurve vor.

Phase	PWS <sub>270</sub>	Bestimm- maß	Mittelwert PWS <sub>270</sub>	Spannweite PWS <sub>270</sub>
EP	0,298	0,8722	0,291	0,014
MW	0,284	0,9038		
BK	0,290	0,9334		
BK-3J	0,284	0,9062	-	-
EP-2Z	0,284	0,9966	0,284	0,003
MW-2Z	0,283	0,9799		
BK-2Z	0,286	0,9782		
alle Phasen	-	-	0,287	0,015

Tabelle 9-2: Zusammenstellung der Bestimmtheitsmaße und der Endgriffigkeiten PWS<sub>270</sub> für die untersuchten Phasen des SMA 8 S

Die Griffigkeitsabnahme zwischen 0 und 270.000 Überrollungen der einzelnen Phasen ist durch die Steigung der jeweiligen Geraden im logarithmischen Griffigkeitsverlauf (Abbildung 9-1) erkennbar. Die geringste Abnahme weist erwartungsgemäß die Phase BK-3J, welche durch den Verkehr bereits eine Polierbeanspruchung erfahren hat, die höchste die Phase BK-2Z auf.

Scheinbar treffen sich mit Ausnahme der Phase EP sämtliche Geradenbüschel in einem „Schnittpunkt“. Der Mittelwert der Endgriffigkeiten PWS<sub>270</sub> aller Phasen beträgt 0,287. Die Spannweite (alle Phasen) zwischen maximaler und minimaler Griffigkeit beträgt 0,015 Einheiten (Tabelle 9-2).

Erfolgt die Mittelwertberechnung der Endgriffigkeiten PWS<sub>270</sub> für die Phasen EP, MW und BK getrennt, so ist festzustellen, dass der Mittelwert oberhalb des Werts der Phase BK-3J und über dem Mittelwert der Phasen mit der modifizierten Probenvorbereitung (EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z) liegt. Die Spannweite der Endgriffigkeiten PWS<sub>270</sub> der Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z beträgt 0,003 Einheiten. Sie konnte gegenüber der berechneten Spannweite der Phasen EP, MW und BK auf ein Viertel gesenkt werden.

Die Endgriffigkeiten PWS<sub>270</sub> der Phasen EP, MW und BK (Abstand größer 0,010 Einheiten) liegen auf unterschiedlichen Niveaus. Hingegen weisen die Endgriffigkeiten PWS<sub>270</sub> der Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z nahezu identische Werte auf und liegen auf demselben Niveau wie die Endgriffigkeit PWS<sub>270</sub> der verkehrsbelasteten Straße (Phase BK-3J) nach 2 bzw. 3 Jahren.

### Statistische Auswertung

Zur Absicherung der Versuchsergebnisse und um mögliche signifikante Unterschiede zwischen den untersuchten Phasen (EP-2Z, MW-2Z, BK-2Z) erkennen zu können, wurde im Nachgang eine einfache Varianzanalyse [80] mit nachgeschaltetem modifiziertem LSD-Test (Least Significant Difference Test) für die ermittelten Griffigkeitswerte  $\mu_{\text{PWS}_{270}}$  nach 270.000 Überrollungen durchgeführt.

Die statistische Auswertung (Tabelle 9-3) zeigt, dass alle drei Phasen einer homogenen Gruppe zuzuordnen sind und somit keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Phasen vorliegen.

SMA 8 S				einfache Varianz- analyse	LSD-Test		
					EP	MW	BK
				Ranking der homogenen Gruppen			
				1. Gruppe	2. Gruppe	3. Gruppe	
$\mu_{PWS}$ nach 270.000 Überrollungen	9	SMA 8 S	25/55-55 A	n. signifi.			

Tabelle 9-3: Ergebnisse der statistischen Analyse Griffigkeitswert  $\mu_{PWS270}$  nach 270.000 Überrollungen an SMA 8 S, Strecke 9, nach zielführender Probenvorbereitung aus [80]

Die Ergebnisse bestätigen die statistische Auswertung zu den Phasen EP, MW und BK der Strecke 9 (siehe Abschnitt 5.1.2.1). Lediglich im Ranking der Phase MW-2Z und BK-2Z der homogenen Gruppe 1 ist eine Änderung erfolgt.

Mit der neu entwickelten Probenvorbereitung liegen die Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  der Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z trotz unterschiedlicher Probekörperherstellung mit Werten zwischen 0,283 bis 0,286 Einheiten auf einem identischen Niveau.

### 9.3 Asphaltbeton AC 11 D S

Der Asphaltbeton wurden analog der Vorgehensweise der SMA 8 S mit folgendem Ergebnis ausgewertet:

#### Griffigkeitswerte $\mu_{PWS}$

Die Anfangsgriffigkeit  $\mu_{PWS}$  bei 0 Überrollungen der Phasen EP, MW und BK liegt im Gegensatz zum Splittmastixasphalt immer oberhalb der Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z (Abbildung 9-2).

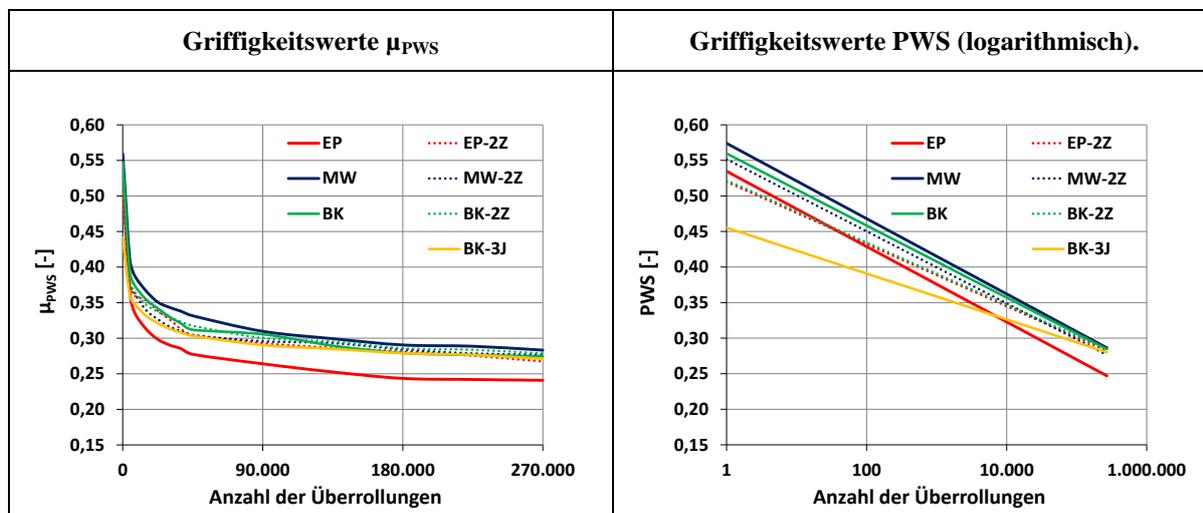


Abbildung 9-2: Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  und Griffigkeitsverlauf PWS, AC 11 D S der Strecke 14

Die Anfangsgriffigkeit der Phase BK-3J liegt mit 0,441, (immer) zwischen den nach 0 bzw. 4.500 Überrollungen ermittelten Griffigkeiten  $\mu_{PWS}$  der anderen Phasen (Anhang E5). Die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  zwischen 0 und 270.000 Überrollungen der Phase MW weisen stets die höchsten Werte auf. Die niedrigsten liegen bei der Phase EP vor. Durch die modifizierte Probenvorbereitung wurden ab 4.500 Überrollungen bei der Phase EP-2Z höhere, bei der MW-2Z niedrigere Griffigkeitswerte als bei der Phase EP bzw. MW gemessen.

Die Spannweite aller untersuchten Phasen zwischen maximaler und minimaler Griffigkeit nach 4.500 bis 270.000 Überrollungen beträgt bis zu 0,054 Einheiten. Im Gegensatz zum Splittmastixasphalt

verringert sich die Spannweite mit einer steigenden Anzahl der Überrollungen nur geringfügig (Abbildung 9-2). Nach 270.000 Überrollungen beträgt die Spannweite 0,042 Einheiten. Der Mittelwert liegt bei 0,270 Einheiten (Tabelle 9-4).

Phase	Griffigkeitswerte $\mu_{PWS270}$			Griffigkeitswerte $\mu_{PWS180}$		
	Ergebnis	Mittelwert	Spannweite	Ergebnis	Mittelwert	Spannweite
EP	0,241	0,266	0,042	0,244	0,271	0,047
MW	0,283			0,291		
BK	0,275			0,279		
BK-3J	0,271	-	-	0,279	-	-
EP-2Z	0,267	0,274	0,012	0,281	0,284	0,005
MW-2Z	0,277			0,284		
BK-2Z	0,279			0,286		
alle Phasen	-	0,270	0,042	-	0,278	0,047

Tabelle 9-4: Zusammenstellung der Griffigkeiten  $\mu_{PWS}$  nach 180.000 bzw. 270.000 Überrollungen für die untersuchten Phasen des AC 11 D S

Die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS270}$  nach 270.000 Überrollungen der Phasen EP-2, MW-2Z und BK-2Z liegen im Mittel um 0,008 Einheiten oberhalb der Phasen EP, MW und BK. Die Spannweite zwischen den Phasen bei EP, MW und BK beträgt 0,042 Einheiten. Durch die modifizierte Probenvorbereitung (Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z) konnte die berechnete Spannweite auf ein Drittel (0,012 Einheiten) gesenkt werden.

Analog zur Auswertung des SMA 8 S wurden für die Phasen EP, MW und BK beim AC 11 D S der Mittelwert für die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS180}$  nach 180.000 Überrollungen mit 0,271 und die Spannweite mit 0,047 (Minimum: 0,244, Maximum: 0,279) berechnet. Die ermittelte Spannweite liegt nahezu um das Doppelte über dem mit 0,024 für die Wiederholpräzision angegebenen Griffigkeitswert  $\mu_{PWS180}$  nach 180.000 Überrollungen (vgl. Tabelle 7-5).

Der Mittelwert für die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS180}$  nach 180.000 Überrollungen der Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z beträgt 0,284. Die Spannweite konnte mit 0,005, (Maximum bzw. Minimum von 0,296 bzw. 0,286) gegenüber der berechneten Spannweite der Phasen EP, MW und BK auf ein Neuntel gesenkt werden.

Es konnte nachgewiesen werden, dass sich durch die neu entwickelte Probekörpervorbereitung mittels zwei Sandstrahlzyklen bei  $(-20 \pm 3) ^\circ\text{C}$ , deutlich bessere Präzisionsdaten der Griffigkeitswerte nach 180.000 Überrollungen erzielen lassen und die Wiederholpräzision zielsicher eingehalten wird.

### Endgriffigkeiten $PWS_{270}$

Wie bereits im Abschnitt 5-2 dargelegt, liegen die berechneten Endgriffigkeiten nach 270.000 Überrollungen  $PWS_{270}$  i.d.R. stets oberhalb der ermittelten Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS270}$ . Im Mittel liegen die Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  bei den Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z bzw. EP, MW und BK mit je 0,007 Einheiten oberhalb der Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS270}$ .

Sämtliche Bestimmtheitsmaße liegen über 0,94 (Tabelle 9-5). Demnach liegt eine sehr gute Übereinstimmung mit der gewählten Regressionskurve vor.

Phase	PWS <sub>270</sub>	Bestimm- maß	Mittelwert PWS <sub>270</sub>	Spannweite PWS <sub>270</sub>
EP	0,247	0,9834	0,273	0,039
MW	0,286	0,9750		
BK	0,285	0,9797		
BK-3J	0,280	0,9450	-	-
EP-2Z	0,282	0,9679	0,281	0,008
MW-2Z	0,276	0,9923		
BK-2Z	0,284	0,9811		
alle Phasen	-	-	0,277	0,039

Tabelle 9-5: Zusammenstellung der Bestimmtheitsmaße und der Endgriffigkeiten PWS<sub>270</sub> für die untersuchten Phasen des AC 11 D S

Die Griffigkeitsabnahme zwischen 0 und 270.000 Überrollungen der einzelnen Phasen (Abbildung 9-2) ist durch die Steigung der jeweiligen Geraden im logarithmischen Griffigkeitsverlauf erkennbar. Die geringste Abnahme weist erwartungsgemäß die Phase BK-3J, welche durch den Verkehr bereits eine Polierbeanspruchung erfahren hat, die höchste die Phase MW auf. Scheinbar treffen sich mit Ausnahme der Phase EP sämtliche Geradenbüschel in einem „Schnittpunkt“. Die Geraden für die Phasen MW und EP verlaufen nahezu parallel und besitzen somit vergleichbare Steigungen und Griffigkeitsabnahmen.

Der Mittelwert der Endgriffigkeiten PWS<sub>270</sub> aller Phasen beträgt 0,277. Die Spannweite (alle Phasen) zwischen maximaler und minimaler Griffigkeit beträgt 0,039 Einheiten (Tabelle 9-5).

Erfolgt die Mittelwertberechnung der Endgriffigkeiten PWS<sub>270</sub> für die Phasen EP, MW und BK getrennt, so ist festzustellen, dass der Mittelwert unterhalb des Werts der Phase BK-3J und des Mittelwerts der Phasen (EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z) mit der modifizierten Probenvorbereitung liegt. Die Spannweite der Endgriffigkeiten PWS<sub>270</sub> der Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z beträgt 0,008 Einheiten. Sie konnte gegenüber der berechneten Spannweite der Phasen EP, MW und BK auf ein Viertel gesenkt werden.

Die Endgriffigkeiten PWS<sub>270</sub> der Phasen EP, MW und BK (Abstand größer 0,010 Einheiten) liegen auf unterschiedlichen Niveaus. Hingegen liegen die Endgriffigkeiten PWS<sub>270</sub> der Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z auf einem Niveau und weisen im Mittel einen nahezu identischen Wert wie die Endgriffigkeit PWS<sub>270</sub> der verkehrsbelasteten Straße (Phase BK-3J) nach 2 bzw. 3 Jahren auf.

### Statistische Auswertung

Analog zum SMA 8 S wurde zur Absicherung der Versuchsergebnisse eine mathematisch-statistische Auswertung [80] für die Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z für die ermittelten Griffigkeitswerte  $\mu_{\text{PWS}_{270}}$  nach 270.000 Überrollungen durchgeführt (Anhang E7). Die Ergebnisse bestätigen die statistische Auswertung zu den Phasen EP, MW und BK der Strecke 14 im Abschnitt 5.1.3.1. Übereinstimmend zum Splittmastixasphalt hat sich beim Asphaltbeton eine Änderung der Reihenfolge in den Phasen MW-2Z und BK-2Z in der homogenen Gruppe 1 ergeben.

Mit der neu entwickelten Probenvorbereitung liegen die Endgriffigkeiten PWS<sub>270</sub> der Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z trotz unterschiedlicher Probekörperherstellung mit Werten zwischen 0,276 bis 0,284 Einheiten auf einem nahezu identischen Niveau.

## 9.4 Ergebnisse

Ein Zusammenhang zwischen den mittleren Profiltiefen nach 270.000 Überrollungen und den Griffigkeitswerten  $\mu_{PWS}$  bzw. den Endgriffigkeiten konnte beim Splittmastixasphalt SMA 8 S und Asphaltbeton AC 11 D S nicht nachgewiesen werden.

Die Anfangsgriffigkeit bei 0 Überrollungen der Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z liegen beim untersuchten Splittmastixasphalt oberhalb, beim Asphaltbeton unterhalb der Phasen EP, MW und BK. Die Anfangsgriffigkeit der Phase BK-3J liegt immer zwischen den nach 0 bzw. 4.500 Überrollungen ermittelten Griffigkeiten  $\mu_{PWS}$  der anderen Phasen.

In den DIN EN 12697-49 [54] sind Präzisionsdaten für die Wiederholpräzision für die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS180}$  nach 180.000 Überrollungen (Tabelle 7-5) angegeben, obwohl im Regelfall für die Prüfung nur 90.000 Überrollungen vorgesehen sind. Durch die neu entwickelte Probekörpervorbereitung mittels zwei Sandstrahlzyklen bei  $(-20 \pm 3)^\circ\text{C}$ , liegen für die Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z die Spannweiten für die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS180}$  nach 180.000 Überrollungen stets unterhalb der in den DIN EN 12697-49 [54] angegebenen Werte für die Wiederholpräzision FAP.

Durch einen zweimaligen Sandstrahlzyklus bei  $(-20 \pm 3)^\circ\text{C}$  konnten vergleichbare Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS270}$  nach 270.000 Überrollungen bzw. Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  der Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z und der Phase BK-3J erzielt werden.

Die Ergebnisse der mathematisch-statistischen Auswertung für die Phasen EP-2Z, MW-2Z, BK-2Z bestätigen die statistische Auswertung zu den Phasen EP, MW und BK. Lediglich im Ranking der Phasen MW-2Z und BK-2Z der homogenen Gruppe 1 ist eine Änderung erfolgt. Mit der neu entwickelten Probenvorbereitung liegen die Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  der Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z trotz unterschiedlicher Probekörperherstellung auf einem nahezu identischen Niveau.

Wird diese neu entwickelte Oberflächenbeanspruchung zukünftig bei der Probenvorbereitung zur „Messung der Griffigkeit nach Polierung“ eingesetzt, so können die Einflüsse auf die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS270}$  nach 270.000 Überrollungen bzw. Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$ , die sich aus der Probekörperherstellung ergeben, nahezu zur Gänze ausgeschlossen werden.

Beim Splittmastixasphalt SMA 8 S und Asphaltbeton AC 11 D S zeigt sich, dass die modifizierte Probenvorbereitung gegenüber der in den DIN EN 12697-49 [54] festgelegten Probekörperherstellung folgende Vorteile bietet:

- Der Bindemittelfilm an der Oberfläche der groben Gesteinskörnungen wird vollständig abgetragen.
- Die Gefahr, dass während des Poliervorgangs Bitumen an die Prüfkörperoberfläche aufsteigt wurde verringert.
- Die in den DIN EN 12697-49 [54] angegebenen Präzisionsdaten für die Wiederholpräzision für die Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS180}$  nach 180.000 Überrollungen werden sowohl beim SMA 8 S als auch AC 11 D S eingehalten.
- Die berechneten Bestimmtheitsmaße der kontinuierlichen Griffigkeitsentwicklung weisen beim Splittmastixasphalt SMA 8 S höhere, beim Asphaltbeton AC 11 D S vergleichbare Werte auf.

- Die Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  der Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z sind nahezu identisch. Sie liegen auf einem Niveau.
- Die Endgriffigkeiten der Phase EP-2Z und MW-2Z weisen niedrigere Werte als die Phasen BK-2Z und BK-3J auf. Demzufolge können bereits im Vorfeld der Baumaßnahme, an den Phasen EP-2Z und MW-2Z mit einer ausreichenden Sicherheit, die Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  mit einem gewissen Vorhaltemaß zielsicher ermittelt werden.
- Die Spannweite der Endgriffigkeit zwischen den Phasen weist deutlich niedrigere Werte auf.

## 10 Erforderliche Anpassungen in der Prüfvorschrift

Aus den Erkenntnissen aller durchgeführten Untersuchungen wird zusammenfassend empfohlen, in der zu erstellenden Technische Prüfvorschrift: „Bestimmung der Griffigkeitsentwicklung von Oberflächen mit dem Prüfverfahren Wehner/Schulze (PWS)“ weitergehende Festlegungen in den Prüfbedingungen - vor allem bezüglich der verfahrenstechnischen Einzelheiten - wie folgt festzulegen:

- Zur Erhöhung der Genauigkeit des Messverfahrens, sind zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Messgerätes mindestens zwei Kalibrieroberflächen (Kontrollplatten) auf einem niedrigen und hohen Griffigkeitsmessbereich zu verwenden. Die maximal erlaubte Spannweite, um welche das Messergebnis der Kontrollplatte vor und nach jeder Prognoseprüfung vom bekannten Griffigkeitswert der Kontrollplatte abweichen darf, ist über eine Standardabweichung festzulegen.
- Mit den Kontrollplatten für den hohen Griffigkeitsmessbereich, lassen sich unterschiedliche Fertigungschargen von Messgummisätzen, aber auch einzelne Messgummisätze innerhalb einer Fertigungscharge differenzieren. Zur Vermeidung falscher Prüfwerte sind geeignete Regelungen für die Prüfung der Messgummisätze zu treffen.
- Zur Gewährleistung einheitlicher Messgummis bzw. Polierrollen mit identischen, reproduzierbaren Gummieigenschaften und zur Vermeidung unterschiedlicher Produktions- bzw. Herstellungsbedingungen sollten diese durch eine zentrale Stelle hergestellt werden. Die Gummieigenschaften sind für je einen Satz (3 Stück) Messgummis bzw. Polierrollen durch den Hersteller zu überprüfen. Ein Zertifikat, das die Übereinstimmung mit den Anforderungen bestätigt bzw. garantiert, ist dem Anwender beim Kauf, mit Angabe der Prüfergebnisse, auszuhändigen.
- Die DIN EN 12697-49 [54] sieht i.d.R. als Poliermittel ein Quarzmehl mit weniger als 0,063 mm „Typ Millisil W6 (Quarzwerk Frechen)“ vor. Das bislang eingesetzte Quarzmehl weist immer einen Überkornanteil größer 0,063 mm auf. Das Quarzmehl hätte vor Verwendung durch ein 0,063 mm Analysensieb gesiebt und nur die Korngruppe 0/0,063 mm hätte zur Prüfung eingesetzt werden dürfen. Ein Aussieben des Überkornanteils hat in der Vergangenheit nie stattgefunden. Die Beschreibung des Poliermittels ist deshalb wie folgt anzupassen: Bei dem Quarzmehl handelt es sich um „Millisil W6“ der „Quarzwerke Frechen“.
- Die Definition des „Übergangs“ gemäß DIN EN 12697-49, Abschnitt 3.1 [54] ist wie folgt zu präzisieren: Aus einer vollständigen Umdrehung des Polierkopfes (Übergang), resultieren drei Übergänge durch die Polierrollen.

- Trotz der in den DIN EN 12697-49 [54] vorgegebenen bzw. festgelegten Randbedingungen (Prüftemperaturen etc.) sind Einflüsse aus den vorherrschenden Umgebungsbedingungen und des Zustandes der Messeinrichtung am Messtag vorhanden. Festlegungen hierfür sind zukünftig zu treffen. Empfohlen wird eine Raumtemperatur von  $(25 \pm 5)$  °C bei einer relativen Luftfeuchte von  $(50 \pm 15)$  %.
- Die in den DIN EN 12697-49 [54] gezeigte Darstellung (Bild 4) des Grundrisses der Messgummis ist zu korrigieren. Die Abrundung des Gummibelags wird seitenverkehrt wiedergegeben. Die Skizze ist anzupassen.
- Für unbeanspruchte Probekörper aus SMA 8 S bzw. AC 11 D S sind deutlich längere Sandstrahldauern zur Entfernung des Bindemittelfilms von der groben Gesteinskörnung als die derzeit in den DIN EN 12697-49 (Einführung 2014) [54] empfohlenen zu wählen.
- Die neu entwickelte Probenvorbereitung durch einen zweimaligen Sandstrahlzyklus mit je einer Zeitdauer von  $(120 \pm 10)$  s bei  $(-20 \pm 3)$  °C ist für unbeanspruchte Probekörper anzuwenden.
- Für die kontinuierliche Griffigkeitsentwicklung sind Griffigkeitsmessungen in den Beanspruchungsstufen nach 4.500, 7.500, 15.000, 22.500, 30.000, 37.500, 45.000, 90.000, 135.000, 180.000, 225.000 und 270.000 Überrollungen durchzuführen [56]. Diese Messreihe umfasst auch den derzeit in den DIN EN 12697-49 [54] angegebenen Wert.
- Die nach einer Beanspruchung mit 270.000 Überrollungen ermittelte Griffigkeit, wird als Endgriffigkeit (Endpolierwert) definiert [vgl. 69].
- Der Geschwindigkeitsbereich in dem der Reibungsverlauf mit einem Polynom 6ten Grades angenähert wird, ist in der Prüfvorschrift anzugeben. Angaben hierzu fehlen bislang in den DIN EN 12697-49 [54]. Aktuell wird die Regressionsrechnung mit der Anwendersoftware im Geschwindigkeitsbereich von (95 bis 5) km/h durchgeführt, diese Vorgehensweise ist beizubehalten.
- Die in den DIN EN 12697-49 [54] für den Reibungsbeiwert  $\mu$  angegebene Berechnungsformel ist zu korrigieren. Im Nenner der Formel ist ein falscher Hebelarm angegeben, der Hebelarm beträgt 0,09 m und nicht 0,9 m. Die Formelzeichen inkl. Einheit für den Hebelarm und die Vertikalkraft (aus der Auflast 253 N) sind zu erläutern.
- Weder für den ermittelten Reibungsbeiwert noch für den berechneten Griffigkeitswert einer Einzelmessprobe existieren in den DIN EN 12697-49 [54] Angaben zur Stellengenauigkeit. Vorgaben hierfür müssen getroffen werden. Es wird empfohlen, die Zwischenergebnisse auf drei Stellen und das Ergebnis (Mittelwert aus zwei Einzelmessungen) auf zwei Stellen nach dem Komma anzugeben. Diese Stellengenauigkeit ist auch für die europäisch eingeführten Kategorien für die „Mindest-Griffigkeit nach Polierung“ [82, 83, 84] vorgesehen.
- Der durch die Griffigkeitsprognose ermittelte kontinuierliche Griffigkeitsverlauf ist in Abhängigkeit von der Anzahl der Überrollungen (Beanspruchungsdauer) bis zum Erreichen der Beanspruchungsstufe nach 270.000 Überrollungen ( $PWS_{270}$ ) mit einer Logarithmusfunktion ( $PWS = a \ln(x) + b$ ) zu beschreiben, wobei die Anzahl der Überrollungen  $x$  ist und die Koeffizienten  $a$  und  $b$  durch Korrelation bestimmt werden [56].

- Der kontinuierliche Griffigkeitsverlauf ist als Logarithmusfunktion graphisch darzustellen [56], das Bestimmtheitsmaß und die Korrelationskoeffizienten sind bei der Auswertung mit anzugeben.
- Für den kontinuierlichen Griffigkeitsverlauf hat sich die Darstellung mit logarithmierter Abszisse (Anzahl der Überrollungen) als zweckmäßig erwiesen. Die Steigung der Geraden gibt hierbei die Griffigkeitsabnahme wieder.
- Die in den DIN EN 12697-49 [54] angegebenen Präzisionsdaten für die Wiederhol- und Vergleichpräzision der Griffigkeit vor dem Polieren und nach 180.000 Überrollungen, welche auf Erfahrungswerte der Mischgutsorte BBTM aus Frankreich dem Jahr 2010 zurückgreifen, sind für die in Deutschland verwendeten Asphaltarten und -sorten zu überprüfen und zusätzlich nach 90.000 und 270.000 Überrollungen zu bestimmen.

## 11 Ausblick / offene Fragen

Die Untersuchungsergebnisse zeigten, dass die in den derzeit gültigen Fassungen der DIN EN 13108-1; -5 und -6 [82, 83, 84] europäisch eingeführten Kategorien für die „Mindest-Griffigkeit nach Polierung,  $FAP_{\min}$ “, für die in Deutschland eingesetzten Asphalte - unabhängig davon ob sie nach 90.000 oder 270.000 Überrollungen ermittelt werden - als zu hoch anzusehen sind. Die Einführung zusätzlicher Kategorien mit geringeren „Mindest-Griffigkeiten nach Polierung“ ist notwendig.

Um die Anforderungen an die Griffigkeit für die in Deutschland eingesetzten Walzasphalte zum Ende der Nutzungsdauer sicher gewährleisten zu können, wird aufgrund des Bewertungshintergrundes empfohlen, eine Endgriffigkeit nach 270.000 Überrollungen  $PWS_{270}$  von größer 0,25 zu fordern.

Die ermittelten Endgriffigkeiten nach 270.000 Überrollungen  $PWS_{270}$  (Mittelwerte) liegen um 0,013 bis 0,027 Einheiten unterhalb der ermittelten Griffigkeiten nach 90.000 Überrollungen ( $PWS_{90}$ ). Demzufolge sollte für die Griffigkeit nach 90.000 Überrollungen  $PWS_{90}$  ein Wert von mindestens 0,27 erreicht werden.

Tendenziell liegen die Griffigkeiten der Asphaltbetone oberhalb der Griffigkeiten der Splittmastixasphalte. Aufgrund der geringen Anzahl der untersuchten Strecken, können zum jetzigen Zeitpunkt keine Empfehlungen für einzelne Asphaltarten und -sorten ausgesprochen werden.

Obwohl der Einfluss der feinen Gesteinskörnungen auf die erzielbaren Griffigkeiten bekannt ist und sich dies anhand der Untersuchungsergebnisse wiederum bestätigt hat, ist es erstaunlich, dass - trotz geeigneter, anerkannter Prüfverfahren - auf europäischer Ebene bislang noch keine Anforderungswerte, an den Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnungen für die Verwendung in Asphalt eingeführt wurden.

Vielmehr wird immer noch der Polierwert der groben Gesteinskörnungen auf die feinen Gesteinskörnungen übertragen. Lediglich in Bayern gibt es für die feinen gebrochenen Gesteinskörnungen seit dem Jahre 2008 ergänzende Regelungen zu den TL Asphalt-StB 07 [37], welche Anforderungswerte an den Polierwert der feinen Gesteinskörnungen  $PSV_{fGK}$  vorsehen.

Aufbauend auf diesen Festlegungen könnte sich zukünftig zur Charakterisierung der Polierresistenz von feinen Gesteinskörnungen die Bestimmung des Polierwerts  $PSV_{fGK}$  bzw. vorzugsweise des

Polierwerts mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze  $PWS_{0,2/0,4}$ , unabhängig vom PSV der groben Gesteinskörnung vom selben Lieferwerk, als zielführend erweisen. Um Anforderungswerte an den Polierwert  $PWS_{0,2/0,4}$  festlegen zu können, muss deshalb in naher Zukunft, in einem separaten Forschungsvorhaben ein Bewertungshintergrund geschaffen werden.

Bei sandreichen Asphaltmischungen ist zudem zu klären, ob auch die granulometrischen Eigenschaften der feinen Gesteinskörnungen insbesondere Kornform, Korngrößenverteilung (Massenanteile in den einzelnen Korngruppen) und Oberflächenrauheit einen signifikanten Einfluss auf die Griffbarkeit von Asphaltdeckschichten ausüben. Seit 2015 steht für die Kornform, basierend auf der Forschungsarbeit [64], ein geeignetes Prüfverfahren [73] zur Verfügung.

Aktuell wird in Deutschland für die Ermittlung des Polierwiderstandes von groben Gesteinskörnungen das PSV-Verfahren nach den TP Gestein-StB Teil 5.4.1 [51] bzw. den DIN EN 1097-8 [52] angewendet. Dieses Prüfverfahren besitzt nachweislich eine Reihe von Schwächen. Die Möglichkeiten zur Verbesserung der Verfahrenspräzision sind ausgeschöpft. Alternativ kann der Polierwert von groben Gesteinskörnungen auch mit dem Verfahren TP Gestein-StB, Teil 5.4.2 „Bestimmung des Polierwertes mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze“ (PWS) [55] bestimmt werden.

Die benötigten Probekörper können dabei mit dem Mosaik-Auslegeverfahren (Gesteinskörnungen werden in einer Kreisscheibe mit Epoxidharz eingelegt) oder dem Mastix-Eingussverfahren (Gesteinskörnungen werden in Asphaltmastix eingegossen bzw. eingemischt) hergestellt werden. Das Mastix-Eingussverfahren hat sich, aufgrund der Zeitersparnis und des geringeren Einflusses des Laboranten bei der Probekörperherstellung, als zielführend erwiesen.

Die Anwendung des Verfahrens Wehner/Schulze hätte den Vorteil, dass sowohl für die Ermittlung des Polierwiderstandes von feinen und groben Gesteinskörnungen als auch für die Bestimmung des Griffigkeitsverhaltens von Asphaltoberflächen (Griffigkeitsprognose) ein einheitliches Prüfverfahren angewendet werden kann.

## 12 Zusammenfassung

Jeder Verkehrsteilnehmer erwartet auch bei Nässe eine ausreichend griffige Fahrbahnoberfläche. Hierfür ist es notwendig, dass die festgelegten Anforderungen an die Griffbarkeit über den gesamten Nutzungszeitraum einer Fahrbahnoberfläche zielsicher eingehalten werden.

Mit dem Prüfverfahren Wehner/Schulze (DIN EN 12697-49 [54]) steht erstmalig ein genormtes Laborverfahren zur Verfügung, mit dem das Griffigkeitsverhalten eines Asphaltes im Labormaßstab prognostiziert werden kann. Die „Prüfung der Griffbarkeit nach Polierung“ ist in den derzeit gültigen Fassungen der DIN EN 13108-1; -5 und -6: „Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen“ [82, 83, 84] vorgesehen, Kategorien für die „Mindest-Griffbarkeit nach Polierung“, welche auf Erfahrungen in verschiedenen Ländern beruhen, sind hierin aufgeführt. Für die in Deutschland eingesetzten Asphalte erscheinen die enthaltenen Kategorien als nicht sachgerecht. Ein entsprechender Bewertungshintergrund könnte z.B. im Rahmen von Kontrollprüfungen geschaffen werden.

Zur Schaffung eines ersten Bewertungshintergrundes wurden an insgesamt 21 Baumaßnahmen [77] die Griffigkeitswerte der Asphaltdeckschichten in den Phasen der Asphaltmischgutkonzeption (Pha-

se EP), der Asphaltmischgutproduktion (Phase MW) und nach dem Asphalteinbau (Phase BK) ermittelt und mathematisch-statistisch ausgewertet. Darüber hinaus wurden nach 2 bis 3 Jahren erneut Bohrkern (Phase BK-3J) in der Rollspur von sieben Versuchsstrecken entnommen.

Es konnte nachgewiesen werden, dass durch das Aufbringen einer zusätzlichen mechanischen Beanspruchung, über die gemäß DIN EN 12697-49 [54] vorgesehenen 90.000 Überrollungen hinaus, eine weitere Abnahme der Griffigkeit erfolgt. Die Untersuchungen bestätigen die Ergebnisse einer älteren Forschungsarbeit [69], dass sich zielsicher nur eine „Endgriffigkeit (Endpolierwert)“ nach mindestens 270.000 Überrollungen ermitteln lässt.

Die an der Phase BK-3J bestimmten Anfangsgriffigkeiten liegen immer zwischen den nach 0 bzw. 4.500 Überrollungen ermittelten Griffigkeiten der im Labor beanspruchten Probekörper. Daraus ist zu folgern, dass durch eine Polierbeanspruchung mit maximal 4.500 Überrollungen die durch die dreijährige Verkehrsbeanspruchung verursachte Griffigkeitsabnahme an im Labor beanspruchten Probekörpern näherungsweise simuliert werden kann. Eine Aussage zur Griffigkeit zu einem konkreten Zeitpunkt, z.B. dem Ablauf der Verjährungsfrist für Mängelansprüche [1], kann jedoch nicht getroffen werden.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Anfangs- bzw. Endgriffigkeiten der Asphalte um das zwei- bzw. sechsfache oberhalb des durchschnittlichen Referenzwerts  $\mu_{ref}$  der aktuell verwendeten Kontrollplatte aus Glas liegen. Um das gesamte Spektrum der Griffigkeiten zukünftig abdecken und sichere Messergebnisse gewährleisten zu können, ist es zur Überprüfung der Griffigkeitsmessereinrichtung zwingend erforderlich, auch für das hohe Griffigkeitsniveau eine entsprechende Kontrollplatte vorzuhalten. Für den hohen Griffigkeitsmessbereich konnten je eine industriell hergestellte und eine natürliche Kalibrieroberfläche gefunden werden.

Im Rahmen der Arbeit wurde untersucht, welchen Einfluss die Asphaltzusammensetzung und die Probenvorbereitung auf die Griffigkeitswerte ausüben. Für die Asphaltarten SMA 8 S bzw. AC 11 D S konnte dabei festgestellt werden, dass hinsichtlich der Merkmale Bindemittelgehalt, Fülleranteil, Anteil an feinen bzw. groben Gesteinskörnungen und Grobkornanteil nur der Anteil an feiner Gesteinskörnung beim SMA 8 S einen signifikanten Einfluss auf die Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  ausübt. Es zeigte sich zudem, dass sich die Bindemittelrückstände durch die gemäß DIN EN 12697-49 [54] vorzunehmende Probenvorbereitung (Sandstrahlzyklus bei  $(+5 \pm 3) ^\circ\text{C}$  mit einer Zeitdauer von  $(120 \pm 10) \text{ s}$ ) nicht wie gefordert vollständig von der zu prüfenden Fläche entfernen lassen.

Um das Griffigkeitsverhalten einer Asphaltoberfläche zielsicher beschreiben zu können, ist eine praxisgerechte Probenvorbereitung erforderlich, welche die in situ vorhandene Oberflächenbeschaffenheit zum Prognosezeitpunkt im Labor so realitätsnah als möglich erzeugt. Es wurde deshalb die aktuell in DIN EN 12697-49 [54] beschriebene Probenvorbereitung zur Griffigkeitsprognose durch eine zusätzliche mechanische, physikalische bzw. chemische Beanspruchung angepasst bzw. modifiziert.

Die Auswertungen zu den unterschiedlich durchgeführten Beanspruchungsvarianten zeigen auf, dass sich der geforderte Oberflächenzustand erst durch eine mechanische Beanspruchung mittels zwei Sandstrahlzyklen (Strahldauer je Zyklus  $(120 \pm 10) \text{ s}$ ) bei  $(-20 \pm 3) ^\circ\text{C}$  erzeugen lässt. Wird diese als zielführend erachtete Probenvorbereitung angewendet, so kann der Bindemittelfilm von der Ober-

fläche der groben Gesteinskörnungen bei kurzen Strahldauern - verbunden mit einem geringeren Mörtelabtrag - vollständig entfernt werden.

Die Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  der so vorbereiteten Probekörper liegen für Bohrkerne und im Labor hergestellte Platten - trotz unterschiedlicher Art der Probekörperherstellung - auf einem nahezu identischen Niveau. Demzufolge können bereits im Vorfeld der Baumaßnahme an im Labor hergestellten Probekörpern mit ausreichender Sicherheit die Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  zielsicher ermittelt werden.

Für die Prognose der Griffigkeit ist es notwendig, den gesamten Verlauf der Griffigkeitsentwicklung einer Asphaltoberfläche bis zum Erreichen der „Endgriffigkeit“ zu erfassen. Hierfür sind Griffigkeitsmessungen in den Beanspruchungsstufen nach 4.500, 7.500, 15.000, 22.500, 30.000, 37.500, 45.000, 90.000, 135.000, 180.000, 225.000 und 270.000 Überrollungen durchzuführen [56]. Der so ermittelte kontinuierliche Griffigkeitsverlauf ist durch eine Logarithmusfunktion anzunähern und als Ergebnis ist die berechnete Endgriffigkeit  $PWS_{270}$  nach 270.000 Überrollungen anzugeben.

Die entwickelte Prüfsystematik liefert somit praxisgerechte und reproduzierbare Ergebnisse mit dem Prüfverfahren Wehner/Schulze. Die Bau- und Asphaltindustrie kann die Griffigkeit nach Polierung bereits in die Asphaltkonzeption integrieren und so zielsicher Asphalte herstellen.

## 13 Literatur

- [1] Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächen aus Asphalt (ZTV Asphalt-StB 07/13), Ausgabe 2007 / Fassung 2013 Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln – FGSV 799
- [2] Merkblatt zur Optimierung der Oberflächeneigenschaften von Asphaltdeckschichten (M OOA), Ausgabe 2010, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln – FGSV 768
- [3] DIN ISO 13473-2, Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen Teil 2: Begriffe und grundlegende Anforderungen für die Analyse von Fahrbahntexturprofilen (ISO 13473-2:2002)
- [4] Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau (TP Griff-StB) Teil Messverfahren SRT, Ausgabe 2004, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln - FGSV 408/2
- [5] Begriffsbestimmungen, Teil Straßenbautechnik, Ausgabe 2003, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln – FGSV 924
- [6] DIN EN ISO 13473-1, Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen - Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe (ISO 13473-1:1997); Deutsche Fassung EN ISO 13473-1:2004
- [7] Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau (TP Griff-StB), Teil Seitenkraftmessverfahren (SKM), Ausgabe 2007, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln – FGSV 408/1
- [8] Wörner, Th.; Westiner, E.; Böhnisch, S: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung des Polierwiderstandes von Sand, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 943 (2006)
- [9] Merkblatt zur Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe (M BGriff), Ausgabe 2012, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln – FGSV 401
- [10] Merkblatt für den Bau griffiger Asphaltdecksichten (M BgA), Ausgabe 2004, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln – FGSV 758
- [11] Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau (TP Asphalt-StB), Teil 35, Asphaltmischgutherstellung im Laboratorium, Ausgabe 2007, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln – FGSV 756
- [12] Bühlmann, F.: Einfluss der Witterung auf die Griffigkeit von Fahrbahnen, Mitteilung Nr. 55, Institut für Straßen-, Eisenbahn- und Felsbau der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Zürich 1985
- [13] Huschek, S.: Die Griffigkeitsprognose mit der Verkehrssimulation nach Wehner/Schulze, Bitumen, 64 Jahrgang, Heft 1, März 2002, Seite 15-18
- [14] Zipkes E.: Über das Leistungsvermögen einer Straßenoberfläche und ihres Angebots im Adhäsionsbereich, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik Nr. 2/1983
- [15] DIN 32645:2008-11, Titel: Chemische Analytik - Nachweis-, Erfassungs- und Bestimmungsgrenze unter Wiederholbedingungen - Begriffe, Verfahren, Auswertung; Beuth Verlag
- [16] DIN EN 13108, Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Teil 1, 5, 6 und 7, Beuth Verlag
- [17] Dames J.: Untersuchungen an die Sandpolierprüfung in Anlehnung an BS 812, Schlussbericht zu FE-Nr. 06.068/1996/CGB, Berlin
- [18] Huschek, S.: Entwicklung der Oberflächeneigenschaften auf der Versuchsstrecke Bamberg A 70 – Messtechnische Erfassung 1999 – 2001, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn, 2004
- [19] Schellenberg, K.: Abschließende Messungen auf der bestehenden Sandversuchsstrecke im Zuge der B14, Umgehung Rottweil. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 966, Bonn 2007

- 
- [20] Dames, J., Huschek, S., Lindner, J.: Untersuchungen über den Einfluss unterschiedlicher Mineralstoffe auf das Gebrauchsverhalten von Asphaltdeckschichten hinsichtlich Griffigkeit, Querebenheit und Reifengeräusche. Straßenbau und Straßenbautechnik, Heft 754, 1997
- [21] Ballmann, P.: Einfluss unterschiedlicher Sande auf die Griffigkeit von Fahrbahnen aus Asphaltbeton (Versuchsstrecke Rottweil). Interner BAST-Bericht vom November 1999
- [22] Litzka, J.; Pfeifer, A.; Zieger, F.: Einfluss des Sandes auf das Griffigkeitsverhalten bituminöser Decken. Straßenforschung, Heft 534, Wien 2003
- [23] Kirchmaier L.: Einfluss feiner Gesteinskörnungen auf die Griffigkeit von Deckschichten im Straßenbau, Wien 2011
- [24] Patzak, Th.: Einfluss der feinen Gesteinskörnungen auf die Griffigkeitsentwicklung von Asphaltdeckschichten. Diplomarbeit an der Hochschule Anhalt (FH), 2009
- [25] Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau (TL Min-StB 94), Ausgabe 1994, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln - FGSV 613
- [26] Änderung und Ergänzung der Technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau, Ausgabe 1994, TL Min-StB 94 Bekanntmachung der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern vom 26. Juni 1996 Az.: IID9-43432-004/92
- [27] Änderungen und Ergänzungen Ausgabe 1998 zu den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt, Ausgabe 1994, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln – FGSV 799/1
- [28] Änderung und Ergänzung der Zusätzlichen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt, Ausgabe 1994, ZTV Asphalt-StB 94 mit Änderungen und Ergänzungen, Ausgabe 1998, Bekanntmachung der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern vom 24. Februar 1999 Az.: IID9-43415-006/94
- [29] Änderung und Ergänzung der Zusätzlichen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt, Ausgabe 2001, ZTV Asphalt-StB 01 Bekanntmachung der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern vom 12. Juni 2002 Az.: IID9-43415-006/94
- [30] Änderung und Ergänzung der Technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau, Ausgabe 2000, TL Min-StB 2000 Bekanntmachung der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern vom 12. Juni 2002, Nr.: IID9-43432-004/92
- [31] Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB 04), Ausgabe 2004, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln – FGSV 613
- [32] Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau (TL Min-StB 2000), Ausgabe 2000; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln – FGSV 699
- [33] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt (ZTV Asphalt-StB 01), Ausgabe 2001 mit Einarbeitung der Änderungen und Ergänzungen (aus ARS Nr. 28/2001, ARS Nr. 34/2001, ARS Nr. 2/2002, ARS Nr. 24/2003, RS vom 2.9.2003, ARS Nr. 19/2004 und ARS Nr.9/2005, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln – FGSV 799
- [34] Änderung in Technischen Regelwerken für den Bau von Straßen (ZTV Asphalt-StB 01, ZTV BEA-StB 98/03, ZTV T-StB 95, TL G Asphalt-StB 01 sowie ZTV Beton-StB 01) Bekanntmachung der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern vom 12. Dezember 2005 Az.: IID9-43415-006/94 mit den Änderungen der Bekanntmachungen vom 14.02.2006
- [35] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächen aus Asphalt (ZTV Asphalt-StB 07), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2007, Köln - FGSV 799
- [36] Merkblatt für die Herstellung von Oberflächentexturen auf Fahrbahndecken aus Beton (M OB), Ausgabe 2009, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln - FGSV 829

- 
- [37] Änderung und Ergänzung der Technischen Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen, Ausgabe 2007, TL Asphalt-StB 07 Bekanntmachung der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern vom 8. April 2009 Az.: IID9-43434-001/09
- [38] Änderung und Ergänzung der Technischen Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen, Ausgabe 2007, Fassung 2013, TL Asphalt-StB 07/13 Bekanntmachung der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern vom 24. April 2008, Az.: IID9-43434-001/08
- [39] Änderung und Ergänzung der Technischen Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen, Ausgabe 2007, TL Asphalt-StB 07 Bekanntmachung der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern vom 10. November 2008, Az.: IID9-43434-001/08 in der Fassung vom 11. März 2011
- [40] Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen, Ausgabe 2007, (TL Asphalt-StB 07), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln –FGSV 797
- [41] Huschek, S.: Anforderungen an die Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen – Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe, Straße und Autobahn, Heft 720, 1996
- [42] Huschek, S.: Polierwiderstand und Griffigkeit- Langzeiterfahrungen; Straße und Autobahn, Heft 9/2004 S. 492-498
- [43] DIN CEN/TS 12390-9: Prüfung von Festbeton - Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand - Abwitterung, Vornorm, August 2006.
- [44] Arbeitsanleitung für Griffigkeitsmessungen mit dem LFC-Messverfahren (Grip Tester), Ausgabe 2015, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln - FGSV 411
- [45] Feix, R.: Einfluss der Schlagfestigkeit von Splitten auf das Verhalten in bituminösen Fahrbahnbelägen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 260. BMV. 1978.
- [46] DIN EN 13036-3: Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen - Prüfverfahren – Teil 3: Messung der horizontalen Entwässerung von Deckschichten: Ausgabe 2003, Beuth Verlag
- [47] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen (ZTV ZEB-StB), Ausgabe 2006, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln – FGSV 998
- [48] Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 12), Ausgabe 2012, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln – FGSV 499
- [49] Schniering, A.: Erhaltung von Asphaltstraßen; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Deutscher Straßenkongress München 1982, S. 53 – 57; Köln; 1983
- [50] Änderung und Ergänzung zu den Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt, Ausgabe 2007, Fassung 2013, ZTV Asphalt-StB 07/13 Bekanntmachung der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern für Bau und Verkehr vom 24. April 2014 Az.: IID9-43415-004/08
- [51] Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TP Gestein-StB) Teil 5.4.1: Bestimmung des Polierwertes (Polished Stone Value - PSV), Ausgabe 2015, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln – FGSV 610
- [52] Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen Teil 8: Bestimmung des Polierwertes Deutsche Fassung EN 1097-8 :2009
- [53] Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TP Gestein-StB) Teil 5.4.3: Bestimmung des Polierwertes von feinen Gesteinskörnungen ( $PSV_{fGK}$ ), Ausgabe 2008, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln – FGSV 610
- [54] DIN EN 12697: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 49: Messung der Griffigkeit nach Polierung; Deutsche Fassung EN 12697-49:2014

- 
- [55] Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TP Gestein-StB) Teil 5.4.2: Bestimmung des Polierwertes mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze (PWS), Ausgabe 2008, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln - FGSV 610
- [56] Technische Prüfvorschrift: Bestimmung der Griffigkeitsentwicklung von Oberflächen mit dem Prüfverfahren Wehner/Schulze (PWS), Entwurf, Köln: FGSV; Ausgabe 2009
- [57] DIN EN 13036-1: Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen - Prüfverfahren – Teil 1: Messung der Makrotexturtiefe der Fahrbahnoberfläche mit Hilfe eines volumetrischen Verfahrens; Deutsche Fassung, 2010
- [58] Beckmann, L.: Zur Bewertung der Griffigkeit von nassen Straßenoberflächen – II. Teil: Relative Unfallhäufigkeit bei Nässe; in: Straße und Autobahn 15 (1964), Nr. 6, S 205 - 210
- [59] Schulze, K.-H.; Dames, J.; und Lange, H.: Untersuchungen über die Verkehrssicherheit bei Nässe, Forschung Straßenbau und Straßenbautechnik, Heft 189, 1975.
- [60] Kendziorra, N.; Wies, B.; Schulze, C.; Steinauer, B.; Meyer, A.; Ueckermann, A.: Integrale Betrachtung der Fahrbahngriffigkeit aus Reifen / Fahrbahnansicht. VDI-Berichte, Nr. 2089, Düsseldorf 2009
- [61] Potschka, V.: Die Bedeutung der Straßenoberflächeneigenschaften für die Verkehrssicherheit; in: Straßen- und Tiefbau 42 (1988), Nr. 10, S. 20 – 25
- [62] Steinauer, B.; Mayer, G.; van der Sluis, S.; Platen, C.: Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen, Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik, Heft 841, Bonn 2002
- [63] Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 27/1996, Sachgebiet 4.6: Straßenbefestigung; Straßenerhaltung, Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) der Straßenbefestigungen von Bundesfernstraßen, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn 1996
- [64] Wörner, Th., Neidinger, S., Westiner, E.: Granulometrische Eigenschaften von feinen Gesteinskörnungen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1100, Bonn 2013
- [65] Wehner, B.: Veränderungen der Straßenoberfläche durch Verkehr und Witterung insbesondere der Straßengriffigkeit, Der Bauingenieur 40, Heft 1, 1965
- [66] Wehner, B.: Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, Beitrag 26 zu: Internationales Colloquium über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, Juni 1968 TU Berlin
- [67] Schulze, K.-H.: Typen der Oberflächenfeingestalt und ihre Wirkung auf den Reibungswiderstand bei Nässe, Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, Beitrag 15 zu: Internationales Colloquium über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, Juni 1968 TU Berlin
- [68] Huschek, S.; Dames J.; Lindner J.: Ermittlung der Endpolierwerte von im Straßenbau verwendeten Gesteinen, Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik, Heft 574 BMV, 1989
- [69] Böhnisch, S.; Wörner, Th.: Untersuchung zur Qualifizierung von Geräten zur Prognose von Griffigkeitsmesswerten – Vorstudie. Schlussbericht F-5013 zum Forschungsauftrag FGSV-Nr. 5/ 2002, München, 2003
- [70] Wörner, Th.; Wenzl, P.; Schmalz, M.; Bösel, P.: Bewertungshintergrund für Verfahren zur Griffigkeitsprognose, Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik, Heft 1044 BMVBW, 2010
- [71] Design Manual for Roads and Bridges, Vol. 7, Pavement Design and Maintenance, Skidding Resistance; HD 28/04; The Department of Transport (GB) 2004.
- [72] Hosking, JR.; Woodford, GC.: Measurement of Skidding Resistance Part II: Factors Affecting the Slipperiness of a Road Surface; TRL-Report LR 738, 1976
- [73] Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TP Gestein-StB), Teil 4.3.3: Bestimmung der Kornform von feinen Gesteinskörnungen durch Stabsiebung – Plattigkeitskennzahl, Ausgabe 2015, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln – FGSV 610
- [74] Begriffsbestimmungen, Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb, Ausgabe 2012, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln – FGSV 220

- 
- [75] Theodore Wilbur Anderson, Donald Allan Darling: Asymptotic Theory of Certain "Goodness of Fit" Criteria Based on Stochastic Processes. In: *Annals of Mathematical Statistics*. 23(2)/1952, Institute of Mathematical Statistics, ISSN 0003-4851, S. 193–212
- [76] Frank E. Grubbs: Sample Criteria for Testing Outlying Observations. In: *The Annals of Mathematical Statistics*. Band 21, Nr. 1, 1950, S. 27–58, doi:10.1214/aoms/1177729885.
- [77] Roos, R. et al: Schlussbericht: Repräsentative Ermittlung der performance-relevanten Asphalteigenschaften als Grundlage neuer Vertragsbedingungen FE-Vorhaben 07.0253/2011/ERB im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 14. August 2015
- [78] Patzak, Th.; Paper: Friction of different surface courses, Id: 256; 6th Euroasphalt & Eurobitume Congress Prag, vom 01.06 bis 03.06.2016
- [79] Patzak, Th.; Wörner, Th.: Auswertung der Griffigkeitsmessdaten aus der laufenden Straßenzustandserfassung zur Erweiterung des bisherigen Erfahrungshintergrundes im Hinblick auf den Widerstand gegen Polieren von feinen Gesteinskörnungen im Auftrag des Freistaats Bayern vertreten durch die Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, 29 Juli 2012
- [80] Prüfbericht-Nr.: 6/3554/2016, HNL, „Projekt – über die statistischen Auswertung von Griffigkeitsversuchen“, 29.08.2016, unveröffentlicht
- [81] Änderung und Ergänzung der Technischen Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen, Ausgabe 2007, Fassung 2013, TL Asphalt-StB 07/13 Bekanntmachung der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern vom 29. August 2016, Az.: IID9-43434-001/08
- [82] DIN EN 13108: Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen - Teil 1: Asphaltbeton; Deutsche Fassung EN 13108-1:2016
- [83] DIN EN 13108: Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen - Teil 5: Splittmastixasphalt; Deutsche Fassung EN 13108-5:2016
- [84] DIN EN 13108: Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen - Teil 6: Gussasphalt; Deutsche Fassung EN 13108-6:2016
- [85] Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen, Ausgabe 2007, Fassung 2013 (TL Asphalt-StB 07/13), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln –FGSV 797
- [86] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt (ZTV Asphalt-StB 01), Ausgabe 2001, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln - FGSV 799
- [87] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton (ZTV Beton-StB 01), Ausgabe 2001, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln –FGSV 899
- [88] Änderung und Ergänzung der Technischen Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen, Ausgabe 2007, TL Asphalt-StB 07 Bekanntmachung der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern vom 10. November 2008 Az.: IID9-43434-001/08
- [89] DIN ISO 5725-1:1997-11, Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Meßverfahren und Meßergebnissen - Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Begriffe, (ISO 5725-1:1994)

---

## Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 2-1: Einflüsse der physikalischen Eigenschaften auf die funktionalen Eigenschaften [2]
- Abbildung 2-2: Texturlängenspektrum der Fahrbahnoberfläche und ihre Auswirkungen [2]
- Abbildung 2-3: Auswirkungen der Oberflächenstruktur auf die Höhe des Reibungskoeffizienten nach [14]
- Abbildung 2-4: Verlauf der Griffigkeitseigenschaften einer in England mit der SCRIM untersuchten Fahrbahnoberfläche über einen Messzeitraum von 12 Jahren [nach 72 aus 71]
- Abbildung 2-5: Häufigkeitsverteilung der Griffigkeitskennwerte im Straßennetz aus [59]
- Abbildung 2-6: Anzahl der Unfälle für fünf verschiedene Griffigkeitsklassen aus [49, 61]
- Abbildung 2-7: Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein einer Nass-Unfallhäufungsstelle in Abhängigkeit von der Griffigkeit des rechten Fahrstreifens [62]
- Abbildung 2-8: Entwicklung der Anforderungen an den Widerstand gegen Polieren an Gesteinskörnungen für die Verwendung in Asphaltbetonen für Deckschichten und Splittmastixasphalte
- Abbildung 3-1: Prüfgerät Wehner/Schulze, cbm
- Abbildung 3-2: Kalibriervorgang auf der Glasplatte, cbm
- Abbildung 3-3: Detail Polierrollen mit Profilrillen, cbm
- Abbildung 3-4: Messkopf (Griffigkeitsmessung), cbm
- Abbildung 3-5: Schema der Griffigkeitsmessung, Formelmäßiger Zusammenhang
- Abbildung 3-6: Reibungsverlauf einer Einzelmessung
- Abbildung 3-7: Näherung Polynom 6ten Grades
- Abbildung 3-8: Oberflächen bzw. Oberflächenstrukturen von Messgummis
- Abbildung 3-9: Beanspruchungsstufe / Griffigkeitszustand
- Abbildung 3-10: Logarithmische Regressionskurve des kontinuierlichen Griffigkeitsverlaufs
- Abbildung 4-1: Untersuchungsprogramm für die Entwicklung einer praxisgerechten Probenvorbereitung
- Abbildung 5-1: Darstellung der Griffigkeiten nach 90.000 ( $PWS_{90}$ ) bzw. 270.000 Überrollungen ( $PWS_{270}$ ) an Asphaltdeckschichten gruppiert nach Asphalten für alle Untersuchungsstrecken in Anlehnung an [77]
- Abbildung 5-2: Darstellung der mittleren Profiltiefen  $MPD_0$  (sandgestrahlter Zustand) bzw. nach 270.000 Überrollungen  $MPD_{270}$  an Asphaltdeckschichten gruppiert nach Asphalten für alle Untersuchungsstrecken in Anlehnung an [77]
- Abbildung 5-3: Darstellung der Griffigkeiten nach 90.000 Überrollungen ( $PWS_{90}$ ) an Asphaltdeckschichten gruppiert nach Asphalten [77]
- Abbildung 5-4: Darstellung der Griffigkeiten nach 270.000 Überrollungen ( $PWS_{270}$ ) an Asphaltdeckschichten gruppiert nach Asphalten [77]
- Abbildung 5-5: Darstellung der mittleren Profiltiefen  $MPD_0$  (sandgestrahlter Zustand) an Asphaltdeckschichten gruppiert nach Asphalten [77]
- Abbildung 5-6: Darstellung der mittleren Profiltiefen  $MPD_{270}$  (nach 270.000 Überrollungen) an Asphaltdeckschichten gruppiert nach Asphalten
- Abbildung 5-7: Korrelation der Griffigkeitswerte nach 90.000 und 270.000 Überrollungen für die Phasen EP, MW und BK
- Abbildung 5-8: Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  der Strecken mit SMA 8 S
- Abbildung 5-9: Prüfkörperoberflächen der Strecke 4, Phase MW, bei 0 und 270.000 Überrollungen

- 
- Abbildung 5-10: Mittlere Profiltiefe  $MPD_0$  der Strecken mit SMA 8 S (sandgestrahlter Zustand)
- Abbildung 5-11: Vergleich  $\mu_{PWS}$  der Phase BK und  $\mu_{SKM}$  der Splittmastixasphalte (aufsteigend sortiert)
- Abbildung 5-12: Korrelation  $\mu_{SKM}$  mit  $\mu_{PWS}$
- Abbildung 5-13: Mittlere Profiltiefen, Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  und Griffigkeitsverlauf PWS der Strecke 9 für die Probekörper in den Phasen BK-3J und BK
- Abbildung 6-1: Exemplarisches Beispiel eines linearen Zusammenhangs der mit dem Messgerät ermittelten Reibungskoeffizienten  $\mu_m$  in Abhängigkeit der Referenzwerte  $\mu_{ref}$
- Abbildung 6-2: Graphische Darstellung der jeweils 21 gemessenen Reibungskoeffizienten  $\mu_m$  der fünf Messgummisätze, auf der Kontrollplatte „CC 6,5 mm, normal“
- Abbildung 6-3: Boxplot-Diagramme der Reibungskoeffizienten  $\mu_m$  unterteilt für die fünf Messgummisätze
- Abbildung 6-4: Dichtefunktion der Normalverteilung für die Reibungskoeffizienten  $\mu_m$
- Abbildung 6-5: Summenkurve (Wahrscheinlichkeit) der Normalverteilung für die Reibungskoeffizienten  $\mu_m$
- Abbildung 7-1: Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  der Asphaltvariationen SMA 8 S
- Abbildung 7-2: Griffigkeitsverlauf PWS der Asphaltvariationen SMA 8 S
- Abbildung 7-3: logarithmischer Griffigkeitsverlauf PWS der Asphaltvariationen SMA 8 S
- Abbildung 7-4: Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  der Asphaltvariationen AC 11 D S
- Abbildung 7-5: halblogarithmischer Griffigkeitsverlauf PWS der Asphaltvariationen AC 11 D S
- Abbildung 8-1: Prüfkörperoberflächen SMA 8 S bzw. AC 11 D S nach einem Sandstrahlzyklus bei  $(5 \pm 3)^\circ\text{C}$
- Abbildung 8-2: Mittlere Profiltiefen MPD für die unterschiedlichen Oberflächenzustände der Strecken 9 und 14
- Abbildung 8-3: Veränderung der mittleren Profiltiefen MPD und des Masseverlusts in Abhängigkeit der Anzahl der Sandstrahlzyklen, bei verschiedenen Lagerungstemperaturen
- Abbildung 8-4: Korrelation zwischen mittleren Profiltiefe MPD und Masseverlusten für SMA 8 S und AC 11 D S
- Abbildung 8-5: Prüfkörperoberflächen SMA 8 S bzw. AC 11 D S nach einem, zwei bzw. drei Sandstrahlzyklen bei  $(+5 \pm 3)$  bzw. nach zwei Zyklen bei  $(-20 \pm 3)^\circ\text{C}$
- Abbildung 8-6: Mittlere Profiltiefen MPD, Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  und Griffigkeitswerte PWS der Versuchsserien
- Abbildung 9-1: Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  und Griffigkeitsverlauf PWS, SMA 8 S der Strecke 9
- Abbildung 9-2: Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  und Griffigkeitsverlauf PWS, AC 11 D S der Strecke 14

---

## Tabellenverzeichnis

- Tabelle 2-1: Griffigkeitsmessverfahren für Asphaltoberflächen bzw. Gesteinskörnungen
- Tabelle 3-1: Definition der Beanspruchungsstufen ([0] bis [4])
- Tabelle 5-1: Asphaltzusammensetzung und Endgriffigkeiten SMA 8 S
- Tabelle 5-2: Ergebnisse der statistischen Analyse Griffigkeitswert  $\mu_{PWS270}$  nach 270.000 Überrollungen an SMA 8 S [77]
- Tabelle 5-3: Ergebnisse der statistischen Analyse Griffigkeitswert  $\mu_{PWS270}$  nach 270.000 Überrollungen an SMA 8 S nach Ausschluss der Ausreißer [77]
- Tabelle 5-4: DTV<sup>(KFZ)</sup> bzw. DTV<sup>(SV)</sup>,  $\mu_{SKM}$  und  $\mu_{PWS}$  der sieben Untersuchungsstrecken
- Tabelle 6-1: Zusammenstellung der Eigenschaften der untersuchten natürlich und industriell hergestellten Kalibrieroberflächen (Auszug)
- Tabelle 6-2: Einfache Varianzanalyse (Anova) für die jeweils 21 ermittelten Reibungskoeffizienten  $\mu_m$  der fünf Messgummisätze, auf der Kontrollplatte „CC 6,5 mm, normal“
- Tabelle 7-1: Toleranzen für SMA 8 S und AC 11 D S gemäß den ZTV Asphalt-StB 07/13
- Tabelle 7-2: Zusammenstellung der Asphaltvariationen für die Asphaltarten SMA 8 S und AC 11 D S
- Tabelle 7-3: Asphaltzusammensetzung der Asphaltvariationen für die Asphaltart SMA 8 S
- Tabelle 7-4: Griffigkeitswerte und mittlere Profiltiefe der Asphaltvariationen SMA 8 S nach 0, 180.000 bzw. 270.000 Überrollungen
- Tabelle 7-5: Wiederhol- und Vergleichpräzision (Erfahrungswerte) gemäß den DIN EN 12697-49
- Tabelle 7-6: Asphaltzusammensetzung der Asphaltvariationen für die Asphaltart AC 11 D S
- Tabelle 7-7: Griffigkeitswerte und mittlere Profiltiefe der Asphaltvariationen SMA 8 S nach 0, 180.000 bzw. 270.000 Überrollungen
- Tabelle 7-8: Ergebnisse der statistischen Analyse Griffigkeitswert  $\mu_{PWS}$  nach 270.000 Überrollungen an Asphaltvariationen des SMA 8 S (Strecke 9)
- Tabelle 7-9: Ergebnisse der statistischen Analyse Griffigkeitswert  $\mu_{PWS}$  nach 270.000 Überrollungen an Asphaltvariationen des AC 11 D S (Strecke 14)
- Tabelle 8-1: Bezeichnung der Versuchsserien
- Tabelle 8-2: Masse des abgewitterten Materials  $m_{s,n}$  bzw. des aufsummierten Masseverlusts  $m_{v,n}$  bei steigender Anzahl an Frost-Tau-Wechseln
- Tabelle 8-3: Bezeichnung der Versuchsserien
- Tabelle 9-1: Zusammenstellung der Griffigkeiten  $\mu_{PWS}$  nach 180.000 bzw. 270.000 Überrollungen für die untersuchten Phasen des SMA 8 S
- Tabelle 9-2: Zusammenstellung der Bestimmtheitsmaße und der Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  für die untersuchten Phasen des SMA 8 S
- Tabelle 9-3: Ergebnisse der statistischen Analyse Griffigkeitswert  $\mu_{PWS270}$  nach 270.000 Überrollungen an SMA 8 S, Strecke 9, nach zielführender Probenvorbereitung aus [80]
- Tabelle 9-4: Zusammenstellung der Griffigkeiten  $\mu_{PWS}$  nach 180.000 bzw. 270.000 Überrollungen für die untersuchten Phasen des AC 11 D S
- Tabelle 9-5: Zusammenstellung der Bestimmtheitsmaße und der Endgriffigkeiten  $PWS_{270}$  für die untersuchten Phasen des AC 11 D S

# Anhang

Anhang A: Bewertungshintergrund

Anhang B: Kontrollplatten

Anhang C: Variationen in der Asphaltzusammensetzung

Anhang D: Probekörpervorbereitung

Anhang E: Griffigkeitsprognose mit der neu entwickelten Oberflächenbeanspruchung

Überrollungen	Strecke 1 - MPD [mm]		Strecke 2 - MPD [mm]		Strecke 3 - MPD [mm]		Strecke 4 - MPD [mm]		Strecke 5 - MPD [mm]		Strecke 6 - MPD [mm]		Strecke 7 - MPD [mm]	
	Phase EP	Phase BK												
Original	1,11	0,78	0,85	0,37	0,69	0,42	0,49	0,77	0,41	0,49	0,74	0,55	1,20	1,17
0	1,10	0,78	1,04	0,30	0,66	0,43	0,59	0,73	0,41	0,57	0,69	0,64	1,14	1,28
4500	0,98	0,67	0,98	0,29	0,62	0,36	0,53	0,69	0,32	0,54	0,70	0,64	1,10	1,24
7500	0,98	0,64	0,97	0,31	0,59	0,35	0,53	0,69	0,32	0,53	0,69	0,66	1,11	1,23
15000	0,97	0,63	0,97	0,30	0,60	0,33	0,52	0,68	0,32	0,54	0,71	0,65	1,09	1,23
22500	0,95	0,63	0,94	0,29	0,59	0,34	0,52	0,67	0,32	0,53	0,70	0,66	1,10	1,22
30000	0,95	0,63	0,94	0,30	0,59	0,33	0,52	0,67	0,32	0,52	0,71	0,67	1,11	1,23
37500	0,96	0,62	0,93	0,29	0,56	0,33	0,52	0,65	0,31	0,53	0,72	0,66	1,09	1,23
45000	0,96	0,63	0,91	0,29	0,56	0,30	0,51	0,67	0,31	0,52	0,69	0,66	1,09	1,22
90000	0,93	0,57	0,91	0,30	0,57	0,32	0,51	0,67	0,31	0,53	0,70	0,65	1,06	1,23
135000	0,93	0,57	0,90	0,29	0,56	0,32	0,51	0,66	0,30	0,52	0,68	0,65	1,04	1,23
180000	0,91	0,55	0,91	0,30	0,53	0,32	0,49	0,64	0,30	0,53	0,69	0,65	1,04	1,21
225000	0,90	0,57	0,90	0,29	0,55	0,32	0,48	0,65	0,29	0,53	0,69	0,64	1,02	1,18
270000	0,92	0,57	0,89	0,29	0,54	0,31	0,48	0,63	0,29	0,52	0,69	0,63	1,03	1,17

Überrollungen	Strecke 8 - MPD [mm]		Strecke 9 - MPD [mm]		Strecke 10 - MPD [mm]		Strecke 11 - MPD [mm]		Strecke 12 - MPD [mm]		Strecke 13 - MPD [mm]		Strecke 14 - MPD [mm]	
	Phase EP	Phase BK	Phase EP	Phase BK	Phase EP	Phase BK	Phase EP	Phase BK	Phase EP	Phase BK	Phase EP	Phase BK	Phase EP	Phase BK
Original	0,80	0,73	0,74	0,85	0,49	0,79	0,48	0,85	0,50	0,56	0,90	0,79	0,86	0,87
0	0,67	0,72	0,82	0,78	0,58	0,82	0,79	0,71	0,47	0,65	0,74	0,85	0,79	0,64
4500	0,61	0,68	0,79	0,74	0,53	0,74	0,75	0,61	0,40	0,58	0,65	0,74	0,75	0,83
7500	0,60	0,58	0,79	0,74	0,53	0,73	0,73	0,61	0,40	0,58	0,64	0,73	0,74	0,83
15000	0,60	0,55	0,80	0,71	0,55	0,71	0,75	0,62	0,38	0,57	0,64	0,71	0,75	0,80
22500	0,62	0,56	0,78	0,77	0,52	0,68	0,73	0,62	0,38	0,56	0,64	0,68	0,74	0,80
30000	0,59	0,54	0,77	0,76	0,52	0,69	0,75	0,61	0,37	0,54	0,61	0,69	0,74	0,80
37500	0,60	0,52	0,77	0,77	0,52	0,68	0,72	0,60	0,37	0,53	0,60	0,68	0,72	0,80
45000	0,60	0,51	0,78	0,73	0,53	0,67	0,71	0,58	0,37	0,54	0,62	0,67	0,71	0,80
90000	0,59	0,50	0,76	0,72	0,50	0,65	0,70	0,59	0,36	0,53	0,62	0,65	0,70	0,79
135000	0,60	0,49	0,76	0,71	0,50	0,64	0,70	0,57	0,36	0,52	0,60	0,64	0,70	0,77
180000	0,58	0,49	0,76	0,72	0,51	0,65	0,71	0,57	0,35	0,53	0,60	0,65	0,71	0,75
225000	0,55	0,49	0,76	0,72	0,50	0,69	0,68	0,55	0,33	0,52	0,61	0,67	0,68	0,75
270000	0,56	0,48	0,74	0,70	0,49	0,68	0,68	0,53	0,34	0,51	0,61	0,67	0,63	0,73

Überrollungen	Strecke 15 - MPD [mm]		Strecke 16 - MPD [mm]		Strecke 17 - MPD [mm]		Strecke 18 - MPD [mm]		Strecke 19 - MPD [mm]		Strecke 20 - MPD [mm]		Strecke 21 - MPD [mm]	
	Phase EP	Phase BK												
Original	0,21	0,19	0,23	0,42	0,62	0,58	0,71	0,56	0,57	0,96	0,73	0,49	0,69	0,70
0	0,31	0,35	0,42	0,35	0,61	0,60	0,97	0,49	0,49	1,07	0,88	0,48	0,73	0,93
4500	0,30	0,33	0,41	0,25	0,55	0,56	0,82	0,42	0,45	0,98	0,78	0,47	0,71	0,90
7500	0,30	0,32	0,39	0,23	0,54	0,54	0,81	0,42	0,44	0,95	0,78	0,46	0,70	0,89
15000	0,30	0,32	0,39	0,25	0,55	0,52	0,81	0,41	0,42	0,97	0,78	0,45	0,69	0,89
22500	0,29	0,31	0,38	0,25	0,56	0,54	0,78	0,41	0,41	0,97	0,79	0,46	0,68	0,88
30000	0,29	0,31	0,39	0,23	0,55	0,53	0,81	0,37	0,41	0,99	0,77	0,46	0,70	0,88
37500	0,30	0,32	0,39	0,26	0,53	0,55	0,82	0,39	0,41	0,97	0,76	0,47	0,69	0,87
45000	0,30	0,31	0,37	0,24	0,53	0,54	0,80	0,39	0,42	0,95	0,78	0,47	0,69	0,87
90000	0,29	0,29	0,36	0,24	0,52	0,55	0,81	0,37	0,40	0,90	0,77	0,47	0,71	0,87
135000	0,29	0,30	0,38	0,23	0,53	0,52	0,81	0,36	0,39	0,88	0,75	0,46	0,68	0,86
180000	0,30	0,30	0,38	0,27	0,53	0,53	0,78	0,36	0,38	0,93	0,75	0,46	0,68	0,87
225000	0,29	0,31	0,38	0,24	0,53	0,51	0,80	0,37	0,40	0,89	0,75	0,46	0,68	0,85
270000	0,29	0,30	0,37	0,24	0,53	0,50	0,79	0,34	0,40	0,86	0,70	0,46	0,67	0,85

Anhang A1: Mittlere Profiltiefen (MPD) der Strecken 1 bis 21 in den Phasen EP, MW und BK

AC 11 D S				einfache Varianz- analyse	LSD-Test						multiple Varianzanalyse			
µ <sub>PWS</sub> nach 270.000 Über-	7	AC 11 D S	25/55-55 A		signifi.	Ranking der homogenen Gruppen						Phase	Verwerf.	%
						1. Gruppe		2. Gruppe		3. Gruppe				
	10	AC 11 D S	25/55-55 A	signifi.								nein	-	
	14	AC 11 D S	25/55-55 A	signifi.								ja	43,87	
												Phase/ Strecke	ja	51,72
												Fehler		4,41

Anhang A2: Ergebnisse der stat. Analyse Griffigkeitswert  $\mu_{PWS}$  nach 270.000 Überrollungen an AC 11 D S aus [77]

Überrollungen	Strecke 8 - BK-3J			Strecke 9 - BK-3J			Strecke 10 - BK-3J			Strecke 11 - BK-3J		
	µ <sub>PWS</sub>	PWS	MPD	µ <sub>PWS</sub>	PWS	MPD	µ <sub>PWS</sub>	PWS	MPD	µ <sub>PWS</sub>	PWS	MPD
Original	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
0	0,387	0,407	0,51	0,385	0,396	0,77	0,436	0,434	0,48	0,360	0,374	0,53
4500	0,344	0,315	0,52	0,344	0,320	0,77	0,369	0,367	0,48	0,320	0,290	0,54
7500	0,331	0,309	0,52	0,320	0,316	0,76	0,359	0,363	0,50	0,306	0,285	0,51
15000	0,315	0,302	0,51	0,310	0,310	0,77	0,353	0,357	0,50	0,290	0,278	0,51
22500	0,303	0,297	0,51	0,303	0,306	0,75	0,351	0,354	0,49	0,280	0,274	0,51
30000	0,296	0,294	0,50	0,297	0,303	0,75	0,350	0,352	0,50	0,274	0,271	0,51
37500	0,291	0,291	0,50	0,292	0,301	0,77	0,349	0,350	0,49	0,270	0,269	0,51
45000	0,287	0,289	0,51	0,290	0,300	0,74	0,346	0,348	0,49	0,265	0,267	0,49
90000	0,272	0,282	0,51	0,285	0,294	0,74	0,343	0,343	0,47	0,256	0,260	0,50
135000	0,266	0,277	0,51	0,277	0,290	0,75	0,342	0,339	0,47	0,255	0,256	0,49
180000	0,259	0,274	0,51	0,272	0,287	0,73	0,341	0,337	0,46	0,252	0,253	0,50
225000	0,257	0,272	0,48	0,278	0,285	0,72	0,337	0,335	0,46	0,250	0,251	0,48
270000	0,252	0,270	0,48	0,274	0,284	0,72	0,335	0,334	0,45	0,243	0,249	0,48

Überrollungen	Strecke 12 - BK-3J			Strecke 13 - BK-3J			Strecke 14 - BK-3J		
	µ <sub>PWS</sub>	PWS	MPD	µ <sub>PWS</sub>	PWS	MPD	µ <sub>PWS</sub>	PWS	MPD
Original	--	--	--	--	--	--	--	--	--
0	0,387	0,395	0,52	0,319	0,313	0,44	0,441	0,455	0,30
4500	0,322	0,311	0,53	0,263	0,262	0,45	0,360	0,338	0,34
7500	0,311	0,306	0,55	0,256	0,259	0,43	0,348	0,330	0,35
15000	0,299	0,299	0,54	0,243	0,255	0,42	0,331	0,321	0,34
22500	0,295	0,295	0,53	0,240	0,253	0,42	0,321	0,315	0,34
30000	0,288	0,292	0,53	0,237	0,251	0,42	0,314	0,311	0,34
37500	0,282	0,290	0,53	0,235	0,250	0,43	0,308	0,308	0,33
45000	0,279	0,288	0,54	0,235	0,249	0,41	0,303	0,305	0,35
90000	0,275	0,281	0,53	0,245	0,244	0,41	0,290	0,296	0,34
135000	0,266	0,277	0,52	0,243	0,242	0,40	0,285	0,290	0,32
180000	0,264	0,274	0,51	0,243	0,240	0,40	0,279	0,286	0,33
225000	0,260	0,272	0,52	0,243	0,239	0,40	0,277	0,283	0,34
270000	0,259	0,270	0,51	0,244	0,238	0,39	0,271	0,280	0,33

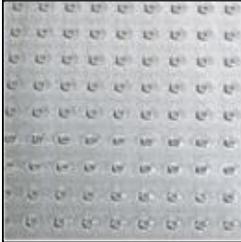
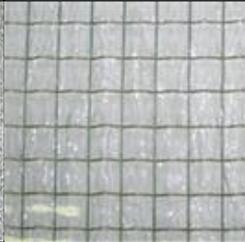
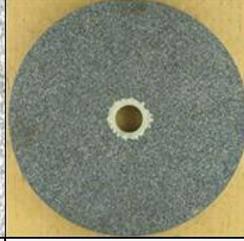
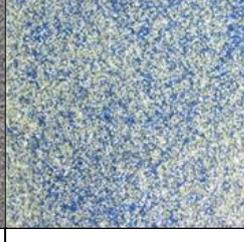
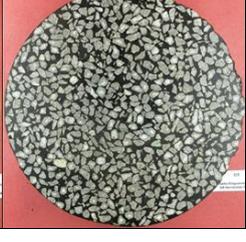
Anhang A3: Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  bzw. PWS und mittlere Profiltiefen (MPD) der Strecke 8 bis 14 in der Phase BK-3J

Variation	log. Reression (PWS = a · ln(x) + b)		
	a	b	R <sup>2</sup>
Strecke 8 - BK-3J	-0,011	0,4073	0,8419
Strecke 9 - BK-3J	-0,009	0,3962	0,9062
Strecke 10 - BK-3J	-0,008	0,4340	0,9899
Strecke 11 - BK-3J	-0,010	0,3741	0,8767
Strecke 12 - BK-3J	-0,010	0,3949	0,9618
Strecke 13 - BK-3J	-0,006	0,3129	0,8617
Strecke 14 - BK-3J	-0,014	0,4553	0,9450

Anhang A4: Regressionsgleichungen des kontinuierlichen Griffigkeitsverlaufs der der Strecke 8 bis 14 in der Phase BK-3, mit Angabe der Koeffizienten a bzw. b. und des Bestimmtheitsmaßes R<sup>2</sup>

mittlere Profiltiefen MPD der Phasen in [mm]									
Strecke	EP-O	MW-O	BK-O	EP	MW	BK	z. RS	RS	BK-3J
8	0,798	0,730	0,738	0,668	0,717	0,822	0,737	0,525	0,505
9	0,852	0,855	0,848	0,817	0,783	1,042	0,835	0,803	0,767
10	0,490	0,790	0,477	0,582	0,822	0,793	0,415	0,475	0,483
11	0,850	0,497	0,563	0,710	0,470	0,647	0,623	0,530	0,530
12	0,898	0,790	0,477	0,743	0,847	0,793	0,563	0,540	0,517
13	0,855	0,773	0,683	0,792	0,635	0,865	0,472	0,433	0,440
14	0,533	0,338	0,272	0,680	0,483	0,393	0,400	0,333	0,295

Anhang A5: mittlere Profiltiefen MPD für die unterschiedlichen Oberflächenzustände der Strecken 8 bis 14

Glasoberflächen				
Mastercaree 8 mm	SR Listral L 10 mm	DO Silvit 7 mm	Listral A 4 mm	Masterpoint 8 mm
				
Glasoberfläche	Schleifscheiben			
DO Waterdrop 7 mm	10A 24 Q VS	10A 36 P VS	20C 24/36 LB (BH)	20C 24/36 LB (AG)
				
Fliese	Kunststoffbeläge		beaufschlagte Metallplatten	
Grau Mix, Schieferstruktur	Atlas 40 / X40	Stronghold 30 / K30	Vaudit V 100 8+5	CC 6,5 mm normal
				
Kunststoffverbundmaterialien			Gesteinskörnung	
KG 2-fach abgestreut	KG grob	KG fein	„feine“ Quarz	„grobe“ Granit
				
Naturstein				
Sandstein				
				

Anhang B1: Untersuchte Kontrolloberflächen

ermittelte Reibungskoeffizienten $\mu_m$ der Kontrolloberfläche						
Nr.	Mastercaree 8 mm	SR Listral L 10 mm	DO Silvit 7 mm	Listral A 4 mm	Masterpoint 8 mm	Waterdrop 7 mm
1	0,051	0,051	0,067	0,082	0,051	0,101
2	0,050	0,051	0,068	0,083	0,050	0,102
3	0,050	0,051	0,068	0,084	0,050	0,103
4	0,050	0,050	0,068	0,085	0,050	0,103
5	0,050	0,051	0,068	0,086	0,050	0,104
MW	0,050	0,051	0,068	0,084	0,050	0,103

ermittelte Reibungskoeffizienten $\mu_m$ der Kontrolloberfläche						
Nr.	20C 24/36 LB (AG)	Vaudit V 100 8+5	Atlas 40 / X40	Stronghold 30 / K30	Grau Mix Schieferst.	KG 2-fach abgestreut
1	0,874	0,414	0,201	0,244	0,290	0,507
2	0,850	0,388	0,187	0,236	0,282	0,505
3	0,833	0,377	0,181	0,230	0,271	0,497
4	0,812	0,374	0,176	0,227	0,263	0,496
5	0,789	0,371	0,174	0,227	0,255	0,490
6	0,781	0,365	0,171	0,218	0,248	0,489
7	0,771	0,365	0,167	0,216	0,243	0,486
8	0,773	0,367	0,165	0,214	0,242	0,485
9	0,779	0,364	0,161	0,215	0,242	0,484
10	0,788	0,349	0,158	0,213	0,239	0,482

ermittelte Reibungskoeffizienten $\mu_m$ der Kontrolloberfläche						
Nr.	grobe Gesteinskörnung "Granit"					
	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3
1	0,311	0,276	0,267	0,270	0,273	0,274
2	0,333	0,315	0,289	0,244	0,240	0,242
3	0,326	0,265	0,257	0,239	0,250	0,241
MW	0,323	0,285	0,271	0,251	0,254	0,253

ermittelte Reibungskoeffizienten $\mu_m$ der Kontrolloberfläche						
Nr.	10A 24 Q VS	10A 36 P VS	20C 24/36 LB (BH)	Warthauer Sandstein	KG grob	KG fein
1	0,846	0,852	0,574	0,547	0,380	0,259
2	0,816	0,845	0,567	0,441	0,379	0,245
3	0,808	0,826	0,560	0,392	0,371	0,235
4	0,801	0,814	0,550	0,366	0,371	0,229
5	0,792	0,798	0,545	0,347	0,371	0,223
6	0,789	0,802	0,540	0,334	0,373	0,219
7	0,784	0,796	0,535	0,326	0,381	0,214
8	0,782	0,795	0,531	0,320	0,387	0,211
9	0,778	0,792	0,524	0,312	0,386	0,207
10	0,777	0,792	0,519	0,309	0,386	0,206
11	0,774	0,790	0,522	0,303	0,384	0,204
12	0,772	0,788	0,518	0,300	0,383	0,203
13	0,770	0,766	0,514	0,294	0,382	0,200
14	0,766	0,775	0,512	0,305	0,382	0,200
15	0,766	0,780	0,508	0,296	0,379	0,199
16	0,762	0,763	0,506	0,291	0,379	0,197
17	0,763	0,769	0,503	0,324	0,379	0,197
18	0,758	0,768	0,501	0,313	0,378	0,194
19	0,758	0,770	0,498	0,306		0,194
20	0,757	0,768	0,496	0,311		0,193
21	0,755	0,735	0,493	0,298		0,192
22	0,750	0,752	0,492	0,293		0,191
23	0,749	0,751	0,490	0,289		0,190
24	0,752	0,748	0,488	0,284		0,190
25	0,750	0,747	0,487	0,278		0,189
26	0,749	0,748	0,486	0,271		0,189
27	0,748	0,738	0,484	0,267		0,188
28	0,747	0,749	0,481	0,265		0,188
29	0,745	0,750	0,480	0,269		0,187
30	0,744	0,734	0,478	0,265		0,187

Anhang B2: Reibungskoeffizienten  $\mu_m$  der nicht als zielführend anzusehenden Kontrolloberflächen

Test auf Normalverteilung: Anderson Darling; Test Hypothese: H0: Die Werte sind normalverteilt / HA: Die Werte sind nicht normalverteilt																																		
Die Nullhypothese H0 wird abgelehnt, wenn der p-Wert des Tests zu klein ist. Im Allgemeinen wird die Normalverteilungsannahme abgelehnt, wenn $p < 0,05 = 5\%$ ist.																																		
Messgummsatz 7							Messgummsatz 11G							Messgummsatz 1212							Messgummsatz 1412							Messgummsatz 3						
Nr.	Messwert	Messtag	p - Wert	0,160	Anzahl	21	Nr.	Messwert	Messtag	p - Wert	0,238	Anzahl	21	Nr.	Messwert	Messtag	p - Wert	0,512	Anzahl	21	Nr.	Messwert	Messtag	p - Wert	0,361	Anzahl	21	Nr.	Messwert	Messtag	p - Wert	Anzahl	21	
1	0,6497	12.02.15	0,6564	12.02.15	0,6561	2	0,6488	12.02.15	0,6483	12.02.15	0,6493	2	0,6559	12.02.15	0,6533	12.02.15	0,6493	2	0,6488	12.02.15	0,6483	12.02.15	0,6533	12.02.15	0,6493	2	0,6450	12.02.15	0,6466	12.02.15	MW	0,6469		
2	0,6509	12.02.15	0,6511	12.02.15	0,0020	3	0,6483	12.02.15	0,6450	12.02.15	0,0036	3	0,6491	12.02.15	0,6478	13.02.15	0,6440	4	0,6440	12.02.15	0,6450	12.02.15	0,6478	13.02.15	0,6440	4	0,6423	12.02.15	0,6423	12.02.15	STD	0,0065		
3	0,6472	12.02.15	0,6515	12.02.15	0,6515	4	0,6450	12.02.15	0,6440	13.02.15	0,6515	4	0,6440	13.02.15	0,6515	4	0,6440	13.02.15	0,6515	4	0,6440	13.02.15	0,6515	4	0,6440	13.02.15	0,6400	13.02.15	0,6400	13.02.15	Min	0,6385		
4	0,6457	13.02.15	0,6539	13.02.15	0,6590	5	0,6463	13.02.15	0,6463	13.02.15	0,6590	5	0,6463	13.02.15	0,6590	5	0,6463	13.02.15	0,6590	5	0,6463	13.02.15	0,6590	5	0,6463	13.02.15	0,6385	13.02.15	0,6385	13.02.15	Max	0,6625		
5	0,6494	13.02.15	0,6550	13.02.15	0,0112	6	0,6457	13.02.15	0,6457	13.02.15	0,0075	6	0,6457	13.02.15	0,0075	6	0,6457	13.02.15	0,0075	6	0,6457	13.02.15	0,0075	6	0,6457	13.02.15	0,6423	13.02.15	0,6423	13.02.15	Spanne	0,0241		
6	0,6471	13.02.15	0,6559	13.02.15	0,0000	7	0,6458	16.02.15	0,6458	16.02.15	0,0000	7	0,6458	16.02.15	0,0000	7	0,6458	16.02.15	0,0000	7	0,6458	16.02.15	0,0000	7	0,6458	16.02.15	0,6429	16.02.15	0,6429	16.02.15	p1	0,0714		
7	0,6474	16.02.15	0,6524	16.02.15	0,1599	8	0,6464	16.02.15	0,6464	16.02.15	0,2381	8	0,6464	16.02.15	0,2381	8	0,6464	16.02.15	0,2381	8	0,6464	16.02.15	0,2381	8	0,6464	16.02.15	0,6451	16.02.15	0,6451	16.02.15	p2	0,0000		
8	0,6467	16.02.15	0,6538	16.02.15	0,0000	9	0,6467	16.02.15	0,6467	16.02.15	0,0000	9	0,6467	16.02.15	0,0000	9	0,6467	16.02.15	0,0000	9	0,6467	16.02.15	0,0000	9	0,6467	16.02.15	0,6401	16.02.15	0,6401	16.02.15	p3	0,0000		
9	0,6478	16.02.15	0,6550	16.02.15	0,0000	10	0,6511	18.02.15	0,6511	18.02.15	0,0000	10	0,6511	18.02.15	0,0000	10	0,6511	18.02.15	0,0000	10	0,6511	18.02.15	0,0000	10	0,6511	18.02.15	0,6406	18.02.15	0,6406	18.02.15	p4	0,0000		
10	0,6516	18.02.15	0,6581	18.02.15	0,0000	11	0,6511	18.02.15	0,6511	18.02.15	0,0000	11	0,6511	18.02.15	0,0000	11	0,6511	18.02.15	0,0000	11	0,6511	18.02.15	0,0000	11	0,6511	18.02.15	0,6451	18.02.15	0,6451	18.02.15	S	-454,9333		
11	0,6543	18.02.15	0,6590	18.02.15	-452,0280	12	0,6521	18.02.15	0,6521	18.02.15	0,4579	12	0,6521	18.02.15	0,4579	12	0,6521	18.02.15	0,4579	12	0,6521	18.02.15	0,4579	12	0,6521	18.02.15	0,3849	18.02.15	0,3849	18.02.15	AD	0,6665		
12	0,6540	18.02.15	0,6577	18.02.15	0,5251	13	0,6527	18.02.15	0,6527	18.02.15	0,4766	13	0,6527	18.02.15	0,4766	13	0,6527	18.02.15	0,4766	13	0,6527	18.02.15	0,4766	13	0,6527	18.02.15	0,6542	18.02.15	0,6542	18.02.15	z	0,6906		
13	0,6536	18.02.15	0,6549	18.02.15	0,5466	14	0,6557	18.02.15	0,6557	18.02.15	0,4766	14	0,6557	18.02.15	0,4766	14	0,6557	18.02.15	0,4766	14	0,6557	18.02.15	0,4766	14	0,6557	18.02.15	0,6625	18.02.15	0,6625	18.02.15	z	0,6906		
14	0,6543	18.02.15	0,6581	18.02.15	0,5466	15	0,6562	18.02.15	0,6562	18.02.15	0,4766	15	0,6562	18.02.15	0,4766	15	0,6562	18.02.15	0,4766	15	0,6562	18.02.15	0,4766	15	0,6562	18.02.15	0,6575	18.02.15	0,6575	18.02.15	z	0,6906		
15	0,6543	18.02.15	0,6581	18.02.15	0,5466	16	0,6557	18.02.15	0,6557	18.02.15	0,4766	16	0,6557	18.02.15	0,4766	16	0,6557	18.02.15	0,4766	16	0,6557	18.02.15	0,4766	16	0,6557	18.02.15	0,6466	19.02.15	0,6466	19.02.15	z	0,6906		
16	0,6522	19.02.15	0,6580	19.02.15	0,5466	17	0,6498	19.02.15	0,6498	19.02.15	0,4766	17	0,6498	19.02.15	0,4766	17	0,6498	19.02.15	0,4766	17	0,6498	19.02.15	0,4766	17	0,6498	19.02.15	0,6533	19.02.15	0,6533	19.02.15	z	0,6906		
17	0,6531	19.02.15	0,6573	19.02.15	0,5466	18	0,6498	19.02.15	0,6498	19.02.15	0,4766	18	0,6498	19.02.15	0,4766	18	0,6498	19.02.15	0,4766	18	0,6498	19.02.15	0,4766	18	0,6498	19.02.15	0,6533	19.02.15	0,6533	19.02.15	z	0,6906		
18	0,6529	19.02.15	0,6573	19.02.15	0,5466	19	0,6498	19.02.15	0,6498	19.02.15	0,4766	19	0,6498	19.02.15	0,4766	19	0,6498	19.02.15	0,4766	19	0,6498	19.02.15	0,4766	19	0,6498	19.02.15	0,6533	19.02.15	0,6533	19.02.15	z	0,6906		
19	0,6515	19.02.15	0,6567	19.02.15	0,5466	20	0,6466	19.02.15	0,6466	19.02.15	0,4766	20	0,6466	19.02.15	0,4766	20	0,6466	19.02.15	0,4766	20	0,6466	19.02.15	0,4766	20	0,6466	19.02.15	0,6548	19.02.15	0,6548	19.02.15	z	0,6906		
20	0,6524	19.02.15	0,6560	19.02.15	0,5466	21	0,6482	19.02.15	0,6482	19.02.15	0,4766	21	0,6482	19.02.15	0,4766	21	0,6482	19.02.15	0,4766	21	0,6482	19.02.15	0,4766	21	0,6482	19.02.15	0,6516	19.02.15	0,6516	19.02.15	z	0,6906		
21	0,6539	19.02.15	0,6581	19.02.15	0,5466																													

Anhang B3: Test auf Normalverteilung nach Anderson Darling für die, je 21 ermittelten Reibungskoeffizienten  $\mu_m$  auf der nach 540.000 Überrollungen konditionierten Kontrollplatte „CC 6,5 mm, normal“

Ausreißertest nach Grubbs (Signifikanz 0,05, zweiseitiger Test; d.h 95,45 %, 2 * s)														
Ein Ausreißer liegt vor, wenn die ermittelte Prüfgröße Z oberhalb des des Kritischen Wertes von Z liegt.														
Messgummisatz 7			Messgummisatz 11G			Messgummisatz 1212			Messgummisatz 1412			Messgummisatz 3		
Nr.	Messwert	Prüfgröße Z	Nr.	Messwert	Prüfgröße Z	Nr.	Messwert	Prüfgröße Z	Nr.	Messwert	Prüfgröße Z	Nr.	Messwert	Prüfgröße Z
1	0,6497	0,3356	1	0,6564	0,0483	1	0,6488	0,0653	1	0,6539	0,3550	1	0,6450	0,2969
2	0,6509	0,0153	2	0,6559	0,0483	2	0,6483	0,3396	2	0,6533	0,0592	2	0,6466	0,0072
3	0,6472	1,2964	3	0,6515	2,0762	3	0,6450	1,1625	3	0,6491	1,7160	3	0,6423	0,7531
4	0,6457	1,6167	4	0,6539	1,0623	4	0,6440	1,4368	4	0,6478	2,1302	4	0,6400	1,0572
5	0,6494	0,6558	5	0,6550	0,5553	5	0,6463	0,8882	5	0,6509	0,8876	5	0,6385	1,3613
6	0,6471	1,2964	6	0,6559	0,0483	6	0,6443	1,4368	6	0,6505	0,8876	6	0,6423	0,7531
7	0,6474	1,2964	7	0,6524	2,0762	7	0,6458	0,8882	7	0,6517	0,4734	7	0,6429	0,6010
8	0,6467	1,2964	8	0,6538	1,0623	8	0,6464	0,8882	8	0,6526	0,0592	8	0,6451	0,2969
9	0,6478	0,9761	9	0,6550	0,5553	9	0,6467	0,6139	9	0,6536	0,3550	9	0,6401	1,0572
10	0,6516	0,3050	10	0,6581	0,9657	10	0,6511	0,4833	10	0,6557	1,1835	10	0,6406	0,9051
11	0,6543	0,9456	11	0,6590	1,4727	11	0,6531	1,0319	11	0,6561	1,1835	11	0,6451	0,2969
12	0,6540	0,9456	12	0,6577	0,9657	12	0,6521	0,7576	12	0,6556	1,1835	12	0,6489	0,3114
13	0,6536	0,9456	13	0,6549	0,5553	13	0,6527	1,0319	13	0,6523	0,4734	13	0,6542	1,0717
14	0,6543	0,9456	14	0,6562	0,0483	14	0,6557	1,8548	14	0,6550	0,7692	14	0,6625	2,4402
15	0,6569	1,9065	15	0,6581	0,9657	15	0,6562	1,8548	15	0,6559	1,1835	15	0,6575	1,5279
16	0,6522	0,3050	16	0,6580	0,9657	16	0,6498	0,2090	16	0,6523	0,4734	16	0,6466	0,0072
17	0,6531	0,6253	17	0,6573	0,4587	17	0,6495	0,0653	17	0,6544	0,3550	17	0,6535	1,0717
18	0,6529	0,6253	18	0,6582	0,9657	18	0,6510	0,4833	18	0,6532	0,0592	18	0,6444	0,4489
19	0,6515	0,0153	19	0,6567	0,4587	19	0,6529	1,0319	19	0,6497	1,3018	19	0,6432	0,6010
20	0,6524	0,3050	20	0,6560	0,0483	20	0,6466	0,6139	20	0,6561	1,1835	20	0,6548	1,2237
21	0,6539	0,9456	21	0,6581	0,9657	21	0,6482	0,3396	21	0,6552	0,7692	21	0,6516	0,7676
n	21	Kritischer	n	21	Kritischer	n	21	Kritischer	n	21	Kritischer	n	21	Kritischer
MW	0,6511	Wert	MW	0,6561	Wert	MW	0,6493	Wert	MW	0,6531	Wert	MW	0,6469	Wert
STD	0,0031	2,7338	STD	0,0020	2,7338	STD	0,0035	2,7338	STD	0,0024	2,7338	STD	0,0063	2,7338

Anhang B4: Ausreißertest nach Grubbs für die 21 mit je einem Messgummisatz ermittelten Reibungskoeffizienten  $\mu_m$  auf der nach 540.000 Überrollungen konditionierten Kontrollplatte „CC 6,5 mm, normal“

Stichprobenumfang	Mittelwert	Standardabweichung	Maximum	Minimum	Spannweite	prozentuale Spannweite
n = 105	0,6513	0,0049	0,6625	0,6385	0,0241	3,7

Anhang B5: Statistische Kennzahlen und prozentuale Abweichung der Spannweite bezogen auf den Mittelwert der Reibungskoeffizienten  $\mu_m$  der Kontrollplatte „CC 6,5 mm, normal“ für den Stichprobenumfang n = 105

	MG 3	MG 1212	MG 7	MG 1412	MG 11G
Minimum	0,6385	0,6440	0,6457	0,6478	0,6515
Q1	0,6423	0,6464	0,6478	0,6517	0,6550
Median	0,6451	0,6488	0,6516	0,6533	0,6562
Q3	0,6516	0,6521	0,6536	0,6552	0,6580
Maximum	0,6625	0,6562	0,6569	0,6561	0,6590
Mittelwert	0,6469	0,6493	0,6511	0,6531	0,6561

Anhang B6: Kennzahlen der Boxplot-Diagramme für die jeweils 21 ermittelten Reibungskoeffizienten  $\mu_m$  der fünf unterschiedlichen Messgummisätze (MG), auf der Kontrollplatte „CC 6,5 mm, normal“

	Mittelwert	Standardabweichung	linker (2,5%) Grenzpunkt	rechter (97,5%) Grenzpunkt	Spannweite
Reibungskoeffizient $\mu_m$	0,6512	0,0049	0,6416	0,6610	0,0194

Anhang B7: Kennzahlen der Normalverteilung für die Reibungskoeffizienten  $\mu_m$  der Kontrollplatte „CC 6,5 mm, normal“

Griffigkeitsmessung	1	2	3	4
Mittelwert	0,6885	0,6642	0,6475	0,6359
Maximaler Wert	0,7124	0,6828	0,6669	0,6539
Minimaler Wert	0,6690	0,6443	0,6236	0,6076
Spannweite	0,0434	0,0385	0,0433	0,0463
Standardabweichung	0,0093	0,0094	0,0105	0,0114

Anhang B8: Statistische Kennzahlen der Reibungskoeffizienten  $\mu_m$  der vier durchgeführten Griffigkeitsmessungen, auf den Kontrollplatten aus feinen Gesteinskörnungen

Test auf Normalverteilung: Anderson Darling; Test Hypothese: H0: Die Werte sind normalverteilt / HA: Die Werte sind nicht normalverteilt Die Nullhypothese H0 wird abgelehnt, wenn der p-Wert des Tests zu klein ist. Im Allgemeinen wird die Normalverteilungsannahme abgelehnt, wenn $p < 0,05 = 5\%$ ist.												
Messgummisatz F23A - Messung 1			Messgummisatz F23A - Messung 2			Messgummisatz F73B - Messung 1			Messgummisatz F73B - Messung 2			
Nr.	Messwert	p-Wert	0,519	Messwerte	p-Wert	0,156	Messwerte	p-Wert	0,091	Messwerte	p-Wert	0,426
1	0,6848	10	0,6900	1	0,6886	10	0,6870	1	0,6760	1	0,6760	10
2	0,6934	MW	0,6885	2	0,6901	MW	0,6893	2	0,6849	2	0,6788	MW
3	0,6959	STD	0,0074	3	0,6871	STD	0,0083	3	0,6744	3	0,6798	STD
4	0,6887	p1	0,0000	4	0,7124	p1	0,0000	4	0,6813	4	0,6905	p1
5	0,6905	p2	0,0000	5	0,6894	p2	0,0000	5	0,6740	5	0,6872	p2
6	0,6957	p3	0,5191	6	0,6928	p3	0,0000	6	0,6848	6	0,6794	p3
7	0,6970	p4	0,0000	7	0,6935	p4	0,0000	7	0,6868	7	0,6972	p4
8	0,7000	S	-102,9813	8	0,6868	S	-105,2306	8	0,7000	8	0,6946	S
9	0,6750	AD	0,2981	9	0,6912	AD	0,5231	9	0,6906	9	0,6793	AD
10	0,6863	z	0,3272	10	0,6944	z	0,5741	10	0,7029	10	0,7093	z
Min	0,6750			Min	0,6755			Min	0,6740	Min	0,6760	
Max	0,7000			Max	0,7025			Max	0,7029	Max	0,7093	
Spanne	0,0250			Spanne	0,0291			Spanne	0,0288	Spanne	0,0334	
Wahrscheinlichkeitsnetz			Wahrscheinlichkeitsnetz			Wahrscheinlichkeitsnetz			Wahrscheinlichkeitsnetz			
3												
2												
1												
0												
N	0,64	0,66	0,68	0,70	0,72	0,64	0,66	0,68	0,70	0,72	0,64	0,66
-1												
-2												
-3												
Werte			Werte			Werte			Werte			
Messgummisatz F23A - Messung 2			Messgummisatz F23A - Messung 1			Messgummisatz F73C - Messung 2			Messgummisatz F73C - Messung 1			
Nr.	Messwert	p-Wert <td>0,004</td> <td>Messwerte</td> <td>p-Wert <td>0,049</td> <td>Messwerte</td> <td>p-Wert <td>0,383</td> <td>Messwerte</td> <td>p-Wert <td>0,049</td> </td></td></td>	0,004	Messwerte	p-Wert <td>0,049</td> <td>Messwerte</td> <td>p-Wert <td>0,383</td> <td>Messwerte</td> <td>p-Wert <td>0,049</td> </td></td>	0,049	Messwerte	p-Wert <td>0,383</td> <td>Messwerte</td> <td>p-Wert <td>0,049</td> </td>	0,383	Messwerte	p-Wert <td>0,049</td>	0,049
1	0,6531	10	0,6617	1	0,6582	10	0,6614	1	0,6653	1	0,648	
2	0,6723	MW	0,6689	2	0,6744	MW	0,6668	2	0,6591	2	0,655	
3	0,6742	STD	0,0070	3	0,6677	STD	0,0109	3	0,6620	3	0,6653	
4	0,6712	p1	0,0056	4	0,6828	p1	0,0000	4	0,6600	4	0,647	
5	0,6702	p2	0,0000	5	0,6725	p2	0,0000	5	0,6571	5	0,3833	
6	0,6720	p3	0,0000	6	0,6575	p3	0,5486	6	0,6597	6	0,657	
7	0,6740	p4	0,0000	7	0,6617	p4	0,0000	7	0,6537	7	0,676	
8	0,6735	S	-111,1091	8	0,6443	S	-102,8512	8	0,6653	8	0,674	
9	0,6594	AD	1,1109	9	0,6706	AD	0,2851	9	0,6768	9	0,653	
10	0,6687	z	1,2192	10	0,6743	z	0,3129	10	0,6622	10	0,676	
Min	0,6531			Min	0,6537			Min	0,6447	Min	0,648	
Max	0,6742			Max	0,6768			Max	0,6773	Max	0,677	
Spanne	0,0212			Spanne	0,0385			Spanne	0,026	Spanne	0,029	
Wahrscheinlichkeitsnetz			Wahrscheinlichkeitsnetz			Wahrscheinlichkeitsnetz			Wahrscheinlichkeitsnetz			
3												
2												
1												
0												
N	0,62	0,64	0,66	0,68	0,70	0,62	0,64	0,66	0,68	0,70	0,62	0,64
-1												
-2												
-3												
Werte			Werte			Werte			Werte			

Anhang B9: Test auf Normalverteilung nach Anderson Darling für die auf je zehn Kontrollplatten aus feinen Gesteinskörnungen nach 90.000 Überrollungen mit je einen Messgummisatz ermittelten Reibungskoeffizienten (nach erster bzw. zweiter Griffigkeitsmessung)

Ausreißertest nach Grubbs (Signifikanz 0,05, zweiseitiger Test; d.h 95,45 %, 2 * s)														
Ein Ausreißer liegt vor, wenn die ermittelte Prüfgröße Z oberhalb des des Kritischen Wertes von Z liegt.														
MG F23A - Messung 1			MG 9 - Messung 1			MG F73C - Messung 1			MG F73B - Messung 1			MG F73H - Messung 1		
Nr.	Messwert	Prüfgröße Z	Nr.	Messwert	Prüfgröße Z	Nr.	Messwert	Prüfgröße Z	Nr.	Messwert	Prüfgröße Z	Nr.	Messwert	Prüfgröße Z
1	0,6850	0,7848	1	0,6690	1,7055	1	0,6890	0,0469	1	0,6870	0,0314	1	0,6760	1,0492
2	0,6930	0,2977	2	0,6880	0,0437	2	0,6900	0,0704	2	0,6850	0,1779	2	0,6790	0,7682
3	0,6960	0,7036	3	0,6870	0,1312	3	0,6870	0,2815	3	0,6740	1,3288	3	0,6800	0,6745
4	0,6890	0,2436	4	0,7120	2,0554	4	0,6900	0,0704	4	0,6810	0,5964	4	0,6910	0,3560
5	0,6910	0,0271	5	0,6890	0,0437	5	0,6870	0,2815	5	0,6740	1,3288	5	0,6870	0,0187
6	0,6960	0,7036	6	0,6750	1,1808	6	0,6890	0,0469	6	0,6850	0,1779	6	0,6790	0,7682
7	0,6970	0,8389	7	0,6930	0,3936	7	0,6730	1,9233	7	0,6870	0,0314	7	0,6970	0,9180
8	0,7000	1,2448	8	0,6870	0,1312	8	0,7020	1,4777	8	0,7000	1,3916	8	0,6950	0,7307
9	0,6750	2,1378	9	0,6910	0,2187	9	0,7030	1,5949	9	0,6910	0,4499	9	0,6790	0,7682
10	0,6860	0,6495	10	0,6940	0,4811	10	0,6840	0,6333	10	0,7030	1,7055	10	0,7090	2,0422
n	10	Kritischer	n	10	Kritischer	n	10	Kritischer	n	10	Kritischer	n	10	Kritischer
MW	0,6908	Wert	MW	0,6885	Wert	MW	0,6894	Wert	MW	0,6867	Wert	MW	0,6872	Wert
STD	0,0070	2,2899	STD	0,0108	2,2899	STD	0,0081	2,2899	STD	0,0091	2,2899	STD	0,0101	2,2899

Anhang B10: Ausreißertest nach Grubbs für die auf je zehn Kontrollplatten aus feinen Gesteinskörnungen nach 90.000 Überrollungen mit je einem Messgummisatz (MG) ermittelten Reibungskoeffizienten (nach erster Griffigkeitsmessung)

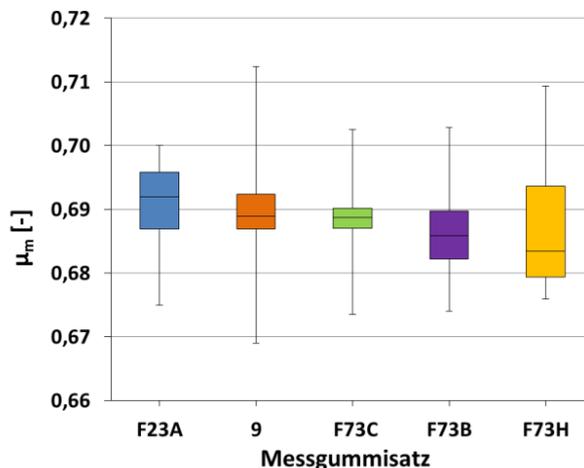
Stichprobenumfang	Mittelwert	Standartabweichung	Maximum	Minimum	Spannweite	prozentuale Spannweite
n = 50	0,6885	0,0093	0,7124	0,6690	0,0434	6,3

Anhang B11: Statistische Kennzahlen und prozentuale Abweichung der Spannweite bezogen auf den Mittelwert der Reibungskoeffizienten  $\mu_m$  (nach erster Griffigkeitsmessung) der Sandplatten für den Stichprobenumfang n = 80

Zusammenfassung				
Gruppe	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
MG F23A	10	6,90720	0,69072	0,00005
MG 9	10	6,88676	0,68868	0,00013
MG F73C	10	6,89299	0,68930	0,00007
MG F73B	10	6,86678	0,68668	0,00009
MG F73H	10	6,87225	0,68722	0,00011

Einfache Varianzanalyse ANOVA						
Streuungsursache	Quadratsummen	Freiheitsgrade	mittlere Quadratsumme	Prüfgröße (F)	P-Wert	kritischer F-Wert
zw. den Gruppen	0,00011	4	0,00003	0,28678	0,88503	2,57874
innerhalb der Gruppen	0,00414	45	0,00009			
Gesamt	0,00424	49				

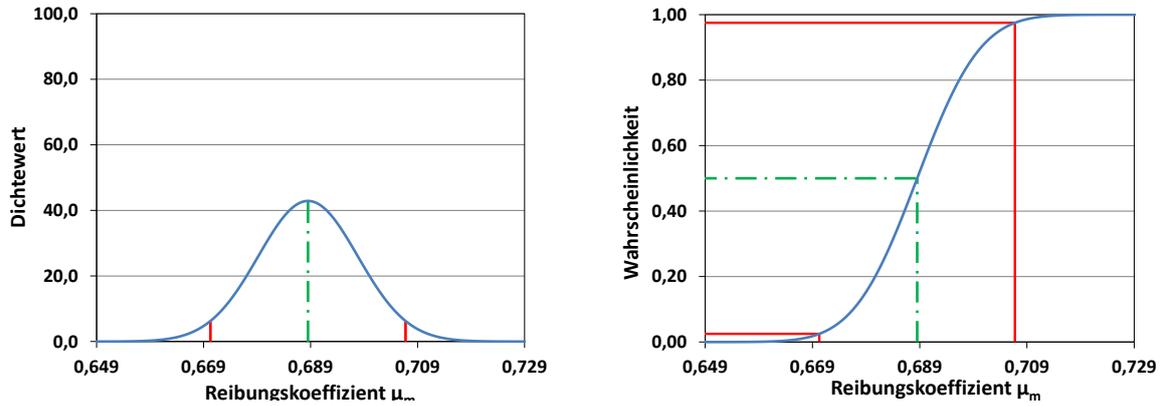
Anhang B12: Einfache Varianzanalyse (ANOVA) für die Reibungskoeffizienten  $\mu_m$  (1 Griffigkeitsmessung) ermittelt mit fünf Messgummisätzen (MG), an jeweils zehn Kontrollplatten aus feinen Gesteinskörnungen



Anhang B13: Boxplot-Diagramme für die jeweils 10 ermittelten Reibungskoeffizienten  $\mu_m$  (1 Griffigkeitsmessung) der fünf Messgummisätze auf den Kontrollplatten aus feinen Gesteinskörnungen

	MG F23A	MG 9	MG F73C	MG F73B	MG F73H
Minimum	0,6750	0,6690	0,6735	0,6740	0,6760
Q1	0,6869	0,6869	0,6870	0,6822	0,6794
Median	0,6919	0,6889	0,6887	0,6859	0,6835
Q3	0,6958	0,6924	0,6901	0,6897	0,6936
Maximum	0,7000	0,7124	0,7025	0,7029	0,7093
Mittelwert	0,6907	0,6887	0,6893	0,6867	0,6872

Anhang B14: Kennzahlen der Boxplot-Diagramme für die jeweils 10 ermittelten Reibungskoeffizienten  $\mu_m$  der fünf Messgummisätze (MG) auf den Kontrollplatten aus feinen Gesteinskörnungen



Anhang B15: Dichtefunktion und Summenkurve (Wahrscheinlichkeit) der Normalverteilung für die Reibungskoeffizienten  $\mu_m$  der Kontrollplatte aus den feinen Gesteinskörnungen

	Mittelwert	Standart-abweichung	linker (2,5%) Grenzpunkt	rechter (97,5%) Grenzpunkt	Spannweite
Reibungskoeffizient $\mu_m$	0,6885	0,0093	0,6703	0,7068	0,0364

Anhang B16: Kennzahlen der Normalverteilung für die Reibungskoeffizienten  $\mu_m$  der Kontrollplatten aus den feinen Gesteinskörnungen

Überrollungen	Asphaltvariation 9-0			Asphaltvariation 9-1			Asphaltvariation 9-2			Asphaltvariation 9-3			Asphaltvariation 9-4			Asphaltvariation 9-5			
	$\mu_{PWS}$	MPD	PWS																
Original	--	0,80	--	--	0,84	--	--	0,92	--	0,98	--	--	0,92	--	--	--	0,32	--	0,32
0	0,483	0,493	0,73	0,454	0,464	0,77	0,439	0,457	0,91	0,412	0,422	0,85	0,475	0,485	0,92	0,485	0,92	0,380	0,29
4500	0,375	0,358	0,65	0,382	0,363	0,67	0,383	0,356	0,85	0,350	0,338	0,75	0,385	0,368	0,86	0,307	0,295	0,295	0,27
7500	0,365	0,350	0,63	0,368	0,357	0,67	0,360	0,350	0,84	0,342	0,333	0,75	0,366	0,360	0,85	0,296	0,290	0,290	0,27
15000	0,352	0,339	0,62	0,357	0,349	0,67	0,352	0,342	0,84	0,333	0,326	0,75	0,355	0,351	0,87	0,291	0,283	0,283	0,25
22500	0,341	0,332	0,63	0,349	0,344	0,68	0,350	0,337	0,83	0,324	0,322	0,74	0,346	0,345	0,85	0,284	0,279	0,279	0,25
30000	0,335	0,328	0,61	0,345	0,341	0,68	0,340	0,334	0,81	0,318	0,319	0,74	0,339	0,341	0,83	0,280	0,277	0,277	0,25
37500	0,329	0,324	0,62	0,340	0,338	0,68	0,336	0,331	0,80	0,314	0,317	0,70	0,332	0,338	0,84	0,279	0,274	0,274	0,25
45000	0,324	0,321	0,62	0,336	0,336	0,67	0,337	0,329	0,80	0,310	0,315	0,74	0,329	0,335	0,86	0,277	0,272	0,272	0,25
90000	0,313	0,310	0,60	0,327	0,328	0,65	0,317	0,320	0,79	0,300	0,308	0,72	0,323	0,326	0,84	0,271	0,266	0,266	0,25
135000	0,311	0,304	0,61	0,320	0,323	0,65	0,305	0,316	0,78	0,297	0,304	0,72	0,311	0,320	0,84	0,264	0,261	0,261	0,25
180000	0,299	0,299	0,60	0,312	0,319	0,67	0,297	0,312	0,79	0,293	0,301	0,70	0,305	0,316	0,80	0,259	0,259	0,259	0,25
225000	0,290	0,296	0,61	0,313	0,317	0,64	0,289	0,309	0,76	0,289	0,299	0,68	0,299	0,313	0,83	0,248	0,256	0,256	0,26
270000	0,288	0,293	0,60	0,310	0,314	0,63	0,292	0,307	0,76	0,286	0,297	0,68	0,302	0,310	0,79	0,248	0,255	0,255	0,25

Überrollungen	Asphaltvariation 9-6			Asphaltvariation 9-7			Asphaltvariation 9-8			Asphaltvariation 14-0			Asphaltvariation 14-1			Asphaltvariation 14-2			
	$\mu_{PWS}$	MPD	PWS	$\mu_{PWS}$	MPD	PWS	$\mu_{PWS}$	MPD	PWS	$\mu_{PWS}$	MPD	PWS	$\mu_{PWS}$	MPD	PWS	$\mu_{PWS}$	MPD	PWS	
Original	--	1,11	--	1,15	--	0,98	--	0,98	--	0,44	--	--	0,45	--	--	--	0,43	--	0,43
0	0,434	0,448	1,04	0,448	0,462	1,09	0,436	0,445	1,00	0,521	0,531	0,62	0,516	0,527	0,51	0,532	0,550	0,58	0,58
4500	0,381	0,363	0,97	0,365	0,344	1,02	0,375	0,352	0,90	0,382	0,363	0,63	0,382	0,368	0,48	0,403	0,381	0,381	0,55
7500	0,370	0,358	0,96	0,353	0,337	1,02	0,357	0,346	0,93	0,368	0,353	0,63	0,367	0,358	0,47	0,387	0,371	0,371	0,55
15000	0,362	0,351	0,96	0,340	0,327	1,03	0,350	0,339	0,91	0,349	0,339	0,62	0,350	0,345	0,48	0,368	0,357	0,357	0,53
22500	0,353	0,347	0,94	0,334	0,322	1,00	0,341	0,334	0,92	0,337	0,331	0,61	0,339	0,337	0,49	0,356	0,349	0,349	0,53
30000	0,349	0,344	0,94	0,331	0,318	1,03	0,332	0,331	0,92	0,327	0,325	0,60	0,330	0,332	0,48	0,348	0,343	0,343	0,53
37500	0,342	0,342	0,92	0,325	0,314	1,09	0,332	0,329	0,89	0,321	0,321	0,62	0,323	0,327	0,46	0,341	0,339	0,339	0,53
45000	0,338	0,340	0,95	0,320	0,312	1,02	0,330	0,327	0,88	0,316	0,317	0,62	0,318	0,324	0,47	0,333	0,335	0,335	0,54
90000	0,327	0,333	0,97	0,310	0,302	0,99	0,322	0,319	0,92	0,298	0,303	0,61	0,304	0,311	0,47	0,312	0,321	0,321	0,54
135000	0,324	0,329	0,94	0,295	0,297	0,98	0,316	0,315	0,89	0,293	0,295	0,60	0,294	0,303	0,47	0,303	0,313	0,313	0,51
180000	0,316	0,326	0,93	0,288	0,292	0,95	0,314	0,311	0,87	0,283	0,289	0,60	0,283	0,297	0,46	0,294	0,308	0,308	0,52
225000	0,312	0,324	0,93	0,282	0,289	0,97	0,303	0,309	0,90	0,283	0,285	0,61	0,279	0,293	0,45	0,286	0,303	0,303	0,52
270000	0,308	0,322	0,93	0,274	0,287	0,98	0,303	0,307	0,87	0,277	0,281	0,59	0,277	0,290	0,45	0,281	0,299	0,299	0,50

Überrollungen	Asphaltvariation 14-3			Asphaltvariation 14-4			Asphaltvariation 14-5			Asphaltvariation 14-6			Asphaltvariation 14-7			Asphaltvariation 14-8		
	$\mu_{PWS}$	MPD	PWS															
Original	--	0,41	--	0,70	--	0,54	--	0,54	--	0,65	--	0,43	--	0,43	--	0,45	--	0,45
0	0,491	0,506	0,35	0,522	0,533	0,77	0,508	0,525	0,74	0,499	0,509	0,67	0,508	0,528	0,64	0,505	0,524	0,69
4500	0,377	0,355	0,31	0,393	0,373	0,74	0,399	0,373	0,69	0,360	0,349	0,65	0,401	0,360	0,61	0,398	0,373	0,67
7500	0,358	0,346	0,31	0,372	0,364	0,74	0,381	0,364	0,69	0,346	0,340	0,64	0,369	0,350	0,61	0,380	0,364	0,65
15000	0,345	0,333	0,31	0,359	0,350	0,73	0,361	0,352	0,70	0,336	0,327	0,64	0,348	0,336	0,59	0,361	0,351	0,65
22500	0,333	0,326	0,32	0,343	0,343	0,74	0,350	0,344	0,70	0,325	0,319	0,65	0,335	0,328	0,61	0,349	0,344	0,64
30000	0,327	0,321	0,30	0,334	0,337	0,74	0,339	0,339	0,67	0,319	0,313	0,63	0,326	0,322	0,60	0,338	0,339	0,66
37500	0,318	0,317	0,29	0,331	0,333	0,73	0,331	0,335	0,66	0,314	0,309	0,64	0,319	0,318	0,60	0,332	0,335	0,65
45000	0,312	0,313	0,29	0,326	0,330	0,73	0,325	0,332	0,68	0,312	0,306	0,64	0,315	0,314	0,59	0,329	0,331	0,65
90000	0,294	0,301	0,29	0,313	0,316	0,73	0,308	0,319	0,67	0,293	0,293	0,63	0,297	0,300	0,60	0,309	0,319	0,62
135000	0,287	0,294	0,29	0,302	0,309	0,71	0,300	0,312	0,65	0,279	0,285	0,64	0,288	0,292	0,59	0,299	0,312	0,62
180000	0,276	0,288	0,28	0,297	0,303	0,73	0,293	0,307	0,68	0,272	0,279	0,63	0,276	0,286	0,58	0,291	0,306	0,62
225000	0,273	0,284	0,28	0,291	0,299	0,73	0,288	0,303	0,67	0,264	0,275	0,64	0,269	0,282	0,57	0,285	0,302	0,62
270000	0,267	0,281	0,29	0,282	0,295	0,71	0,286	0,300	0,65	0,259	0,272	0,63	0,265	0,278	0,59	0,277	0,299	0,62

Anhang C1: Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  bzw. PWS und mittlere Profiltiefen (MPD) der Asphaltvariationen 9 und 14

Variation	log. Reression (PWS = a · ln(x) + b)		
	a	b	R <sup>2</sup>
9-0	-0,016	0,4928	0,9756
9-1	-0,012	0,4644	0,9608
9-2	-0,012	0,4573	0,8775
9-3	-0,010	0,4219	0,9482
9-4	-0,014	0,4854	0,9679
9-5	-0,010	0,3796	0,9663
9-6	-0,010	0,4475	0,9068
9-7	-0,014	0,4619	0,9375
9-8	-0,011	0,4460	0,9499

Variation	log. Reression (PWS = a · ln(x) + b)		
	a	b	R <sup>2</sup>
14-0	-0,020	0,5312	0,9823
14-1	-0,019	0,5274	0,9794
14-2	-0,020	0,5496	0,9601
14-3	-0,018	0,5063	0,9600
14-4	-0,019	0,5331	0,9796
14-5	-0,018	0,5247	0,9514
14-6	-0,019	0,5093	0,9814
14-7	-0,020	0,5282	0,9180
14-8	-0,018	0,5242	0,9438

Anhang C2: Regressionsgleichungen des kontinuierlichen Griffigkeitsverlaufs der Asphaltvariationen 9 und 14, mit Angabe der Koeffizienten a bzw. b. und des Bestimmtheitsmaßes R<sup>2</sup>

Mischgutart	AC 11 D S		SMA 8 S	
Untersuchungsgegenstand	Ergebnis	Anforderung an AC 11 D S gem. TL Asphalt-StB 07	Ergebnis	Anforderung an SMA 8 S gem. TL Asphalt-StB 07
<b>1. Äußere Beschaffenheit</b>	Mischgut normal, schw arzglänzend, Gesteinskörnung vollständig umhüllt		Mischgut normal, schw arzglänzend, Gesteinskörnung vollständig umhüllt	
<b>2. Bindemittelgehalt</b> [M.-%]				
gesamt	6,1	≥ 6,0	7,1	≥ 7,2
lösliche Anteile	5,84		6,86	
unlösliche Anteile	0,22		0,28	
Wassergehalt Ofentrocknung	< 0,1		< 0,1	
<b>3. Kornzusammensetzung</b> [M.-%]				
Korngröße [mm]	Rückstand	Durchgang	Durchgang	Durchgang
16,0	0,0	100,0	100	100
11,2	0,1	99,9	90 - 100	100,0
8,0	20,2	79,7	70 - 85	97,2
5,6	16,9	62,8		52,1
2,0	15,4	47,4	40 - 50	29,5
1,0	13,6	33,8		21,3
0,25	18,9	14,9		16,7
0,125	4,2	10,7	7 - 17	14,5
0,063	1,9	8,8	5 - 9	12,7
< 0,063	8,8	-	-	-
Gehalt an Grobkorn > 8,0 mm	20,3	15 - 30		
grober Gesteinskörnung > 2 mm	52,6	50 - 60	47,9	45 - 65
feiner Gesteinskörnung 0,063 - 2 mm	38,6		70,5	70 - 80
Gesteinskörnung < 0,125 mm	10,7	7 - 17	16,8	
Füller < 0,063 mm	8,8	5 - 9	12,7	8 - 12
<b>4. Art der Gesteinskörnungen</b>	Granitsplitt, Brechsand und Füller sowie Faserstoffe		Granitsplitt, Brechsand und Füller sowie Faserstoffe	
<b>5. Stabilisierender Zusatz</b>				
a) Art der Zusätze				
b) Gehalt im Mischgut [M.-%]				0,3 - 1,5
<b>6. Eigenschaften des Bindemittels</b>				
a) Art des result. Bindemittels	Bitumen		Bitumen	
b) Klebekraft bei 20 °C	normal		normal	
c) Erweichungspunkt RuK [°C]	62,0		60,8	
d) Elastische Rückstellung [%]	40		45	
Ausziehlänge [cm]	20		20	
<b>7. Mischgutrohdichte</b> $\rho_m$ [g/cm³]	2,473		2,434	
<b>8. Eigenschaften des Marshall-Probekörpers</b>				
Verdichtung mit 2 x 50 Schlägen bei 145 °C				
a) Raumdichte $\rho_{b,ssd}$ [g/cm³]	2,391		2,384	
b) Hohlraumgehalt V [Vol.-%]	3,3	2,5 - 3,5	2,1	2,5 - 3,0

Anhang D1: Asphaltzusammensetzung des Asphaltbetons AC 11 D S bzw. Splittmastixasphaltes SMA 8 S in der Phase MW

	AC +5		AC -10		AC -20		SMA +5		SMA -10		SMA -20	
	MPD [mm]	MV [%]										
Original	0,38	0,0	0,39	0,0	0,38	0,0	0,52	0,0	0,53	0,0	0,53	0,0
1 Zyklus	0,52	0,4	0,59	0,5	0,61	0,6	0,36	0,3	0,36	0,4	0,35	0,5
2 Zyklus	0,68	0,9	0,71	1,0	0,74	1,3	0,37	0,5	0,37	0,7	0,39	1,0
3 Zyklus	0,77	1,4	0,85	1,5	0,90	1,9	0,41	0,8	0,45	1,1	0,47	1,4
4 Zyklus	0,91	1,9	0,96	2,0	1,11	2,4	0,46	1,2	0,52	1,5	0,58	1,7
5 Zyklus	1,02	2,3	1,09	2,5	1,20	2,9	0,55	1,6	0,59	1,8	0,62	2,1
6 Zyklus	1,13	2,8	1,22	3,0	1,24	3,3	0,62	1,9	0,63	2,2	0,66	2,3
7 Zyklus	1,20	3,2	1,34	3,4	1,37	3,7	0,66	2,3	0,72	2,5	0,71	2,6
8 Zyklus	1,27	3,5	1,44	3,9	1,41	4,1	0,69	2,6	0,77	2,8	0,76	2,9
9 Zyklus	1,34	3,9	1,59	4,3	1,55	4,6	0,73	2,9	0,82	3,1	0,81	3,2
10 Zyklus	1,41	4,2	1,62	4,7	1,64	5,0	0,78	3,2	0,87	3,4	0,86	3,5
11 Zyklus	1,52	4,5	1,70	5,1	1,72	5,4	0,84	3,4	0,89	3,7	0,90	3,8
12 Zyklus	1,58	4,8	1,80	5,5	1,77	5,7	0,92	3,6	0,96	4,0	0,92	4,0

Anhang D2: Veränderung der mittlere Profiltiefen (MPD) und des Masseverlusts (MV) in Abhängigkeit der Anzahl der Sandstrahlzyklen beim Asphaltbeton bzw. Splittmastixasphalt bei Lagerungstemperaturen von (+5 ± 3) °C, (-10 ± 3) °C und (-20 ± 3) °C

## Anhang D

Überrollungen	AC + 5 1Z			AC - 20 2Z			SMA + 5 1Z			SMA - 20 2Z		
	$\mu_{PWS}$	PWS	MPD									
Original	--	--	0,35	--	--	0,36	--	--	0,49	--	--	0,51
1 Zyklus	0,534	0,539	0,50	--	--	0,51	0,443	0,442	0,41	--	--	0,38
2 Zyklus	--	--	--	0,547	0,554	0,70	--	--	--	0,507	0,516	0,44
4500	0,371	0,354	0,48	0,376	0,360	0,68	0,287	0,291	0,37	0,338	0,322	0,46
7500	0,351	0,343	0,48	0,364	0,349	0,67	0,279	0,281	0,37	0,319	0,311	0,44
15000	0,332	0,328	0,48	0,337	0,333	0,67	0,269	0,269	0,36	0,297	0,295	0,43
22500	0,319	0,319	0,48	0,322	0,323	0,66	0,262	0,262	0,38	0,284	0,285	0,41
30000	0,310	0,312	0,48	0,310	0,317	0,65	0,257	0,256	0,36	0,275	0,279	0,41
37500	0,303	0,307	0,47	0,302	0,312	0,65	0,255	0,252	0,37	0,268	0,274	0,40
45000	0,297	0,303	0,47	0,298	0,307	0,64	0,251	0,249	0,37	0,262	0,269	0,40
90000	0,291	0,288	0,46	0,293	0,292	0,65	0,245	0,237	0,35	0,245	0,253	0,40
135000	0,278	0,279	0,46	0,283	0,282	0,63	0,233	0,229	0,35	0,243	0,244	0,40
180000	0,272	0,273	0,45	0,272	0,276	0,62	0,228	0,224	0,36	0,233	0,237	0,40
225000	0,267	0,268	0,45	0,270	0,270	0,62	0,217	0,220	0,36	0,226	0,232	0,39
270000	0,263	0,264	0,44	0,265	0,266	0,61	0,209	0,217	0,35	0,216	0,228	0,40

Anhang D3: Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  bzw. PWS und mittlere Profiltiefen (MPD) der Varianten AC +5 1Z, AC -20 2Z, SMA +5 1Z und SMA -20 2Z

log. Reression (PWS = a · ln(x) + b)			
Variation	a	b	R <sup>2</sup>
AC +5 1Z	-0,022	0,5392	0,9926
AC -20 1Z	-0,023	0,5539	0,9880
SMA +5 1Z	-0,018	0,4420	0,9952
SMA -20 2Z	-0,023	0,5158	0,9890

Anhang D4: Regressionsgleichungen des kontinuierlichen Griffigkeitsverlaufs der Varianten AC +5 1Z, AC -20 2Z, SMA +5 1Z und SMA -20 2Z, mit Angabe der Koeffizienten a bzw. b und des Bestimmtheitsmaßes R<sup>2</sup>

Überrollungen	Strecke 9 - EP-2Z			Strecke 9 - MW-2Z			Strecke 9 - BK-2Z		
	$\mu_{PWS}$	PWS	MPD	$\mu_{PWS}$	PWS	MPD	$\mu_{PWS}$	PWS	MPD
Original	--	--	0,89	--	--	0,80	--	--	1,02
1 Zyklus	--	--	0,79	--	--	0,74	--	--	1,24
2 Zyklus	0,481	0,484	0,82	0,488	0,496	0,80	0,501	0,511	1,38
4500	0,355	0,349	0,81	0,374	0,353	0,81	0,379	0,360	1,34
7500	0,345	0,341	0,82	0,351	0,344	0,77	0,365	0,351	1,36
15000	0,336	0,330	0,83	0,334	0,332	0,77	0,350	0,338	1,35
22500	0,328	0,323	0,82	0,322	0,325	0,76	0,340	0,331	1,33
30000	0,328	0,319	0,82	0,315	0,320	0,76	0,332	0,326	1,34
37500	0,320	0,315	0,81	0,309	0,317	0,77	0,325	0,322	1,31
45000	0,314	0,312	0,80	0,306	0,314	0,77	0,319	0,318	1,30
90000	0,306	0,301	0,80	0,298	0,302	0,77	0,313	0,306	1,28
135000	0,297	0,295	0,80	0,289	0,295	0,77	0,305	0,299	1,28
180000	0,296	0,290	0,79	0,286	0,290	0,75	0,295	0,293	1,27
225000	0,289	0,286	0,80	0,282	0,286	0,73	0,285	0,289	1,27
270000	0,283	0,284	0,79	0,280	0,283	0,72	0,279	0,286	1,27

Überrollungen	Strecke 14 - EP-2Z			Strecke 14 - MW-2Z			Strecke 14 - BK-2Z		
	$\mu_{PWS}$	PWS	MPD	$\mu_{PWS}$	PWS	MPD	$\mu_{PWS}$	PWS	MPD
Original	--	--	0,50	--	--	0,36	--	--	0,28
1 Zyklus	--	--	0,76	--	--	0,60	--	--	0,42
2 Zyklus	0,506	0,520	1,03	0,549	0,552	0,75	0,511	0,522	0,59
4500	0,376	0,360	1,06	0,377	0,367	0,75	0,381	0,362	0,58
7500	0,361	0,350	1,06	0,364	0,355	0,75	0,366	0,352	0,58
15000	0,353	0,337	1,05	0,340	0,340	0,75	0,347	0,339	0,57
22500	0,339	0,329	1,04	0,327	0,331	0,75	0,337	0,332	0,57
30000	0,327	0,324	1,05	0,316	0,325	0,75	0,329	0,326	0,57
37500	0,313	0,320	1,05	0,310	0,320	0,75	0,323	0,322	0,56
45000	0,304	0,316	1,05	0,304	0,316	0,74	0,318	0,318	0,56
90000	0,293	0,303	1,05	0,296	0,301	0,74	0,300	0,305	0,55
135000	0,287	0,295	1,05	0,293	0,292	0,74	0,295	0,298	0,54
180000	0,281	0,290	1,05	0,284	0,285	0,73	0,286	0,292	0,55
225000	0,275	0,286	1,05	0,279	0,280	0,72	0,284	0,288	0,53
270000	0,267	0,282	1,03	0,277	0,276	0,71	0,279	0,284	0,52

Anhang E1: Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  bzw. PWS und mittlere Profiltiefen (MPD) der Strecke 9 bzw. 14 in den Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z

Variation	log. Reression (PWS = a · ln(x) + b)		
	a	b	R <sup>2</sup>
Strecke 9 - EP-2Z	-0,016	0,4836	0,9966
Strecke 9 - MW-2Z	-0,017	0,4957	0,9799
Strecke 9 - BK-2Z	-0,018	0,5113	0,9782
Strecke 14 - EP-2Z	-0,019	0,5199	0,9670
Strecke 14 - MW-2Z	-0,022	0,5516	0,9923
Strecke 14 - BK-2Z	-0,019	0,5220	0,9811

Anhang E2: Regressionsgleichungen des kontinuierlichen Griffigkeitsverlaufs der Strecke 9 bzw. 14 in den Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z, mit Angabe der Koeffizienten a bzw. b und des Bestimmtheitsmaßes R<sup>2</sup>

Phase	EP	MW	BK	BK-3J	EP-2Z	MW-2Z	BK-2Z	Mittelwert	Spannweite
Überrollungen	$\mu_{PWS}$								
0	0,440	0,441	0,450	0,385	0,481	0,488	0,501	0,455	0,116
4500	0,376	0,379	0,367	0,344	0,355	0,374	0,379	0,368	0,036
7500	0,363	0,351	0,353	0,320	0,345	0,351	0,365	0,350	0,045
15000	0,352	0,329	0,339	0,310	0,336	0,334	0,350	0,336	0,042
22500	0,343	0,320	0,331	0,303	0,328	0,322	0,340	0,327	0,040
30000	0,338	0,309	0,324	0,297	0,328	0,315	0,332	0,320	0,041
37500	0,330	0,308	0,317	0,292	0,320	0,309	0,325	0,315	0,038
45000	0,326	0,302	0,323	0,290	0,314	0,306	0,319	0,311	0,036
90000	0,310	0,294	0,307	0,285	0,306	0,298	0,313	0,302	0,028
135000	0,298	0,285	0,300	0,277	0,297	0,289	0,305	0,293	0,028
180000	0,288	0,277	0,281	0,272	0,296	0,286	0,295	0,285	0,024
225000	0,284	0,272	0,277	0,278	0,289	0,282	0,285	0,281	0,018
270000	0,276	0,270	0,271	0,274	0,283	0,280	0,279	0,276	0,013

Anhang E3: Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  in Abhängigkeit der Anzahl der Überrollungen der Strecke 9 in den Phasen EP, MW, BK, BK-3J, EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z

Anhang E

Phase	EP	MW	BK	BK-3J	EP-2Z	MW-2Z	BK-2Z	Mittelwert	Spannweite
Überrollungen	PWS	PWS							
0	0,461	0,459	0,465	0,396	0,484	0,496	0,511	0,467	0,115
4500	0,351	0,342	0,347	0,320	0,349	0,353	0,360	0,346	0,039
7500	0,345	0,334	0,340	0,316	0,341	0,344	0,351	0,339	0,035
15000	0,335	0,325	0,330	0,310	0,330	0,332	0,338	0,329	0,029
22500	0,330	0,319	0,325	0,306	0,323	0,325	0,331	0,323	0,025
30000	0,326	0,315	0,321	0,303	0,319	0,320	0,326	0,319	0,023
37500	0,324	0,312	0,318	0,301	0,315	0,317	0,322	0,315	0,022
45000	0,321	0,309	0,315	0,300	0,312	0,314	0,318	0,313	0,021
90000	0,312	0,300	0,305	0,294	0,301	0,302	0,306	0,303	0,019
135000	0,307	0,294	0,300	0,290	0,295	0,295	0,299	0,297	0,017
180000	0,303	0,290	0,296	0,287	0,290	0,290	0,293	0,293	0,016
225000	0,300	0,287	0,293	0,285	0,286	0,286	0,289	0,290	0,015
270000	0,298	0,284	0,290	0,284	0,284	0,283	0,286	0,287	0,015

Anhang E4: Griffigkeitswerte PWS in Abhängigkeit der Anzahl der Überrollungen der Strecke 9 in den Phasen EP, MW, BK, BK-3J, EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z

Phase	EP	MW	BK	BK-3J	EP-2Z	MW-2Z	BK-2Z	Mittelwert	Spannweite
Überrollungen	$\mu_{PWS}$								
0	0,524	0,559	0,547	0,441	0,506	0,549	0,511	0,520	0,118
4500	0,365	0,411	0,394	0,360	0,376	0,377	0,381	0,381	0,051
7500	0,337	0,389	0,375	0,348	0,361	0,364	0,366	0,363	0,052
15000	0,313	0,366	0,354	0,331	0,353	0,340	0,347	0,344	0,053
22500	0,298	0,351	0,342	0,321	0,339	0,327	0,337	0,331	0,052
30000	0,290	0,343	0,330	0,314	0,327	0,316	0,329	0,321	0,053
37500	0,285	0,338	0,321	0,308	0,313	0,310	0,323	0,314	0,053
45000	0,277	0,332	0,312	0,303	0,304	0,304	0,318	0,307	0,054
90000	0,264	0,310	0,306	0,290	0,293	0,296	0,300	0,294	0,046
135000	0,253	0,299	0,290	0,285	0,287	0,293	0,295	0,286	0,047
180000	0,244	0,291	0,279	0,279	0,281	0,284	0,286	0,278	0,047
225000	0,242	0,289	0,276	0,277	0,275	0,279	0,284	0,275	0,047
270000	0,241	0,283	0,275	0,271	0,267	0,277	0,279	0,270	0,042

Anhang E5: Griffigkeitswerte  $\mu_{PWS}$  in Abhängigkeit der Anzahl der Überrollungen der Strecke 14 in den Phasen EP, MW, BK, BK-3J, EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z

Phase	EP	MW	BK	BK-3J	EP-2Z	MW-2Z	BK-2Z	Mittelwert	Spannweite
Überrollungen	PWS	PWS							
0	0,535	0,574	0,560	0,455	0,520	0,552	0,522	0,531	0,119
4500	0,341	0,381	0,375	0,338	0,360	0,367	0,362	0,360	0,043
7500	0,329	0,369	0,363	0,330	0,350	0,355	0,352	0,350	0,039
15000	0,314	0,353	0,348	0,321	0,337	0,340	0,339	0,336	0,039
22500	0,304	0,344	0,339	0,315	0,329	0,331	0,332	0,328	0,039
30000	0,298	0,337	0,333	0,311	0,324	0,325	0,326	0,322	0,039
37500	0,292	0,332	0,328	0,308	0,320	0,320	0,322	0,317	0,039
45000	0,288	0,328	0,324	0,305	0,316	0,316	0,318	0,314	0,039
90000	0,272	0,312	0,309	0,296	0,303	0,301	0,305	0,300	0,039
135000	0,263	0,302	0,300	0,290	0,295	0,292	0,298	0,291	0,039
180000	0,256	0,296	0,293	0,286	0,290	0,285	0,292	0,286	0,039
225000	0,251	0,291	0,289	0,283	0,286	0,280	0,288	0,281	0,039
270000	0,247	0,286	0,285	0,280	0,282	0,276	0,284	0,277	0,039

Anhang E6: Griffigkeitswerte PWS in Abhängigkeit der Anzahl der Überrollungen der Strecke 14 in den Phasen EP, MW, BK, BK-3J, EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z

AC 11 D S				einfache Varianz- analyse	LSD-Test			
					EP	MW	BK	
$\mu_{PWS}$ nach 270.000 Überrollungen				signifi.	Ranking der homogenen Gruppen			
					1. Gruppe	2. Gruppe	3. Gruppe	
14	AC 11 D S	25/55-55 A						

Anhang E7: Ergebnisse der statistischen Analyse Griffigkeitswert  $\mu_{PWS}$  nach 270.000 Überrollungen der Strecke 14 in den Phasen EP-2Z, MW-2Z und BK-2Z [80]