



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Polierbarkeit – Griffigkeit und Akustik von Deckschichten (PoGrifAk)

**Polishing - Grip and acoustic properties of pavements
(PoGrifAk)**

**Polissage – adhérence et acoustique des couches de
roulement (PoGrifAk)**

IMP Bautest AG

Christian Angst, Dr. dipl. Ing. ETH

Pietro Luraschi, MSc Erdw. ETH

Martin Dressler, Dr.-Ing.

Müller Engineering GmbH

Gert Müller, dipl. Ing. FH

**Forschungsprojekt VSS2018/330 auf Antrag des Schweizerischen
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS**

Juni 2024 | 1792

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet. Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.
Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima. Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee. Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)

Polierbarkeit – Griffigkeit und Akustik von Deckschichten (PoGrifAk)

**Polishing - Grip and acoustic properties of pavements
(PoGrifAk)**

**Polissage – adhérence et acoustique des couches de
roulement (PoGrifAk)**

IMP Bautest AG

Christian Angst, Dr. dipl. Ing. ETH

Pietro Luraschi, MSc Erdw. ETH

Martin Dressler, Dr.-Ing.

Müller Engineering GmbH

Gert Müller, dipl. Ing. FH

**Forschungsprojekt VSS2018/330 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes
der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS**

Juni 2024 | 1792

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Christian Angst, IMP Bautest AG

Mitglieder

Pietro Luraschi, IMP Bautest AG

Martin Dressler, IMP Bautest AG

Gert Müller, Müller Engineering

Federführende Fachkommission

Fachkommission 3: Baustoffe

Begleitkommission

Präsident

Urs Schellenberg

Mitglieder

Hans Peter Bucheli

Philip Bürgisser

Guido Frenzer

Ursina Jenny

Fabian Traber

Ko-Finanzierung des Forschungsprojekts

keine

Antragsteller

Bundesamt für Strassen (ASTRA)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von
<https://www.mobilityplatform.ch>
heruntergeladen werden.

Juni 2024

4.2.1	Mosaik-Verfahren	51
4.2.1.1	Mastix-Verfahren.....	52
4.2.2	Messung der Sandfraktion 0/2	55
4.3	PWS-Wert der verschiedenen Fraktionen	56
4.4	Schlussfolgerungen Kapitel I	58
4.4.1	Vergleich Mastix – Mosaik.....	58
4.4.2	Entwicklung der Griffigkeit: Erreichung des Endpolierwertes	59
4.4.3	Korrelation zwischen PSV- und PWS-Wert	60
4.4.4	Mögliche Anforderungen an den PWS-Wert	61
4.4.5	Zusammenfassung	62
5	Resultate II: Akustik	64
5.1	Proben.....	64
5.1.1	Walz-Asphaltproben	64
5.1.2	Gussasphalt und Waschbeton	64
5.1.3	Polierexperimente	65
5.1.4	Visuelles Ergebnis des Polierens.....	67
5.1.5	SRT-Messungen	68
5.1.6	Vergleich Polierwirkung IWS-Maschine und Wehner/Schulze-Maschine.....	70
5.1.7	Spezifischer Luftströmungswiderstand	71
5.1.8	Gestaltfaktor.....	73
5.1.9	Lambda-Wert	74
5.1.10	SPERoN-Simulation.....	76
5.2	Schlussfolgerungen Kapitel II.....	77
6	Resultate III: Optimierung von Rezepturen.....	79
6.1	Asphalt	79
6.1.1	AC 8 S 80	
6.1.2	AC MR 8	81
6.1.3	Folgerungen Rezeptoptimierung Asphalt	82
6.2	Beton	84
6.2.1	Waschbeton.....	84
6.2.1.1	Zusammensetzung und Herstellung der Prüfkörper.....	84
6.2.1.2	Frischbetonkontrolle und mechanische Eigenschaften.....	85
6.2.1.3	Prüfung der Oberflächeneigenschaften	85
6.2.2	Besenstrich auf G-Beton 22	87
6.2.2.1	Zusammensetzung und Herstellung der Prüfkörper.....	87
6.2.2.2	Frischbetonkontrolle und mechanische Eigenschaften.....	89
6.2.2.3	Prüfung der Griffigkeit nach Wehner/Schulze (FAP)	90
7	Wehner/Schulze-Validierung: Ringversuch	93
7.1	Einführung.....	93

8	Schlussfolgerungen	94
8.1	Bewertungshintergrund	94
8.2	Akustik	94
8.3	Rezeptoptimierung	94
8.3.1	Asphalt	95
8.3.2	Beton	95
9	Weiterer Forschungsbedarf	96
10	Literaturverzeichnis	98
11	Anhänge	101
11.1	Gesteinskörnungen	101
11.2	Asphaltnmischungen Kapitel 2	114
11.3	Asphaltnmischungen Kapitel 3	117
12	Projektabschluss	124

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Herstellung von Waschbetonplatten: A) frisch B) mit Verzögerer C) «gewaschene» Platte.	39
Abbildung 2: Die verschiedenen Arten von Oberflächentexturen, die hergestellt wurden: Strassen-, Strohbesen und unbehandelte Oberfläche.....	40
Abbildung 3: Links: Aufzeichnung des Reibungskoeffizienten während des Bremsvorganges. Rechts: Entwicklung des Reibungskoeffizienten (Griffigkeit) für eine Probe mit ungünstigem Polierwiderstand (rot) und für eine Probe mit hohem Polierwiderstand (grün). Quelle: IMP.....	42
Abbildung 4: Vorbereitung von Mosaik-Proben: a) Verlegung von Gesteinskörnungen, b) Auffüllung mit Sand, c) erste Schicht aus hochviskosem Harz, d) fertige Probe bei der die beiden unterschiedlichen Harze sichtbar sind, e) Ansicht von oben.	45
Abbildung 5: Probenvorbereitung nach der Mastix-Methode: a) Mischungsvorbereitung, b) Füllen der Form, c) Vibration, um eventuelle Luftblasen zu entfernen, d) gefüllte Form, e) ausgeschaltete Proben, f) geschnittene Proben, g) Ansicht von oben.	45
Abbildung 6: Erscheinungsbild der Sandproben 0/2.	46
Abbildung 7: Histogramm der Standardabweichungen (s_N) für μ_m-0 und $\mu_m-180'000$ bestimmt an Mastix- und Mosaik-Proben mit Wehner/Schulze.	48
Abbildung 8: PSV-Wert der verschiedenen Provenienzen (links) und entsprechender LA-Koeffizient (rechts). Die orange gestrichelte Line stellt die Anforderung (SN EN 670130a) für Deckschichten dar.	51
Abbildung 9: Entwicklung des Reibungskoeffizienten (PWS) für Mosaik-Proben der 10 verschiedenen Provenienzen. Dargestellt sind der Anfangswert (blau), der Wert nach 90'000 Polierübergängen (orange) und der Endwert 180'000 Polierübergängen (grau).....	52
Abbildung 10: Links: Reibungskoeffizient nach 180'000 Polierübergängen für die 10 Provenienzen, Fraktion 8/11. Der angegebene Fehler entspricht der jeweiligen Standardabweichung der Messwerte. Rechts: Vergleich des gemessenen PWS-Wertes (Mosaik) und PSV für die verschiedenen Proben der Fraktion 8/11.....	52
Abbildung 11: Zusammenfassung des Reibungskoeffizienten (FAP) für Mastix-Proben der 10 Provenienzen (Fraktion 8/11) gemessen nach 0 (PWS-0, blau), 90'000 (PWS-90'000, orange) und 180'000 Polierübergängen (PWS-180'000, grau).	53
Abbildung 12: Zusammenfassung des Reibungskoeffizienten (FAP) für Mastix-Proben der 10 Provenienzen (Fraktion 4/8) gemessen nach 0 (PWS-0, blau), 90'000 (PWS-90'000, orange) und 180'000 Polierübergängen (PWS-180'000, grau).....	54
Abbildung 13: Links: Zusammenfassung des Reibungskoeffizienten für Mastix-Proben der 10 Provenienzen (Fraktion 2/4) gemessen nach 0 (PWS-0, blau), 90'000 (PWS-90'000, orange) und 180'000 Polierübergängen (PWS-180'000, grau). Rechts: Fokus auf die Verteilung von PWS-180'000 (Endgriffigkeit).	54
Abbildung 14: Entwicklung des Reibungskoeffizienten (PWS) für die vier gemessenen Fraktionen 0/2.	55

Abbildung 15: Gemessene PWS-Werte für die vier Provenienzen und die verschiedenen Fraktionen. Ebenfalls in rosa dargestellt ist der PWS-Wert der 0/2-Fraktion, der deutlich höher ist als die anderen gemessenen Werte. Bis auf die Sandfraktion 0/2 sind alle Proben nach dem Mastix-Verfahren hergestellt.....	56
Abbildung 16: Darstellung des Reibungskoeffizienten für Mosaik-Proben der 10 Provenienzen nach 180'000 Polierübergängen Fraktionen (2/4, 4/8, 8/11).	57
Abbildung 17: Bestimmung des PWS-Wertes für verschiedene Fraktionen einer einzigen Provenienz. Die Proben der Fraktionen 4/8 und 8/11 wurden nach der Mosaik-Methode hergestellt. Bei der Fraktion 0/2 kam das Sandherstellungsverfahren zur Anwendung. Die Fraktion 2/4 wurde nicht untersucht. Die Schätzungswerte für die Fraktion 2/4 sind daher mit einer gestrichelten Linie dargestellt.....	58
Abbildung 18: Korrelation zwischen PWS-Mastix und PWS-Mosaik. Links: PWS-Anfang (Anfangsgriffigkeit). Rechts: PWS-180'000 (Endgriffigkeit).....	59
Abbildung 19: Entwicklung des Reibungskoeffizienten für eine nach dem Mastix-Verfahren hergestellte Probe. Die Probe wurde mit bis zu 540'000 Polierübergängen geprüft.....	60
Abbildung 20: Korrelation zwischen PWS-180'000 und PSV für Proben der Fraktion 8/11, die nach der Mastix-Methode (grün) und Mosaik (blau) hergestellt wurden.	61
Abbildung 21: Schleifgerät IWS.	66
Abbildung 22: Asphaltproben poliert.	67
Abbildung 23: Lupenaufnahme eines angeschliffenen Kornes bei Probe AC 8 H GKh während der Einlaufversuche.	68
Abbildung 24: Die Probenoberfläche der polierten Waschbetonproben nach 9x polieren.	68
Abbildung 25: SRT-Versuchsaufbau.....	69
Abbildung 26: PTV-Werte der Griffigkeitsmessungen mit dem SRT-Pendel. Deutlich zu erkennen ist der Abfall der Griffigkeit mit fortschreitender Anzahl relativer Polierübergänge. Die jeweils für die Asphaltproben angegebenen solitären Messwerte (einzelne Punkte ohne Gerade) bei Anzahl relativer Polierübergänge = 0 entsprechen der Griffigkeit vor dem Sandstrahlen.	70
Abbildung 27: Vergleich der Polierwirkung der IWS-Maschine (Proben «as received» mit eckigen Symbolen) und anschließender Polierung mit der Wehner/Schulze-Maschine. Die IWS-Proben wurden vor Beginn der FAP-Prüfung mittels Sandstrahlen wiederaufgeraut.	71
Abbildung 28: Spezifischer Luftströmungswiderstand als Funktion der Anzahl relativer Polierübergänge für Bitumenproben (AC 8 H, SDA 4-12, SDA 8-12) mit unterschiedlicher Gesteinskörnung (GKh, GKt), sowie Gussasphalt MA 11 S abgestreut mit Material der Provenienz 11.	72
Abbildung 29: spez. Luftströmungswiderstand GA/Waschbeton. Spezifischer Luftströmungswiderstand als Funktion der Anzahl relativer Polierübergänge für Waschbeton mit unterschiedlicher Gesteinskörnung (GKh, GKt) sowie für Gussasphalt.....	73
Abbildung 30: Plot aller Wertepaare spez. Luftströmungswiderstand vs. mittlere Profiltiefe unabhängig von der Gesteinsprovenienz, Asphaltorte, Waschbeton oder Gussasphalt. Oberhalb ca. 1 mm mittlerer Profiltiefe nimmt der spez. Luftströmungswiderstand stark ab.....	73

Abbildung 31: Erläuterung zum Gestaltfaktor nach Beckenbauer. Aus Quelle: https://docplayer.org/33125805-Reifen-fahrbahn-geraeusche-minderungspotenziale-der-strassenoberflaeche.html	74
Abbildung 32: Änderung des Gestaltfaktors als Funktion der Anzahl relativer Polierübergänge. Zwei Probenklassen sind zu erkennen; Gestaltfaktor zwischen 40 und 60 % - annähernd konkave Oberfläche für Waschbeton und die Gussasphaltprobe sowie Gestaltfaktor zwischen 90 und 80 % - alle anderen Asphaltproben.	74
Abbildung 33: Verhalten der effektiven Rauigkeitstiefe R_{eff} und Rauigkeitwellenlänge λ beim Polieren. Die Lage des Maximums von λR_{max} ändert sich nicht mit fortschreitendem Polieren. Das zunehmende Polieren ebnet die Oberflächen ein und senkt λR_{max}	76
Abbildung 34: Siebkurve eines AC 8 (blau) vs. eines AC MR 8 (orange).....	80
Abbildung 35: Links: Gemessene FAP-Werte (Mastix-Proben) für die vier verschiedenen Mischungen von AC 8 S. Rechts: Zoom auf FAP-Werte nach 180'000 Polierübergängen (Endgriffigkeit).	81
Abbildung 36: Links: Gemessene FAP-Werte (Mastix-Proben) für die vier verschiedenen Mischungen von AC MR 8. Rechts: Zoom auf FAP-Werte nach 1800'000 Polierübergängen (Endgriffigkeit).....	82
Abbildung 37: Aussehen eines AC MR 8 (links) und eines AC 8 (rechts).	83
Abbildung 38: Ermittelte Endgriffigkeiten (FAP-180'000) für die beiden Mischgutsorten (AC 8 und AC MR 8) mit GK _h und GK _t verteilt auf verschiedene Fraktionen (Mastix-Proben).	83
Abbildung 39: Korngrößenverteilung des Waschbeton WB8; Zielwerte (gelb) und effektive Werte (blau).....	84
Abbildung 40: Entwicklung der Biegezugfestigkeit (links) und Druckfestigkeit (rechts) für 2, 7 und 28 Tage.	86
Abbildung 41: Links: Gemessene FAP-Werte für die vier verschiedenen Mischungen von WB 8. Rechts: Zoom auf FAP-Werte nach 180'000 Polierübergängen (Endgriffigkeit).....	86
Abbildung 42: typische Korngrößenverteilung für den G-Beton 22.	88
Abbildung 43: Beispiel einer Betonplatte (48 x 48 x 10) cm mit verschiedenen Oberflächen-Bearbeitungen (oben rechts: keine Textur / unten rechts Strohbesen / links Strassenbesen).....	88
Abbildung 44: links Strassenbesen; rechts Strohbesen.	89
Abbildung 45: Entwicklung der Biegezugfestigkeit (links) und Druckfestigkeit (rechts) für 2, 7 und 28 Tage.	90
Abbildung 46: Entwicklung der FAP-Werte, die für die vier Mischungen (G1-G4) ermittelt wurden.....	90
Abbildung 47: Rautiefen der Proben «Strohbesen vor / nach Polierung».....	91
Abbildung 48: Laser-Texturmessungen auf der polierten Oberfläche; oben Probe G4 mit 100 % GK _h , unten Probe G3 mit 0/4 GK _h	92
Abbildung 49: Entwicklung des FAP-Wertes für die 4 untersuchten Mischungen. ...	92
Abbildung 50: Darstellung der Ergebnisse (Mastix-Proben) des Ringversuches mit insgesamt 5 Laboratorien.....	93

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Liste der verwendeten Prüfungen und Methoden sowie der entsprechenden Normen.	38
Tabelle 2: Übersicht der drei Varianten, die für die Wehner/Schulze-Prüfung im PoGrifAk-Projekt verwendet wurden.	43
Tabelle 3: Vergleich der Mosaik- und Mastix-Methode.....	47
Tabelle 4: Angaben zur Präzision des FAP- bzw. PWS-Wertes aus TP Gestein-StB [5].	47
Tabelle 5: Angaben zur Präzision des FAP-Wertes aus SN EN 12697-49 [3].	48
Tabelle 6: Auswahl der Gesteinskörnungen für das Projekt.....	49
Tabelle 7: Tabellarische Darstellung der Petrographie, des Los-Angeles-Koeffizienten und Polierwiderstandes PSV sowie des PWS-Wertes für die 10 Provenienzen. Die Provenienz 11 diente als Abstreumaterial für die Akustiktests des lärmarmen Gussasphaltes. 1) beim Teilprojekt III «Rezeptoptimierung»; 2) beim Teilprojekt II Akustik.	50
Tabelle 8: Zusammenfassung der Messdaten von Proben, die nach der Mastix-Methode hergestellt wurden, für die Fraktionen 2/4, 4/8 und 8/11.	55
Tabelle 9: PWS-0, -90'000 und -180'000 für die vier Provenienzen.	55
Tabelle 10: Rangfolge der PWS-Werte je nach Fraktion. Daten entnommen aus Abbildung 15.	56
Tabelle 11: Analyse der Unterschiede der PWS-Werte für Mastix-Proben nach 90'000 und 180'000 Polierübergängen.	60
Tabelle 12: Festlegung von provisorischen Anforderungen, die sich aus der Korrelation PWS zu PSV, dem PSV-Anforderungswert für die Fraktion 8/11 sowie den Zunahmen der PWS-Werte bei kleineren Grösstkörnern ableiten.....	62
Tabelle 13 Übersicht über die hergestellten Asphaltmischgutsorten.	64
Tabelle 14 Planung der Messungen auf den Asphaltplatten einer Mischgutsorte für die unterschiedlichen Polierstadien. Diese Planung wurde für jede Mischgutsorte durchgeführt.	65
Tabelle 15: Kumulierte Polierzeit und Anzahl relativer Polierübergänge für die in Tabelle 14 definierten Versuchspunkte.....	65
Tabelle 16 Auswertung der Veränderungen der massgebenden Werte für die Beurteilung der akustischen Eigenschaften einer Deckschicht.	77
Tabelle 17 : Zusammenfassung von PTV, MPD (Mittlere Profiltiefe), G-Faktor, spezifischem Luftströmungswiderstand und Rauigkeitswellenlänge ($\lambda_{R_{max}}$) bei maximaler effektiver Rauigkeitstiefe für Nullproben (vor Polieren) sowie nach 5 und 17 relativen Polierübergängen.	78
Tabelle 18: Zusammenfassung der hergestellten Asphaltmischungen.....	80
Tabelle 19: Entwicklung der FAP-Werte für die vier gemessenen AC 8-Mischungen. Daten aus Abbildung 35.....	81
Tabelle 20: Entwicklung der FAP-Werte für die vier gemessenen AC MR 8-Mischungen. Daten aus Abbildung 36.....	82
Tabelle 21: Auflistung der verschiedenen Mischungen aus Waschbeton.	85
Tabelle 22: Konsistenz und mechanische Eigenschaften der Mischungen.	85

Tabelle 23: Entwicklung der FAP-Werte für die vier gemessenen WB 8-Mischungen.	86
Tabelle 24: Konsistenz und mechanische Eigenschaften der Mischungen.....	89
Tabelle 25 Gegenüberstellung der Anteile GK _h bzw. GK _t und den Werten für FAP- 180'000.	90
Tabelle 26 Zusammenstellung der gemessenen FAP-Werte an den Proben G-Beton 22 mit Stroh- bzw. Strassenbesen.	91

Abkürzungs- und Begriffsverzeichnis

AC	Asphalt Concrete
AC MR	Rauasphalt (Macro Rugeux)
Art.	Artikel
Bd.	Band
Bsp.	Beispiel
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
FAP	Friction after Polishing; wird durch den Mittelwert mindestens zweier μ_{FAP} -Werte bestimmt
FAP-90'000	Friction after Polishing; Ergebnis nach 90'000 Polierübergängen
FAP-180'000	Friction after Polishing; Ergebnis nach 180'000 Polierübergängen
EN	Europäische Norm
G-Beton 22	NPK G-Beton mit Grösstkorn 22 mm
GKh	Gesteinskörnung mit hohem Polierwiderstand
GKt	Gesteinskörnung mit tiefem Polierwiderstand
LA	Los-Angeles-Test
μ_{FAP}	Griffigkeitswert (Reibungskoeffizient) einer Einzelprobe
μ_{km}	Mittelwert des Reibungskoeffizienten der Prüf gummi auf der Vergleichsplatte vor ($\mu_{km,a}$) und nach ($\mu_{km,b}$) der Messung
μ_m	Reibungskoeffizient bei 60 km/h
μ_{m-0}	Reibungskoeffizient μ_m , gemessen vor Beginn der Polierung
$\mu_{m-90'000}$	Reibungskoeffizient μ_m , gemessen nach 90'000 Polierübergängen
$\mu_{m-180'000}$	Reibungskoeffizient μ_m , gemessen nach 180'000 Polierübergängen
μ_{ref}	Gleitender Mittelwert der letzten 50 Messungen auf der Vergleichsplatte
NPK	Normen Positionen Katalog
n.b.	nicht bestimmt
Polierübergänge	Anzahl an vollständigen Umläufen des Polierkopfes auf der Probe während der FAP-Prüfung auf der Wehner/Schulze-Prüfmaschine
PTV	Pendulum Test Value
PSV	Polised Stone Value
PWS	Prüfverfahren Wehner/Schulze
RAP	Recycled Asphalt Pavement
SDA	Semi Dichter Asphalt
SN	Schweizer Norm
SRT	Skid Resistance Tester

Zusammenfassung

Problemstellungen

Das Forschungsprojekt mit dem Akronym PoGrifAk (Polierbarkeit – Griffigkeit – Akustik) hat drei unterschiedliche Ziele, welche sich aus drei verschiedenen Problemstellungen ableiten:

- Polierbarkeit der Gesteinskörnungen
Die heutige Prüfmethode PSV ist in mehrfacher Hinsicht nicht mehr befriedigend, da das Verfahren an einer Kornfraktion 8/11 durchgeführt wird, welche heute bei Deckschichten eine untergeordnete Rolle spielt. Zudem ist die Präzision des Verfahrens unbefriedigend. Es soll ein Bewertungshintergrund zur Festlegung von Anforderungen an den Polierwiderstand für die FAP-Methode mit den in der Schweiz typischen Gesteinskörnungen erarbeitet werden.
- Griffigkeit:
Es ist bekannt, dass die Griffigkeit einer Deckschicht vom Polierwiderstand der verwendeten Gesteinskörnungen abhängig ist. Ausländische Forschungen zeigen, dass mit einer optimierten Rezeptur teilweise auch weniger polierresistente Gesteinskörnungen verwendet werden können. Die Optimierung der Rezeptur von Asphalt- und Beton-Deckschichten in Bezug auf die Griffigkeit soll untersucht werden.
- Akustik:
Kann die anfänglich lärmreduzierende Textur einer Deckschicht über einen langen Zeitraum erhalten werden, bleibt auch die Lärmreduktion erhalten. Es ist zu untersuchen, ob ein Zusammenhang zwischen der Lärmreduktion (akustische Eigenschaften einer Deckschicht) und der Polierbarkeit der Gesteinskörnungen besteht.

Prüfmethode

Die Wehner/Schulze-Prüfmethode wurde für Asphalt-Oberflächen festgelegt, kann jedoch ebenfalls für Betonoberflächen, Gesteinskörnungen, Markierungen Schachtdeckel etc. verwendet werden. Die Abkürzung FAP steht für Friction after Polishing und hat im Rahmen der EN-Normierung die Bezeichnung «Wehner/Schulze» abgelöst. Das Ergebnis der Prüfung an gebundenen Oberflächen wird als FAP-Wert angegeben, bei der Prüfung von Gesteinskörnungen haben wir den in Deutschland verwendeten Begriff PWS (Prüfung Wehner/Schulze) übernommen. Für gebundene Oberflächen (Asphalt, Beton etc.) wird als Prüfkörper entweder ein Bohrkern Ø 225 mm oder eine Platte 220 mm x 220 mm verwendet. Bei der Prüfung von Gesteinskörnungen muss der Prüfkörper im Laborhergestellt werden. Untersucht wurden zwei unterschiedliche Herstellungs-Verfahren; das Mosaik- und das Mastix-Verfahren. Beim Mosaik-Verfahren werden die einzelnen Körner von Hand mosaikartig angeordnet und anschliessend durch Vergiessen eines Epoxidharzes befestigt. Diese Prüfkörperherstellung erinnert an die Herstellung der Platten für den PSV-Test. Bei der Mastix-Methode wird die zu untersuchende Kornfraktion mit einem bituminösen Mastix gemischt und in einem Zylinder (Ø 225 mm) gegossen und

einviertelt. Die Prüfung findet an einer Schnittfläche des Zylinders statt. Vergleichsuntersuchungen haben ergeben, dass beide Herstellungsmethoden zuverlässig sind und reproduzierbare Ergebnisse liefern; auch werden die 10 Provenienzen analog klassiert. Es wird die Mastix-Methode zur weiteren Verwendung vorgeschlagen, da bei diesem Verfahren der menschliche Einfluss (manuelles Verlegen des Mosaiks) geringer ist. Zudem wird diese Methode in Deutschland in der TP Gestein-StB [5] ebenfalls vorgeschlagen. Die Anzahl erforderlicher Polierübergänge wurde auf 90'000 festgelegt, da einerseits der weitere Abfall der Griffigkeit (nach 180'000 Polierübergängen) kleiner als die Wiederholpräzision ist, und andererseits auch die SN EN 12697-49 diese Anzahl an Polierübergängen für eine Standardmessung – wo keine Zwischenstufen zwischen Null und 90'000 Polierübergängen vermessen werden – festlegt.

Bewertungshintergrund

Es sollen Entscheidungsgrundlagen für die Festlegung von Anforderungen an die Polierbarkeit mittels FAP-Verfahren von Gesteinskörnungen für Asphalt- und Beton-Deckschichten ausgearbeitet werden. Zu diesem Zweck wurden aus 10 verschiedenen, repräsentativen Provenienzen der Schweiz Proben entnommen und untersucht. An diesen Proben wurden FAP-Prüfung gemäss EN 12697-49 an den Fraktionen 2/4, 4/8 und 8/11 durchgeführt und den Ergebnissen der PSV-Prüfung (an der Fraktion 8/11) gegenübergestellt. Um die Ergebnisse der Polierbarkeit zielgerichtet interpretieren zu können, wurden weitere Standard-Untersuchungen an den 10 ausgewählten Provenienzen durchgeführt (Los-Angeles-Versuch sowie eine petrographische Beurteilung). Aus den Untersuchungsergebnissen werden folgende Punkte herausgehoben:

- Zwischen dem PSV-Wert und dem PWS-Wert (Mastix-Verfahren) besteht bei der Fraktion 8/11 eine gute Korrelation; das Bestimmtheitsmass beträgt $r^2 = 0.81$; bei $n = 10$.
- Der Wert PWS ist stark von der untersuchten Kornfraktion abhängig, wie dies in Abbildung 15 zu sehen ist.
- Die Rangfolge der Provenienzen ändert sich je nach Fraktion. In der Tabelle 10 sind die Rangfolgen der PWS-Werte der Provenienzen bei den verschiedenen Fraktionen dargestellt, wobei der höchste Wert auf Rang 1 liegt. Die Provenienz 4 liegt je nach untersuchter Fraktion auf Rang 1, 2 oder 3. Dies zeigt, dass es wenig zuverlässig ist, von den Eigenschaften einer Fraktion auf die Eigenschaften anderer Fraktionen zu schliessen. Diese Erkenntnis ist aus früheren Arbeiten bekannt, es kann jedoch nicht genug darauf hingewiesen werden, dass die PSV-Werte der Fraktion 8/11 nicht auf kleinere Korngrößen übertragbar sind.

Es wurde ein Vorgehen vorgeschlagen, auf dessen Basis Anforderungen an die PWS-Werte abgeleitet werden können:

- Aus der Korrelation PWS zu PSV kann ein Anforderungswert für den PWS-Wert der Fraktion 8/11 abgeleitet werden.
- Aus den Ergebnissen zeigt sich, dass die PWS-Werte mit kleiner werdendem Grösstkorn zunehmen. Es wurde die Zunahme der PWS-Werte gegenüber

demjenigen der Fraktion 8/11 berechnet; 9 % bei der Fraktion 4/8 und 27 % bei der Fraktion 2/4.

- Mit dem festgelegten Anforderungswert für den PWS-Wert am Korn 8/11 kann, mittels der berechneten %-Zunahmen für die übrigen Fraktionen, die Anforderungswerte für die Fraktionen 2/4 und 4/8 errechnet werden.

In der vorliegenden Arbeit standen lediglich 10 Provenienzen zur Verfügung, was für die Festlegung von Anforderungen ungenügend ist, es wurden daher «provisorische Richtwerte» festgelegt.

Akustik

Die Fragestellung des Einflusses der Polierbarkeit auf die akustischen Eigenschaften wurde sowohl an Asphalt- wie auch Betonproben untersucht. Folgende Deckschicht-Konzepte wurden analysiert:

AC 8 H
SDA 4 12
SDA 8-12
MA 11 LA
Waschbeton WB8

Ausser beim MA 11 LA wurde jede Mischung doppelt hergestellt, wobei die eine Mischung 100 % Gesteinskörnungen mit hohem Polierwiderstand GK_h enthielt, die andere 100 % Gesteinskörnungen mit tiefem Polierwiderstand GK_t.

Die Proben wurden im Labor unter kontrollierten, wiederholbaren Bedingungen poliert. Nach einer festgelegten Anzahl an relativen Polierübergängen wurden folgende Werte bestimmt:

- PSV zur Beurteilung der Veränderung der Griffigkeit
- Spezifischer Luftströmungswiderstand
- Lasertextur-Messungen zur Bestimmung der Kennwerte mittlere Profiltiefe (MPD), Gestaltfaktor g , Fourier-Analyse der Texturprofile mit den Kennwerten R_{max} und λR_{max} .

Aus den Ergebnissen wurden untenstehende Folgerungen gezogen:

- Die Griffigkeitswerte zeigten einen Abfall, welcher sowohl in Abhängigkeit der Anzahl Polierübergänge sowie der eingesetzten Gesteinskörnungen stand. Dieses Ergebnis war zu erwarten und weist nach, dass die Polierung im Labor effektiv war.
- Bei den Kennwerten für lärmindernde Beläge wurden marginale Veränderungen festgestellt. Da sich die Eingangsgrößen zur Computersimulation des Rollgeräusches praktisch nicht veränderten, war auch nicht zu erwarten, dass eine Simulation des Rollgeräusches zusätzliche Erkenntnisse zeigen würde.
- Die als Zielsetzung des Teilprojektes «Akustik» formulierte Frage, ob die Polierung der Oberfläche einen Einfluss auf die akustischen Eigenschaften habe, kann somit beantwortet werden: Die Untersuchungsergebnisse geben keine Hinweise auf einen

Einfluss des Polierens der Gesteinskörner auf die akustischen Eigenschaften einer Deckschicht.

Optimierung der Rezepturen

Aus der Literatur [13] ist bekannt, dass sich die Griffigkeit durch den Einsatz eines hochwertigen Sandes, verbessern lässt. Unklar ist, ob bei Gesteinskörnungen mit ungünstiger Polierresistenz durch den gezielten Austausch von mittleren Kornfraktionen mit günstigerer Polierresistenz die Griffigkeit ebenfalls verbessern lässt.

Hierzu wurden Gesteinskörnungen aus zwei verschiedenen Provenienzen verwendet, welche sich durch ihren Polierwiderstand deutlich unterscheiden. Im Weiteren werden die Gesteinskörnung mit einem tiefen Polierwiderstand als «GKt» (Provenienz 10) bezeichnet, die Gesteinskörnung mit hohem Polierwiderstand mit «GKh (Provenienz 2).

Pro Mischgutsorte wurden je 4 Mischungen im Labor hergestellt, wobei die Provenienz der Gesteinskörnungen variiert wurde; siehe Tabelle 18. Es wurden insgesamt 8 Mischungen (4 x AC 8 S und 4 x AC MR 8) und 16 Asphaltplatten mit dem Walzsegmentverdichter hergestellt (zwei pro Mischung), sodass der FAP-Wert mittels Doppelbestimmung ermittelt werden konnte.

Es ist deutlich zu erkennen (Abbildung 35), dass für einen AC 8 S die Fraktion 0/4 für die Griffigkeit am relevantesten ist. Diese Tatsache kann auf die Siebkurve zurückgeführt werden, die im Falle eines AC 8 zu ca. 70 % aus der 0/4-Fraktion besteht.

Bei einem AC MR spielt die 4/8-Fraktion die wichtigste Rolle hinsichtlich der Griffigkeit. In der Tat hat die Mischung M6 Gesteinskörnungen mit einem hohen Polierwiderstand in dieser Fraktion. Obwohl sie nicht an die Werte der M8-Mischung (100 % GKh) herankommt, hat sie dennoch die zweitbeste Griffigkeit (Abbildung 36).

Folgerungen Rezeptoptimierung Asphalt

- Je höher der Anteil an Gesteinskörnungen mit hohem Polierwiderstand, desto höher ist (logischerweise) die Griffigkeit. Abhängig von der Mischgutsorte (und insbesondere der Sieblinie) wirken sich die verschiedenen Fraktionen jedoch unterschiedlich auf die endgültige Griffigkeit aus. Beim AC 8 ist der Anteil 0/4 entscheidend für die Griffigkeit; beim AC MR 8 ist der Anteil 4/8 entscheidend.
- Der AC MR 8 hat im Allgemeinen eine höhere Griffigkeit als ein AC 8, was auf die unterschiedliche Oberfläche zurückzuführen ist; ein AC MR ist per Definition rauer und hat eine viel grössere Rautiefe.

Beim Waschbeton wurden mit den beiden Gesteinskörnungen GKt und GKh ebenfalls 4 Mischungen hergestellt.

Die beiden Mischungen mit teilweiseem Gehalt an GKt-Körnung zeigen gute Endgriffigkeiten, alle drei Mischungen mit einem Anteil an GKh liegen auf einem

höheren Niveau als die Mischung K1 mit 100 % Gkt. Die Sieblinie des verwendeten Waschbeton weist eine Ausfallkörnung auf; die Komponente 4/8 hat einen Anteil von ca. 60 %. Wie der Abbildung 39 entnommen werden kann ist die Korngrösse 4/8 beim WB 8 hinsichtlich der Polierbarkeit dominant. Im Vergleich zum Asphalt scheint bereits ein geringer Anteil an GKh einen grossen Einfluss auf die Endgriffigkeit zu haben.

Neben dem Waschbeton WB8 wurde auch ein Beton G 22 mit zwei verschiedenen Besenstrichen (Stroh- und Strassenbesen) untersucht, wobei auch hier die Anteile Gkt und GKh analog variiert wurden. In dieser Untersuchung wurde auf die Bestimmung der Anfangsgriffigkeit verzichtet, um die Prüfmaschine zu schonen (extrem abrasive Textur zu Beginn der Prüfung). Aus den Daten wurden untenstehende Folgerungen gezogen:

- Sowohl beim Stroh- wie auch beim Strassenbesen haben die Gesteinskörnungen einen entscheidenden Einfluss auf die Endgriffigkeit
- Es ist davon auszugehen, dass die Textur des Besenstriches – unabhängig von der Zusammensetzung des Beton - abgefahren wird.
- Die nach der Polierung der Besenstrichtextur verbleibende Griffigkeit ist von der Zusammensetzung des Betons, insbesondere dessen Gesteinskörnungen, abhängig.
- Auch beim G-Beton 22 spielt der Polierwiderstand der Korngruppe 0/4 eine dominante Rolle.

Weiterer Forschungsbedarf

Anforderungen an Gesteinskörnungen

Mit der Prüfmethode nach Wehner/Schulze steht ein taugliches, zuverlässiges Instrument zur Verfügung, um die bestehende Lücke in der Prüfung der Polierbarkeit von Gesteinskörnungen zu schliessen.

Es wurde aufgezeigt, wie Anforderungswerte definiert werden könnten. Was zurzeit fehlt, ist ein breit abgestützter Bewertungshintergrund der schweizerischen Gesteinskörnungen. Hierzu wären Reihenuntersuchungen erforderlich, um Anforderungswerte auf der Basis eines robusteren Datenkollektivs festlegen zu können. Es ist auch zu prüfen, ob Anforderungen an Sekundärsplitte definiert werden sollen.

Anforderungen an die Griffigkeit von Asphalt- und Beton-Deckschichten

Die Arbeit hat aufgezeigt, dass auch bei den in der Schweiz verwendeten Deckschichten, mit einer geschickten Wahl der Gesteinskörnungen gute Griffigkeiten erreicht werden können. Dabei können auch Gesteinskörnungen verwendet werden, welche die heutigen Anforderungen (in Bezug auf den Polierwiderstand) nicht erfüllen. Die heutigen Normen schreiben die Eigenschaften der einzelnen Komponenten vor, ohne sich um das Endergebnis der Deckschicht zu kümmern. Im Sinne von leistungsorientierten Anforderungen würden Anforderungen an die Griffigkeit des fertig eingebauten Belages einen zukunftssträchtigen Schritt bedeuten. Möglicherweise könnte dies zu Anforderungen im Rahmen von Erstprüfungen führen.

Bei Deckschichten wird der Anteil RAP aus Gründen der Griffigkeit niedrig gehalten. Hinsichtlich der Kreislaufwirtschaft wäre es wünschenswert auch bei Deckschichten

höhere Anteile an RAP zu ermöglichen. Mit Griffigkeitsanforderungen an den fertig aufbereiteten Asphalt wäre dies möglich.

Prognosemodell

Das angewendete Prognosemodell wurde auf der Basis ausländischer Bedingungen (oft SMA-Deckschichten) entwickelt. Es wäre dringend erforderlich, das Prognosemodell hinsichtlich folgender Punkte zu überprüfen:

- Besteht auch für SDA, AC MR, MA, Waschbeton etc. ein Zusammenhang zwischen der im Labor erstellten Prognose der Griffigkeitsentwicklung und der tatsächlich gemessenen Griffigkeit in situ?
- Verhalten sich die unterschiedlichen Mischgutsorten im Prognosemodell ähnlich, oder müsste das Modell mischgutspezifisch angepasst werden?
- Welchen Einfluss hat der Anteil an Schwerverkehr (LW) bei der Entwicklung der Griffigkeit? Wie kann dieser Einfluss im Prognosemodell berücksichtigt werden?
- Kann das Prognosemodell im Rahmen von Erstprüfungen verwendet werden?

Einfluss der Witterung auf die Griffigkeit

Die Umwelteinflüsse wie Witterung bleiben bei der FAP-Prüfung unberücksichtigt, obwohl bekannt ist, dass (saurer) Regen, Frost und UV-Strahlung die Griffigkeit beeinflussen; es stellen sich folgende Fragen:

- Kann das Potential einer Gesteinskörnung die Griffigkeit durch Witterungseinflüsse wieder ansteigen zu lassen quantifiziert werden?
- Haben die in der Schweiz vorkommenden, verschiedenen klimatischen Bedingungen unterschiedliche Auswirkungen auf die Entwicklung der Griffigkeit im Verlaufe der Nutzungsdauer?
- Sind die schlechteren Griffigkeitswerte in Tunnels ausschliesslich auf die fehlende Bewitterung zurückzuführen oder gibt es weitere Gründe?
- Kann ein ungünstiger Polierwiderstand einer Gesteinskörnung in Kauf genommen werden, falls die Gesteinskörner durch Witterungseinflüsse wieder aufgeraut werden?

Résumé

Problématique

Le projet de recherche dont l'acronyme est PoGrifAk (polissage - adhérence - acoustique) a trois objectifs différents qui découlent de trois problématiques bien distinctes :

- Aptitude au polissage des granulats (polissabilité) :
La méthode d'essai actuelle (CPA) n'est plus satisfaisante à plusieurs égards, car le procédé est effectué sur une fraction de granulats (8/11) qui joue aujourd'hui un rôle secondaire dans les couches de roulement. De plus, la précision de la méthode n'est pas satisfaisante. Il s'agit d'élaborer un contexte d'évaluation pour définir les exigences en matière de résistance au polissage pour la méthode FAP avec les granulats typiques de la Suisse.
- Adhérence :
Il est connu que l'adhérence d'une couche de roulement dépend de la résistance au polissage des granulats utilisés. Des recherches menées à l'étranger montrent qu'en optimisant la formulation, il est parfois possible d'utiliser des granulats moins résistants au polissage. L'optimisation de la formulation des couches de roulement en enrobé bitumineux et en béton en termes d'adhérence doit être étudiée.
- Acoustique :
Si la texture d'une couche de roulement qui réduit initialement le bruit peut être maintenue sur une longue période, la réduction du bruit sera également maintenue. Il convient d'examiner s'il existe un lien entre la réduction du bruit (propriétés acoustiques d'une couche de roulement) et l'aptitude au polissage des granulats.

Méthode d'essai

La méthode d'essai Wehner/Schulze a été développée pour les surfaces en enrobé bitumineux, mais peut également être utilisée pour les surfaces en béton, les granulats, les marquages, les couvercles de canalisations, etc. L'abréviation FAP signifie Friction after Polishing et a remplacé la désignation "Wehner/Schulze" dans le cadre de la normalisation EN. Le résultat de l'essai sur les surfaces liées est indiqué comme valeur FAP. Pour l'essai sur les granulats, nous avons repris le terme PWS (Prüfung Wehner/Schulze) utilisé en Allemagne.

Pour les surfaces liées (asphalte, béton, etc.), l'échantillon utilisé est soit une carotte de Ø 225 mm, soit une plaque de 250 mm x 250 mm. Pour les essais sur les granulats, l'éprouvette doit être fabriquée en laboratoire. Deux méthodes de fabrication différentes ont été étudiées : la méthode de la mosaïque et celle du mastic. Dans le cas de la méthode de la mosaïque, les différents granulats sont disposés à la main en forme de mosaïque, puis fixés par coulage d'une résine époxy. Cette fabrication d'éprouvettes rappelle la fabrication des plaques pour l'essai CPA. Dans la méthode au mastic, la fraction granulaire à examiner est mélangée à un mastic bitumineux, puis coulée et vibrée dans un cylindre (Ø 225 mm). L'essai se fait sur une surface de coupe du cylindre. Des études comparatives ont montré que les deux méthodes de fabrication sont fiables et donnent des résultats reproductibles ; de même, les 10 provenances sont

classées de manière analogue. La méthode au mastic est proposée pour une utilisation ultérieure, car l'influence humaine (pose manuelle de la mosaïque) est moindre avec cette méthode. De plus, cette méthode est également proposée en Allemagne dans la TP Gestein-StB [5]. Le nombre de passages nécessaires au polissage a été défini à 90'000, car d'une part la baisse supplémentaire de l'adhérence (après 180'000 passages) est inférieure à la précision de la répétition, et d'autre part la norme SN EN 12697-49 fixe également ce nombre de passages.

Contexte de l'évaluation

Il s'agit d'élaborer des bases de décision pour la définition des exigences en matière de l'aptitude au polissage (procédé FAP) des granulats destinés aux couches de roulement en enrobé bitumineux et en béton. Dans ce but, des échantillons de 10 différentes provenances suisses ont été prélevés et analysés. Des essais FAP ont été réalisés sur ces échantillons conformément à la norme EN 12697-49 soit sur les fractions 2/4, 4/8 et 8/11 et comparés aux résultats des essais CPA (sur la fraction 8/11). Afin de pouvoir interpréter les résultats d'aptitude au polissage de manière ciblée, des examens complémentaires ont été réalisés sur les 10 granulats sélectionnées (essai Los Angeles ainsi qu'évaluation pétrographique). Les points suivants ont été mis en évidence à partir des résultats de l'étude :

- Il existe une bonne corrélation entre la valeur CPA et la valeur PWS (méthode mastic) pour la fraction 8/11 ; le coefficient de corrélation de $r^2 = 0,81$; pour $n = 10$ a été obtenu.
- La valeur PWS dépend fortement de la fraction granulométrique étudiée, comme on peut le voir dans la Abbildung 15.
- Le classement selon la provenance change en fonction des fractions étudiées. Dans le Tableau 10, nous avons représenté les classements des valeurs PWS pour les différentes fractions selon la provenance, la valeur la plus élevée se situant au rang 1. La provenance 4 se situe au rang 1, 2 ou 3 selon la fraction étudiée, ce qui montre qu'il est peu fiable de déduire les propriétés d'une fraction à partir des propriétés d'autres fractions. Cette constatation est connue sur la base de travaux antérieurs, mais on ne doit pas ignorer le fait que les valeurs CPA de la fraction 8/11 ne sont pas transposables à des granulométries plus petites.

Une procédure sur la base de laquelle des exigences relatives aux valeurs PWS peuvent être déduites a ensuite été proposée :

- La corrélation entre le PWS et le CPA permet de déduire une valeur d'exigence pour le PWS de la fraction 8/11.
- Les résultats montrent que les valeurs PWS augmentent lorsque la taille des grains diminue. L'augmentation des valeurs PWS par rapport à celle de la fraction 8/11 a été calculée ; 9 % pour la fraction 4/8 et 27 % pour la fraction 2/4.
- Avec l'exigence suggérée pour la valeur PWS au grain 8/11, il est possible de calculer les valeurs requises pour les fractions 2/4 et 4/8 au moyen des augmentations en % calculées pour les autres fractions.

Dans le présent travail, seules 10 différentes provenances étaient disponibles, ce qui est insuffisant pour fixer des exigences.

Acoustique

La question de l'influence de l'aptitude au polissage sur les propriétés acoustiques a été étudiée à la fois sur des échantillons d'enrobé et de béton. Les couches de roulement suivantes ont été analysés :

AC 8 H
 SDA 4-12
 SDA 8-12
 MA 11 LA (peu bruyant)
 Béton lavé WB8

A l'exception du MA 11 LA, chaque mélange a été fabriqué deux fois, un premier mélange contenant 100 % de granulats à haute résistance au polissage (GKh), et un second mélange contenant 100 % de granulats à faible résistance au polissage (GKt).

Les échantillons ont été polis en laboratoire dans des conditions contrôlées et reproductibles. Après un nombre défini de passage de polissage, les valeurs suivantes ont été déterminées :

- CPA afin d'évaluer les changements d'adhérence
- Résistance spécifique à l'écoulement de l'air
- Mesures de texture au laser pour déterminer les valeurs caractéristiques de profondeur moyenne du profil (MPD), facteur de forme g , analyse de Fourier des profils de texture avec les valeurs caractéristiques R_{max} et λ_{Rmax} .

Les conclusions suivantes ont été tirées des résultats :

- Les valeurs d'adhérence ont montré une baisse qui dépendait à la fois du nombre de passages de polissage et des granulats utilisés. Ce résultat était attendu et prouve que le polissage en laboratoire était efficace.
- Des changements marginaux ont été constatés dans les valeurs caractéristiques des revêtements antibruit. Comme les paramètres d'entrée pour la simulation informatique du bruit de roulement n'ont pratiquement pas changé, il ne fallait pas s'attendre à ce qu'une simulation du bruit de roulement amène des conclusions additionnelles.
- Il est donc possible de répondre à la question formulée comme objectif du sous-projet "Acoustique", à savoir si le polissage de la surface a une influence sur les propriétés acoustiques : Les résultats de l'étude ne donnent aucune indication relative à l'influence du polissage des granulats sur les propriétés acoustiques d'une couche de roulement.

Optimisation des formulations

La littérature [13] montre que l'utilisation d'un sable de haute qualité permet d'améliorer l'adhérence. Il n'est pas clair si, dans le cas de granulats présentant une résistance au polissage défavorable, le remplacement ciblé de fractions granulométriques moyennes présentant une résistance au polissage plus favorable permet également d'améliorer l'adhérence.

Pour ce faire, nous avons utilisé des granulats de deux provenances différentes, qui se distinguent nettement par leur résistance au polissage. Dans la suite de l'étude, les granulats présentant une faible résistance au polissage sont appelés "GKt" (provenance 10), tandis que les granulats présentant une forte résistance au polissage sont appelés "GKh" (provenance 2).

Pour chaque type d'enrobé, 4 mélanges ont été fabriqués en laboratoire, en variant la provenance des granulats ; voir Tabelle 18. Au total, 8 mélanges (4 x AC 8 S et 4 x AC MR 8) et 16 plaques d'enrobé ont été fabriqués avec le compacteur à segments cyclique en acier (i.e. deux par mélange), de sorte que la valeur FAP a pu être déterminée par double mesure.

On voit clairement (Abbildung 35) que pour un AC 8 S, la fraction 0/4 est la plus importante pour l'adhérence. Ce fait peut être attribué à la courbe granulométrique qui, dans le cas d'un AC 8, est composée à environ 70 % de la fraction 0/4.

Dans un AC MR, la fraction 4/8 joue le rôle le plus important en termes d'adhérence. En effet, le mélange M6 possède des granulats avec une résistance au polissage élevée dans cette fraction. Bien qu'il n'atteigne pas les valeurs du mélange M8 (100 % GKh), il possède néanmoins la deuxième meilleure adhérence (Abbildung 36).

Conclusions optimisation de la formulation des enrobés

- Plus la proportion de granulats à haute résistance au polissage est élevée, plus l'adhérence est (logiquement) élevée. Cependant, en fonction du type d'enrobé (et notamment de la courbe granulométrique), les différentes fractions ont un effet différent sur l'adhérence finale. Pour l'AC 8, c'est la proportion 0/4 qui détermine l'adhérence ; pour l'AC MR 8, c'est la proportion 4/8.
- L'AC MR 8 a en général une meilleure adhérence qu'un AC 8, ce qui est dû à la différence de caractéristique de surface ; un AC MR est par définition plus rugueux et a une profondeur de rugosité beaucoup plus importante.

Pour le béton lavé, 4 mélanges ont également été réalisés avec les deux granulats GKt et GKh.

Les deux mélanges contenant partiellement des grains de GKt présentent une bonne adhérence finale, les trois mélanges contenant une part de GKh se situent à un niveau plus élevé que le mélange K1 avec 100 % de GKt. La courbe granulométrique du béton lavé utilisé présente une courbe discontinue ; le composant 4/8 a une proportion d'environ 60 %. Comme le montre la Abbildung 39, la fraction granulométrique 4/8 est dominante pour le mélange WB 8 en ce qui concerne l'aptitude au polissage. En comparaison avec l'enrobé bitumineux, une faible proportion de GKh semble déjà avoir une grande influence sur l'adhérence finale.

Outre le béton lavé WB8, un béton G 22 avec deux différents types de balai (balai de paille et balai de rue) a également été étudié, les proportions de GKt et GKh ayant ici aussi été variées de manière analogue. Dans cette étude, on a renoncé à déterminer l'adhérence initiale afin de ménager la machine d'essai (texture extrêmement abrasive

au début de l'essai). Les conclusions suivantes ont été tirées à partir des données obtenues :

- Tant pour le balai à paille que pour le balai de rue, les granulats ont une influence décisive sur l'adhérence finale.
- On peut partir du principe que la texture du balai est usée, indépendamment de la composition du béton.
- L'adhérence restante après le polissage de la texture du trait de balai dépend de la composition du béton, en particulier de ses granulats.
- La résistance au polissage de la fraction granulométrique 0/4 joue également un rôle dominant dans le cas du béton G 22.

Besoins de recherche supplémentaires

Exigences relatives aux granulats

La méthode d'essai de Wehner/Schulze est un instrument fiable et approprié pour combler les lacunes existantes dans les essais d'aptitude au polissage des granulats.

Il a été démontré comment des valeurs d'exigence pourraient être définies. Il manque encore actuellement une évaluation des granulats suisses se basant sur une grande quantité de données. Pour ce faire, des études en série seraient nécessaires afin de pouvoir définir des valeurs d'exigence sur la base d'un lot de données plus robuste. Il convient également d'examiner s'il faut définir des exigences pour les gravillons secondaires.

Exigences relatives à l'adhérence des couches de roulement en enrobé et en béton

Le travail a montré qu'en choisissant judicieusement les granulats, il est possible d'obtenir une bonne adhérence pour les couches de roulement utilisées en Suisse. Par ailleurs, il est également possible d'utiliser des granulats qui ne répondent pas aux exigences actuelles en termes de résistance au polissage.

Les normes actuelles prescrivent les propriétés des différents composants sans nécessairement se soucier du résultat final de la couche de roulement. Dans l'optique d'exigences axées sur la performance, des exigences relatives à l'adhérence du revêtement fini mis en place constitueraient une avancée prometteuse. Cela pourrait éventuellement conduire à des exigences dans le cadre d'épreuves de formulation.

Pour les couches de roulement, la part de d'agrégats d'enrobés (RAP) est maintenue à un niveau bas pour des raisons d'adhérence. D'un point de vue de l'économie circulaire, il serait souhaitable d'autoriser des pourcentages plus élevés de RAP, ceci également pour les couches de roulement. Cela serait alors possible en imposant des exigences d'adhérence à aux agrégats d'enrobés.

Modèle de prévision

Le modèle de prévision utilisé a été développé sur la base de conditions provenant de l'étranger (souvent des couches de roulement SMA). Il serait donc urgent de vérifier le modèle de prévision en ce qui concerne les points suivants :

- Existe-t-il également pour les SDA, AC MR, MA, béton lavé, etc. une relation entre le pronostic de l'évolution de l'adhérence établi en laboratoire et l'adhérence réellement mesurée in situ ?
- Les différents types d'enrobés se comportent-ils de manière similaire dans le modèle de prévision ou le modèle devrait-il être adapté en fonction des enrobés ?
- Quelle est l'influence de la proportion de poids lourds (PL) sur l'évolution de l'adhérence ? Comment cette influence peut-elle être prise en compte dans le modèle de prévision ?
- Le modèle de prévision peut-il être utilisé dans le cadre d'épreuves de formulations ?

Influence des conditions météorologiques sur l'adhérence

Les influences environnementales telles que les conditions météorologiques ne sont pas prises en compte dans les essais FAP, bien que l'on sache que la pluie (acide), le gel et les rayons UV influencent l'adhérence ; les questions suivantes se posent :

- Est-il possible de quantifier le potentiel d'un granulat à voir son adhérence augmenter à nouveau sous l'effet des intempéries ?
- Les différentes conditions climatiques que l'on trouve en Suisse ont-elles des effets différents sur l'évolution de l'adhérence au cours de la durée d'utilisation ?
- Les valeurs d'adhérence plus faibles dans les tunnels sont-elles uniquement dues au manque d'exposition aux intempéries ou y a-t-il d'autres raisons ?
- Peut-on s'accommoder d'une résistance au polissage défavorable d'un granulat si les intempéries rendent les granulats à nouveau rugueux ?

Summary

Problem definitions

The research project with the acronym PoGrifAk (Polishability - Grip - Acoustics) has three different objectives, which are derived from three different problems:

- Polishability of the aggregates:
The current test method (PSV) is no longer satisfactory in several respects, as the procedure is carried out on a grain fraction (8/11) that plays a subordinate role in surface courses today. In addition, the precision of the method is not satisfactory. An evaluation background is to be developed to determine the polishing resistance requirements for the FAP method with the aggregates typically used in Switzerland.
- Skid resistance:
It is known that the skid resistance of a surface course depends on the polishing resistance of the used aggregates. Foreign research show that with an optimised recipe, less polish-resistant aggregates can also be used in some cases. The optimisation of the mix design of asphalt and concrete surface courses with regard to skid resistance is to be investigated.
- Acoustics:
If the initial noise-reducing texture of a surface course can be maintained over a long period of time, the noise reduction will also be maintained. It should be investigated whether there is a correlation between the noise reduction (acoustic properties of a surface course) and the polishability of the aggregates.

Test method

The Wehner/Schulze test method was defined for asphalt surfaces, but can also be used for concrete surfaces, aggregates, shaft cover, markings, etc. The abbreviation FAP stands for Friction after Polishing and this abbreviation has replaced the term "Wehner/Schulze" in the EN standardisation. The result of the test on bonded surfaces is given as the FAP value. When testing aggregates, we have adopted the term PWS (Wehner/Schulze test) as used in Germany.

For bonded surfaces (asphalt, concrete, etc.), either a drill core Ø 225 mm or a 250 mm x 250 mm plate is used as the test specimen. When testing aggregates, the test specimen must be produced in the laboratory. Two different production methods were analysed: the mosaic method and the mastic method. In the mosaic method, the individual grains are arranged by hand in a mosaic-like pattern and then fixed by casting an epoxy resin. This test specimen production is similar to the production of the samples for the PSV test. In the mastic method, the grain fraction to be analysed is mixed with a bituminous mastic, poured into a cylinder (Ø 225 mm) and then vibrated. The test is carried out on a cut surface of the cylinder. Comparative tests have shown that both production methods are reliable and provide reproducible results; the 10 aggregates sources are also classified in the same way. The mastic method is proposed for further use, as the human influence (manual laying of the mosaic) is lower with this method. In addition, this mastic method is also proposed in Germany in the TP Gestein

StB [5]. The number of polishing passes required was set at 90'000, as on the one hand the further drop in grip (after 180'000 passes) is smaller than the test repeatability, and on the other hand SN EN 12697-49 also specifies this number of passes.

Evaluation background

The aim of this project is to develop a basis for decision-making for the definition of requirements related to the polishability (FAP process) of aggregates for asphalt and concrete surface courses. For this purpose, aggregates samples were taken from 10 different representative sources in Switzerland and further analysed. FAP tests in accordance with EN 12697-49 were carried out on these samples on fractions 2/4, 4/8 and 8/11 and compared with the results of the PSV test (on fraction 8/11). Further characterization tests were carried out on the 10 selected aggregates sources (Los Angeles test and petrographic assessment) in order to be able to interpret the results of the polishability in a targeted manner. The following points are emphasised from the test results:

- There is a good correlation between the PSV value and the PWS value (mastic method) for fraction 8/11; the coefficient of determination is $r^2 = 0.81$; with $n = 10$.
- The PWS value is strongly dependent on the analysed grain fraction, as can be seen in Abbildung 15.
- The ranking of the aggregates sources changes depending on the fraction. der Tabelle 10 shows the rankings of the PWS values of the source for the different fractions, with the highest value being rank 1. Source 4 is ranked 1, 2 or 3, depending on the analysed fraction. This shows that it is not very reliable to draw conclusions about the properties of other fractions from the properties of one given fraction. This finding is known from earlier work, but it cannot be emphasised enough that the PSV values of fraction 8/11 cannot be transferred to smaller aggregate sizes.

A procedure was proposed on the basis of which requirements for the PWS values can be derived:

- A requirement value for the PWS value of fraction 8/11 can be derived from the correlation between PWS and PSV.
- The results show that the PWS values increase with decreasing grain size. The increase in PWS values compared to that of fraction 8/11 was calculated; 9 % for fraction 4/8 and 27 % for fraction 2/4.
- Using the specified requirement value for the PWS value for grain 8/11, the requirement values for fractions 2/4 and 4/8 can be calculated using the calculated % increases for the other fractions.

In this study, only 10 sources were available, which is insufficient for the determination of requirements, so "provisional limit values" were determined.

Acoustics

The question of the influence of polishability on the acoustic properties was analysed on both asphalt and concrete samples. The following types of surface course were analysed:

AC 8 H
 SDA 4-12
 SDA 8-12
 MA 11 LA (low noise)
 Washed concrete WB8

With the exception of MA 11 LA, each mixture was produced in duplicate, with one mixture containing 100 % aggregates with high polishing resistance GK_h and the other 100 % aggregates with low polishing resistance GK_t.

The samples were polished in the laboratory under controlled and repeatable conditions. The following values were determined after a specified number of polishing cycles:

- PSV to assess the change in grip
- Specific air flow resistance
- Laser texture measurements to determine the mean profile depth (MPD), shape factor g , Fourier analysis of the texture profiles with the characteristic values R_{max} and λR_{max} .

The following conclusions were drawn from the results:

- The skid resistance values showed a drop, which was dependent on both the number of polishing passes and the aggregates used. This result was to be expected and proves that the polishing in the laboratory was effective.
- Marginal changes were observed in the characteristic values for noise-reducing surfaces. As the input parameters for the computer simulation of the rolling noise remained practically unchanged, it was not to be expected that a simulation of the rolling noise would reveal any additional findings.
- The question formulated as the objective of the "Acoustics" sub-project as to whether the polishing of the surface has an influence on the acoustic properties can therefore be answered: The test results provide no evidence of an influence of the polishing of the aggregates on the acoustic properties of a surface course.

Optimising the mix design

It is known from the literature [13] that skid resistance can be improved by using a high-quality sand. It is unclear whether the skid resistance of aggregates with unfavourable polishing resistance can also be improved by the targeted replacement of medium grain fractions with better polishing resistance.

For this purpose, aggregates from two different sources were used, which differ significantly in their polishing resistance. In the following, the aggregate with a low

polishing resistance is labelled "GKt" (source 10), while the aggregate with a high polishing resistance is labelled "GKh" (source 2).

For each mix type, 4 mixes were produced in the laboratory, whereby the provenance of the aggregates was varied; see Tabelle 18. A total of 8 mixes (4 x AC 8 S and 4 x AC MR 8) and 16 asphalt slabs were produced with the roller segment compactor (two per mix), so that the FAP value could be determined by means of double measurement.

It can be clearly seen (Abbildung 35) that fraction 0/4 is the most relevant for the skid resistance of an AC 8 S. This fact can be attributed to the sieve curve, which in the case of an AC 8 consists of approx. 70 % of the 0/4 fraction.

In the case of an AC MR, the 4/8 fraction plays the most important role in terms of skid resistance. In fact, the M6 mix has aggregates with a high polishing resistance in this fraction. Although it does not come close to the values of the M8 mix (100 % GKh), it still has the second best skid resistance (Figure 35).

Conclusions on asphalt mixture optimisation

- The higher the proportion of aggregates with high polishing resistance, the higher the skid resistance (logically). However, depending on the mix type (and in particular the grading curve), the different fractions have different effects on the final skid resistance. With AC 8, the 0/4 fraction is most relevant for the skid resistance; with AC MR 8, the 4/8 fraction is relevant.
- The AC MR 8 generally has a higher grip than an AC 8, which is due to the different surface; an AC MR is by definition rougher and has a much greater roughness depth.

For exposed aggregate concrete, 4 mixtures were also produced with the two aggregates GKt and GKh.

The two mixtures with a partial content of GKt aggregate show good final grip, all three mixtures with a proportion of GKh are at a higher level than the mixture K1 with 100 % GKt. The grading curve of the exposed aggregate concrete used shows a discontinuous curve; component 4/8 has a proportion of approx. 60 %. As can be seen in the Abbildung 36, grain size 4/8 is dominant in WB 8 in terms of polishability. Compared to asphalt, even a small proportion of GKh appears to have a major influence on the final grip.

In addition to the exposed aggregate concrete WB8, a concrete G 22 with two different broom finishes (straw and road broom) was also investigated, whereby the proportions of GKt and GKh were also varied analogously here. In this test, the initial grip was not determined in order to protect the testing machine (extremely abrasive texture at the start of the test). The following conclusions were drawn from the data:

- The aggregates have a decisive influence on the final grip of both the straw broom and the road broom.
- It can be assumed that the texture of the broom finish - regardless of the composition of the concrete - is worn away.
- The grip remaining after polishing of the broom finish texture depends on the composition of the concrete, in particular its aggregates.
- The polishing resistance of aggregate group 0/4 also plays a dominant role with G Concrete 22.

Further research needs

Requirements for aggregates

The Wehner/Schulze test method provides a suitable, reliable instrument for closing the existing gap in the testing of the polishability of aggregates.

It was shown how requirement values could be defined. What is currently lacking is a broad-based evaluation background for Swiss aggregates. This would require several studies in order to be able to define requirement values on the basis of a more robust data set. It should also be examined whether requirements for secondary chippings should be defined.

Requirements for the skid resistance of asphalt and concrete surface courses

The work has shown that even with the surface courses used in Switzerland, good skid resistance can be achieved with a skilful choice of aggregates. It is also possible to use aggregates that do not fulfil the current requirements (in terms of polishing resistance). Today's standards specify the properties of the individual components without considering the final result of the surface course. In terms of performance-orientated requirements, requirements for the skid resistance of the finished pavement would be a promising step for the future. This could possibly lead to requirements in the context of initial tests.

For surface courses, the proportion of RAP is kept low for skid resistance reasons. With regards to the circular economy, it would be desirable to allow higher proportions of RAP in surface courses as well. This would be possible with skid resistance requirements for the prepared asphalt.

Forecast model

The forecast model used was developed on the basis of foreign conditions (often SMA cover layers). It would be urgently necessary to review the prediction model with regards to the following points:

- Is there also a correlation for SDA, AC MR, MA, exposed aggregate concrete etc. between the prediction of skid resistance development made in the laboratory and the skid resistance actually measured in situ?
- Do the different types of mix behave similarly in the prediction model, or would the model have to be adapted to the specific mix?
- What influence does the proportion of heavy goods vehicles (HGV) have on the development of skid resistance? How can this influence be taken into account in the forecast model?
- Can the prediction model be used in the context of initial tests?

Influence of the weather on skid resistance

Environmental influences such as weathering are not taken into account in the FAP test, although it is known that (acid) rain, frost and UV radiation influence skid resistance; the following questions arise:

- Can the potential of an aggregate to increase skid resistance again due to weathering be quantified?
- Do the different climatic conditions occurring in Switzerland have different effects on the development of skid resistance over the course of the service life?
- Are the poorer skid resistance values in tunnels solely due to the lack of weathering or are there other reasons?
- Can an unfavourable polishing resistance of an aggregate be accepted if the aggregates are roughened again by weathering?

1 Einführung

1.1 Problemstellung, Ziele und Methodik

1.1.1 Problembeschreibung

Das Forschungsprojekt mit dem Akronym PoGrifAk (**P**olierbarkeit – **G**riffigkeit – **A**kustik) hat drei unterschiedliche Ziele, welche sich aus drei verschiedenen Problemstellungen ableiten:

- Polierbarkeit der Gesteinskörnungen:

In der Schweiz werden seit Jahren Deckschichten mit einem Grösstkorn von 4, 8 oder 11 mm eingebaut. Heute spielen 11-er Deckschichten eine sehr untergeordnete Rolle, das am meisten verwendete Grösstkorn ist das 8-er-Korn. Die häufigsten Mischgutsorten sind AC 8, AC MR 8, SDA 8-12 und SDA 4-12. Die heutige Prüfung der Polierbarkeit der Gesteinskörnungen (PSV-Verfahren gem. [1] ist für ein Grösstkorn (8/11) normiert, welches heute nicht mehr relevant ist. Das Ableiten der Eigenschaften einer Kornfraktion (zum Beispiel 4/8) aus einer anderen (zum Beispiel 8/11) ist nicht zuverlässig, da sich die petrografische Zusammensetzung mit abnehmendem Grösstkorn ändern kann. Zudem werden mit der PSV-Prüfung wesentliche Elemente, wie der Einfluss der Feinfraktion (Sand) und der gesamten Rezeptur, nicht berücksichtigt, da nur eine Kornfraktion untersucht wird.

- Griffigkeit:

Die Griffigkeit einer Deckschicht verändert sich infolge der Überrollungen durch den Verkehr, je grösser der Polierwiderstand der verwendeten Gesteinskörnungen, desto geringer fällt die Abnahme der Griffigkeit aus. Erfahrungen zeigen, dass die Verwendung von Gesteinskörnungen mit geringerem Polierwiderstand ebenfalls gute Ergebnisse zeigen, sofern sie mit Gesteinskörnungen mit hoher Polierresistenz gemischt werden. Die Optimierung der Rezeptur von Asphalt- und Beton-Deckschichten in Bezug auf die Griffigkeit soll untersucht werden.

- Akustik:

Kann die anfänglich lärmreduzierende Textur einer Deckschicht über einen langen Zeitraum erhalten werden, bleibt auch die Lärmreduktion erhalten. Zurzeit gibt es international keine Untersuchungen zum Einfluss der Polierbarkeit auf die akustischen Eigenschaften. Es ist nicht klar, ob das Polieren der Gesteinskörnungen einen Einfluss auf die akustischen Eigenschaften ausübt. Zu diesem Thema gibt es widersprüchliche Meinungen, ohne dass dies je untersucht wurde. Es ist zu untersuchen, ob ein Zusammenhang zwischen der Lärmreduktion (akustische Eigenschaften einer Deckschicht) und der Polierbarkeit besteht.

1.2 Stand der Forschung

In weltweit zahlreichen Forschungsarbeiten wird mittlerweile für Fragestellungen der Griffigkeit fast ausschliesslich das Wehner/Schulze-Verfahren verwendet, welches Mitte der 60er Jahre an der TU Berlin von B. Wehner und K.-H. Schulze entwickelt wurde. Da in den

heutigen EN-Normen keine Personennamen mehr verwendet werden, wurde eine neue Bezeichnung für das ursprüngliche «Wehner/Schulze-Verfahren» festgelegt. Zudem wurde in Deutschland für die Anwendung dieses Prüfverfahren auf Gesteinskörnungen eine andere Definition festgelegt:

- **FAP** steht für «friction after polishing» und wird für Deckschichten verwendet. Die Prüfung wurde für Asphalte definiert, wird jedoch ebenfalls zur Beurteilung von Beton-Deckschichten verwendet; es gilt die SN-EN 12697-49 [3].
- **PWS** steht für «Prüfverfahren Wehner/Schulze» und wird an Gesteinskörnungen verwendet. In der deutschen TP Gestein-StB Teil 5.4.2 für feine Gesteinskörnungen [4] und Teil 5.4.4 für grobe Gesteinskörnungen [5] werden Präzisierungen für die Anwendung der Prüfmaschine gemäss EN 12697-49 [3] aufgeführt. Das Prüfergebnis wird als PWS-Wert angegeben.

Mit dem FAP-Verfahren lassen sich sowohl der Polierwert von groben und feinen Gesteinskörnungen bestimmen wie auch die Griffigkeit von Asphaltoberflächen (Bohrkerne oder Laborproben). Zudem ist es möglich, eine Prognose zur Entwicklung des Griffigkeitsverlaufes einer Fahrbahnoberfläche zu erstellen. Im Weiteren kann das Verfahren generell auch zur Beurteilung der Polierbarkeit anderer Oberflächen wie beispielsweise Markierungen oder Schachtdeckel verwendet werden.

Die heutigen Anforderungen an den PSV-Wert sind unbefriedigend, da sie nur einen Teil der Aspekte (Splitt 8/11) der Griffigkeitsproblematik abdecken. Die Unzulänglichkeiten des Prüfverfahrens gelten auch für die Anforderungen, wobei hier die verhältnismässig grosse Abweichung zwischen den Prüfstellen zu erwähnen ist. Trotz weiterer Arbeiten und Verbesserungen der Methode, konnte die Vergleichbarkeit nicht verbessert werden [6]. Die Unsicherheit bezüglich der Aussagekraft des Prüfverfahrens wird in Zukunft noch schlechter, da das seit Jahrzehnten verwendete Referenzgestein nicht mehr erhältlich ist.

Die Anforderungen an die Polierbarkeit – charakterisiert durch den PSV-Wert – wurde im Ausland aufgrund von Unfällen für gewisse Deckschichten (offenporige Beläge, PA, SMA, etc.) angehoben. Auch in der Schweiz hat das ASTRA für einzelne Deckschichten (SDA 4, SDA 8 und AC MR 8) die normierte Anforderung an den PSV-Wert von ≥ 50 auf ≥ 52 angehoben. Die Erhöhung der Anforderungen war im Sinne der Vorsorge eine richtige Massnahme, obwohl nicht alle Fragen geklärt waren. Es besteht ein dringendes Bedürfnis Klarheit zu schaffen, beispielsweise indem ein Überblick über die in der Schweiz zu erwartenden Ergebnisse der FAP-Prüfung an Gesteinskörnungen erarbeitet wird. Dazu ist es heute kaum möglich, auf ausländische Anforderungen zurückzugreifen, da noch zu wenig Daten zur Verfügung stehen. So gibt es in Deutschland lediglich für das Land Berlin [7] [8] einen Bewertungshintergrund für die Prüfkörnung 8/11, 2/5, 0.2/4, welcher aus dem Jahr 1996 stammt. Diese Werte lassen sich für die Schweiz nicht unbesehen übernehmen, da in Berlin vorwiegend Grauwacke und Basalt verwendet werden; Gesteine, welche in der Schweiz keine Rolle spielen. In Österreich besteht seit 2010 ein Bewertungshintergrund für Gesteinskörnungen, welche in Asphalt- und Betondecken verwendet werden, allerdings nur für die feinkörnigen Fraktionen 0/2 und 2/4 [9] [10]. Patzak hat in seiner Dissertation [11] einen Bewertungshintergrund für verschiedene Mischgutsorten publiziert. Die in der Schweiz am meisten verwendeten Mischgutsorten AC MR und SDA sind in dieser Publikation nicht enthalten.

Es ist allgemein bekannt, dass die Korngrösse einen Einfluss auf die Griffigkeit eines Deckbelages hat; so weisen 8-er Beläge in der Regel eine bessere Griffigkeit auf als 16-er Beläge.

Aber auch die Eigenschaften der Feinfraktion beeinflusst die Griffigkeit. So zeigen Arbeiten von Wehner [12] und Kirchmeier [13], dass die Eigenschaften des Sandes 0/2 mm die Griffigkeit von Asphalt-Deckschichten deutlich beeinflussen. Kirchmeier kommt auch zum Schluss, dass das FAP-Verfahren als das derzeit beste Laborprüfverfahren zur Beschreibung der Poliereigenschaften von Gesteinskörnungen und Oberflächen ist. In der Dissertation von Pfeifer [14] wurde festgestellt, dass Gesteinskörnungen 2/4 die Griffigkeit beeinflussen können.

In [15] wurden diejenigen Parameter beschrieben, welche grundsätzlich die Dauerhaftigkeit der akustischen Eigenschaften beeinflussen könnten. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die Polierbarkeit der Gesteinskörnungen die akustischen Eigenschaften beeinflussen kann. Die Lärmentstehung in der Kontaktfläche Reifen-Fahrbahn wird von der Textur der Oberfläche massgebend beeinflusst. Wird diese Textur durch Abfahren der Ecken und Kanten (= Polieren) infolge der Verkehrsbelastung verändert, so ist auch eine Veränderung der akustischen Eigenschaften möglich. Einerseits wird argumentiert, die akustischen Eigenschaften einer Strassenoberfläche würden vor allem durch die Makro- und Megatextur in einem Wellenlängenbereich zwischen 0.5 und 500 mm beeinflusst, andererseits stellt man fest, dass die Veränderungen der akustischen Eigenschaften im Verlaufe der Nutzungsdauer durch Veränderungen der Textur hervorgerufen werden. Inwieweit da auch die Mikrotextrur (0.1 mm bis 0.5 mm) eine Rolle spielt, wurde noch nicht abgeklärt.

Mit dem FAP-Wert ist es ausserdem möglich, für Asphalt- und Betondeckbeläge eine Griffigkeitsprognose zu erstellen. Diese kann sowohl an im Labor hergestellten Proben als auch an Bohrkernen aus Verkehrsflächen durchgeführt werden. In zahlreichen Arbeiten [16, [17, [18, [19, [20, [21] wurde ein Zusammenhang zwischen der im Labor ermittelten Entwicklung der Griffigkeit unter Belastung und der auf Objekten gemessenen SKM-Griffigkeit nachgewiesen. Diese Arbeiten können teilweise für die Schweiz verwendet werden, teilweise wurden sie auf Deckschichten durchgeführt, welche für die Schweiz nicht relevant sind (Oberflächenbehandlung in [21] und Hot-Rolled-Asphalt in [18]).

1.3 Projektziele

Das Forschungsprojekt verfolgt drei unterschiedliche Ziele:

- Es soll ein Bewertungshintergrund zur Festlegung von Anforderungen an den Polierwiderstand für die FAP-Methode mit den in der Schweiz typischen Gesteinskörnungen erarbeitet werden.
- Es ist zu untersuchen, ob ein Zusammenhang zwischen der Lärmreduktion (akustische Eigenschaften einer Deckschicht) und der Polierbarkeit besteht.
- Die Optimierung der Rezeptur von Asphalt- und Beton-Deckschichten in Bezug auf die Griffigkeit soll untersucht werden. Falls es gelingt, durch den gezielten Einsatz hochwertiger Gesteinskörnungen in einzelnen Fraktionen die Verwendung von ungünstigeren Gesteinskörnungen zu kompensieren, hätte dies eine grosse wirtschaftliche Bedeutung.

1.3.1 Beschreibung der Arbeitspakete

- Gemäss Ausschreibung zur Forschungsarbeit sind drei Themen zu bearbeiten:
- Erarbeiten eines Bewertungshintergrundes für die in der Schweiz typischen Gesteinskörnungen
- Einfluss der Polierbarkeit auf die akustische Dauerhaftigkeit von Asphalt-Deckschichten
- Optimierung der Rezeptur von Asphalt- und Betondeckschichten

Alle Themen werden mit denselben Gesteinskörnungen bearbeitet. Da die Gesteinskörnungen aus verschiedenen Werken stammen, ist erfahrungsgemäss davon auszugehen, dass deren Unter- und Überkornanteile beträchtlich schwanken. Um den Einfluss der Unter- und Überkornanteile zu eliminieren, werden alle Gesteinskörnungen beim Eingang ins Labor derart fraktioniert, dass sie idealerweise bei der oberen Siebgrösse einen Siebdurchgang von 100 Masse-% und bei der unteren Siebgrösse einen Rückstand von 100 Masse-% aufweisen.

1.3.1.1 Bewertungshintergrund

Es sollen Entscheidungsgrundlagen für die Festlegung von Anforderungen an die Polierbarkeit (FAP-Verfahren) von Gesteinskörnungen für Asphalt- und Beton-Deckschichten ausgearbeitet werden. Diese Vorschläge basieren einerseits auf dem erstellten Bewertungshintergrund der in der Schweiz vorkommenden Gesteinskörnungen und andererseits auf den internationalen Erfahrungen.

Es soll die Prüfnorm EN 12697-49 [3] unverändert angewendet werden. Die heutige Anforderungsnormen EN 13043 [22] für Asphalte und [23] für Beton enthalten bis heute noch keine Anforderungen an den PWS-Wert. Da dies jedoch zurzeit in den CEN-Gremien des TC 154 intensiv diskutiert wird, liefert das Forschungsprojekt unter anderem die Basis zur Positionierung der Schweiz in dieser Frage.

Die in der Schweiz für die Aufbereitung von Asphalt- und Beton-Deckschichten am häufigsten verwendeten Gesteinskörnungen werden erfasst, analysiert und katalogisiert. Anschliessend sollen an Gesteinskörnungen aus 10 verschiedenen, repräsentativen Provenienzen Proben entnommen und untersucht werden. An diesen Proben wird die FAP-Prüfung gemäss EN 12697-49 an den Fraktionen 2/4, 4/8 und 8/11 durchgeführt. Vergleichende Untersuchungen mit der PSV-Prüfung (an der Fraktion 8/11) werden die weitere Verwendung der bisherigen Praxiserfahrungen erleichtern. Um die Ergebnisse der Polierbarkeit zielgerichtet interpretieren zu können, werden weitere Untersuchungen an den 10 ausgewählten Provenienzen durchgeführt (Zertrümmerungswiderstand im Los-Angeles-Versuch sowie eine petrographische Beurteilung).

1.3.1.2 Dauerhaftigkeit der akustischen Eigenschaften

Das Ziel ist es, abzuklären, ob Gesteinskörnungen mit hohem Polierwiderstand einen Beitrag zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit lärmarmen Asphalt-Deckschichten leisten können.

Da Teststrecken sehr kostenintensiv und zeitraubend sind, werden die akustischen Fragestellungen im Labor bearbeitet. Dazu wird die Methodik angewendet, welche im «Forschungspaket Lärm» in den Einzelprojekten EP2 «Labortechnische Bestimmung der Dauerhaftigkeit lärmarmen Beläge» [24] und EP4 «Labormethoden für die Bestimmung akustischer Eigenschaften lärmarmen Beläge» [25] entwickelt wurde. In diesen Arbeiten wurden Methodologie und Auswertung entwickelt. Zudem wurde der Nachweis erbracht, dass analoge Ergebnisse wie auf eingebauten Deckschichten erzielt werden. Dabei wird auf der Basis

von Messungen der Oberfläche von Asphaltplatten (spezifischer Luftströmungswiderstand und Lasertextur) mit dem mathematischen Simulationsmodell SPERoN [26] das Rollgeräusch ermittelt. Das berechnete Rollgeräusch wird anschliessend mit dem in der Schweiz üblichen Lärmberechnungsmodell StL-86+ der EMPA [27] verglichen und als Abweichung zu diesem Referenzwert angegeben. Auf diese Weise können die akustischen Eigenschaften und insbesondere deren Veränderungen unter Überrollbelastung beurteilt werden. Um das Polieren der Platten durch den Verkehr im Labor nachzubilden, soll eine Poliermaschine verwendet werden, welche im Rahmen einer Dissertation an der TU München gebaut wurde [28]. Mit dieser Poliermaschine kann der Abfall der Griffigkeit einer Belagsoberfläche im Zeitraffer vollzogen werden, wie dies Ergebnisse von SRT-Messungen zeigen.

1.3.1.3 Optimierung von Rezepturen

Aus der Literatur [13] ist bekannt, dass sich die Griffigkeit durch den Einsatz eines hochwertigen Sandes, verbessern lässt. Unklar ist, ob bei Gesteinskörnungen mit ungünstiger Polierresistenz durch den gezielten Austausch von mittleren Kornfraktionen mit günstigerer Polierresistenz die Griffigkeit ebenfalls verbessern lässt.

Hierzu werden Gesteinskörnungen aus zwei verschiedenen Provenienzen verwendet. Einmal eine Gesteinskörnung mit hohem Polierwiderstand (= GK_h) und einmal eine mit niedrigem Polierwiderstand (= GK_t).

Obwohl die Griffigkeit bei Betonoberflächen durch andere Faktoren als im Asphalt geprägt wird, spielt auch hier die Kornform und die Polierbarkeit eine wesentliche Rolle, insbesondere beim Langzeitverhalten. Untenstehend wird das Vorgehen für beide Baustoffe getrennt aufgezeigt.

ASPHALT:

Vorgesehen ist eine Reihenuntersuchung an im Labor hergestellten Mischungen. Bei diesen Mischungen wird die Polierbarkeit der verschiedenen Kornfraktionen derart variiert, dass der Einfluss der Polierbarkeit einzelner Kornfraktionen auf die Gesamtmischung erkannt werden kann. Als Beurteilungskriterium wird die Griffigkeitsentwicklung verwendet. Durch vergleichende Untersuchungen von Griffigkeitsmessungen an Deckschichten unterschiedlichen Alters in-situ und Griffigkeitsmessungen mit dem Wehner/Schulze-Verfahren nach unterschiedlicher Anzahl an Polierübergängen, konnte ein Verfahren definiert werden, welches es erlaubt, das Griffigkeitsverhalten einer Deckschicht unter Verkehr zu prognostizieren. Damit wird es möglich, nicht nur die Veränderung der Griffigkeit nach einer bestimmten Anzahl Polierübergängen festzustellen, sondern auch eine Aussage über die Entwicklung der Griffigkeit als Funktion der Anzahl an Polierübergängen zu erhalten. Beim «Wiener Modell» wird das Griffigkeitsniveau nach 500, 1'000, 1'500, 3'000, 6'000, 18'000, 60'000 und 90'000 Polierübergängen bestimmt.

BETON:

Die Problematik der Griffigkeit einer Betonverkehrsfläche unterscheidet sich von derjenigen einer Asphaltoberfläche. So hat die Art und die Beschaffenheit der Betonoberfläche (Besenstrich, Waschbeton, Fräsen), die Einbautechnik, Wahl der Kornform der Gesteinskörnung (rund oder gebrochen) einen sehr grossen Einfluss auf die Griffigkeit.

Da die Untersuchung sämtlicher Einflussfaktoren den Rahmen sprengen würde, soll der Einfluss der Gesteinskörnung auf das Griffigkeitsniveau und die Griffigkeitsentwicklung bei einem Waschbeton WB8 untersucht werden. Zudem wird bei einem Beton (G-Beton 22) mit

unterschiedlichen Oberflächenbearbeitungen (Besenstrich mit Strassenbesen und mit Strohbesen) der Einfluss der Gesteinskörnungen untersucht.

2 Methoden

Die Gesteinskörnungen wurden verschiedenen Standardprüfungen unterzogen, um ihre Eigenschaften zu verifizieren. Ebenso wurde der hergestellte Asphalt und der Beton mittels Standardverfahren verdichtet und geprüft. In der nachstehenden Tabelle sind die entsprechenden Prüfungen und Normen aufgeführt.

Prüfungen und Methoden mit entsprechenden Normen		
	Prüfung/Methode	Norm
Gesteinskörnungen	Korngrößenverteilung	SN EN 933-1
	Los-Angeles-Koeffizient	SN EN 1097-2
	Polierwiderstand PSV	SN EN 1097-8
Asphalt	Löslicher Bindemittelgehalt	SN EN 12697-1
	Siebanalyse	SN EN 12697-2
	Raumdichte	SN EN 12697-8
	Rohdichte	SN EN 12697-5
	Marshall-Versuch	SN EN 12697-34
	Walzsegmentverdichter	SN EN 12697-33
	SRT-Pendel	SN EN 13036-4
	Luftströmungswiderstand	EN ISO 9053-1
Beton	Luftgehalt	SN EN 12350-7
	Verdichtungsmass	SN EN 12350-4
	Biegezugfestigkeit	SN EN 12390-5
	Druckfestigkeit	SN EN 12390-3
	Rautiefe	ISO 13473-1

Tabelle 1: Liste der verwendeten Prüfungen und Methoden sowie der entsprechenden Normen.

2.1 Herstellung von Mischgut und Asphaltplatten

Für die Projektteile Akustik und Rezeptoptimierung wurden Asphaltplatten hergestellt und anschliessend mit dem Wehner/Schulze-Verfahren (Kap., 1.3) geprüft. Die Asphaltmischungen wurden im Labor mit einem herkömmlichen Labormischer hergestellt. Für jedes Mischgut wurden Siebcurve, löslicher Bindemittelgehalt, Raumdichte, Rohdichte und Marshall-Hohlraumgehalt bestimmt.

Waren die geforderten Kriterien bezüglich Zusammensetzung und Marshall-Hohlraumgehalt erfüllt, so wurde das Gemisch anschliessend mit dem Walzsegmentverdichter verdichtet. Damit konnten Platten von 260 mm x 320 mm verdichtet und anschliessend auf 225 mm x 225 mm zugeschnitten werden. Der Verdichtungsgrad der Platten wurde kontrolliert; es wurde ein Verdichtungsgrad von 99.0 bis 100.5 % angestrebt. Wurde diese Vorgabe nicht erfüllt, so wurden neue Platten hergestellt.

2.2 Herstellung von Beton und Betonplatten

Da der Schwerpunkt des Projektes auf der Griffigkeit liegt, wurde beschlossen, die Herstellung der Betonmischungen zu vereinfachen und auf die Zugabe von Additiven (z.B. Verflüssiger, Luftporenbilder) zu verzichten. Dies bedeutet, dass die Normanforderungen nicht immer erfüllt werden (z.B. Expositionsklassen). Dieser Weg wurde gewählt, um Zeit, Ressourcen und Geld zu sparen und sich primär auf projektbezogene Fragen zu konzentrieren.

2.2.1 Waschbeton WB8

Das Rezept für den Waschbeton sowie die Eigenschaften des Frisch- und Festbeton sind in Kapitel 6.2.1 aufgeführt. Die Proben wurden in einer Holzform mit den Massen 46 cm x 46 cm x 5 cm hergestellt (Abbildung 1). Zur Herstellung der Waschbetonoberfläche muss ein Verzögerer (Abbildung 1B) eingesetzt werden, um die Hydratation der Oberflächenschicht des Zements zu verlangsamen. Die Wirkung des Verzögerers hängt vom Hersteller und der Umgebungstemperatur ab und muss daher jedes Mal angepasst werden. Unter den Laborbedingungen, bei welchen die Platten hergestellt wurden, wurde die Oberfläche etwa 5 bis 5,5 Stunden nach der Herstellung des Betons ausgewaschen.

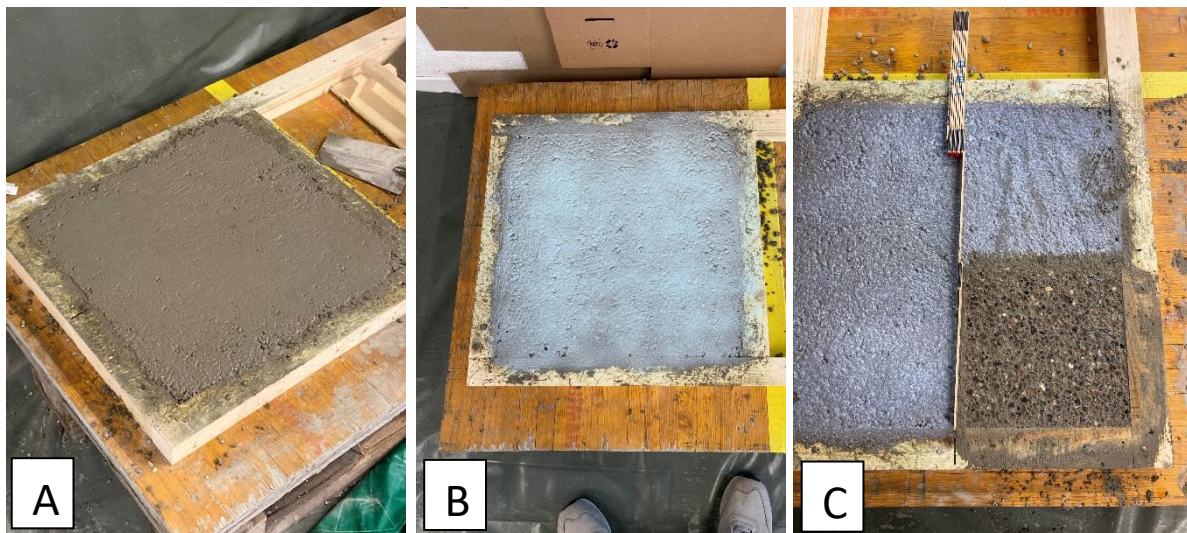


Abbildung 1: Herstellung von Waschbetonplatten: A) frisch B) mit Verzögerer C) «gewaschene» Platte.

2.2.2 Besenstrich auf G-Beton 22

Das Rezept für den G Beton 22 sowie die Eigenschaften des Frisch- und Festbeton sind in Kapitel 6.2.2.1 aufgeführt.

Analog dem Waschbeton wurden Betonplatten 48 cm x 48 cm in einer Holzform hergestellt. Aufgrund des 22 mm Grösstkorns wurde die Schichtdicke etwas grösser gewählt, nämlich 10 cm. Es wurden drei unterschiedliche Oberflächenbearbeitungen durchgeführt, Strassenbaubesen, Strohbesen und ohne Besenstrich, wobei die Platte in 4 Teilflächen unterteilt wurde (Abbildung 2):

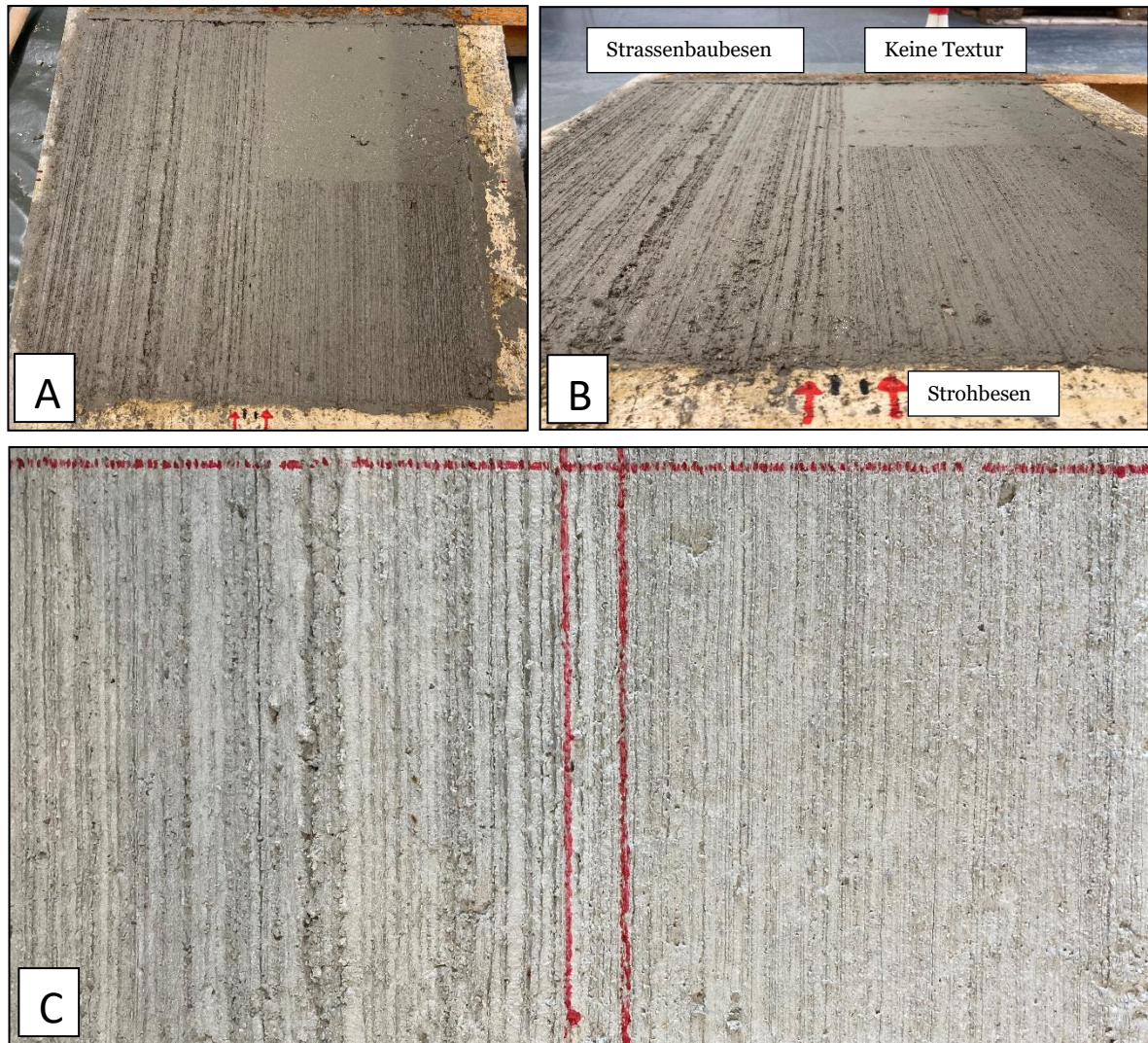


Abbildung 2: Die verschiedenen Arten von Oberflächenstrukturen, die hergestellt wurden: Strassen-, Strohbese- und untexturierte Oberfläche.

- 2X Strassenbau Besen (grobe Textur)
Dies ist die normale Struktur, die in der Schweiz für befahrene Betonflächen hergestellt wird. Die Untersuchung dieser Textur wird direkt anwendbare Werte für die Praxis liefern.
- 1X Strohbese (feine Textur)
Die Fertigung mittels Strohbese wird gelegentlich auf kleinen Betonflächen mit geringem Verkehr und/oder Fussgängerverkehr angewendet. Dank dieser Oberfläche können die Unterschiede in der Anfangs- und Endgriffigkeit im Vergleich zu derjenigen des Strohbese verglichen werden.
- 1X Keine Textur

Die Messung der Oberfläche ohne Textur ist im Grunde eine Simulation des Zeitpunkts, an dem die Besenstrichtextur durch den Verschleiss vollständig poliert ist. Zu diesem Zeitpunkt sind die Gesteinskörnungen der Mischung ausschlaggebend für die resultierende Griffigkeit.

3 Das Wehner/Schulze-Prüfverfahren

3.1 Funktionsweise der Maschine

Die Wehner/Schulze-Methode PWS wurde in den 1960er Jahren an der TU Berlin entwickelt und ermöglicht die Bestimmung der Entwicklung des Reibungskoeffizienten einer Oberfläche. Insbesondere ist es möglich, die Entwicklung des Reibungskoeffizienten einer Oberfläche (Asphalt, Beton, Gesteinskörnungen...) infolge von «Polierung» durch wiederholte Reifenüberrollungen zu verfolgen. Der grosse Vorteil dieser Methode besteht darin, dass sie auf jede Art von Oberfläche angewendet werden kann und es ermöglicht, die Wirkung jahrelangen Verkehrs in nur wenigen Stunden zu simulieren. Die Prüfung basiert auf der EN 12697-49 [3]. Das Gerät besteht im Wesentlichen aus zwei Einheiten:

Poliereinheit

Die Poliereinheit besteht aus einem Polierkopf mit drei rollend gelagerten Polierwalzen aus Gummi, die wie Autoreifen direkten Kontakt mit der Oberfläche haben und einen gewissen Kontaktdruck ausüben. Der Polierkopf drückt – während er mit 500 Umdrehungen pro Minute rotiert – mit einer Kraft von (392 ± 3) N auf die Probe [11]. Dies ergibt insgesamt 90'000 sogenannte «Polierübergänge» pro Stunde. Um die Wirkung des Polierprozesses zu verstärken, wird ausserdem eine Suspension aus Wasser und Quarzmehl kontinuierlich über die Probe und die Polierwalzen geleitet.

Messeinheit

Nach einer definierten Anzahl an Polierübergängen (z.B. 90'000), was insgesamt einen Polierzyklus darstellt, wird der Tisch, auf dem die Probe (über einen Spannring) befestigt ist, auf die gegenüberliegende Seite der Maschine bewegt. Der Reibungskoeffizient wird von drei Gleitgummis gemessen, die auf 100 km/h beschleunigt werden und dann "frei" auf der Probe abbremsen können. Die drei Gleitgummis sitzen auf einer Prüfeinheit, die während der Bremsung mit (253 ± 3) N auf die Prüfoberfläche drückt. Beim Bremsen entsteht ein Drehmoment, das von einem Drehmomentsensor gemessen wird. Wenn das Gewicht der gebremsten Prüfeinheit auf der Probe und der Abstand des Messgummis vom Zentrum der Probe ("Radius") bekannt sind, kann der Reibungskoeffizient berechnet werden.

Der typische Verlauf des beim Bremsen gemessenen Reibungskoeffizienten ist in Abbildung 3 dargestellt. Gemäss Norm wird der Reibungskoeffizient (μ_m) bei 60 km/h abgelesen, einer Geschwindigkeit, bei welcher der Messwert im Allgemeinen stabil ist. Sofern nichts anderes angegeben, sind alle in dieser Arbeit angegebenen Reibungskoeffizienten μ_m -Werte.

Dank der Messung des Reibungskoeffizienten nach unterschiedlicher Anzahl an Polierübergängen ist es möglich, die Entwicklung der Griffigkeit einer Oberfläche sowie den Endzustand der Griffigkeit zu ermitteln.

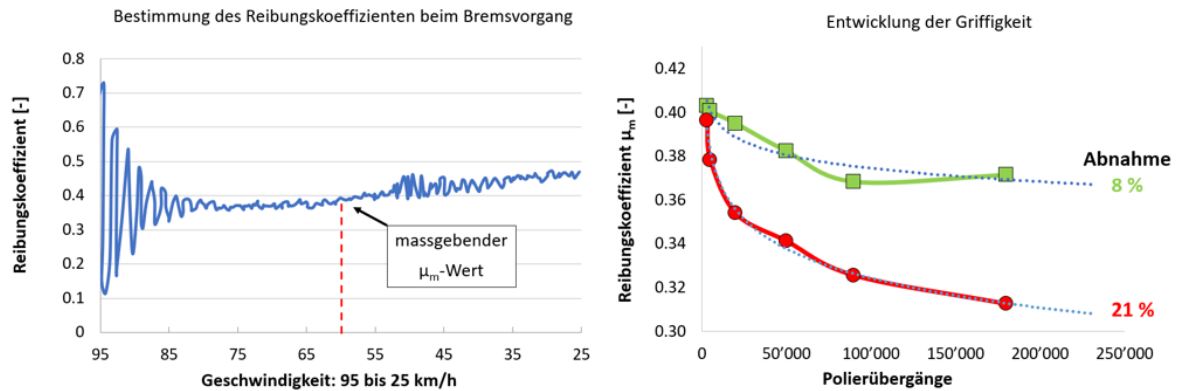


Abbildung 3: Links: Aufzeichnung des Reibungskoeffizienten während des Bremsvorganges. Rechts: Entwicklung des Reibungskoeffizienten (Griffigkeit) für eine Probe mit ungünstigem Polierwiderstand (rot) und für eine Probe mit hohem Polierwiderstand (grün). Quelle: IMP.

3.2 Ermittlung des FAP- bzw. PWS-Wertes

Gemäss EN 12697-49 wird der Reibungskoeffizient einer Einzelprobe (μ_{FAP}) gemäss folgender Gleichung berechnet:

$$\mu_{FAP} = \mu_m + \mu_{ref} - \mu_{km}$$

Dabei steht μ_m für den bei 60 km/h ermittelten Reibungskoeffizienten, μ_{km} für den Durchschnittswert des Reibungskoeffizienten gemessen auf der Kalibrierplatte (Ornamentglasplatte) direkt vor und nach der Prüfung und μ_{ref} für den Referenzwert des Reibungskoeffizienten der Kalibrierungsplatte im Anlieferungszustand (ermittelt aus dem Durchschnittswert von 50 Bremsungen). Bei der Berechnung des Ergebnisses werden somit die Kalibrierwerte der Prüfmaschine mit einbezogen.

Das Ergebnis (FAP- oder PWS-Wert) wird durch Mittelwertbildung von mindestens zwei μ_{FAP} -Werten ermittelt, welche an 2 Prüfkörpern bestimmt wurden. Gemäss Norm [3] ist der Mittelwert wie folgt zu berechnen:

$$FAP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu_{FAP,i} , \text{ mit } n \geq 2$$

Das Wehner/Schulze-Verfahren kann an verschiedenen Oberflächenarten durchgeführt werden. Das normierte Verfahren ist zwar für Asphaltproben festgelegt, doch es können auch Betonproben, Markierungen, Schachtdeckel etc. untersucht werden. In Deutschland wird zwischen den Ergebnissen an Asphalt- oder Betonproben (FAP, Friction after Polishing) oder solchen, an Gesteinskörnungen (PWS, Prüfverfahren Wehner/Schulze) unterschieden. In unserer Arbeit haben wir diese unterschiedlichen Begriffe übernommen.

3.3 Messverfahren

Je nach Fragestellung kann die Anzahl der Polierübergänge variiert werden. Die drei in diesem Projekt verwendeten Messvarianten sind im Folgenden dargestellt.

a) Kurzvariante

Dies ist die in der EN 12697-49 beschriebene Variante und beinhaltet nur einen Polierzyklus mit 90'000 Polierübergängen.

b) Langvariante

In diesem Fall werden mehrere Polierzyklen mit unterschiedlicher Anzahl Polierübergängen durchgeführt und jeweils der Reibungskoeffizient gemessen. Dadurch ist es möglich, die Entwicklung der Griffigkeit einer Oberfläche zu verfolgen (z.B. Abbildung 3). Analog dem Wienermodell [19] werden bis zu 90'000 Polierübergänge gefahren, jedoch werden weniger Zwischenpunkte gemessen.

c) Sandvariante

Verfahren zur Messung von Proben mit sehr hoher Reibung, z.B. Sand. Wir haben beschlossen, die Anfangsgriffigkeit μ_a nicht zu messen, um eine Beschädigung der Messstreifen zu vermeiden. Dies ist mit der EN 12697-49 vereinbar, da die EN die Messung der Anfangsgriffigkeit nicht vorschreibt.

Varianten der Wehner/Schulze-Prüfung			
Variante	a) Kurzvariante	b) Langvariante	c) Sandvariante
Kalibrierung	μ_m -Glasplatte	μ_m -Glasplatte	μ_m -Glasplatte
Anfangsbremung	μ_m -Einlaufen	μ_m -Einlaufen	-
Nullbremung	μ_m -0	μ_m -0	-
	+90'000 Polierübergänge	+5'000 Polierübergänge	
	μ_m -90'000	μ_m -5'000	
		+15'000 Polierübergänge	
		μ_m -20'000	
		+30'000 Polierübergänge	
		μ_m -50'000	
		+40'000 Polierübergänge	+90'000
		μ_m -90'000	μ_m -90'000
		+90'000 Polierübergänge	+90'000
		μ_m -180'000	μ_m -180'000
Kalibrierung	μ_m -Glasplatte	μ_m -Glasplatte	μ_m -Glasplatte

Tabelle 2: Übersicht der drei Varianten, die für die Wehner/Schulze-Prüfung im PoGrifAk-Projekt verwendet wurden.

3.4 Vorbereitung von Gesteinskörnungsproben

Es wurden zwei verschiedene Verfahren zur Herstellung der Proben aus Gesteinskörnungen untersucht. Das Mastix-Verfahren wird in der TP Gestein-StB 5.4.4. [5] beschrieben, das Mosaik-Verfahren lehnt sich an die PSV-Prüfung an.

3.4.1 Mosaik-Verfahren

Dieses Verfahren kann für Korngrösse ab 4 mm aufwärts angewendet werden. Für die Fraktion 2/4 ist es nicht empfehlenswert, da die Korngrösse zu klein ist und die korrekte Aufbereitung der Proben sehr erschwert wird. Die besten Resultate werden mit der Fraktion 8/11 erzielt (größere Fraktionen wurden in diesem Projekt nicht getestet und werden in der Schweiz bisher kaum in Deckschichten eingesetzt).

Ablauf des Verfahrens

- Eine ausreichende Menge an Material der zu prüfenden Fraktion muss durch Siebung von Unter- und Überkorn befreit und anschliessend gewaschen werden.
- Anschliessend werden die Gesteinskörner manuell in eine Form mit einem Durchmesser von 225 mm gelegt. Idealerweise werden die Gesteinskörnungen in einer eher kompakten Anordnung (Abbildung 4a) und mit der flachen Seite nach unten angeordnet (Kirchmeier, 2011 [13]).
- Die freien Räume zwischen den Körnern können mit feinem Sand aufgefüllt werden. Es können verschiedene Sande verwendet werden, erfahrungsgemäss ist ein Sand mit wenig Füller am besten (z. B. Quarzsand). Idealerweise ist die obere Hälfte der Körner frei von Sand, damit das Harz problemlos haften kann.

Im nächsten Schritt wird ein hochviskoses Harz auf die Mischung aufgetragen. Ziel ist die Befestigung der Gesteinskörner, ohne den Sand zu durchdringen und damit die zu messende Oberfläche zu beeinträchtigen. Das hochviskose Harz ermöglicht diese Art der Aufbereitung (Abbildung 4), da es nur leicht durch den Sand migriert.

- Um Material zu sparen, wird nach dem hochviskosen Harz ein normales Epoxidharz zusammen mit Gesteinskörnungen eingebracht (Abbildung 4d). Ziel ist es, eine homogene Probe mit geeigneter Höhe (4-5 cm) zu erhalten.

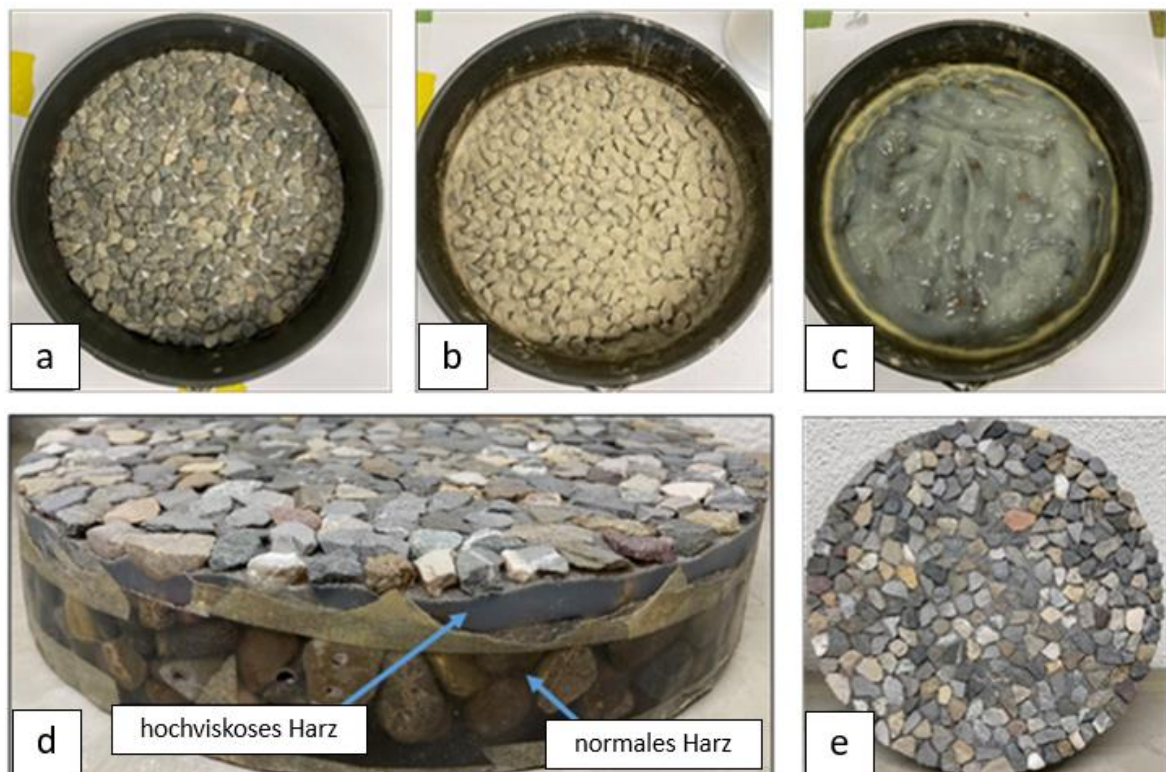


Abbildung 4: Vorbereitung von Mosaik-Proben: a) Verlegung von Gesteinskörnungen, b) Auffüllung mit Sand, c) erste Schicht aus hochviskosem Harz, d) fertige Probe bei der die beiden unterschiedlichen Harze sichtbar sind, e) Ansicht von oben.

3.5 Mastix-Verfahren

Die Herstellung von Proben gemäss dem Mastix-Verfahren basiert im Wesentlichen auf einem in Deutschland erstellten Dokument, das ein Verfahren zur Herstellung dieser Art von Proben beschreibt (TP Gestein-StB 5.4.4 [5]). Ein Gemisch aus Gesteinskörnung, Füller und Bitumen wird als eine Art Gussasphalt in eine entsprechende Form gegossen. Die hergestellten Zylinder werden dann geschnitten und sandgestrahlt. Sie ergeben sehr homogene Proben und Resultate. Die geprüfte Schnittfläche ist eben. Die Kanten und Ecken der einzelnen Gesteinskörner treten nicht in Erscheinung. Somit werden die Poliereigenschaften des Gesteins – unabhängig von der Kornform – angesprochen.

Ablauf des Verfahrens (Abbildung 5)

- 14 kg der gewünschten Fraktion werden gewaschen und gesiebt, um Unter- und Überkorn zu entfernen. Die Gesteinskörnungen werden dann auf 180 °C erhitzt.
- 5,6 kg Kalksteinfüller werden ebenfalls vorbereitet und auf 180 °C erhitzt.
- Schliesslich werden 2,2 bis 2,4 kg Hartbitumen 10/20 vorbereitet und ebenfalls auf 180 °C aufgeheizt.
- In einem Labormischer wird das Mischgut erstellt und schliesslich in der vorgewärmten Form gegossen.
- Die Probe wird dann sofort auf einen Rütteltisch gelegt und mit dem entsprechenden Gewicht darauf geschüttelt. Durch diesen Schritt können eventuell entstandene Luftblasen entweichen.
- Die Proben werden dann gesägt, geschliffen und schliesslich sandgestrahlt.



Abbildung 5: Probenvorbereitung nach der Mastix-Methode: a) Mischungsvorbereitung, b) Füllen der Form, c) Vibration, um eventuelle Luftblasen zu entfernen, d) gefüllte Form, e) ausgeschaltete Proben, f) geschnittene Proben, g) Ansicht von oben.

3.5.1 Messung der Sandfraktion

Weder das Mastix- noch das Mosaik-Verfahren können für die Analyse der Sand-Fraktion 0/2 verwendet werden. Der Sand muss auf einem Bohrkern oder eine Platte verteilt werden, auf welcher ein Harz in gleichmässiger Schichtdicke aufgetragen wurde. Die Gesteinskörnungen werden dann mit einem Metallgewicht angepresst, damit sie gut am Harz haften. Diese Methode ermöglicht es, schnell eine sehr homogene Oberfläche zu erhalten.



Abbildung 6: Erscheinungsbild der Sandproben 0/2.

Vorbereitung der Proben

- 1 kg der 0/2-Fraktion absieben und das Überkorn entfernen. Der Feinanteil sollte ebenfalls entfernt werden (<0.5), um eine 0.5/2 mm Fraktion zu erhalten
- Ein Bohrkern ($\varnothing (225 \pm 5)$ mm) oder eine Platte ($(225 \text{ mm} \times 225 \text{ mm}) \pm 5$ mm), Höhe ca. 50 mm vorbereiten
- Eine Schicht Harz (vorzugsweise von hoher Viskosität) auf die Probe auftragen
- Die 0.5/2 mm Fraktion gleichmässig auf die Probe verteilen
- Die Körner gleichmässig andrücken, damit sie am Harz haften
- Harz 12 h lang aushärten lassen
- Schlecht haftende Gesteinskörnungen mit einer Bürste entfernen

3.5.2 Vergleich Mosaik- und Mastix-Verfahren

Beide Methoden sind zuverlässig und liefern gut reproduzierbare Ergebnisse. Dennoch gibt es erhebliche Unterschiede zwischen den mit den beiden Methoden hergestellten Proben. (siehe Tabelle 1 bis Tabelle 3).

In Deutschland wird gemäss der TP Gestein-StB [5] nur noch die Mastix-Methode angewendet. Die einfache Vorbereitung und die hohe Homogenität der hergestellten Proben lassen vermuten, dass diese Methode für die Beurteilung des Polierwiderstandes von Gesteinskörnungen aussagekräftiger ist.

Möchte man den Einfluss der Form der Körner untersuchen, könnte auch die Mosaik-Methode von Interesse sein.

Erwähnenswert ist auch, dass die mit den beiden Methoden (über Wehner/Schulze) ermittelten Werte zwar gut korrelieren, aber nicht identisch sind. Die Werte der Mosaik-Methode sind gerade wegen der Vorbereitungsmethode immer höher als diejenigen der Mastix-Methode. Bei der Festlegung von Anforderungen muss diese Tatsache unbedingt berücksichtigt werden.

Vergleich der Mosaik und Mastix-Methode

	Mastix	Mosaik
Oberfläche	künstlich: Probe wird geschnitten, geschliffen und sandgestrahlt	natürlich: Die Oberfläche der Gesteinskörnungen (mehr oder weniger gebrochen) wird berücksichtigt.
Herstellungszeit zweier Prüfkörper	~4 h	~4 h
Unterschied der gemessenen Reibungskoeffizienten zweier Proben	ähnlich (vgl. Abbildung 7)	
Benötigt spezielle Form	ja	nein
Labor Mischer erforderlich	ja (kann auch manuell gemacht werden)	nein
Abnutzung der Bremsbeläge	wenig	gross
Einfluss Laborant auf Ergebnis	keinen (zufällige Verteilung)	möglich (manuelle Verteilung)
Einfluss Sandstrahlung	gross	keine

Tabelle 3: Vergleich der Mosaik- und Mastix-Methode.

3.5.3 Bestimmung der Messunsicherheit

Angaben zur Wiederholpräzision des Verfahrens finden sich in der TP Gestein-StB 5.4.4 [5] (siehe Tabelle 4). Diese Werte wurden nicht ermittelt, sondern aus einem noch nicht publizierten Forschungsprojekt (Stand 2024.04) geschätzt (Überprüfung der Praxisrelevanz des Prüfverfahrens „Friction after Polishing“ (FAP-Verfahren); FE 06.0117/2017/DRB). Mangels Vergleichsuntersuchungen mit mehreren Labors konnte in der TP Gestein-StB keine Angaben zur Vergleichspräzision gemacht werden.

Präzision des FAP- bzw. PWS-Wertes

	Standardabweichung	Präzision
Kritische Spannweite für Einzelwerte	–	$d_a = 0,020 [-]$
Wiederholpräzision	$\sigma_r = 0,009 [-]$	$r = 0,024 [-]$
Vergleichpräzision	–	–
Dabei bedeuten: d_a = Kritische Spannweite zweier Einzelwerte r = Grenze der Präzision unter Wiederholbedingungen nach der DIN ISO 5725: $r = 2,77 \cdot \sigma_r$ R = Grenze der Präzision unter Vergleichbedingungen nach der DIN ISO 5725: $R = 2,77 \cdot \sigma_R$ σ_r = Standardabweichung aus Ringversuchen, die unter Wiederholbedingungen nach der DIN ISO 5725 festgestellt wurden σ_R = Standardabweichung aus Ringversuchen, die über Vergleichbedingungen nach der DIN ISO 5725 festgestellt wurden		

Tabelle 4: Angaben zur Präzision des FAP- bzw. PWS-Wertes aus TP Gestein-StB [5].

Die EN 12697-49 [3] gibt Beispiele für Präzisionsdaten an, welche auf einem Ringversuch mit lediglich 7 Laboratorien aus dem Jahr 2015 stammen (Tabelle 5). Dass die EN-Norm keine Präzisionsdaten angibt, sondern nur «Beispiele» weist auf einen grossen Nachholbedarf hin.

Präzision des FAP-Wertes

Tabelle 2 — Beispiele für Präzisionsdaten

Asphaltart	FAP nach 90 000 Polierübergängen		
	Mittelwert FAP	Wiederholpräzision	Vergleichspräzision
BBSG 0/10	0,315	0,024	0,074

ANMERKUNG Die Präzisionsdaten wurden 2015 in einem Ringversuch mit 7 Laboratorien erhalten, die ein BBSG 0/10 (AC10) nach EN 12697-49 (2014) geprüft haben.

Tabelle 5: Angaben zur Präzision des FAP-Wertes aus SN EN 12697-49 [3].

Analysiert man die Standardabweichung (s_n) der FAP-Daten dieser Arbeit, ergeben sich die in Abbildung 7 gezeigten Histogramme. Die grösste Standardabweichung beträgt 0.03 für μ_m-0 . Die meisten Ergebnisse liegen bei $s_n < 0.01$. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass bei vielen Proben nur zwei oder drei Probekörper vorlagen und eine eingehende Analyse der Messunsicherheit des Wehner/Schulze-Verfahrens noch aussteht.

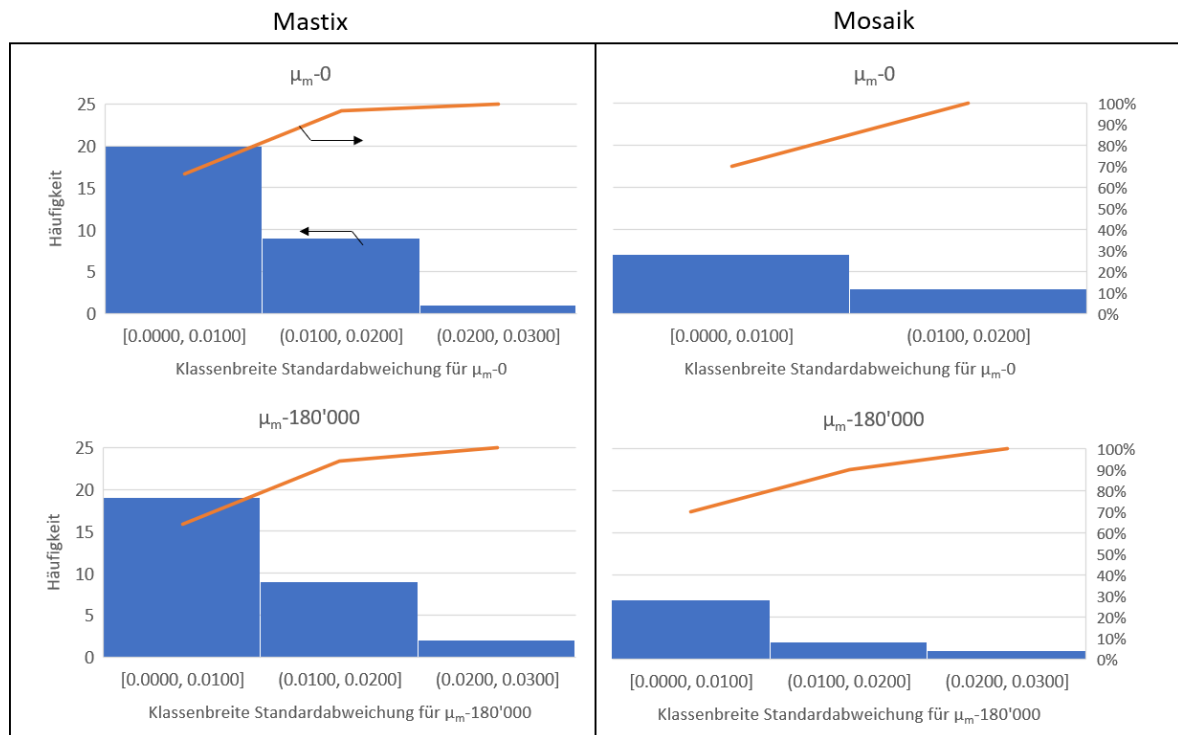


Abbildung 7: Histogramm der Standardabweichungen (s_n) für μ_m-0 und $\mu_m-180'000$ bestimmt an Mastix- und Mosaik-Proben mit Wehner/Schulze.

4 Resultate I:

Bewertungshintergrund für Wehner/Schulze-Prüfungen an Gesteinskörnungen

4.1 Gesteinskörnungen

Die Auswahl der 10 zu untersuchenden Provenienzen der Gesteinskörnungen erfolgte gemeinsam mit der Begleitkommission. Einerseits wurde auf eine breite regionale Verteilung geachtet, andererseits sollten die ausgewählten Provenienzen den schweizerischen Markt repräsentieren. Aus diesem Grunde wurde beispielsweise auch ein Kieswerk aus dem Elsass (unterer Rhein) ausgewählt, da diese Provenienz in der Nordwestschweiz auf dem Markt eine Rolle spielt.

Die 10 untersuchten Gesteinskörnungen bestehen in sechs Fällen aus fluvioglazialen Sedimenten (anschliessend gebrochen) und in vier Fällen aus Steinbruchmaterial (zwei Sandsteine, ein Kieselkalk und ein dolomitischer Kalkstein).

Die Provenienzen 1-9 stellen Gesteinskörnungen dar, die üblicherweise bei Deckschichten in Asphalt oder Beton verwendet werden. Probe Nr. 10 (siehe Tabelle 7) hingegen repräsentiert eine andere Petrographie (Dolomit), die bewusst für die Kapitel über Akustik und Rezeptoptimierung ausgewählt wurde.

Gesteinskörnungen für das Projekt					
Geologische Gliederung	Fest-/Lockergestein	Lithologie	Herkunft	Abbauart	Ausgewählte Provenienz
Mittelland	Lockergesteine	Alluvialschotter	Rhone	Kieswerk	1 x
			Aare		2 x
			Reuss		
			Rhein		2x
Alpen	Festgestein	Alpine Kalke und Sandsteine (inkl. Kieselkalke)	Alpen nordrand	Steinbruch	3 x
			Südrand		1 x
		kristalline Gesteine	Graubünden		
	Lockergesteine	Alluvialschotter	Rhone	Kieswerk	1 x
			Aare		
			Reuss		
Rhein					
			Tessin		

Tabelle 6: Auswahl der Gesteinskörnungen für das Projekt.

4.1.1 Materialeigenschaften

Die Eigenschaften der gewählten Provenienzen wurden mit dem Polierwiderstand (PSV, getestet an Fraktion 8/11), dem Los-Angeles-Koeffizient (Fraktion 4/8) sowie dem PWS-Wert charakterisiert. Die Ergebnisse sind in der nachstehenden Tabelle 7 aufgeführt, die Korngrößenverteilung der verwendeten Korngrößen im ANHANG 11.1.

Petrographie vs. LA-Koeffizient, PSV- und PWS-Wert der Provenienzen

Prove- nienz	Petrographie	LA- Koeff- fizient	PSV	8/11		8/11	
				PWS (Mosaik)		PWS (Mastix)	
				0	180'000	0	180'000
1	Fluvioglaziale Ablagerung	22	47	0.293	0.254	0.249	0.229
2 GKh 1)	Fluvioglaziale Ablagerung	19	53	0.288	0.285	0.285	0.265
3	Fluvioglaziale Ablagerung	21	54	0.340	0.287	0.299	0.223
4	Fluvioglaziale Ablagerung	18	54	0.297	0.266	0.286	0.205
5	Fluvioglaziale Ablagerung	17	55	0.363	0.297	0.395	0.203
6	Quarz Sandstein	14	64	0.401	0.347	0.328	0.308
7	Kieselkalk	18	57	0.287	0.254	0.206	0.230
8 GKh 2)	Quarz Sandstein	18	59	0.421	0.339	0.355	0.259
9	Fluvioglaziale Anlagerung	19	58	0.306	0.305	0.288	0.248
10 Gkt	dolomitischer Kalk	18	35	0.236	0.117	0.203	0.090
11	Fluvioglaziale Ablagerung	n.b.	> 50	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

Tabelle 7: Tabellarische Darstellung der Petrographie, des Los-Angeles-Koeffizienten und Polierwiderstandes PSV sowie des PWS-Wertes für die 10 Provenienzen. Die Provenienz 11 diente als Abstreumaterial für die Akustiktests des lärmarmen Gussasphaltes. 1) beim Teilprojekt III «Rezeptoptimierung»; 2) beim Teilprojekt II Akustik.

Die Norm SN EN 13043 [22] fordert für Gesteinskörnungen, die in Deckschichten Typ S und H verwendet werden, einen PSV-Mindestwert von ≥ 50 und einen LA-Wert ≤ 25 (Fraktion 4/8). Die Normanforderungen sind in der Abbildung 8 mit einer gestrichelten, orangen Linie dargestellt.

GKh und Gkt:

Als Gesteinskörnung mit hohem Polierwiderstand diente Material der Provenienz 2 beim Teilprojekt III «Optimierung von Rezepturen» und der Provenienz 8 beim Teilprojekt II «Akustik». Material der Provenienz 10 hat einen niedrigen Polierwiderstand und repräsentiert Gkt.

PSV:

Die Provenienz 1 liegt mit einem Wert von 47 unterhalb der Norm-Anforderung; alle anderen im Strassenbau verwendeten Gesteinskörnungen haben Werte > 50 . Die Gesteinskörnungen aus einem Steinbruch (Nr. 6-8) weisen erwartungsgemäss tendenziell höhere Werte als Gesteinskörnungen aus Kieswerken auf. Dagegen zeigt die Probe 10 aus dolomitischem Kalk extrem niedrige Werte (35).

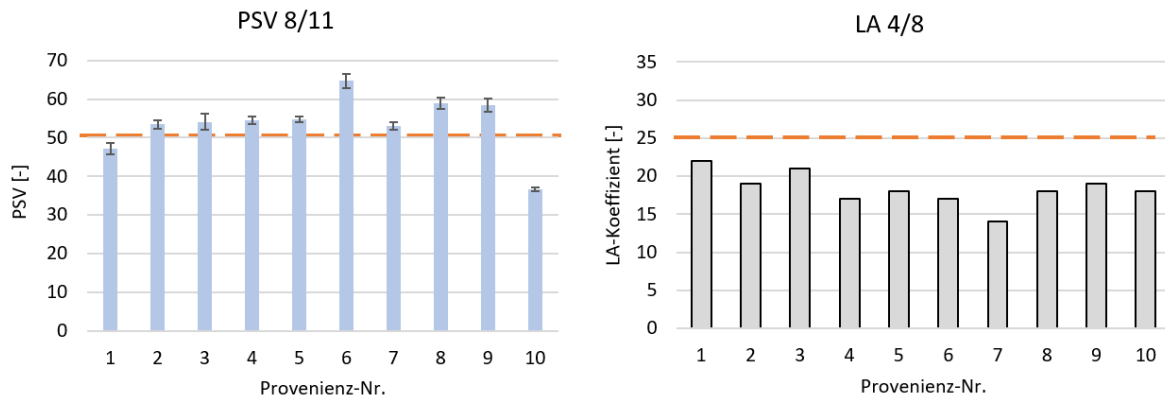


Abbildung 8: PSV-Wert der verschiedenen Provenienzen (links) und entsprechender LA-Koeffizient (rechts). Die orange gestrichelte Linie stellt die Anforderung (SN EN 670130a) für Deckschichten dar.

Alle Provenienzen erfüllen deutlich die Norm-Anforderung. Interessanterweise hat auch der dolomitische Kalkstein (Nr. 10) einen guten Wert (18). Diese Tatsache zeigt, dass es nicht unbedingt eine Korrelation zwischen Polierwiderstand und Zertrümmerungswiderstand gibt. Eine weitere wichtige Feststellung ist, dass Kieselkalk (Nr. 7) einen besseren LA-Koeffizienten als die Sandsteine (Nr. 6, 8), aber einen tieferen PSV-Wert aufweist. Diese Eigenschaft hängt mit der Zusammensetzung des Gesteins (und auch mit seiner Entstehung) zusammen.

4.2 PWS-Wert der verschiedenen Provenienzen

4.2.1 Mosaik-Verfahren

Die untenstehende Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse der Prüfungen, welche an der Fraktion 8/11 der 10 Provenienzen durchgeführt wurden. Dargestellt sind jeweils der Anfangswert, sowie die Werte nach 90'000 und 180'000 Polierübergängen. Es ist zu erkennen, dass der anfängliche Reibungskoeffizient (blau) erwartungsgemäss immer der höchste gemessene Wert ist. Im Durchschnitt sinkt der Wert nach 90'000 Polierübergängen um 10 bis 20 %.

Dieser Abfall des Reibungskoeffizienten kann jedoch je nach Petrographie und Herkunft der Gesteinskörnungen unterschiedlich stark ausgeprägt sein. In einigen Fällen, z.B. Provenienz 2 und 9, ist der Abfall minimal.

Die Proben der Provenienzen 6 und 8 (Sandsteine) weisen erwartungsgemäss die höchsten Endgriffigkeitswerte auf. Die anderen Proben liegen auch nach 180'000 Polierübergängen zwischen mindestens 0.254 bis hinzu 0.305. Eine Ausnahme bildet der dolomitische Kalkstein, mit einem extrem niedrigen Wert von 0.117 (Abbildung 9).

Zudem fällt auf, dass die Werte nach 90'000 und 180'000 Polierübergängen nahe beieinanderliegen. Offenbar wird der Endwert, bei dem zusätzliche Polierübergänge keine weitere Verschlechterung herbeiführen, mit 90'000 Polierübergängen erreicht.

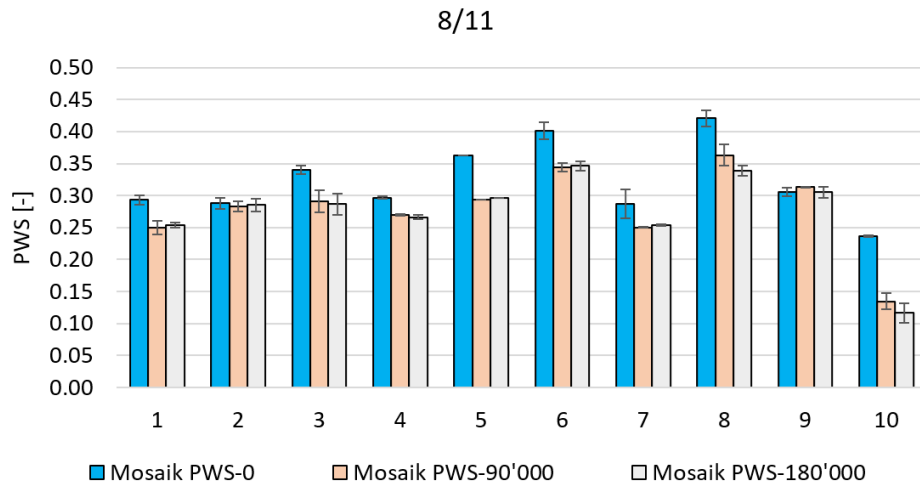


Abbildung 9: Entwicklung des Reibungskoeffizienten (PWS) für Mosaik-Proben der 10 verschiedenen Provenienzen. Dargestellt sind der Anfangswert (blau), der Wert nach 90'000 Polierübergängen (orange) und der Endwert 180'000 Polierübergängen (grau).

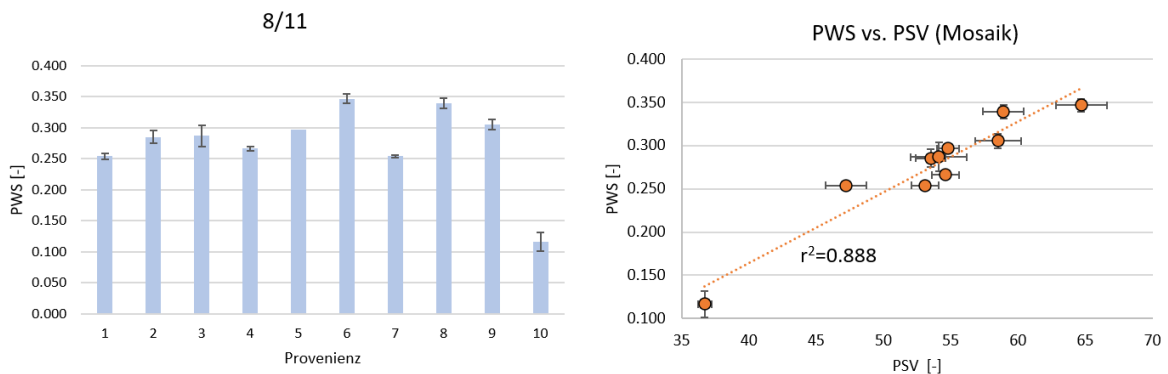


Abbildung 10: Links: Reibungskoeffizient nach 180'000 Polierübergängen für die 10 Provenienzen, Fraktion 8/11. Der angegebene Fehler entspricht der jeweiligen Standardabweichung der Messwerte. Rechts: Vergleich des gemessenen PWS-Wertes (Mosaik) und PSV für die verschiedenen Proben der Fraktion 8/11.

Für jede Provenienz wurden zwei separate Prüfkörper gemessen. Im Durchschnitt entspricht die Differenz zwischen den beiden FAP-Anfangswerten 0.018, während sie bei den Proben nach 180'000 Polierübergängen auf 0.015 sinkt.

Abbildung 10 (rechts) zeigt den Zusammenhang zwischen dem PWS- (Mosaik) und dem PSV-Wert. Probe 7 (Kieselkalk) mit PSV 36.7 liegt etwas ausserhalb. Abgesehen davon, steht das Werteintervall 47.2 – 64.7 der PSV-Messungen einem Werteintervall von 0.347 – 0.254 für die PWS-Ergebnisse gegenüber.

4.2.1.1 Mastix-Verfahren

Die nachstehenden Diagramme (Abbildung 11 bis Abbildung 13) und Tabelle 6 zeigen die Ergebnisse der Prüfungen an den Fraktionen 8/11, 4/8 und 2/4, deren Prüfkörper gemäss Mastix-Verfahren hergestellt wurden.

Die mit dem Wehner/Schulze-Verfahren ermittelte Anfangsgriffigkeit hat eine andere Aussagekraft als das Mosaik-Verfahren. Das Mastix-Verfahren erzeugt eine «flache» Gesteinsoberfläche, d.h. es spiegelt nicht die tatsächliche Gesteinsoberfläche wider

Fraktion 8/11

Die PWS-Anfangswerte liegen zwischen 0.203 und 0.395, wobei der Sandstein wiederum die höchsten Werte aufweist, während der dolomitische Kalkstein (Nr. 10) eindeutig die niedrigsten Werte hat (Abbildung 11).

Die Unterschiede zwischen 90'000 und 180'000 Polierübergängen sind gering und liegen im Bereich der Schwankungsbreite der Einzelmesswerte. Die Werte der Endgriffigkeit (PWS-180. Abbildung 12) variieren – mit Ausnahme von Nr. 10 – zwischen 0.205 (Nr. 4) und 0.308 (Nr. 6). Die meisten Proben haben Werte zwischen 0.223 und 0.265. Der dolomitische Kalkstein (Nr. 10) hat eine Endgriffigkeit von 0.090. An dieser Stelle sei wiederholt, dass diese Provenienz im Strassenbau nicht verwendet wird.

Die Probe Nr. 7, Kieselkalk, zeigt den Trend, dass der gemessene Reibungskoeffizient mit zunehmender Polierung steigt. Diese Tatsache ist auch beim Berühren der Probe mit der Hand deutlich spürbar. Die Ursache scheint in der inneren Struktur des Kieselkalks zu liegen: Je stärker er geschliffen wird, desto mehr liegen die «inneren» Teile der Gesteinskörner frei, die reich an Quarz sind und daher einen hohen Polierwiderstand haben. Röthlisberger [32] spricht in diesem Zusammenhang vom «Konzept des Härtekontrastes» und stellt auf dieser Basis einen Zusammenhang zwischen der Mineralogie und dem Polierwiderstand her.

Fraktion 4/8

Die Anfangswerte der Fraktion 4/8 liegen zwischen 0.266 (Nr. 7) und 0.377 (Nr. 8), wobei die beiden Sandsteine (Nr. 6 und Nr. 8) die höchsten und der dolomitische Kalkstein die niedrigsten Werte aufweisen. Nach 180'000 Polierübergängen nehmen die Werte ab und schwanken zwischen 0.227 und 0.344, ausser bei Kalkstein, dessen Wert auf 0.09 sinkt (Abbildung 12).

Auch in der Fraktion 4/8 kann bei der Probe Nr. 7 (Kieselkalk) die zuvor für die Fraktion 8/11 beobachtete Zunahme der Griffigkeit festgestellt werden.

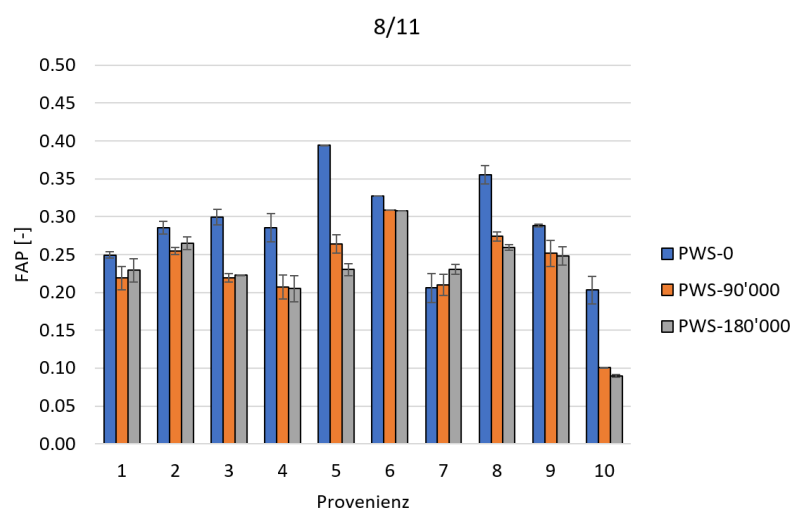


Abbildung 11: Zusammenfassung des Reibungskoeffizienten (FAP) für Mastix-Proben der 10 Provenienzen (Fraktion 8/11) gemessen nach 0 (PWS-0, blau), 90'000 (PWS-90'000, orange) und 180'000 Polierübergängen (PWS-180'000, grau).

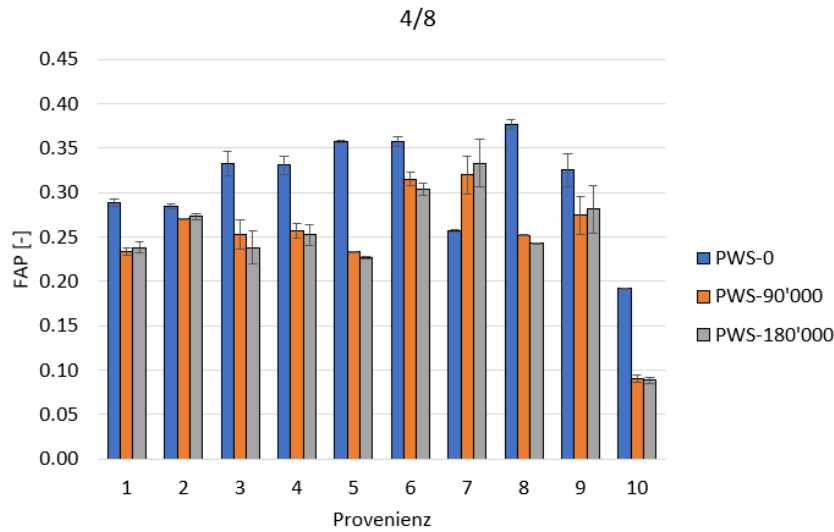


Abbildung 12: Zusammenfassung des Reibungskoeffizienten (FAP) für Mastix-Proben der 10 Provenienzen (Fraktion 4/8) gemessen nach 0 (PWS-0, blau), 90'000 (PWS-90'000, orange) und 180'000 Polierübergängen (PWS-180'000, grau).

Im Allgemeinen gibt es nur einen geringen Unterschied zwischen den nach 90'000 und nach 180'000 Polierübergängen gemessenen Reibungskoeffizienten.

Fraktion 2/4

Die 2/4-Fraktion zeigt deutlich höhere Anfangswerte (0.297 (Nr. 7) bis 0.441 (Nr. 8)) als die größeren Fraktionen. Selbst der dolomitische Kalkstein (Nr. 10) weist einen Anfangswert von 0.251 auf.

Die PWS-90-Werte liegen zwischen 0.264 (Nr. 5) und 0.406 (Nr. 7), wobei der niedrigste Wert von Provenienz 10 mit 0.157 vertreten wird.

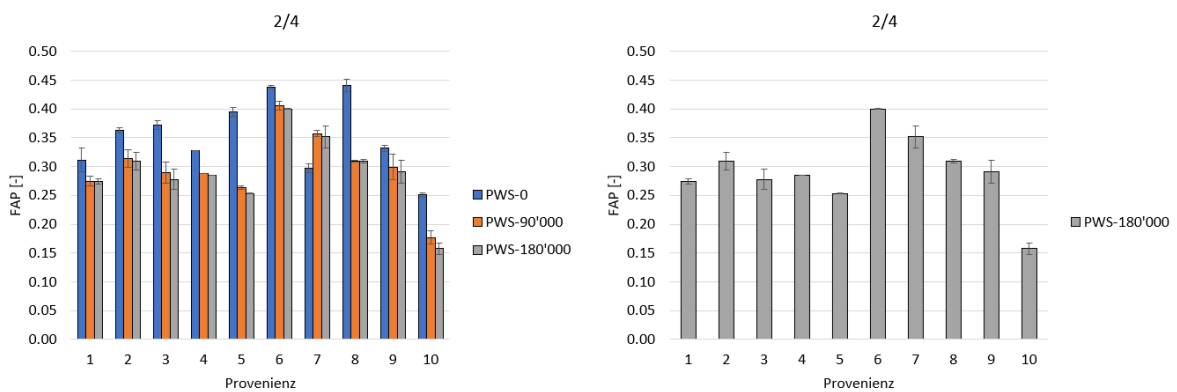


Abbildung 13: Links: Zusammenfassung des Reibungskoeffizienten für Mastix-Proben der 10 Provenienzen (Fraktion 2/4) gemessen nach 0 (PWS-0, blau), 90'000 (PWS-90'000, orange) und 180'000 Polierübergängen (PWS-180'000, grau). Rechts: Fokus auf die Verteilung von PWS-180'000 (Endgriffigkeit).

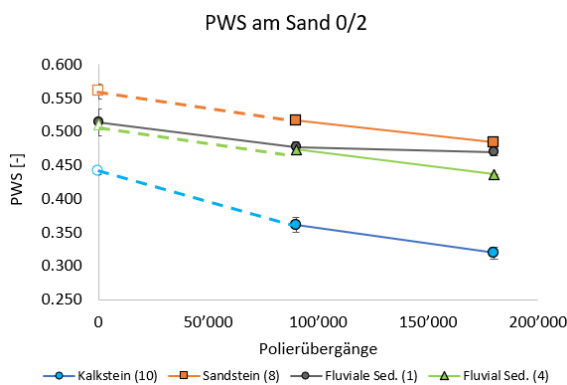
Interessant ist hier auch die Entwicklung der Provenienz Nr. 7, deren Reibungskoeffizient am Anfang mit 0.297 am niedrigsten ist (ohne Berücksichtigung des dolomitischen Kalksteins) und am Ende des Versuches auf 0.352 ansteigt, was einem der höchsten gemessenen Werte entspricht.

PWS-Werte für Mastix-Proben										
Polier- über- gänge	Provenienz									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	2/4									
0	0.312	0.363	0.372	0.328	0.395	0.438	0.297	0.441	0.332	0.251
90'000	0.275	0.314	0.289	0.289	0.264	0.406	0.357	0.310	0.299	0.177
180'000	0.274	0.309	0.278	0.285	0.253	0.400	0.352	0.309	0.291	0.157
	4/8									
0	0.289	0.284	0.333	0.331	0.357	0.357	0.257	0.377	0.325	0.193
90'000	0.233	0.271	0.253	0.257	0.233	0.315	0.320	0.252	0.275	0.090
180'000	0.238	0.273	0.238	0.252	0.227	0.304	0.333	0.243	0.281	0.089
	8/11									
0	0.249	0.285	0.299	0.286	0.395	0.328	0.206	0.355	0.288	0.203
90'000	0.219	0.254	0.219	0.207	0.264	0.309	0.210	0.274	0.252	0.101
180'000	0.229	0.265	0.223	0.205	0.230	0.308	0.230	0.260	0.248	0.090
PSV	47	53	54	54	55	64	57	59	58	35

Tabelle 8: Zusammenfassung der Messdaten von Proben, die nach der Mastix-Methode hergestellt wurden, für die Fraktionen 2/4, 4/8 und 8/11.

4.2.2 Messung der Sandfraktion 0/2

Bei vier Provenienzen wurde beschlossen, auch die Fraktion 0/2 zu prüfen; die Vorbereitung der Proben ist in Kap. 1.3.4.3 beschrieben. Aufgrund der extremen Kantigkeit der sandigen Fraktion wurde – mit Ausnahme einer Probe – beschlossen, die Anfangsgriffigkeit nicht zu messen, sondern erst nach mindestens einem Polierzyklus, um die Abnutzung und Beschädigung der Bremsgummis zu begrenzen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 14 und Tabelle 9 dargestellt. Da diese Untersuchung ursprünglich nicht geplant war, wurde aus Kostengründen für jede der vier Provenienzen nur eine Probe – nicht wie üblich zwei – geprüft.



Polier- über- gänge	Kalk- stein (10)	Sand- stein (8)	Fluv. Sed. (4)	Fluv. Sed. (1)
0	0.440	0.560	0.514	0.510
90'000	0.361	0.516	0.477	0.473
180'000	0.319	0.484	0.470	0.436

Abbildung 14: Entwicklung des Reibungskoeffizienten (PWS) für die vier gemessenen Fraktionen 0/2.

Tabelle 9: PWS-0, -90'000 und -180'000 für die vier Provenienzen.

In der Abbildung 14 ist zu erkennen, dass die Provenienz Nr. 10 (Kalkstein, blau) eindeutig den niedrigsten Wert (0.319) hat, während Sandstein (orange) nach 180'000 Polierübergängen den höchsten Wert (0.484) aufweist. Provenienz Nr. 4 liegt mit 0.47 auf einem ähnlichen Wert wie Sandstein, während die andere Probe sedimentären Ursprungs (1) einen niedrigeren Wert von 0.436 aufweist.

Die ermittelten Ergebnisse stimmen mit denen überein, die zuvor für die anderen Fraktionen beobachtet wurden. Abbildung 15 zeigt die Entwicklung des PWS für die vier Provenienzen. Die 0/2-Fraktion wurde mit Hilfe von Sandplatten bestimmt, während die anderen Fraktionen nach der Mastix-Methode gemessen wurden; dadurch ergibt sich ein deutlicher Unterschied zwischen der 0/2- und den anderen Fraktionen.

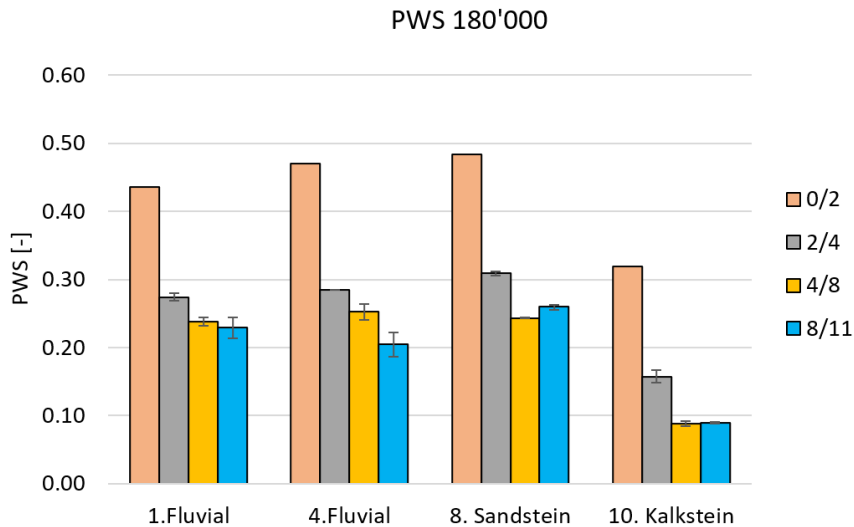


Abbildung 15: Gemessene PWS-Werte für die vier Provenienzen und die verschiedenen Fraktionen. Ebenfalls in rosa dargestellt ist der PWS-Wert der 0/2-Fraktion, der deutlich höher ist als die anderen gemessenen Werte. Bis auf die Sandfraktion 0/2 sind alle Proben nach dem Mastix-Verfahren hergestellt.

Interessant ist auch, dass sich die Rangfolge der Provenienzen, je nach Fraktion ändern kann. In der Tabelle 10 wurden die Rangfolgen der PWS-Werte der Provenienzen bei den verschiedenen Fraktionen dargestellt, wobei der höchste Wert auf Rang 1 liegt. Die Provenienz 4 liegt je nach untersuchter Fraktion auf Rang 1, 2 oder 3. Dies zeigt, dass es wenig zuverlässig ist, von den Eigenschaften einer Fraktion auf die Eigenschaften anderer Fraktionen zu schliessen.

Rangfolge der PWS-Werte

Fraktion	Rangfolge der Provenienzen			
	1. Rang	2. Rang	3. Rang	4. Rang
0/2	8	4	1	10
2/4	8	4	1	10
4/8	4	8	1	10
8/11	8	1	4	10

Tabelle 10: Rangfolge der PWS-Werte je nach Fraktion. Daten entnommen aus Abbildung 15.

4.3 PWS-Wert der verschiedenen Fraktionen

Mastix-Verfahren

Prüfergebnisse von Mastix-Proben zeigen, dass es eine Korrelation zwischen der gemessenen Griffigkeit und der Korngrösse besteht: je kleiner das Grösstkorn, desto höher die gemessene Griffigkeit. Dieser Unterschied ist zwischen den Fraktionen 8/11 und 4/8 nur gering: im

Durchschnitt der 10 Provenienzen liegt der Reibungskoeffizient der Fraktion 4/8 nur 8 % höher als bei der Fraktion 8/11. Die Unterschiede sind oft minimal, und in einigen Fällen zeigt die Fraktion 8/11 sogar eine höhere Griffigkeit als die Fraktion 4/8.

Die Fraktion 2/4 weist dagegen eine deutlich höhere Griffigkeit auf als die größeren Fraktionen. Der PWS-Wert ist im Durchschnitt 21 % höher als bei der Fraktion 8/11 und 15 % höher als bei der Fraktion 4/8. Dies ist direkt auf die grössere Oberfläche zurückzuführen, die mit dem Bremsgummis der Maschine in Kontakt ist.

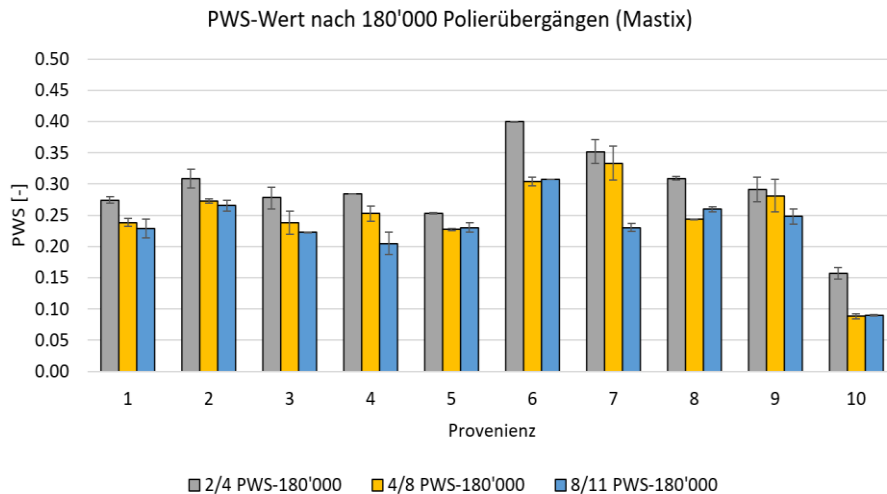


Abbildung 16: Darstellung des Reibungskoeffizienten für Mosaik-Proben der 10 Provenienzen nach 180'000 Polierübergängen Fraktionen (2/4, 4/8, 8/11).

Mosaik-Verfahren

Die Abbildung 17 zeigt die Entwicklung des PWS-Wertes für eine Provenienz (Nr. 4) und verschiedene Fraktionen.

Die Prüfkörper der Fraktion 0/2 wurden nach dem Sandherstellungsverfahren (siehe Kap. 1.3.4.3) hergestellt, diejenigen der Fraktionen 4/8 und 8/11 nach dem Mosaik-Verfahren. Die Fraktion 2/4 (gestrichelte Linie in der Abbildung 17) wurde nicht untersucht, da es nicht möglich war, mit dem Mosaik-Verfahren eine Probe von guter Qualität herzustellen. Aufgrund der Komplexität der Probenvorbereitung wurde nur eine Herkunft getestet.

Die in Abbildung 17 sichtbare Entwicklung scheint linearer zu verlaufen als beim Mastix-Verfahren: Mit abnehmender Korngrösse nimmt die Griffigkeit deutlich zu.

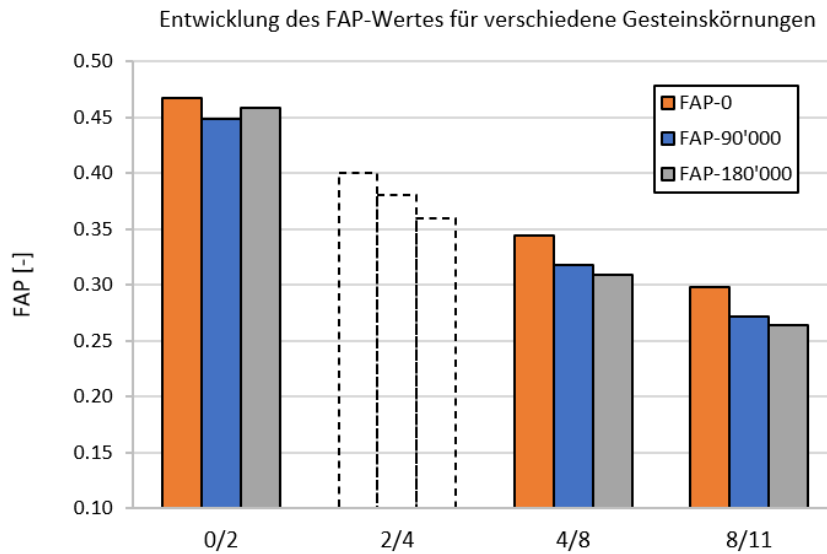


Abbildung 17: Bestimmung des PWS-Wertes für verschiedene Fraktionen einer einzigen Provenienz. Die Proben der Fraktionen 4/8 und 8/11 wurden nach der Mosaik-Methode hergestellt. Bei der Fraktion 0/2 kam das Sandherstellungsverfahren zur Anwendung. Die Fraktion 2/4 wurde nicht untersucht. Die Schätzwerte für die Fraktion 2/4 sind daher mit einer gestrichelten Linie dargestellt.

4.4 Schlussfolgerungen Kapitel I

4.4.1 Vergleich Mastix – Mosaik

Wie bereits erwähnt, weisen die nach der Mosaik-Methode hergestellten Proben ca. 10-20 % höhere Werte auf, als die nach der Mastix-Methode hergestellten Proben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Präparationsmethode zwei unterschiedliche Oberflächentypen erzeugt.

Abbildung 18, links zeigt den Zusammenhang zwischen den PWS-Werten (Mosaik und Mastix) der 10 Provenienzen. Die Mastix-Methode liefert tendenziell kleinere Werte als die Mosaik-Methode. Dies ist vor allem auf die durch die Mosaik-Methode hervorgerufenen Unterschiede in der Oberflächenstruktur zurückzuführen.

Diese Proben weisen eine deutliche Kantigkeit auf (vgl. Abbildung 4), da die einzelnen Körner freiliegen und zwischen den einzelnen Aggregatbestandteilen eine Lücke entsteht. Diese Rauigkeit führt zu einer zusätzlichen Bremswirkung. Die Bremsklötze «huppeln» stark über die Probe, d.h. laufen über die Aggregatoberfläche, tauchen kurz in den Zwischenraum ein, werden wieder auf die Aggregatoberfläche angehoben, usw.

Dagegen ist die Oberfläche der mittels Mastix-Verfahren erzeugten Proben glatt, bzw. sind die Zwischenräume der Aggregate mit Mastixmaterial aufgefüllt (vgl. Abbildung 5). Hier fehlt die durch die freiliegenden Aggregatkörner hervorgerufene «Huppel»-Wirkung, es kommt somit zu keiner zusätzlichen Bremswirkung und der gemessene Reibungskoeffizient ist kleiner.

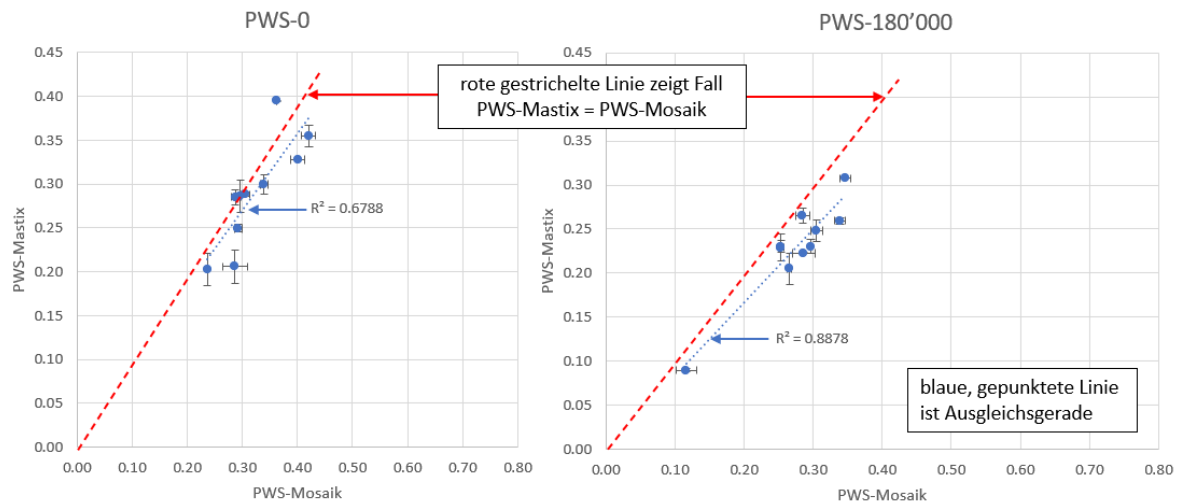


Abbildung 18: Korrelation zwischen PWS-Mastix und PWS-Mosaik. Links: PWS-Anfang (Anfangsgriffigkeit). Rechts: PWS-180'000 (Endgriffigkeit).

In Deutschland wird gemäss der TP Gestein-StB [5] nur noch die Mastix-Methode angewendet. Die einfache Vorbereitung und die hohe Homogenität der hergestellten Proben lassen vermuten, dass diese Methode für die Beurteilung des Polierwiderstandes von Gesteinskörnungen aussagekräftiger ist.

Möchte man den Einfluss der Form der Körner untersuchen, könnte auch die Mosaik-Methode von Interesse sein.

4.4.2 Entwicklung der Griffigkeit: Erreichung des Endpolierwertes

Die Griffigkeit wurde zu Beginn (PWS-Anfang), nach 90'000 (PWS-90'000) und nach 180'000 Polierübergängen (PWS-180'000) gemessen. Im Vergleich dazu verlangt die EN-Norm für Asphalt (EN 12697-49) eine Bestimmung der Reibungskoeffizienten nach 90'000 Polierübergängen.

Die in den vorangegangenen Kapiteln diskutierten Prüfergebnisse zeigen, dass die Werte nach 90'000 und nach 180'000 Polierübergängen sehr ähnlich sind. Die Abnahme des Reibungskoeffizienten als Folge der Polierung wird durch eine logarithmische Funktion beschrieben; die Wirkung der Polierung nimmt mit zunehmender Anzahl an Polierübergängen ab.

Um die Wirkung der Polierung zu untersuchen, wurde eine Probe bis zu 540'000 Polierübergängen geprüft. In der Abbildung 19 ist deutlich zu erkennen, dass die Abnahme des Reibungskoeffizienten zwischen 180'000 und 540'000 Polierübergängen minimal ist (3 %).

Die in den vorangegangenen Kapiteln diskutierten Prüfergebnisse zeigen, dass die Werte nach 90'000 und nach 180'000 Polierübergängen sehr ähnlich sind. Die Abnahme des Reibungskoeffizienten als Folge der Polierung wird durch eine logarithmische Funktion beschrieben; die Wirkung der Polierung nimmt mit zunehmender Anzahl an Polierübergängen ab.

Aus den in der Tabelle 6 aufgeführten Untersuchungsergebnissen wurden die Unterschiede zwischen den Werten nach 90'000 und nach 180'000 Polierübergängen analysiert und in

Tabelle 11 zusammengefasst. Die Mittelwerte sowie 29 der 30 Einzelwerte liegen innerhalb der Wiederholpräzision von <0.024 .

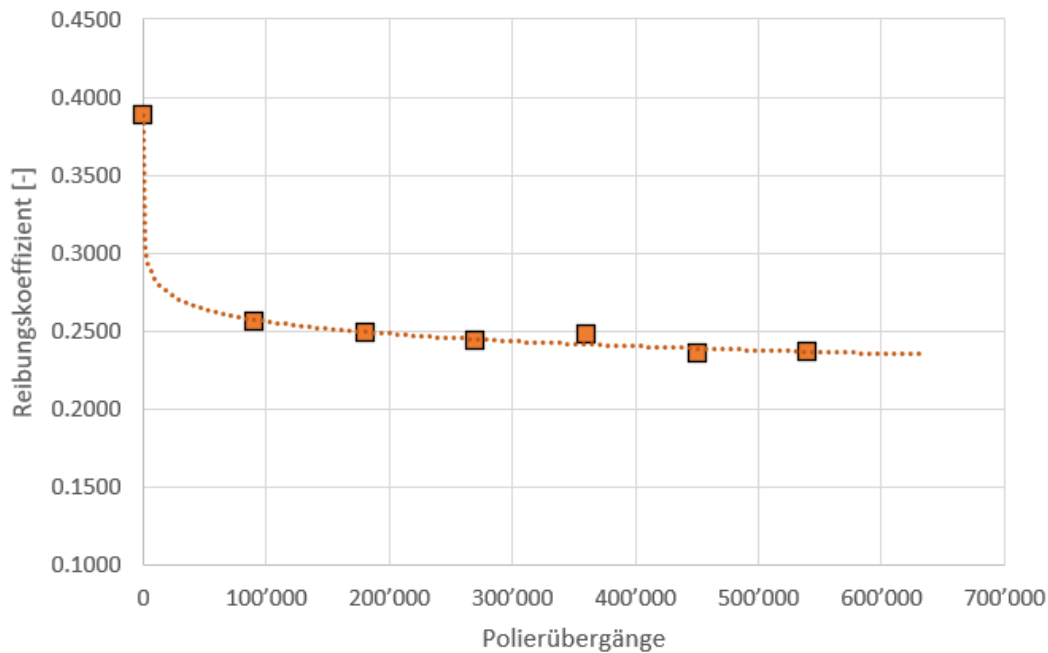


Abbildung 19: Entwicklung des Reibungskoeffizienten für eine nach dem Mastix-Verfahren hergestellte Probe. Die Probe wurde mit bis zu 540'000 Polierübergängen geprüft.

Änderung des PWS-Wertes von 90'000 bis 180'000 | Polierübergängen

Fraktion	Mittelwert	Maximalwert	Minimalwert
2/4	-0.0072	-0.001	-0.020
4/8	-0.0021	0.013	-0.015
8/11	-0.0021	0.020	-0.034

Tabelle 11: Analyse der Unterschiede der PWS-Werte für Mastix-Proben nach 90'000 und 180'000 Polierübergängen.

Aus den obigen Untersuchungen sowie in Anlehnung an die beiden Normen EN 12697-49 [3] und TP Gestein-StB [5] schlagen wir vor, den PWS- und FAP-Wert nach 90'000 Polierübergängen zu bestimmen.

4.4.3 Korrelation zwischen PSV- und PWS-Wert

Die Abbildung 20 zeigt die Korrelation zwischen PSV und PWS für beide Probenarten (Mastix und Mosaik). Es ist zu erkennen, dass es eine klare Korrelation für beide Methoden gibt. Interessant ist auch, dass die Korrelation für die Mosaik-Proben (blau: $r^2 = 0.8785$) etwas besser ist als für die mit der Mastix-Methode hergestellten Proben (grün: $r^2 = 0.8088$). Diese Tatsache könnte wiederum auf die Methodik der Probenvorbereitung zurückzuführen sein: PSV und PWS (Mosaik) prüfen analog hergestellte Oberflächen der Gesteinskörnungen.

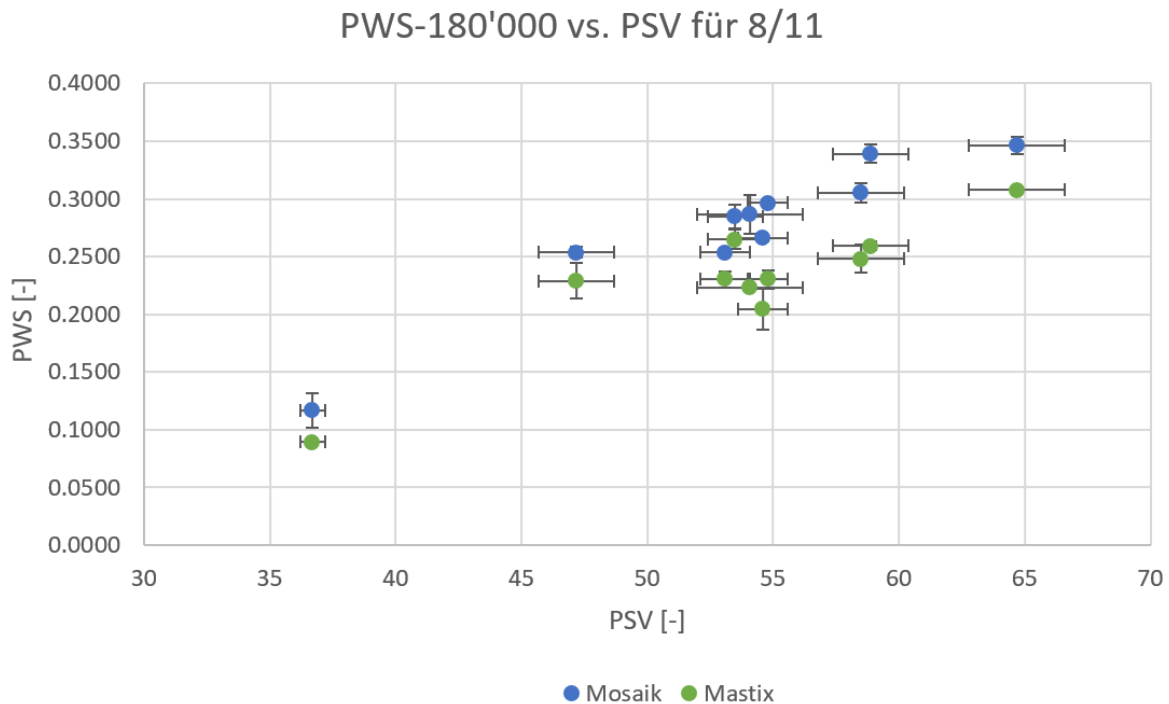


Abbildung 20: Korrelation zwischen PWS-180'000 und PSV für Proben der Fraktion 8/11, die nach der Mastix-Methode (grün) und Mosaik (blau) hergestellt wurden.

4.4.4 Mögliche Anforderungen an den PWS-Wert

Während für den PSV-Wert eine Norm-Anforderung vorliegt, gibt es für die PWS-Werte derzeit keine. Auf der Grundlage der Ergebnisse dieses Forschungsprojekts gibt es einen Weg, um Anforderungen an die PWS-Werte festzulegen. Dabei werden folgende Schritte befolgt:

1. Es gilt der PWS-Wert der Mastix-Methode (siehe dazu Kap. 1.3.4.4 Vergleich Mosaik-Mastix-Verfahren)
2. Es werden nur diejenigen Provenienzen (1 bis 9) berücksichtigt, welche im Strassenbau Anwendung finden
3. Aus der Korrelation PWS zu PSV kann ein Anforderungswert für den PWS-Wert der Fraktion 8/11 abgeleitet werden
4. Aus den Ergebnissen zeigt sich, dass die PWS-Werte mit kleiner werdendem Grösstkorn zunehmen. In der Tabelle 12 wurde die Zunahme der PWS-Werte gegenüber demjenigen der Fraktion 8/11 berechnet; 9 % bei der Fraktion 4/8 und 27 % bei der Fraktion 2/4
5. Der im Punkt 2 festgelegte Anforderungswert für den PWS-Wert am 8/11 kann mittels der berechneten %-Zunahmen für die übrigen Fraktionen errechnet werden.

Provisorische Anforderungen

Fraktion	8/11	4/8	2/4
Mittelwert PWS-90'000 Provenienz 1 bis 9	0.245	0.268	0.311
Zunahme bezogen auf 8/11	-	9 %	27 %
PSV 50 entspricht PWS von	0.21		
Anforderung	0.21	0.23	0.27
Anzahl Provenienzen die die Anforderungen erfüllen würden	8 von 9	9 von 9	8 von 9
Wert der nicht erfüllt	0.207		0.264
Anzahl welche PSV erfüllten	8 von 9		

Tabelle 12: Festlegung von provisorischen Anforderungen, die sich aus der Korrelation PWS zu PSV, dem PSV-Anforderungswert für die Fraktion 8/11 sowie den Zunahmen der PWS-Werte bei kleineren Grösstkörnern ableiten.

Es muss unmissverständlich erwähnt werden, dass die in Tabelle 12 abgeleiteten Anforderungen auf einer sehr kleinen Datenbasis von 10 ausgewählten Provenienzen basieren. Sie können somit lediglich als provisorische Richtwerte gelten.

Um die in der Tabelle 12 abgeleiteten provisorischen Anforderungen bezüglich ihrer Grössenordnung zu überprüfen, wurden sie mit Werten aus einer anderen Arbeit verglichen. Bereits 1996 wurden in Berlin [8] Anforderungen an die Polierbarkeit (Wehner/Schulze-Verfahren) festgelegt. In [7] wurde einerseits ein Bewertungshintergrund für die Polierbarkeit von in Deutschland verwendeten Gesteine erarbeitet und andererseits die damaligen Werte auf heutige Verhältnisse übertragen. Letzteres war erforderlich, da 1996 Prüfmaschinen der ersten Gerätegeneration verwendet wurden und zudem zur Herstellung der Prüfkörper mit dem Mosaikverfahren gearbeitet wurde.

In den deutschen Regelwerken sind Anforderungen an den Polierwiderstand (PSV-Werte) in Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung festgelegt. Dudenhöfer und Rückert [8] schlagen für die Verkehrslastklasse, bei welcher ein PSV-Wert von 51 gefordert wird, einen PWS-Wert von 0.28 (Kornfraktion 8/11) vor. Analog zur vorliegenden Arbeit weisen die Autoren darauf hin, dass eine breitere Datenbasis erforderlich sei, um Anforderungswerte festzulegen. In Anbetracht der schmalen Datenbasis in beiden Arbeiten kann festgehalten werden, dass der in [8] empfohlene Anforderungswert in der gleichen Grössenordnung liegt, wie derjenige der vorliegenden Arbeit.

4.4.5 Zusammenfassung

Die Folgerungen zum Thema «Bewertungshintergrund» lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Als Methode zur Herstellung der Prüfkörper wird dem Mastix-Verfahren der Vorrang gegeben. Diese Methode ist einfacher als das Mosaik-Verfahren und sie wird auch in der TP Gestein-StB vorgesehen [5]. Zudem besteht eine recht gute Korrelation zwischen den beiden Verfahren ($r^2 = 0.89$).
- Die Anzahl erforderlicher Polierübergänge wird für Routine-Untersuchungen auf 90'000 festgelegt. Dies entspricht auch der üblichen Anzahl Polierübergängen bei der Prüfung von Asphalt-Oberflächen gem. [SN EN 12697-49].

- Für die Fraktion 8/11 konnte eine befriedigende Korrelation zwischen dem PWS (Wehner/Schulze) und dem PSV festgestellt werden; das Bestimmtheitsmass beträgt bei 10 Proben $r^2 = 0.81$.
- Die Unterschiede im Polierwiderstand zwischen den einzelnen Fraktionen kann je nach Provenienz sehr unterschiedlich sein (Abbildung 16). Daraus kann gefolgert werden, dass die Ergebnisse der Prüfung des Polierwiderstandes an einer Fraktion nicht auf andere Fraktionen übertragen werden kann. Dies bedeutet, dass die PSV-Werte (an der Fraktion 8/11 bestimmt), keinen zuverlässigen Hinweis auf den Polierwiderstand anderer Fraktionen sein kann.
- Auf der Basis der durchgeführten Untersuchungen konnten provisorische Anforderungen für die Fraktionen 2/4, 4/8 und 8/11 vorgeschlagen werden.

5 Resultate II: Akustik

5.1 Proben

5.1.1 Walz-Asphaltproben

Als Gesteinskörnung (GK) diene «sortenreines» Material, d.h. jeweils nur eine Provenienz pro Mischung. Provenienz 10 hat einen sehr schlechten Polierwiderstand und wird in der Regel nicht zur Aufbereitung von Deckschichten verwendet.

Für drei Mischgutsorten, die in der Schweiz typischerweise als Deckschicht verwendet werden (AC 8, SDA 4-12, SDA 8-12), wurden Mischungen hergestellt und anschliessend auf Standardeigenschaften geprüft. Sobald die Standardanforderungen erfüllt waren, wurden für jede Mischung Prüfplatten verdichtet.

Für alle hergestellten Platten wurden zunächst die Rautiefe (per Laser), die Griffigkeit (SRT-Pendel) und der spezifische Luftströmungswiderstand gemessen.

Als GKt (Gesteinskörnungen mit tiefem Polierwiderstand) wurde wieder die Provenienz Nr. 10 verwendet. Als GKh (Gesteinskörnung mit hohem Polierwiderstand) wurde die Provenienz Nr. 8 verwendet.

Übersicht über hergestellte Asphaltmischgutsorten

Mischung	Gesteinskörnung	
	tiefer Polierwiderstand (GKt)	hoher Polierwiderstand (GKh)
AC 8 H	X	
AC 8 H		X
SDA 4-12	X	
SDA 4-12		X
SDA 8-12	X	
SDA 8-12		X

Tabelle 13 Übersicht über die hergestellten Asphaltmischgutsorten.

Auf der Grundlage dieser Versuchsmatrix wurde in einem einwöchigen Messeinsatz bei IWS in Celle ein zusammenhängender Datensatz gewonnen. Zusätzlich zu den Bitumensorten AC 8 H, SDA 4-12 und SDA 8-12, wurden zwei Waschbetonproben und eine Probe aus Gussasphalt untersucht.

5.1.2 Gussasphalt und Waschbeton

Im Rahmen eines anderen Projektes stand ein Gussasphalt-Transportkocher mit einem MA 11 LA zur Verfügung. Es wurde die Gelegenheit wahrgenommen industriell hergestellten und angelieferten Gussasphalt in vorbereitete Formen (500 mm x 500 mm) in einer Schichtdicke von 40 mm zu giessen und mit einem im Labor vorumhüllten (0.5 Masse-% PmB E 45/80-65), heissen Splitt 2/4 abzustreuen. Um eine gleichmässige Abstreuerung zu erreichen, wurde ein «Zufallsgenerator» verwendet. Dieser bestand aus mehreren, kreuzweise

übereinander liegende Lagen von Stäben mit gleichbleibendem Abstand (horizontal und vertikal). Der durch diese Lagen an horizontalen Stäben fallende Splitt wird zufällig auf die Unterlage verteilt. Durch Vorversuche konnte nachgewiesen werden, dass damit eine homogene Abstreuerung der Oberfläche erreicht werden kann. Als Splitt wurde ein 2/4 der Provenienz 11 (vgl. Tabelle 7) verwendet, welcher die Anforderungen des ASTRA erfüllte, um lärmarme Gussasphalt-Beläge herzustellen. Dabei ist vor allem die Kubizität der Körner (Plattigkeitszahl < 5) [31] entscheidend.

Aus dem Arbeitspaket III Optimierung Rezeptierungen (Kapitel 6.2.1) wurden zwei Waschbeton-Mischungen untersucht, wobei die eine 100 % Gesteinskörnungen mit hohem Polierwiderstand GK_h enthielt, die andere 100 % Gesteinskörnungen mit tiefem Polierwiderstand GK_t.

Messplan für unterschiedliche Polierstadien

Ver-such-s-punkt	Abfolge der Polierstufen	Probe	PTV	Spez. Luft-strömungs-widerstand	Textur	MPD	Gestaltfaktor	Lambda bei R-eff
a	as received	PK1	X	X	X	X	X	X
b	1		X	X	X	X	X	X
c	1,2		X					
d	1,2,3	PK2	X	X	X	X	X	X
e	1,2,3,4		X					
f	1,2,3,4,5	PK3	X	X	X	X	X	X

Tabelle 14 Planung der Messungen auf den Asphaltplatten einer Mischgutsorte für die unterschiedlichen Polierstadien. Diese Planung wurde für jede Mischgutsorte durchgeführt.

Kumulierte Polierzeit und Anzahl relativer Polierübergänge

Ver-such-s-punkt	Abfolge der Polierstufen	Abfolge der Poliergeschwindigkeiten	Kumu-lierte Polier-zeit	Anzahl relativer Polierüber-gänge
			min	min/min
a	as received	µm/s n.a.	0	0
b	1	16'000	0.625	1
c	1,2	16'000, 8'000	1.875	3
d	1,2,3	16'000, 8'000, 8'000	3.125	5
e	1,2,3,4	16'000, 8'000, 8'000, 4'000	5.625	9
f	1,2,3,4,5	16'000, 8'000, 8'000, 4'000, 2'000	10.625	17

Tabelle 15: Kumulierte Polierzeit und Anzahl relativer Polierübergänge für die in Tabelle 14 definierten Versuchspunkte.

5.1.3 Polierexperimente

Am IWS Messtechnik GmbH in Celle befindet sich ein Versuchsaufbau, der den Verschleiss durch Abrasion experimentell bestimmbar macht. Abbildung 21 zeigt den Versuchsaufbau. Eine rotierende Schleifwalze fährt mit definierter Verfahrensgeschwindigkeit über die Probenoberfläche.

Der Anpressdruck der Walze wird vor dem Versuch eingestellt. Tabelle 14 und Tabelle 15 enthalten eine Übersicht über die Versuchsparameter. Grundsätzlich wurden pro Mischung 3 Platten getestet.

Alle Asphaltproben wurden vor dem ersten Schleifdurchgang gesandstrahlt, um Bitumenreste auf dem Abstreumaterial zu entfernen. Das Sandstrahlen entfiel bei den Waschbetonproben. Nach jedem Polierdurchgang wurde mit einem Hochdruckwasserreiniger der Schleifstaub abgewaschen, die feuchte Probe mit dem SRT-Pendel vermessen (in einer beheizten Messkammer), danach das Wasser mit Druckluft abgeblasen und abschliessend die Probe ca. 5 min vor ein Warmluftgebläse mit ca. 35 °C Lufttemperatur gestellt (Abstand ca. 50 cm, Lüfterraddurchmesser ca. 40 cm), um die anhaftende Restfeuchte zu entfernen. Danach waren die Proben allseitig trocken und handwarm. Die Versuche fanden in einer offenen, ungeheizten Halle bei ca. 10-15 °C Temperatur statt. Nur an derartig getrockneten Proben erfolgte die Bestimmung des spezifischen Luftströmungswiderstandes (trockene Proben sind dafür zwingend erforderlich) sowie die Messung der Oberflächentextur mit dem Laserprofilometer (Wasserfilm kann hier zur Verfälschung der Ergebnisse durch Reflexion des Laserstrahles führen).

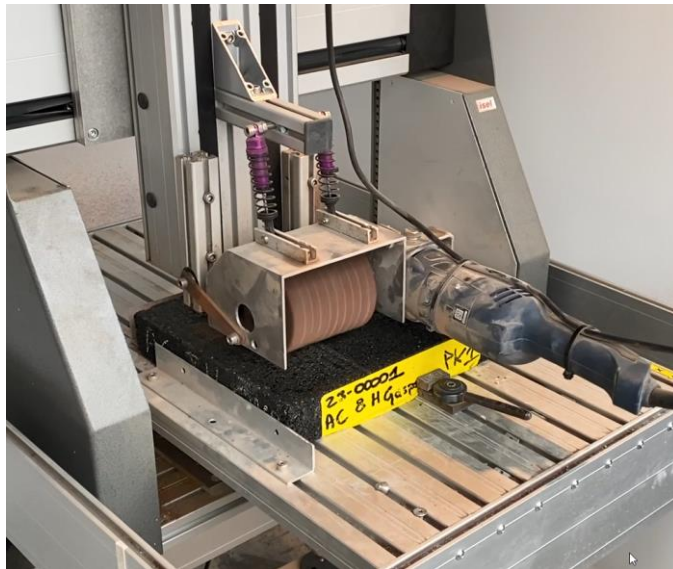
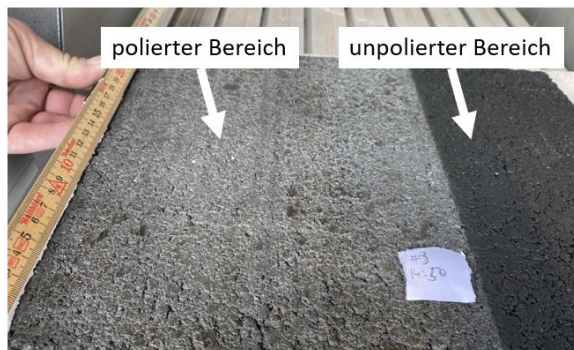


Abbildung 21: Schleifgerät IWS.

Das für die Polierversuche verwendete Gerät hat eine Schleifwalze, deren Geschwindigkeit sich einstellen lässt. Die Traverse ist computergesteuert und verfährt mit definierter Geschwindigkeit in x,y,z-Richtung anhand eines Steuerprogrammes. Die Proben sind fest eingespannt. Der Anpressdruck der Polierwalze wird zu Versuchsbeginn eingestellt.

Als Parameter zur Einstellung der Intensität der Polierleistung diente die Verfahrensgeschwindigkeit der Traverse mit der rotierenden Schleifwalze. Die höchste Verfahrensgeschwindigkeit (16'000 µm/s also 1.6 cm/s) entspricht der kürzesten Polierzeit und damit die geringsten Polierintensität (vgl. Tabelle 14 und Tabelle 15).

5.1.4 Visuelles Ergebnis des Polierens



AC 8 H GKh – 33 relative Polierübergänge



AC 8 H GKt – 17 relative Polierübergänge



AC 4-12 GKh – 17 relative Polierübergänge



AC 4-12 GKt – 17 relative Polierübergänge



AC 8-12 GKh – 17 relative Polierübergänge



AC 8-12 GKt – 17 relative Polierübergänge



GA (MA 11 S) – 17 relative Polierübergänge

Abbildung 22: Asphaltproben poliert.

Die Bilderserie in Abbildung 22 zeigt den Einfluss des Polierens auf die Probenoberfläche. Klar zu sehen ist, dass die polierten Stellen – um Zeit zu sparen, wurde nicht die gesamte Probenoberfläche poliert – keinen Bitumenfilm an der Oberfläche mehr aufweisen und dass es einen mehligem Belag aus abgeschmirgeltem Gesteinsmehl gibt.

Während des Polierens kam es zu einer merklichen Staubbildung. Daher fanden die Versuche in einer überdachten Kalthalle an frischer Luft statt. Das Gesteinsmehl wurde nach jedem Versuchspunkt mit einem Hochdruckwasserreiniger von der Probenoberfläche abgewaschen. Die freigelegte Gesteinskörnung der GkT-Proben hat eine beige Farbe, während die freigelegte GkH-Körnung gräulich erscheint. Ein angeschliffenes Gesteinskorn zeigt Abbildung 23.

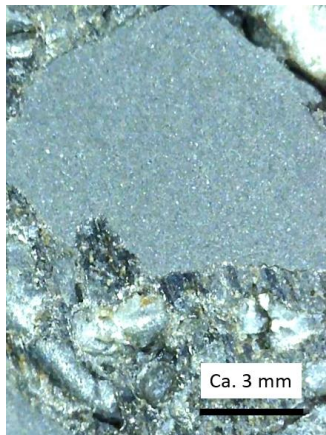


Abbildung 23: Lupenaufnahme eines angeschliffenen Kornes bei Probe AC 8 H GkH während der Einlaufversuche.

Der deutliche Farbunterschied als Folge des Polierens der Asphaltproben lies sich auf den Waschbetonproben nicht beobachten, wie in Abbildung 24 zu sehen ist.



Waschbeton GkH – 17 relative Übergänge



Waschbeton GkT – 17 relative Übergänge

Abbildung 24: Die Probenoberfläche der polierten Waschbetonproben nach 9x polieren.

5.1.5 SRT-Messungen

Alle PTV-Werte sind hinsichtlich der Temperatur der Probe gemäss Norm korrigiert. Abbildung 26 fasst die Ergebnisse der SRT-Messungen zusammen. Die solitären Punkte bei «Anzahl relative Polierübergänge = 0 (nur bei den Asphaltproben) zeigen den PTV-Wert vor dem Sandstrahlen. Deutlich ist zu sehen, dass das Sandstrahlen den Pendelwert anfänglich um ca. 10 Einheiten ansteigen lässt.



Abbildung 25: SRT-Versuchsaufbau.

Für den Messeinsatz wurde ein kalibriertes SRT-Pendel von IMP mitgebracht und vor Ort aufgebaut. Bei allen Messungen pendelte das Pendel in die gleiche Richtung, wie die Laufrichtung der Polierwalze beim Polieren. Im gezeigten Bild liegt die Probe 90° versetzt, da es sich um einen Einlaufversuch für das SRT-Pendel handelt.

Die Probe AC 8 H erfuhr 33 relative Polierübergänge, da diese Probe zum Einfahren des Versuchsaufbaues und zur Identifikation der maximalen Anzahl Polierübergänge bzw. Poliergeschwindigkeit diente. Aufgrund der Ergebnisse aus diesem Pilotversuch wurde beschlossen, Messpunkte für die Lasertextur- und Lufttopfmessungen (spez. Luftströmungswiderstand) bei 5 und 17 relativen Polierübergängen festzulegen (vgl. Tabelle 14 und Tabelle 15), nach wurden.

Ergebnisse der SRT-Messungen

- Alle Asphaltproben zeigen einen Abfall des PTV-Wertes um ca. 35 bis 40 Einheiten infolge des Polierens
- Bei SDA 4-12 und SDA 8-12 sowie dem Waschbeton hat die Oberfläche mit dem abriebfesteren Material (GKh) einen um ca. 10 Einheiten besseren PTV-Wert am Ende der Versuchsserie.
- Probe AC 8 H zeigt genau den umgekehrten Trend. GKt ist am Ende geringfügig besser als GKh. Um eine Verwechslung der Proben auszuschliessen, wurden die Oberflächen visuell beurteilt. Bei der Mischung mit GKt konnte das hellere Gestein deutlich erkannt werden. Dass sich die beiden Proben nicht unseren Vorstellungen entsprechend verhalten, müssen wir hinnehmen und haben dazu keine Erklärung.
- Den höchsten PTV-Wert (60) hat die Gussasphaltprobe mit dem Abstreumaterial der Firma Provenienz 11 nach 9 Polierübergängen.
- Die Waschbetonproben zeigen den geringsten Abfall des PTV-Wertes.

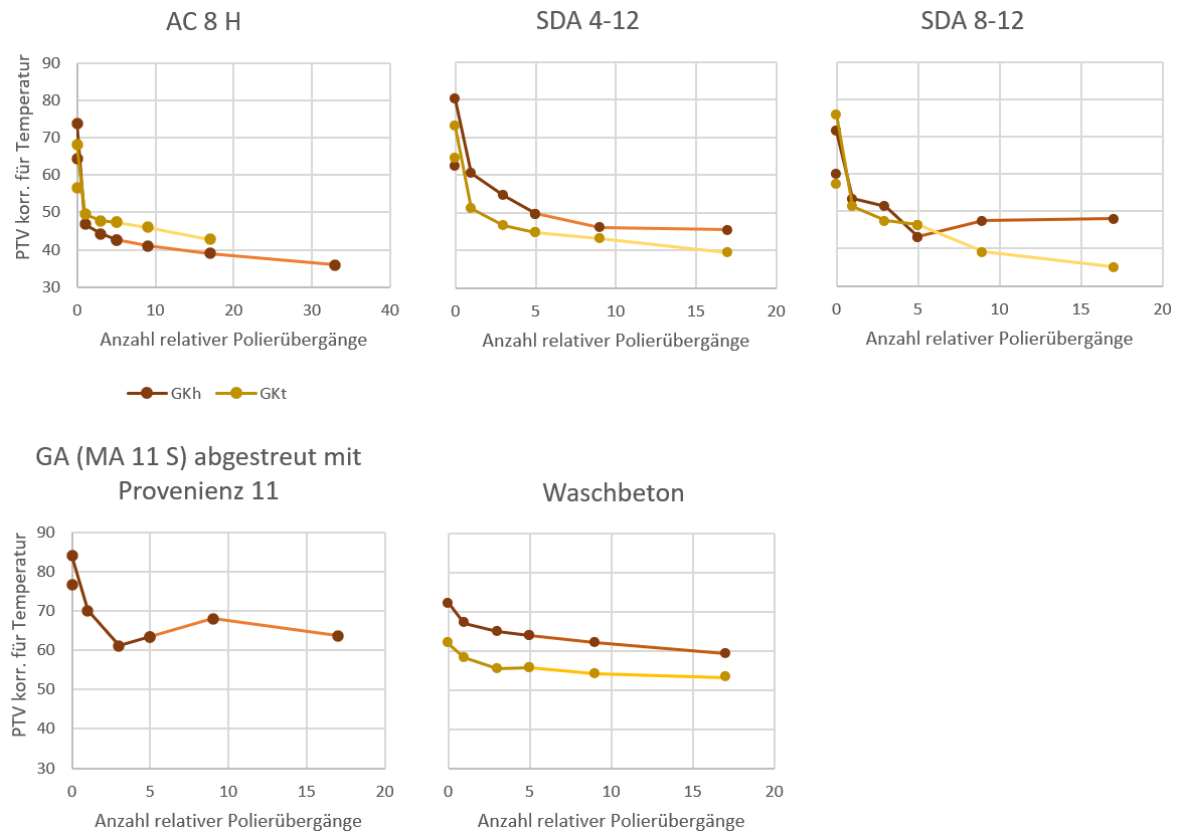


Abbildung 26: PTV-Werte der Griffigkeitsmessungen mit dem SRT-Pendel. Deutlich zu erkennen ist der Abfall der Griffigkeit mit fortschreitender Anzahl relativer Polierübergänge. Die jeweils für die Asphaltproben angegebenen solitären Messwerte (einzelne Punkte ohne Gerade) bei Anzahl relativer Polierübergänge = 0 entsprechen der Griffigkeit vor dem Sandstrahlen.

5.1.6 Vergleich Polierwirkung IWS-Maschine und Wehner/Schulze-Maschine

Um zu überprüfen, inwiefern die Polierwirkung der Poliermaschine beim IWS (vgl. Abbildung 21) der Polierwirkung der Wehner/Schulze-Maschine entspricht fanden an drei ausgewählten Proben (Waschbeton GKh, SDA 8-12 GKh sowie GA MA 11 S Prov. 11) Vergleichsuntersuchungen statt. Diese drei am IWS mit jeweils 17 relativen Polierübergängen polierten Proben (vgl. Tabelle 15) wurden in diesem «as prepared» Zustand mittels Wehner/Schulze vermessen (eckige Punkte in Abbildung 27). Anschliessend erfolgte eine reguläre FAP-Prüfung mit insgesamt 90'000 Polierübergängen. Wie in Abbildung 27 zu sehen ist, führt das Sandstrahlen zu einer Erhöhung des μ_{FAP} -Wertes. Ausgehend von diesem erhöhten Anfangsniveau fällt danach erwartungsgemäss der μ_{FAP} -Wert in Folge der Polierwirkung ab. Beim Waschbeton GKh sinkt der μ_{FAP} -Wert nach 90'000 Polierübergängen beinahe vollständig auf den Ausgangswert der Probe nach der Politur beim IWS ab. Die Asphaltbetonprobe (SDA 8-12 GKh) verliert nach 90'000 Polierübergängen etwa die Hälfte des Zuwachses in μ_{FAP} durch Sandstrahlen. Die Gussasphaltprobe (GA MA 11 S Prov. 11) wird durch die Wehner/Schulze-Anlage sogar stärker beansprucht als durch die IWS-Anlage. Bei dieser Probe war jedoch auch ein starker Ausbruch an Abstreumaterial nach der Wehner/Schulze-Prüfung zu beobachten. Dieser Verlust an Abstreumaterial bewirkt eine starke Verringerung der Griffigkeit.

Da die meisten Proben in dieser Arbeit entweder Waschbeton oder Asphaltbeton darstellten, lässt sich daher – abgesehen vom Sonderverhalten der einen Gussasphaltprobe – feststellen, dass die Polierwirkung der IWS-Maschine mindestens so stark ist, wie die der Wehner/Schulze-Maschine und dass die 17 relativen Polierübergänge der IWS-Maschine ungefähr einer Belastung von mindestens 90'000 Polierübergängen der Wehner/Schulze-Maschine

entsprechen. Die damit bearbeiteten Proben stellen somit geeignete Modelle für gealterten Strassenbelag dar.

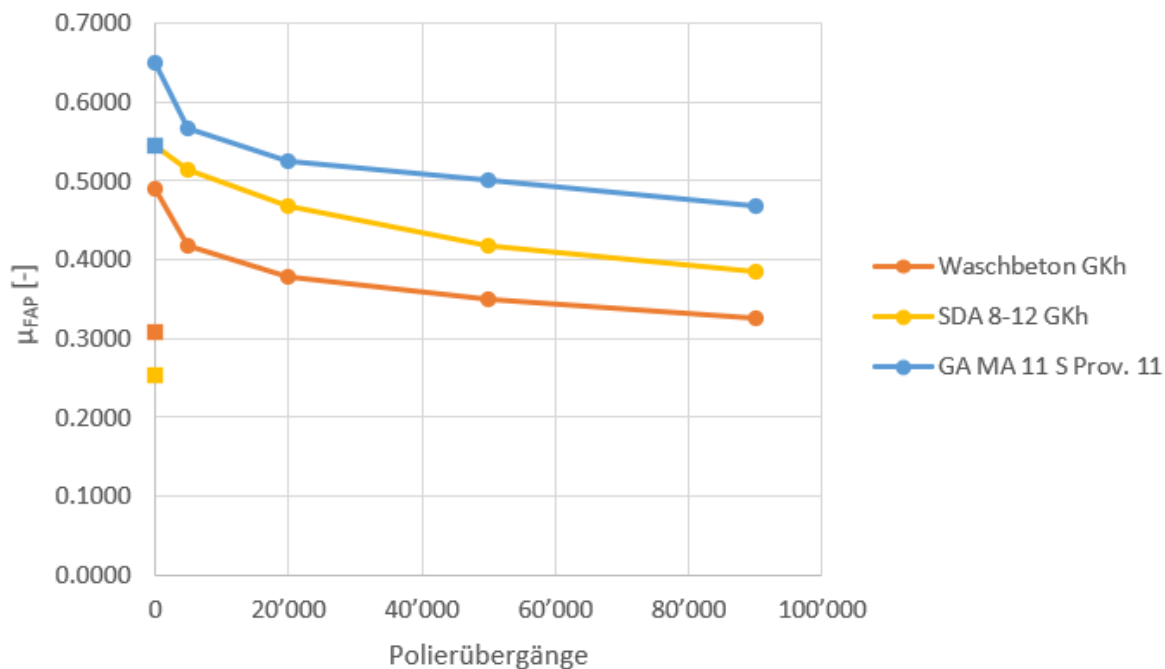


Abbildung 27: Vergleich der Polierwirkung der IWS-Maschine (Proben «as received» mit eckigen Symbolen) und anschliessender Polierung mit der Wehner/Schulze-Maschine. Die IWS-Proben wurden vor Beginn der FAP-Prüfung mittels Sandstrahlen wiederaufgeraut.

5.1.7 Spezifischer Luftströmungswiderstand

Der spezifische Luftströmungswiderstand ist ein Mass dafür, welchen Widerstand eine Struktur der Durchströmung mit Luft entgegensezt. Bei einem hohen spez. Luftströmungswiderstand ist ein hoher Druck erforderlich, bis Luft durch die Struktur strömt. Bei einem geringen spez. Luftströmungswiderstand reicht bereits ein kleiner Druckunterschied aus, um die Luft hindurchströmen zu lassen.

Eine wesentliche Quelle für die Entstehung eines Rollgeräusches ist die an der Kontaktfläche Pneu/Deckschicht in den Profilen des Pneus eingepresste Luft. Daher ist das Vermögen einer Belagsoberfläche die eingeschlossene Luft entweichen zu lassen, ein wichtiger Hinweis bezüglich der Lärmmentstehung. Die eingeschlossene Luft kann sowohl via Rauigkeit der Oberfläche, als auch durch die Deckschicht hindurch entweichen. Bei der Prüfung des spezifischen Luftströmungswiderstandes wird durch eine entsprechende Abdichtung der Einfluss der Rautiefe eliminiert; es wird das Vermögen gemessen, Luft durch die Schicht hindurch zu evakuieren (bekanntestes Beispiel dazu ist der offenporige Asphalt mit ca. 20 Vol.-% Poren).

Die gemessenen Werte zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Probentypen. Den höchsten spez. Luftströmungswiderstand haben die Proben AC 8 H. Hier findet man auch die geringste Rauigkeit. Den geringsten spez. Luftströmungswiderstand hat der mit Material der Provenienz 11 abgestreute Gussasphalt, wo es auch die grösste Rauigkeit gibt.

Die Beobachtung wonach rauere Oberflächen einen wesentlich geringeren spez. Luftströmungswiderstand haben – die Luft also besser entweichen kann –, kommt noch deutlicher in Abbildung 30 zum Vorschein. Oberhalb von ca. 1 mm mittlerer Profiltiefe sinkt der spez. Luftströmungswiderstand stark ab.

Alle Proben zeigen ein Einlaufverhalten mit fortschreitender Anzahl relativer Polierübergänge wobei der spez. Luftwiderstand nach 3 relativen Polierübergängen kaum mehr eine Änderung erfährt. Einen ähnlichen Befund schildern bereits Beckenbauer et al. 2016 [25]. Für die akustischen Eigenschaften betrachten diese Autoren nur noch Werte nach einer Einlaufdauer von 226'405 Zyklen. Diese Autoren haben eine andere Poliermaschine. Deren 226'405 Polierübergänge entsprechen nicht «3» relativen Polierübergängen in unserer Arbeit. Die 226'405 Polierübergänge entsprechen ca. 10 % der maximalen Anzahl Polierübergänge (2'534'517) in deren Arbeit.

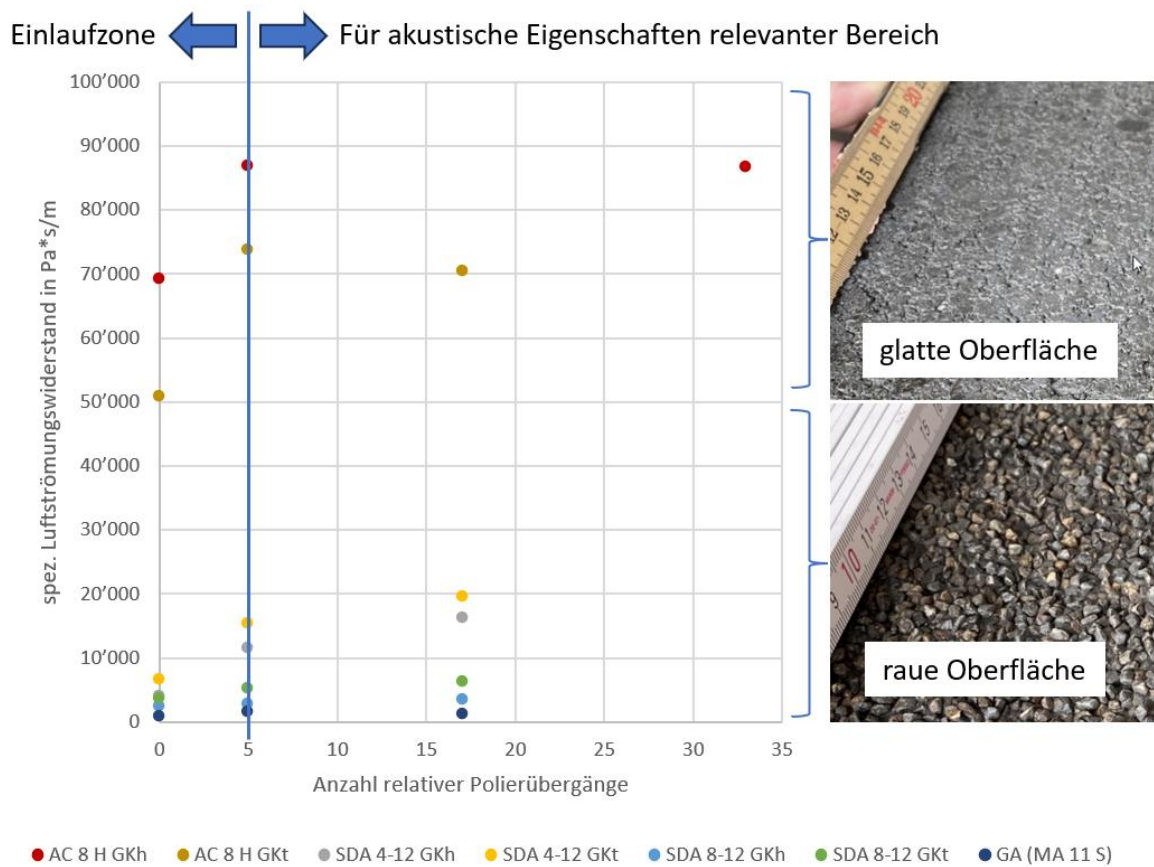


Abbildung 28: Spezifischer Luftströmungswiderstand als Funktion der Anzahl relativer Polierübergänge für Bitumenproben (AC 8 H, SDA 4-12, SDA 8-12) mit unterschiedlicher Gesteinskörnung (GKh, Gkt), sowie Gussasphalt MA 11 S abgestreut mit Material der Provenienz 11.

Wenn man den Befund aus Ref. [29] S. 220 auf die Ergebnisse in dieser Arbeit überträgt, ist die Erhöhung des spez. Luftströmungswiderstandes beim Einlaufen höchst wahrscheinlich auf den Verschluss möglicher Luftkanäle in der Oberfläche durch abgeschmirgeltes Gesteinsmehl zurückzuführen. In Ref. [29] dokumentieren die Autoren solch eine Zunahme des spez. Luftströmungswiderstandes durch Verschmutzung der Fahrbahn.

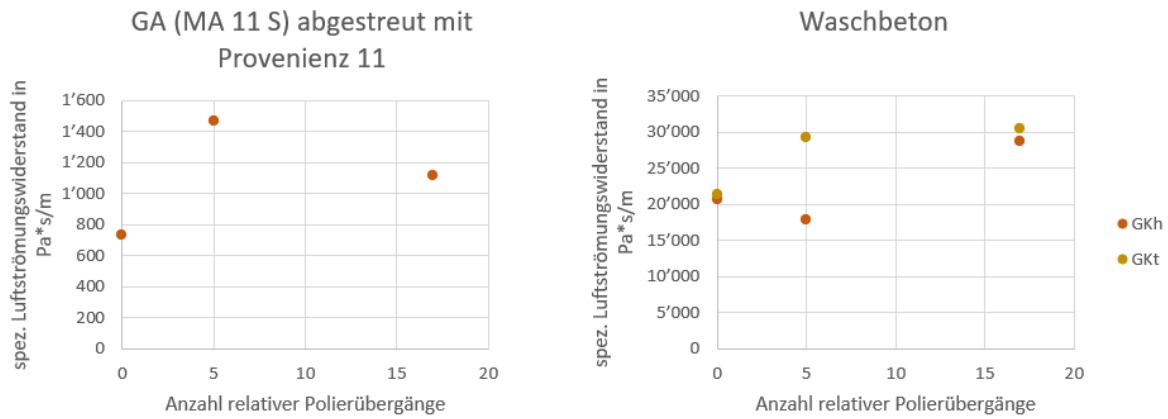


Abbildung 29: spez. Luftströmungswiderstand GA/Washbeton. Spezifischer Luftströmungswiderstand als Funktion der Anzahl relativer Polierübergänge für Washbeton mit unterschiedlicher Gesteinskörnung (GKh, GKT) sowie für Gussasphalt.

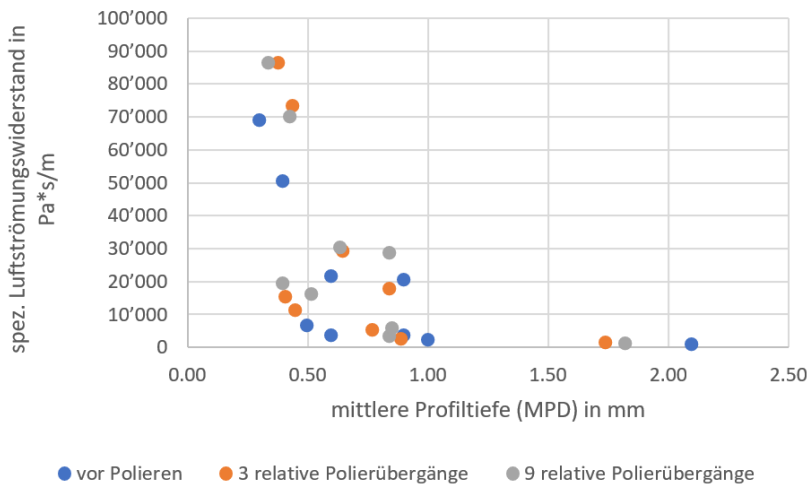


Abbildung 30: Plot aller Wertepaare spez. Luftströmungswiderstand vs. mittlere Profiltiefe unabhängig von der Gesteinsprovenienz, Asphaltorte, Washbeton oder Gussasphalt. Oberhalb ca. 1 mm mittlerer Profiltiefe nimmt der spez. Luftströmungswiderstand stark ab.

5.1.8 Gestaltfaktor

Der Gestaltfaktor gibt an, inwiefern eine Oberfläche eher konkav oder konvex ist. Gestaltfaktoren zwischen 60 % und 90 % gelten als konkav (gewalzte Oberfläche) wohingegen zwischen 20 % und 60 % Oberflächen eher als konvex anzusehen sind (abgestreute Oberfläche) (vgl. Abbildung 31).

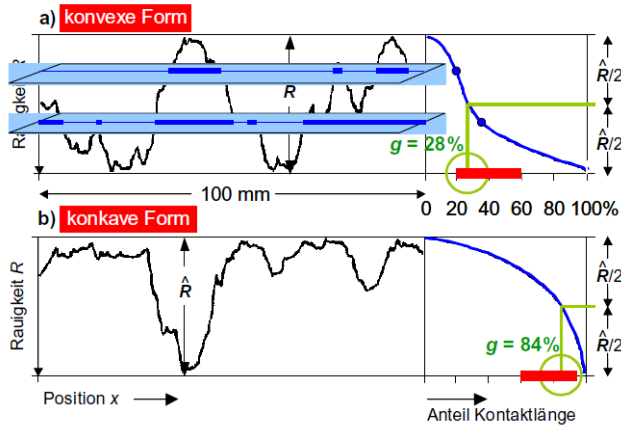


Abbildung 31: Erläuterung zum Gestaltfaktor nach Beckenbauer. Aus Quelle: <https://docplayer.org/33125805-Reifen-fahrbahn-gerauescheminderungspotenziale-der-strassenoberflaeche.html>

Der Gestaltfaktor der vorliegenden Proben zeigt keine signifikante Änderung mit zunehmender Anzahl relativer Polierübergänge (vgl. Abbildung 32). Alle Asphaltproben – mit Ausnahme des Gussasphaltes – sind eher konkav. Die Gussasphaltprobe und der Waschbeton sind eher konvex.

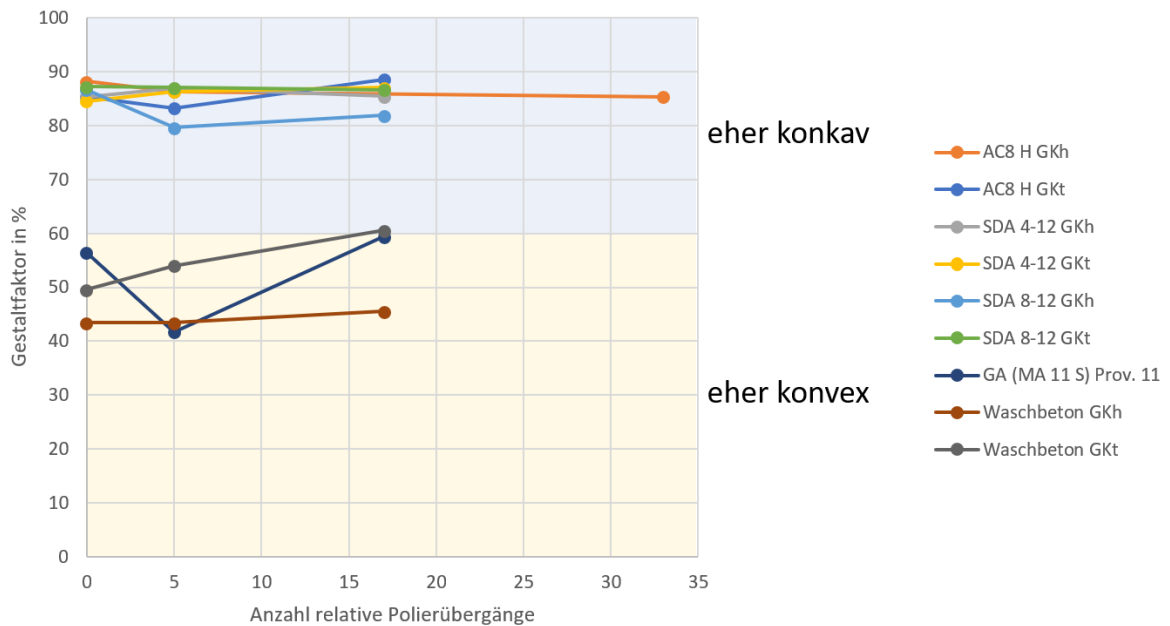


Abbildung 32: Änderung des Gestaltfaktors als Funktion der Anzahl relativer Polierübergänge. Zwei Probenklassen sind zu erkennen; Gestaltfaktor zwischen 40 und 60 % - annähernd konkave Oberfläche für Waschbeton und die Gussasphaltprobe sowie Gestaltfaktor zwischen 90 und 80 % - alle anderen Asphaltproben.

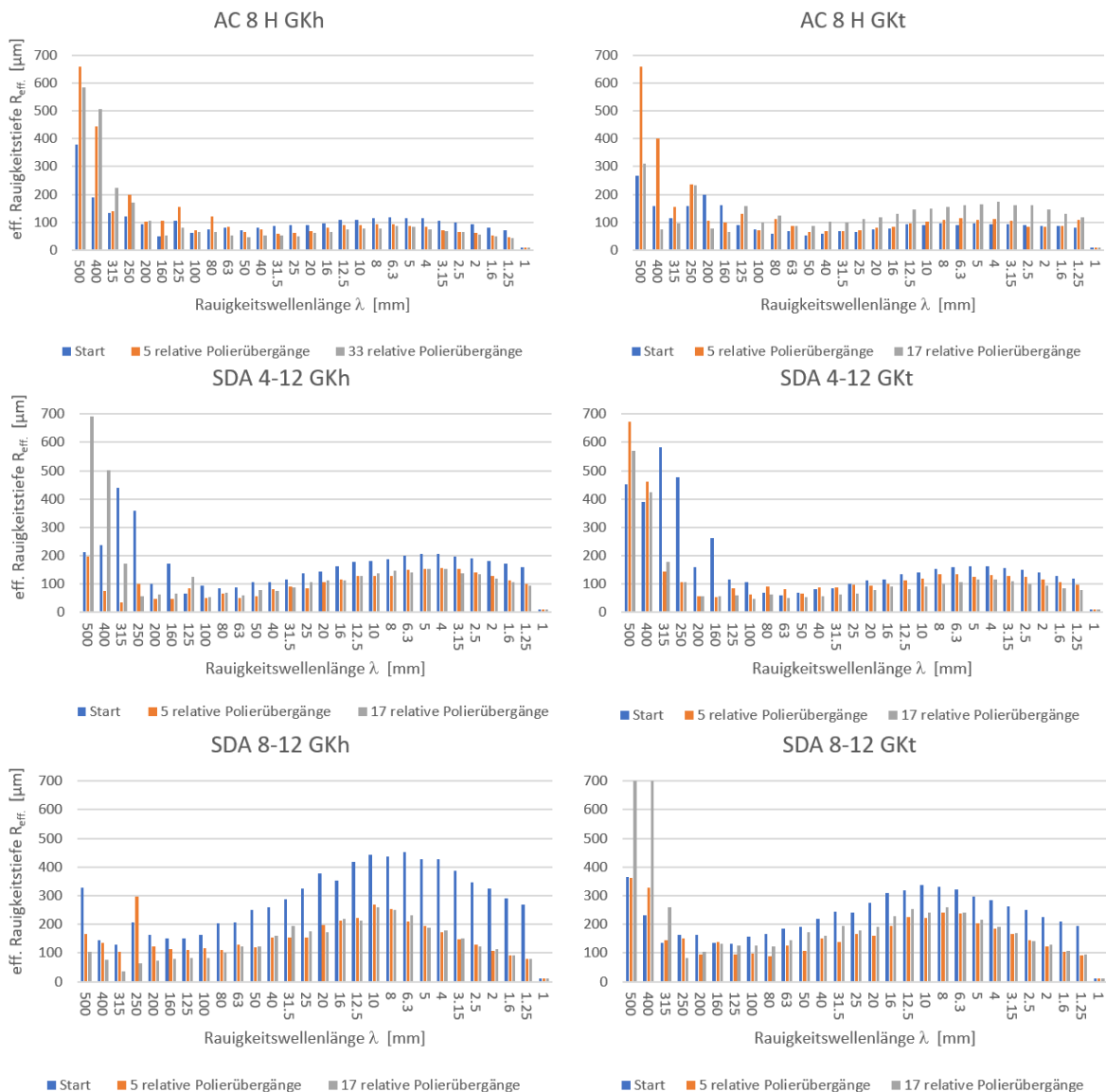
5.1.9 Lambda-Wert

Der Lambda-Wert ist diejenige Rauigkeitswellenlänge λ bei der das Maximum der effektiven Rauigkeitstiefe R_{eff} auftritt; dieses Maximum wird mit λR_{max} bezeichnet. Abbildung 33 fasst die λ -Werte sowie deren Änderung mit zunehmender Anzahl der relativen Polierübergänge zusammen.

Sandberg [33] beschrieb in seinem grundlegenden Buch zu lärmarmen Deckschichten eine Methode zur Analyse der Lasertextur-Profile. Dabei wird das gemessene Profil mittel Fourier-Transformationsanalyse in einzelne Sinuswellen zerlegt, welche mit deren Amplitude (= Rautiefe) und deren Wellenlänge (λ) charakterisiert werden. Einerseits wird die Amplitude bei der maximalen Wellenlänge (λR_{max}) und andererseits die maximale Rautiefe betrachtet. Beide Kennwerte sind gemäss Sandberg für die Beurteilung der akustischen Eigenschaften von Deckschichten entscheidende Faktoren.

Ergebnisse der Lambda-Werte

- Bis auf einen einzelnen Wert, liegen alle Werte für λR_{max} unabhängig von Gestein, Asphaltorte und Polierzustand immer zwischen 4.0 mm und 12.5 mm und damit deutlich unter 20 mm.
- Durch das Polieren verschiebt sich die Lage des Wertes λR_{max} nur unwesentlich und die effektive Rauigkeitstiefe sinkt durch das Einebnen der Oberfläche leicht. Einzig beim SDA 8-12 GKh kann eine nennenswerte Verkleinerung der Rautiefe festgestellt werden.
- Die effektiven Rauigkeitstiefen bewegen sich nach dem Einlaufen – mit Ausnahme der Gussasphaltprobe – zwischen 0.1 mm und 0.25 mm. Bei den Gussasphaltproben schwanken die Werte zwischen 0.2 mm und 0.4 mm.



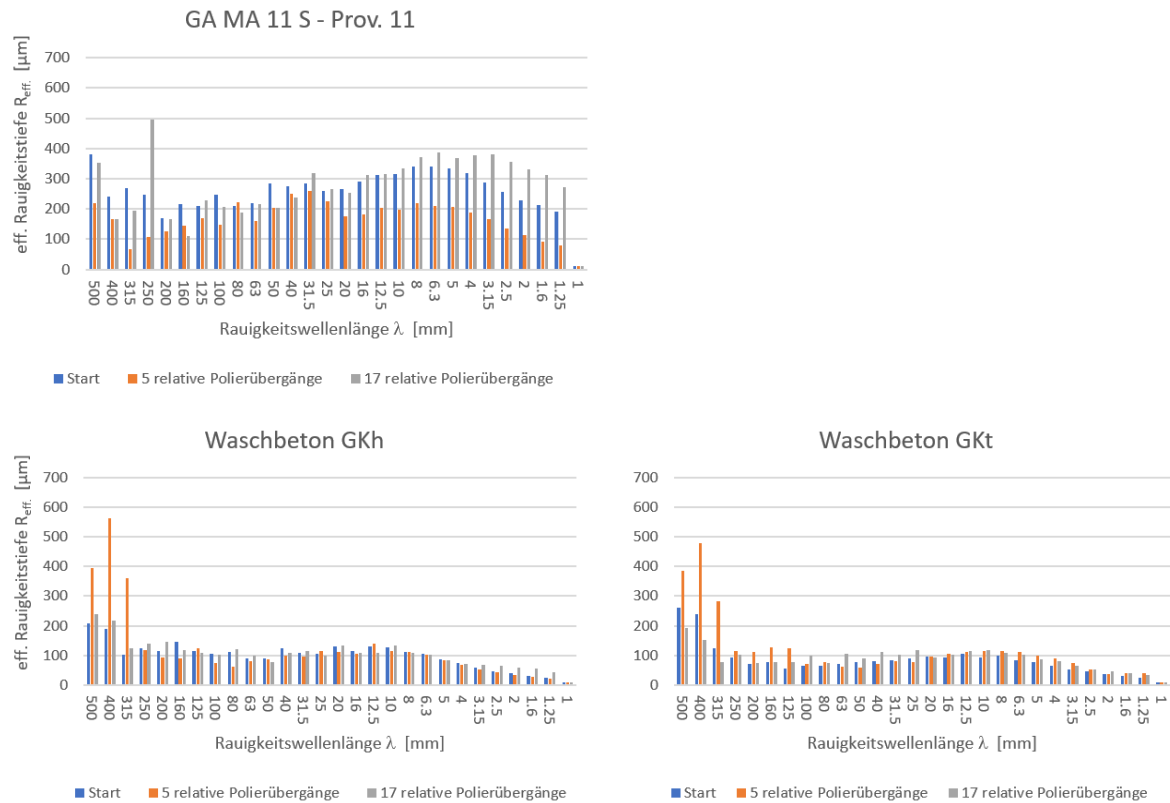


Abbildung 33: Verhalten der effektiven Rauigkeitstiefe R_{eff} und Rauigkeitswellenlänge λ beim Polieren. Die Lage des Maximums von $\lambda_{R_{\text{max}}}$ ändert sich nicht mit fortschreitendem Polieren. Das zunehmende Polieren ebnet die Oberflächen ein und senkt $\lambda_{R_{\text{max}}}$.

5.1.10 SPERoN-Simulation

Aus der Tabelle 17 wurden die Messwerte zwischen dem Zustand nach 5 und nach 17 relativen Polierübergängen ausgewertet und die je 3 grössten bzw. kleinsten Veränderungen in der Tabelle 16 zusammengefasst. Die Begründung, weshalb die Werte vor dem Polieren nicht miteinbezogen wurden, sind in Kapitel 5.1.7 aufgeführt. Die Veränderungen des MPD, G-Faktors und $\lambda_{R_{\text{max}}}$ sind völlig vernachlässigbar.

Bei der Bestimmung des Luftströmungswiderstandes sind grosse Schwankungen im Bereich von mehreren $1'000 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}$ üblich. Wir betrachten einzig den Wert von $10'888$ beim WB 8 GKk als relevante Veränderung, evtl. auch den Wert von $4'701$ beim SDA 4-12 GKk.

Von den insgesamt 36 Wertepaaren (nach 5 bzw. 17 relativen Polierübergängen) sind bei deren 2 punktuelle, nennenswerte Veränderungen festzustellen.

Da die Ausgangswerte für die Computer-Simulation (Lasertexturprofile und Luftströmungswiderstand) sich praktisch nicht verändert haben, ist auch keine Veränderung des Outputs der SPERoN-Simulation zu erwarten. Die ursprünglich vorgesehenen Schätzungen des Rollgeräusches mittel SPERoN-Simulation machen aufgrund der vorliegenden Ergebnisse wenig Sinn. Von der Anwendung der SPERoN-Berechnungen erwarten wir keine zusätzlichen Informationen.

Anstelle der relativ kostspieligen rechnerischen Simulationen wurden im Teilpaket II Akustik über die ursprünglich geplanten Untersuchungen an AC 8 und SDA hinaus, zusätzlich auch Waschbeton und ein lärmärmer Gussasphalt untersucht.

Grösste Änderung der Akustikparameter durch Polierung

Kennwert	je 3 grösste Veränderungen		je 3 kleinste Veränderungen	
	Wert	Probe	Wert	Probe
MPD [mm]	0.08	SDA 8-12 Gkt	0	Waschbeton GKh
	0.08	MA 11 S	0.01	AC 8H Gkt
	0.07	SDA 4-12 GKh	0.01	SDA 8-12 Gkt
G-Faktor [%]	17	MA 11 S	0	SDA 8-12 Gkt
	7	Waschbeton Gkt	1	SDA 4-12 Gkt
	6	AC 8S Gkt	1	AC 8H GKh
spez. Luftströmungswiderstand [Pa*s/m]	10888	Waschbeton GKh	266	AC 8H GKh
	4701	SDA 4-12 GKh	357	MA 11 S
	3276	AC 8S Gkt	658	SDA 8-12 GKh
λR_{\max} [mm]	2.5	Waschbeton GKh	0	SDA 8-12 GKh
	2.3	SDA 4-12 Gkt	1	SDA 4-12 GKh
	2.3	AC 8H Gkt	1	MA 11 S

Tabelle 16 Auswertung der Veränderungen der massgebenden Werte für die Beurteilung der akustischen Eigenschaften einer Deckschicht.

5.2 Schussfolgerungen Kapitel II

Alle für die Bewertung des akustischen Verhaltens relevanten Parameter sind in Tabelle 17 zusammengefasst. Massgeblich für das akustische Verhalten sind gemäss Beckenbauer et al. [30]:

- Der Gestaltfaktor. Günstig für leise Beläge sind konkave Oberflächen. Mit Ausnahme der Waschbetonproben und des Gussasphaltes haben alle Asphaltproben eine deutliche konkave Oberflächenform.
- Der Lambda-Wert λR_{\max} sollte zwischen 5 mm und 15 mm liegen. Diese Bedingung erfüllen alle Proben ausser dem Gussasphalt.
- Der Effektivwert der Rauigkeitstiefe sollte bei λR_{\max} zwischen 0.1 mm und 0.2 mm liegen. Auch diese Bedingung ist für alle Proben erfüllt.
- Wichtig ist darüber hinaus der spez. Luftströmungswiderstand. Lärmindernde 8-er Beläge haben einen spez. Luftströmungswiderstand im Bereich von unter ca. 5'000 Pa*s/m; 4-er Beläge liegen bei ca. < 12'000 Pa*s/m. Dieses Kriterium erfüllen unabhängig vom Gesteinstyp nur der SDA 8-12 sowie der lärmarme MA 11 LA.
- Hinsichtlich der Änderung der akustischen Eigenschaften aufgrund der Polierung der Oberfläche lässt sich feststellen, dass nach dem Einlaufen diejenigen für die akustischen Eigenschaften relevanten Parameter keine wesentliche Änderung erfahren und somit von einem im Untersuchungsbereich (deutlich abgeflachter PTV-Wert nach 17 relativen Polierübergängen) eher unveränderten akustischem Verhalten ausgegangen werden kann.

Zusammenfassung der akustischen Parameter für alle Proben

	Sorte	AC 8 H GK _h	AC 8 H GK _t	SDA 4-12 GK _h	SDA 4-12 GK _t	SDA 8-12 GK _h	SDA 8-12 GK _t	GA - MA 11 S	Waschbeton GK _h	Waschbeton GK _t
	Probenummer	23-00001	23-04341	22-14955	22-15081	22-06438	22-07263	23-1430x	22-10183	22-10187
	Provenienz	8	10	8	10	8	10	11	8	10
vor Polieren										
PTV	[-]	74	68	80	73	72	76	84	72	62
MPD	mm	0.30	0.40	0.60	0.50	1.00	0.90	2.10	0.90	0.60
G-Faktor	%	88	85	85	85	87	87	57	43	50
spez. LuftStröWi	Pa*s/m	69'155	50'583	3'909	6'544	2'270	3'636	730	20'663	21'407
$\lambda_{R_{max}}$	mm	6.3	8.0	4.0	4.0	6.3	10.0	6.3	12.5	20.0
nach 5 relativen Polierübergängen										
PTV	[-]	43	47	50	45	43	47	63	64	56
MPD	mm	0.38	0.44	0.45	0.41	0.89	0.77	1.74	0.84	0.65
G-Faktor	%	86	83	87	86	80	87	42	43	54
spez. LuftStröWi	Pa*s/m	86'735	73'643	11'484	15'248	2'834	5'160	1'472	17'910	29'352
$\lambda_{R_{max}}$	mm	8.0	6.3	4.0	6.3	10.0	6.3	31.5	12.5	8.0
nach 17 relativen Polierübergängen										
PTV	[-]	39	43	46	39	48	35	64	59	53
MPD	mm	0.34	0.43	0.52	0.40	0.84	0.85	1.82	0.84	0.64
G-Faktor	%	85	89	85	87	82	87	59	46	61
spez. LuftStröWi	Pa*s/m	86.469 (33x)	70'367	16'185	19'389	3'492	6'127	1'115	28'798	30'414
$\lambda_{R_{max}}$	mm	6.3	4.0	5.0	4.0	10.0	8.0	6.3	10.0	10.0

Tabelle 17 : Zusammenfassung von PTV, MPD (Mittlere Profiltiefe), G-Faktor, spezifischem Luftströmungswiderstand und Rauigkeitswellenlänge ($\lambda_{R_{max}}$) bei maximaler effektiver Rauigkeitstiefe für Nullproben (vor Polieren) sowie nach 5 und 17 relativen Polierübergängen.

6 Resultate III: Optimierung von Rezepturen

Aus der Literatur [13] ist bekannt, dass sich die Griffigkeit durch den Einsatz eines hochwertigen Sandes, verbessern lässt. Unklar ist, ob bei Gesteinskörnungen mit ungünstiger Polierresistenz durch den gezielten Austausch von mittleren Kornfraktionen mit günstigerer Polierresistenz die Griffigkeit ebenfalls verbessern lässt.

Hierzu werden Gesteinskörnungen aus zwei verschiedenen Provenienzen verwendet, welche sich durch ihren Polierwiderstand deutlich unterscheiden. Im Weiteren werden die Gesteinskörnungen mit einem tiefen Polierwiderstand als «GKt» (Provenienz 10) bezeichnet, die Gesteinskörnungen mit hohem Polierwiderstand mit «GKh» (Provenienz 2).

Als Beurteilungskriterium wird die Griffigkeitsentwicklung verwendet. Durch vergleichende Untersuchungen von Griffigkeitsmessungen an Deckschichten unterschiedlichen Alters in-situ und Griffigkeitsmessungen im Wehner/Schulze-Verfahren nach verschiedenen Anzahlen Polierübergängen konnte ein Verfahren definiert werden, welches es erlaubt das Griffigkeitsverhalten einer Deckschicht unter Verkehr zu prognostizieren. Damit wird es möglich, nicht nur die Veränderung der Griffigkeit nach einer bestimmten Anzahl Polierübergängen festzustellen, sondern auch eine Aussage über die Entwicklung der Griffigkeit in Funktion der Anzahl Polierübergänge zu erhalten.

Obwohl in Kapitel 4 vorgeschlagen wurde die FAP-Prüfung für Routineuntersuchungen nach 90'000 Polierübergängen abzurechnen, wurde in den untenstehenden Untersuchungen die Prüfung bis 180'000 Polierübergängen weitergeführt. Dies um über die Routineuntersuchung hinaus allfällige, weitere Erkenntnisse zu sammeln.

6.1 Asphalt

Die Untersuchungen wurden an zwei Mischgutsorten AC 8 S und AC MR 8 durchgeführt. Wie der Abbildung 34 zu entnehmen ist, unterscheiden sich diese Mischgutsorten hinsichtlich der Korngrößenverteilung sehr stark; der AC hat eine kontinuierliche Sieblinie; der AC MR eine Ausfallkörnung. Mit der Wahl dieser beiden Mischgutsorten will man den Einfluss der mittleren Kornfraktion (0/4) auf die Griffigkeit zweier unterschiedlicher Asphalt-Konzepte untersuchen.

Pro Mischgut-Sorte wurden je 4 Mischungen im Labor hergestellt, wobei die Provenienz der Gesteinskörnungen variiert wurde; siehe Tabelle 18.

Es wurden insgesamt 8 Mischungen (4 x AC 8 S und 4 x AC MR 8) und 16 Asphaltplatten mit dem Walzsegmentverdichter hergestellt (zwei pro Mischung), sodass der FAP-Wert mittels Doppelbestimmung ermittelt werden konnte.

Der Verdichtungsgrad (Mittelwert der beiden Platten) lag beim AC 8 zwischen 100.0 und 100.6 %; beim AC MR 8 zwischen 99.2 und 99.9 %.

Zusammenfassung der hergestellten Asphaltmischungen

Mischung	Mischgutsorte	0/4	4/8
M1	AC 8 S	GKt	GKt
M2	AC 8 S	GKt	GKh
M3	AC 8 S	GKh	GKt
M4	AC 8 S	GKh	GKh
M5	AC MR 8	GKt	GKt
M6	AC MR 8	GKt	GKh
M7	AC MR 8	GKh	GKt
M8	AC MR 8	GKh	GKh

Tabelle 18: Zusammenfassung der hergestellten Asphaltmischungen.

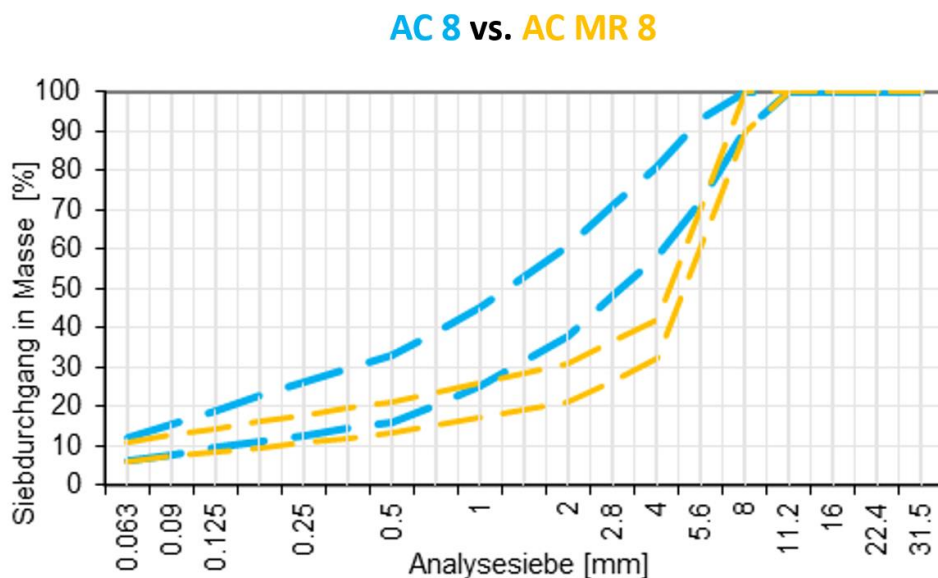


Abbildung 34: Siebkurve eines AC 8 (blau) vs. eines AC MR 8 (orange).

6.1.1 AC 8 S

Die gemessenen FAP-Werte des von AC 8 S sind in Abbildung 35 und Tabelle 19 dargestellt. Die Mischung M1, welche aus 100 % GKt besteht, hat einen etwas niedrigeren Anfangsgriffigkeitswert als die anderen Mischungen (0.297). Nach 90'000 Polierübergängen sinkt der Wert im Vergleich zum Ausgangsniveau drastisch und erreicht nach 180'000 Polierübergängen einen Endwert von 0.157.

Die Mischung M2 besteht zu ca. 70 % aus GKt (Fraktion 0/4). Die Entwicklung der Griffigkeit ist ähnlich wie bei der Mischung M1 und erreicht schliesslich einen sehr niedrigen Wert (0.186). Dieser Wert ist nur geringfügig höher als derjenige des Gemischs M1.

Die dritte gemessene Mischung M3 (GKt bei Fraktion 4/8) zeigt deutlich höhere FAP-180'000-Werte (0.301). Die M4-Mischung, die vollständig aus GKh besteht, zeigt erwartungsgemäss die höchsten Werte, die für diese Mischgutsorte gemessen wurden (FAP-180'000: 0.347).

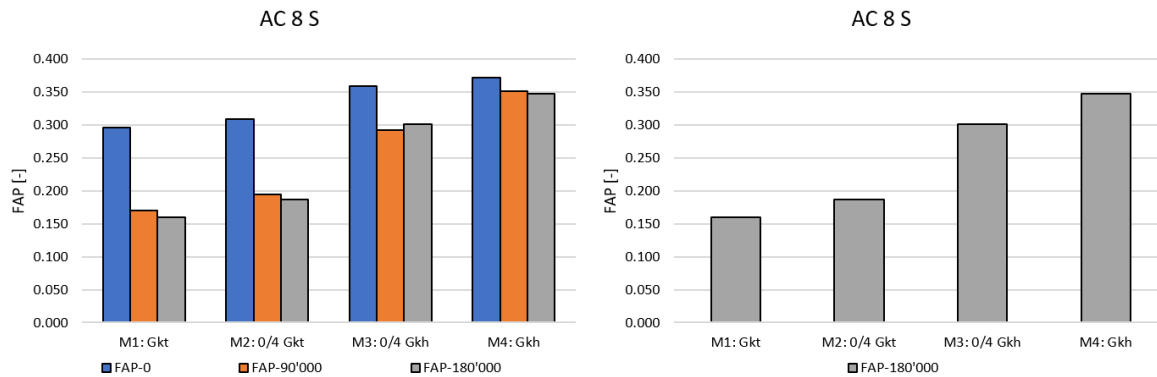


Abbildung 35: Links: Gemessene FAP-Werte (Mastix-Proben) für die vier verschiedenen Mischungen von AC 8 S. Rechts: Zoom auf FAP-Werte nach 180'000 Polierübergängen (Endgriffigkeit).

Diskussion der Ergebnisse

Es ist deutlich zu erkennen (Abbildung 35), dass für einen AC 8 S die Fraktion 0/4 für die Griffigkeit am relevantesten ist. Diese Tatsache kann auf die Siebkurve zurückgeführt werden, die im Falle eines AC 8 zu ca. 70 % aus der 0/4-Fraktion besteht.

Die beiden Mischungen mit grossem Anteil GKh (M3 und M4) heben sich bei der Endgriffigkeit deutlich von den beiden anderen Mischungen ab. Der Unterschied der Mischung M2 zur M3 (35 bzw. 65 % GKh) ist deutlich grösser als derjenige zwischen den Mischungen M3 und M4 (65 bzw. 100 % GKh).

Eine weitere interessante Tatsache ist, dass sämtliche Anfangsgriffigkeiten mittelmässig bis sehr gut sind und zwischen 0.297 (M1-Gkt) und 0.374 (M4-Gkh) liegen. Die Mischung M4 hat eine um nur 26 % höhere Anfangsgriffigkeit als die Mischung M1. Nach der Polierung steigt dieser Unterschied jedoch auf 117 % (!).

Es ist auch zu erkennen, dass die Polierbarkeit der 4/8-Fraktion nur einen geringen Einfluss auf die Endgriffigkeit hat. Es ist daher denkbar (z.B. für Strassen mit geringem Verkehr), hochwertige Gesteinskörnungen nur in der Fraktion 0/4 zu verwenden, sofern diese die weiteren Anforderungen (Los-Angeles, Kornform, Affinität zu Bitumen etc.) erfüllen.

Entwicklung der FAP-Werte für AC 8-Mischungen

AC 8 S	M1	M2	M3	M4
	Gkt	o/4 Gkt	o/4 Gkh	Gkh
FAP-0	0.296	0.309	0.359	0.373
FAP-90'000	0.171	0.195	0.292	0.351
FAP-180'000	0.160	0.187	0.301	0.347

Tabelle 19: Entwicklung der FAP-Werte für die vier gemessenen AC 8-Mischungen. Daten aus Abbildung 35.

6.1.2 AC MR 8

Die Mischung M5 (Gkt) zeigt wie erwartet einen starken Abfall zwischen der Anfangsgriffigkeit (0.33) und der Endgriffigkeit (0.228). Die Mischung M6 (0/4 mit Gkt) hat einen FAP-0-Wert von 0.324 und erreicht einen FAP-180'000 von 0.292. Die Mischung M7 (4/8 mit Gkt) hat zunächst eine Anfangsgriffigkeit von 0.343 (FAP-0) und fällt dann auf 0.249. Die Mischung M8

(nur GKh) hat einen Anfangswert von 0,333, der auf 0,368 ansteigt. Obwohl bei den FAP-Werten der Gesteinskörnungen ebenfalls geringfügige Zunahmen der Werte beobachtet wurden, lässt sich die Zunahme zwischen der Anfangsgriffigkeit und den Werten nach 90'000 bzw. 180'000 Polierübergängen nicht erklären. Obwohl bei den Messdaten nichts Auffälliges beobachtet wurde, müssen wir davon ausgehen, dass der Anfangswert zu tief lag. Unabhängig davon kann festgestellt werden, dass die Mischung M8 die höchsten FAP-Endwerte aufweist.

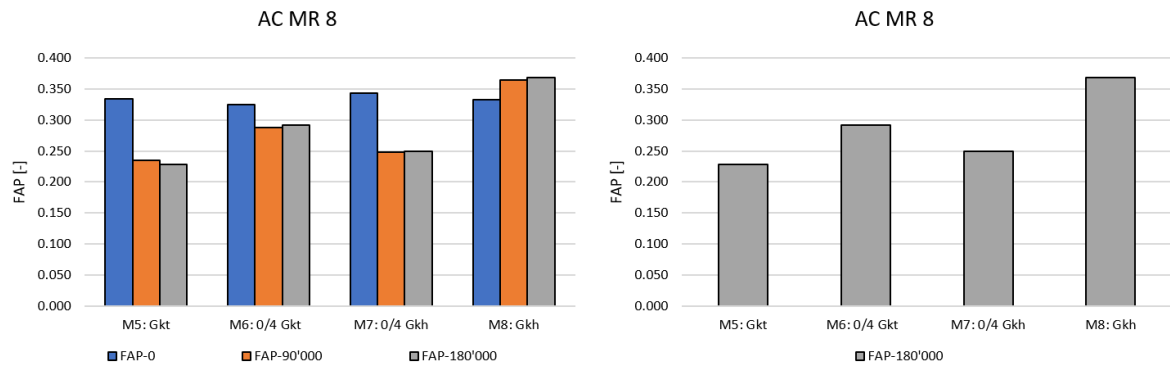


Abbildung 36: Links: Gemessene FAP-Werte (Mastix-Proben) für die vier verschiedenen Mischungen von AC MR 8. Rechts: Zoom auf FAP-Werte nach 180'000 Polierübergängen (Endgriffigkeit).

Diskussion der Ergebnisse

Was die Endgriffigkeit betrifft, gibt es einen deutlichen Unterschied zwischen der Mischung M8 (100 % GKh) und den beiden Mischungen M5 (100 % Gkt) und M7 (ca. 65 % Gkt). Die Mischung M6 (ca. 40 % Gkt) liegt zwischen M8 und M5/M7.

Bei einem AC-MR spielt die 4/8-Fraktion die wichtigste Rolle hinsichtlich der Griffigkeit. In der Tat hat die Mischung M6 Gesteinskörnungen mit einem hohen Polierwiderstand in dieser Fraktion. Obwohl sie nicht an die Werte der M8-Mischung (100 % GKh) herankommt, hat sie dennoch die zweitbeste Griffigkeit.

Entwicklung der FAP-Werte für AC MR-8-Mischungen

AC MR 8	M5	M6	M7	M8
	Gkt	0/4 Gkt	0/4 Gkh	Gkh
FAP-0	0.333	0.324	0.343	0.333
FAP-90'000	0.234	0.288	0.248	0.364
FAP-180'000	0.228	0.292	0.249	0.368

Tabelle 20: Entwicklung der FAP-Werte für die vier gemessenen AC MR 8-Mischungen. Daten aus Abbildung 36.

6.1.3 Folgerungen Rezeptoptimierung Asphalt

- Vergleich AC 8 zu AC MR 8:
Diese beiden Mischgutsorten werden typischerweise in Schweizer Deckschichten verwendet und zeichnen sich durch zwei sehr unterschiedliche Oberflächen aus. Wie in Abbildung 34

dargestellt, zeichnet sich ein AC 8 durch eine kontinuierliche Sieblinie aus, während ein AC MR 8 eine von der 4/8-Fraktion dominierte Siebkurve aufweist, was in der Abbildung 37 deutlich zu sehen ist.

- Je höher der Anteil an Gesteinskörnungen mit hohem Polierwiderstand, desto höher ist (logischerweise) die Griffigkeit. Abhängig von der Mischgutsorte (und insbesondere der Sieblinie) wirken sich die verschiedenen Fraktionen jedoch unterschiedlich auf die endgültige Griffigkeit aus. Abbildung 38 zeigt sehr gut die Unterschiede zwischen den beiden Mischgutsorten in Bezug auf die Endgriffigkeit.
- Der AC MR 8 hat im Allgemeinen eine höhere Griffigkeit als ein AC 8, was auf die unterschiedliche Oberfläche zurückzuführen ist; ein AC MR ist per Definition rauer und hat eine viel grössere Rautiefe.
- Die Unterschiede zwischen dem tiefsten und höchsten Wert der Endgriffigkeit ist beim AC mit 0.187 grösser als beim AC MR mit 0.140.
- Beim AC 8 ist der Anteil 0/4 entscheidend für die Griffigkeit.
- Beim AC MR 8 ist der Anteil 4/8 entscheidend.



Abbildung 37: Aussehen eines AC MR 8 (links) und eines AC 8 (rechts).

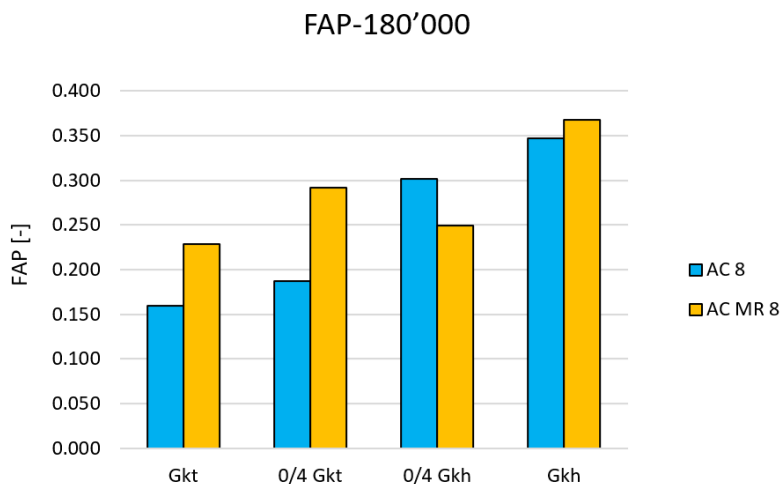


Abbildung 38: Ermittelte Endgriffigkeiten (FAP-180'000) für die beiden Mischgutsorten (AC 8 und AC MR 8) mit GKh und Gkt verteilt auf verschiedene Fraktionen (Mastix-Proben).

6.2 Beton

- Die Problematik der Griffigkeit einer Betonverkehrsfläche unterscheidet sich von derjenigen einer Asphaltoberfläche. Beim Beton kommen neben den Einflüssen der Baustoffe (insbesondere der Gesteinskörnungen) zusätzlich die Beschaffenheit der Betonoberfläche (Besenstrich, Waschbeton, Fräsen) und die Einbautechnik hinzu.
- Da die Untersuchung sämtlicher Einflussfaktoren den Rahmen sprengen würde, wurde der Einfluss der Gesteinskörnung auf das Griffigkeitsniveau und die Griffigkeitsentwicklung bei einem Waschbeton WB8 untersucht. Zudem wurde bei einem G-Beton 22 mit unterschiedlichen Oberflächenbearbeitungen (Besenstrich mit Strassenbesen und mit Strohbesen) der Einfluss der Gesteinskörnungen untersucht.
- Da der Schwerpunkt der Untersuchungen auf der Griffigkeit lag, wurde beschlossen, die Herstellung der Mischungen zu vereinfachen und auf die Zugabe von Zusatzstoffen (z.B. Verflüssiger, Luftporenbilder) zu verzichten. Um eine möglichst konstante Mischung zu erhalten, sowie aufgrund des begrenzten Volumens der zur Verfügung stehenden Aggregate wurde nur eine Charge von ca. 60 L pro Mischung hergestellt.

6.2.1 Waschbeton

6.2.1.1 Zusammensetzung und Herstellung der Prüfkörper

Das Rezept wurde von der Ö-Norm RVS 08.17.02 [10] übernommen. Wie in der untenstehenden Abbildung 39 zu sehen ist, beträgt der Anteil der Fraktion > 4 mm etwa 65 % der gesamten Mischung, während der Anteil ≤ 0.125 mm praktisch Null ist.

Tabelle 21 zeigt die Zusammensetzung der vier hergestellten Mischungen (K1-K4), in denen Gesteinskörnungen mit hohem (GKh) und niedrigem Polierwiderstand (GKt) in verschiedenen Fraktionen verteilt wurden. Als GKt wurde wie zuvor die Provenienz Nr. 10 gewählt, als GKh die Provenienz Nr. 3. Die Herstellung der Platten wurde in Kapitel 1.2.3.1 detailliert beschrieben.

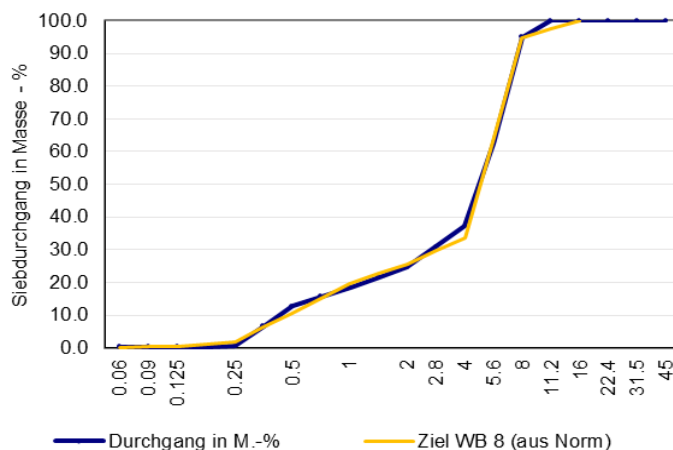


Abbildung 39: Korngrößenverteilung des Waschbeton WB8; Zielwerte (gelb) und effektive Werte (blau).

Mischungen aus Waschbeton

Mischung	0/4	4/8	Kommentar
K1	GKt	GKt	100 % GKt
K2	GKh	GKt	GKh auf 0/4
K3	GKt	GKh	GKt auf 0/4
K4	GKh	GKh	100 % GKh

Tabelle 21: Auflistung der verschiedenen Mischungen aus Waschbeton.

6.2.1.2 Frischbetonkontrolle und mechanische Eigenschaften

Alle Fraktionen der verwendeten Gesteinskörnungen bestanden aus vollständig gebrochenem Material. Dies hat einen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit der Mischung; alle Mischungen wiesen die Konsistenz C1 (steif) auf. Die Form der Gesteinskörner wirkt sich auch auf die mechanischen Eigenschaften aus; der Tabelle 22 und Abbildung 40 ist zu entnehmen, dass die Biegezugfestigkeit nach 2 Tagen sehr hoch ist. Die Anforderung (5.5 MPa nach 28t, SN 640 461) wird weit übertroffen.

Mechanische Eigenschaften der Mischungen

Mischung	Fraktionen	Konsistenz, Verdichtungs- mass	Biegezugfestigkeit [MPa]			Druckfestigkeit [MPa]			Rau- tiefe [mm]
			2 T	7 T	28 T	2 T	7 T	28 T	
K1	GKt	C1	5.3	6.6	7.5	32.1	37.4	44.3	1.09
K2	0/4 GKh	C1	6.7	7.3	7.9	32.3	43.5	47.3	0.81
K3	0/4 GKt	C1	4.9	6.9	7.9	26.6	43.9	51.2	1.17
K4	GKh	C1	5.4	7.7	8.3	30.0	46.4	54.3	0.96

Tabelle 22: Konsistenz und mechanische Eigenschaften der Mischungen.

6.2.1.3 Prüfung der Oberflächeneigenschaften

Die Resultate der FAP-Prüfungen auf Waschbetonplatten sind in der unterstehenden Tabelle 23 und Abbildung 41 aufgeführt. Es muss berücksichtigt werden, dass die Oberflächentextur des Waschbetons eine sehr starke Abnutzung auf dem Messgummi erzeugt. Dies bedeutet, dass der Kalibrierwert während der Prüfung stark schwanken kann. Aus diesem Grund wurde beschlossen, die direkt gemessenen Reibungskoeffizienten als Referenzwert zu verwenden, ohne die normalerweise angewandte Korrektur vorzunehmen. Für vergleichende Untersuchungen ist dies zulässig, es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die so ermittelten Werte nur bedingt mit den gemäss Standardverfahren gemessenen FAP direkt verglichen werden können; die im Folgenden ausgewiesenen Werte liegen tendenziell etwas höher.

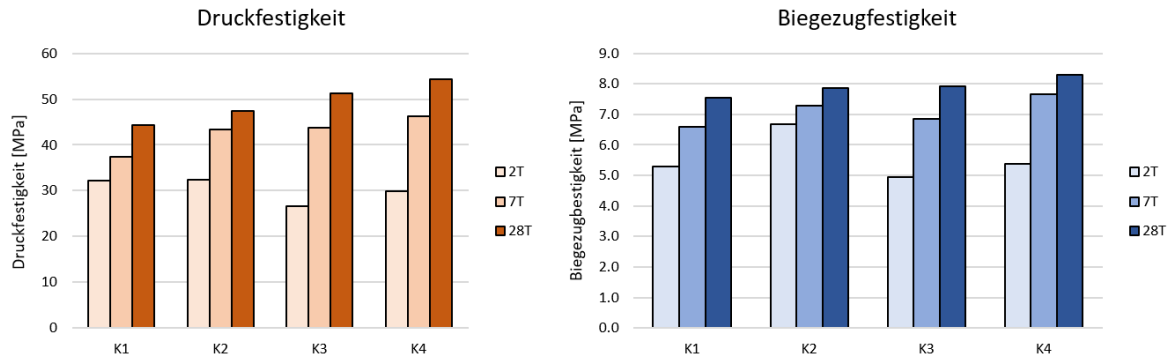


Abbildung 40: Entwicklung der Biegezugfestigkeit (links) und Druckfestigkeit (rechts) für 2, 7 und 28 Tage.

Entwicklung der FAP-Werte für WB 8-Mischungen

	K1	K2	K3	K4
	100 % GKt	0/4 GKh	0/4 GKt	100 % GKh
FAP-0	0.288	0.371	0.367	0.368
FAP-90'000	0.206	0.309	0.336	0.308
FAP-180'000	0.198	0.302	0.323	0.323

Tabelle 23: Entwicklung der FAP-Werte für die vier gemessenen WB 8-Mischungen.

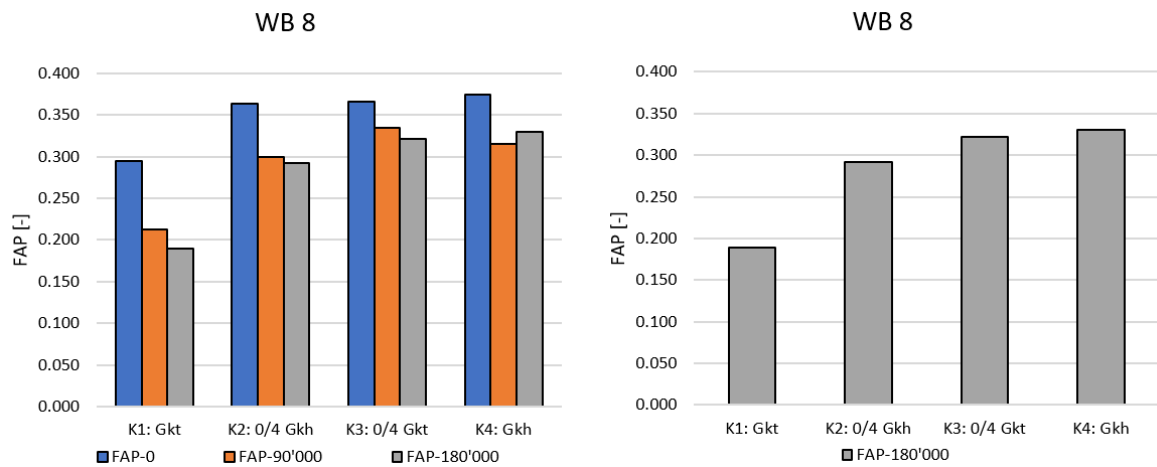


Abbildung 41: Links: Gemessene FAP-Werte für die vier verschiedenen Mischungen von WB 8. Rechts: Zoom auf FAP-Werte nach 180'000 Polierübergängen (Endgriffigkeit).

Diskussion der Resultate

Waschbeton weist im Vergleich zu Asphalt erhebliche Unterschiede auf:

- (i) die unterschiedliche Siebkurve (Abbildung 39).
- (ii) Die Zusammensetzung der Oberflächenmaterialien. Die Oberfläche des Betons besteht sowohl aus Gesteinskörnungen als auch aus hydratisierte Zementphasen. Je nach Korngrösse entsteht dadurch auch eine besonders heterogene Oberfläche mit guter Griffigkeit.

- (iii) Die Ausrichtung der Gesteinskörnungen. Die Vibration des Betons bewirkt nämlich eine Art Schwebezustand der Gesteinskörner, die dazu neigen, sich senkrecht zur Oberfläche auszurichten. Bei Asphalt hingegen führt die Verdichtung durch Walzen zu einer Ausrichtung der Gesteinskörner parallel zur Oberfläche.

Waschbetonproben, die nur aus GKt (Kalkstein) bestehen (K1), haben eine gute Anfangsgriffigkeit, aber erwartungsgemäss eine sehr geringe Endgriffigkeit (<0.2). Die beiden Mischungen, die teilweise aus GKt und GKh bestehen (K2, K3, siehe Tabelle 24), zeigen interessanterweise beide angemessene Werte.

Da die Korngruppe 4/8 in der Mischung Waschbeton 8 dominierend ist, ist sie auch die wichtigste Komponente in Bezug auf die Griffigkeit. Dies erklärt, warum die Mischung K3 (4/8 aus GKt) höhere Werte aufweist als die Mischung K2 (4/8 aus GKt).

Schlussfolgerung

Der Unterschied der Endgriffigkeit zwischen dem höchsten Wert (0.328) und dem niedrigsten (0.198) beträgt beim Waschbeton 0.130 und liegt damit deutlich tiefer als beim Asphaltbeton AC 8 S mit 0.187; der AC MR 8 liegt mit 0.140 dazwischen. Die beiden Konzepte mit Ausfallkörnung (Waschbeton und AC MR) liegen nahe beieinander. Es scheint, dass die Eigenschaften der Gesteinskörnungen die Polierbarkeit eines Asphaltbetons tendenziell stärker beeinflussen, als beim Beton. Ob dies generell gilt, müsste untersucht werden. Dennoch ist es auch für Waschbeton nicht möglich, nur Gesteinskörnungen mit einem geringen Polierwiderstand (GKt) zu verwenden, z.B. nur Kalkstein. Idealerweise sollte zumindest die grösste Fraktion (z.B. 4/8 mm bei einem WB 8) aus Gesteinskörnungen mit hohem Polierwiderstand bestehen.

Offenbar kann bereits mit einem relativ geringen Anteil an polierresistenten Gesteinskörnungen viel erreicht werden, denn die drei Mischungen K2, K3 und K4 heben sich deutlich von der Mischung (K1) ab welche zu 100 % aus ungeeignetem Material besteht.

Wie bei der Griffigkeit von Asphalt besprochen, sind sowohl Gesteinskörnung als auch Textur wichtig. Da die Oberflächentextur und die Korngrössenverteilung je nach Mischung und Aufbereitung (z.B. Rautiefe, Orientierung der Gesteinskörnung, Rezept) variieren, ist es ratsam, eine Prüfung der Endgriffigkeit (FAP-90) durchzuführen, wenn nicht 100 % hochwertige Gesteinskörnungen verwendet werden.

6.2.2 Besenstrich auf G-Beton 22

6.2.2.1 Zusammensetzung und Herstellung der Prüfkörper

Auch beim Beton G 22 wurden vier Mischungen mit den Gesteinskörnungen GKt und GKt über verschiedene Fraktionen verteilt hergestellt (Tabelle 24). Die Platten wurden dann in vier Abschnitte unterteilt und verschiedene Texturen hergestellt: Strassenbesen, Strohbesen und 'keine' Textur. Wie beim Waschbeton wurde die Verarbeitbarkeit ohne Zusatz von Additiven, sondern nur durch die Zugabe von Wasser erreicht. Mehr zur Herstellung der Platten siehe Kapitel 1.2.3.2.

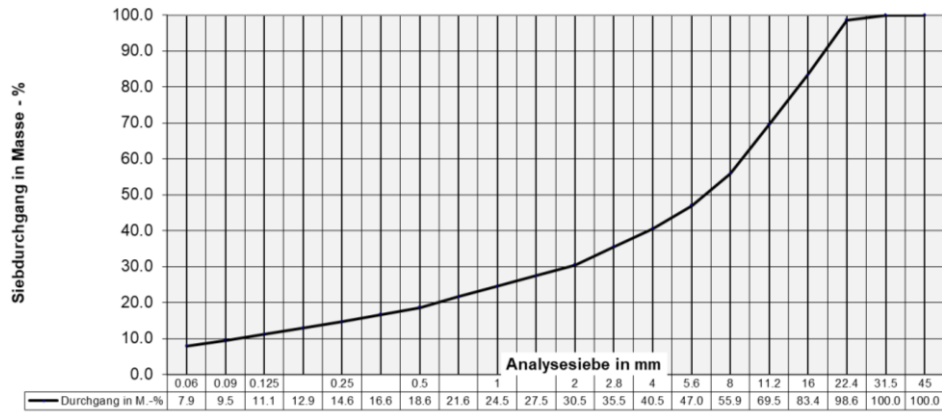


Abbildung 42: typische Korngrößenverteilung für den G-Beton 22.



Abbildung 43: Beispiel einer Betonplatte (48 x 48 x 10) cm mit verschiedenen Oberflächen-Bearbeitungen (oben rechts: keine Textur / unten rechts Strohbesen / links Strassenbesen).



Abbildung 44: links Strassenbesen; rechts Strohbesen.

6.2.2.2 Frischbetonkontrolle und mechanische Eigenschaften

Um eine gute Verarbeitbarkeit ohne Zusatzstoffe und mit 100 % gebrochenen Gesteinskörnungen zu erreichen, musste der W/Z-Faktor auf 0.50 erhöht werden. Die Zugabe von Wasser führt erfahrungsgemäss zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften. Dies ist bei den Ergebnissen der Druck- und Biegezugfestigkeit deutlich sichtbar. Der in der Norm [SN 640 461] geforderte Wert von 5.5 MPa (nach 28 T) wird in einem Fall nicht erreicht. Auch die Druckfestigkeit ist relativ gering. Diese Werte wurde bewusst in Kauf genommen, um die Herstellung des Betons zu vereinfachen. In Bezug auf die untersuchte Problemstellung der Polierbarkeit der Oberfläche dürfte der Einfluss vernachlässigbar sein.

Konsistenz und mechanische Eigenschaften der Mischungen

Mischung	Fraktionen	Verdichtungsmass	Biegezugfestigkeit [MPa]			Druckfestigkeit [MPa]		
			2 T	7 T	28 T	2 T	7 T	28 T
G1	GKt	C1	2.2	4.6	5.9	12.2	27.2	37.0
G2	o/4 GKt	C1	3.9	5.1	5.6	23.5	34.3	38.4
G3	o/4 GKh	C1	3.5	4.9	5.1	21.1	32.2	37.4
G4	GKh	C1	3.9	4.6	6.1	22.6	33.2	39.2

Tabelle 24: Konsistenz und mechanische Eigenschaften der Mischungen

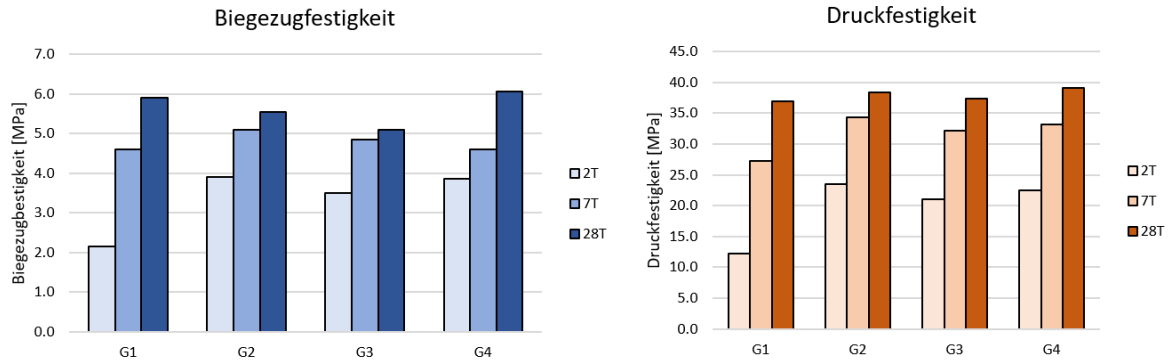


Abbildung 45: Entwicklung der Biegezugfestigkeit (links) und Druckfestigkeit (rechts) für 2, 7 und 28 Tage.

6.2.2.3 Prüfung der Griffigkeit nach Wehner/Schulze (FAP)

Strohbesen

Die mit einem Strohbesen hergestellten Proben zeigen mit zunehmendem Anteil GK_h einen Aufwärtstrend in Bezug auf die Endgriffigkeit (Abbildung 46). Der FAP₁₈₀ der aus 100 % GK_t bestehenden Probe (G1) liegt bei 0.243, während der FAP₁₈₀ der Probe G4 (100 % GK_h) 0.446 beträgt. Im Gegensatz dazu liegen die Proben G2 (FAP₁₈₀ = 0.308) und G3 (FAP₁₈₀ = 0.359) im Mittelfeld. Die Ergebnisse deuten also erwartungsgemäss darauf hin, dass die 0/4-Fraktion für diese Art von Oberfläche besonders wichtig ist. Dies ist im Vergleich der Mischungen deutlich zu erkennen (Tabelle 25). Obwohl die Mischung G2 insgesamt mehr Anteile an GK_h aufweist, liegt der FAP₁₈₀ tiefer als bei der Mischung G3, welche zwar weniger GK_h aufweist, aber diese Gesteinskörnung in der Fraktion 0/4 vorkommt.

Anteile GK_h bzw. GK_t vs. Werte für FAP-180'000

Mischung	Anteil GK _h	Anteil GK _t	FAP-180'000
G1	0	100	0.255
G2	60	40	0.308
G3	40	60	0.359
G4	100	0	0.446

Tabelle 25 Gegenüberstellung der Anteile GK_h bzw. GK_t und den Werten für FAP-180'000.

Bei drei der vier gemessenen Proben ist ein deutlicher Rückgang des nach 90'000 und 180'000 Polierübergängen ermittelten FAP-Wertes festzustellen.

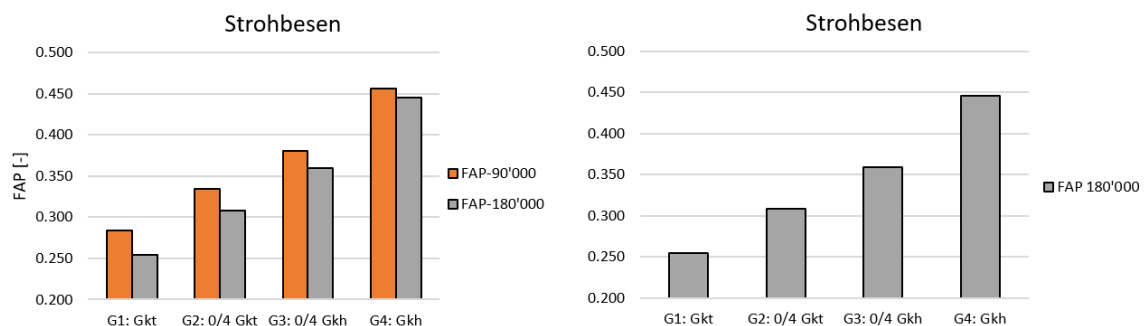


Abbildung 46: Entwicklung der FAP-Werte, die für die vier Mischungen (G1-G4) ermittelt wurden.

Es ist auch zu beachten, dass bei allen Proben (unabhängig von der Zusammensetzung) die durch Strohbesen erzeugten Texturspitzen nach 180'000 Polierübergängen vollständig verschwinden. Abbildung 47 zeigt auch, dass alle vier (G1-G4 Mischungen) eine sehr ähnliche Endrautiefe erreichen (0.41-0.56 mm). Trotzdem sind die gemessenen Griffigkeiten deutlich unterschiedlich; es zeigt sich also der Einfluss der Polierbarkeit der verschiedenen Provenienzen.

Stichprobenweise wurde bei der Probe G3 der FAP-Wert an der Teilfläche, welche nicht mit Besen behandelt wurde (siehe Abbildung 43), gemessen. Der FAP-180'000 beträgt 0.378; er liegt in der gleichen Grössenordnung des FAP-180'000 der Probe mit Strohbesen.

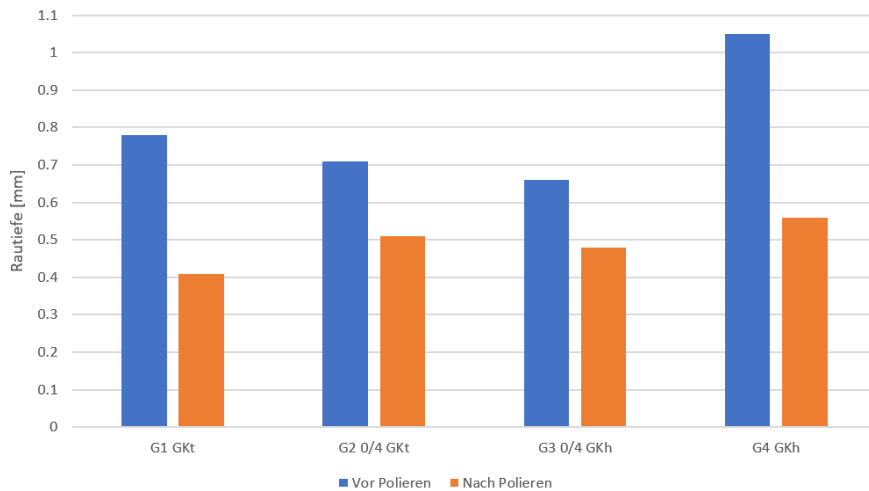


Abbildung 47: Rautiefen der Proben «Strohbesen vor / nach Polierung».

Zusammenstellung der FAP-Werte an den Proben G-Beton 22

		G1	G2	G3	G4
		100 % Gkt	0/4 Gkt	0/4 GKh	100 % GKh
Strohbesen	FAP-90'000	0.284	0.334	0.381	0.456
	FAP-180'000	0.255	0.308	0.359	0.446
Strassenbesen	FAP-90'000	0.381	0.412	0.423	0.409
	FAP-180'000	0.356	0.368	0.419	0.387

Tabelle 26 Zusammenstellung der gemessenen FAP-Werte an den Proben G-Beton 22 mit Stroh- bzw. Strassenbesen.

Strassenbesen

Die Rangfolge der FAP-Werte ist für den FAP-90'000 und den FAP-180'000 die gleiche.

Bei der Endgriffigkeit fällt auf, dass die Probe G4 (100 % GKh) etwas schlechter abschneidet als Probe G3 mit ca. 40 % GKh. Die Rautiefe nach der Polierung betrug bei der Probe G4 0.56 mm, bei der Probe G3 0.45 mm; beide Laser-Texturprofile sind in der Abbildung 48 grafisch dargestellt. Obwohl die Probe G4 mit einer grösseren Rautiefe und einem grösseren Anteil an polierresistenten Gesteinskörnungen einen höheren FAP-Wert aufweisen sollte als G3, zeigen die Messergebnisse das Gegenteil. Auch die visuelle Betrachtung der Profile in Abbildung 48 würde eher dem Profil der Probe G4 eine höhere Griffigkeit zuweisen. Da die Prüfung zerstörend ist, konnte sie leider nicht wiederholt werden, es gibt keine Erklärung für diese unerwarteten Ergebnisse.

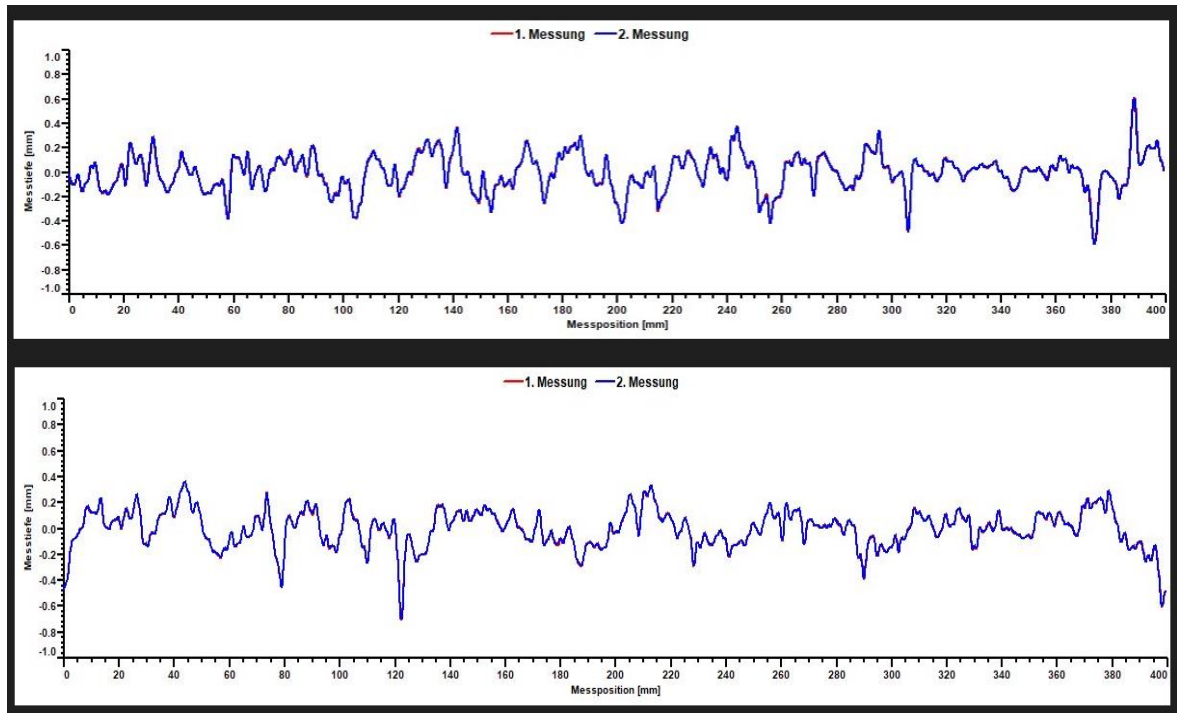


Abbildung 48: Laser-Texturmessungen auf der polierten Oberfläche; oben Probe G4 mit 100 % GKh, unten Probe G3 mit 0/4 GKh.

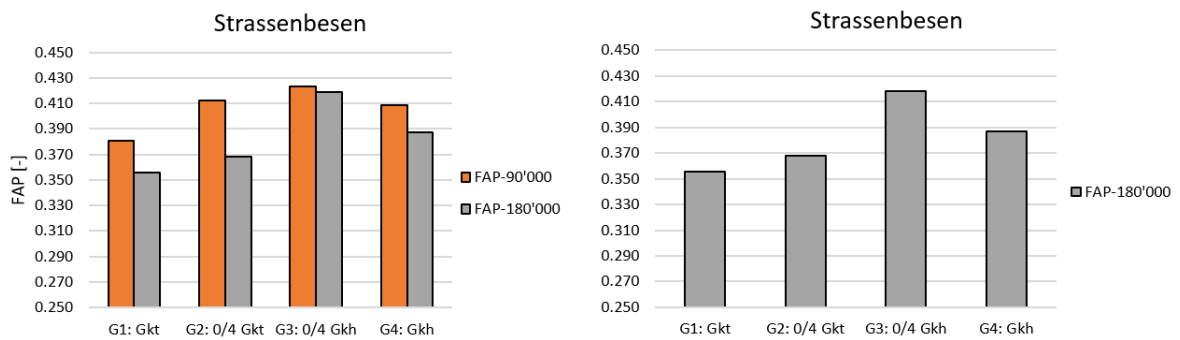


Abbildung 49: Entwicklung des FAP-Wertes für die 4 untersuchten Mischungen.

Schlussfolgerungen:

- Sowohl beim Stroh- wie auch beim Strassenbesen haben die Gesteinskörnungen einen entscheidenden Einfluss auf die Endgriffigkeit.
- Es ist davon auszugehen, dass die Textur des Besenstriches – unabhängig von der Zusammensetzung des Betons – abgefahren wird.
- Die nach der Polierung der Besenstrich-Textur verbleibende Griffigkeit ist von der Zusammensetzung des Betons, insbesondere dessen Gesteinskörnungen, abhängig.
- Auch beim G-Beton 22 spielt der Polierwiderstand der Korngruppe 0/4 eine dominante Rolle.

7 Wehner/Schulze-Validierung: Ringversuch

7.1 Einführung

Zur Validierung der Methode wurde ein Ringversuch unter Beteiligung von fünf Laboratorien – incl. IMP – mit einer Wehner/Schulze-Maschine desselben Herstellers durchgeführt.

Für die Validierung der Methode wurde eine besonders homogene Provenienz (Nr. 6) ausgewählt, die hauptsächlich aus Quarzsandstein besteht. Für jedes beteiligte Labor wurden drei verschiedene Proben nach der Mastix-Methode hergestellt: 2/4, 4/8, 8/11. Um möglichst homogene Proben zu erhalten, wurden sie von ein und derselben Person aufbereitet und sandgestrahlt.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 50 zusammengefasst. Wie bereits bei den vorangegangenen Wehner/Schulze-Prüfungen festgestellt, steigt der Reibungskoeffizient in der Reihenfolge der Körnungen 8/11, 4/8 hinzu 2/4. Innerhalb dieses Ringversuches fanden wir, dass die Standardabweichung im besten Fall ± 0.015 und im ungünstigsten Fall ± 0.048 beträgt.

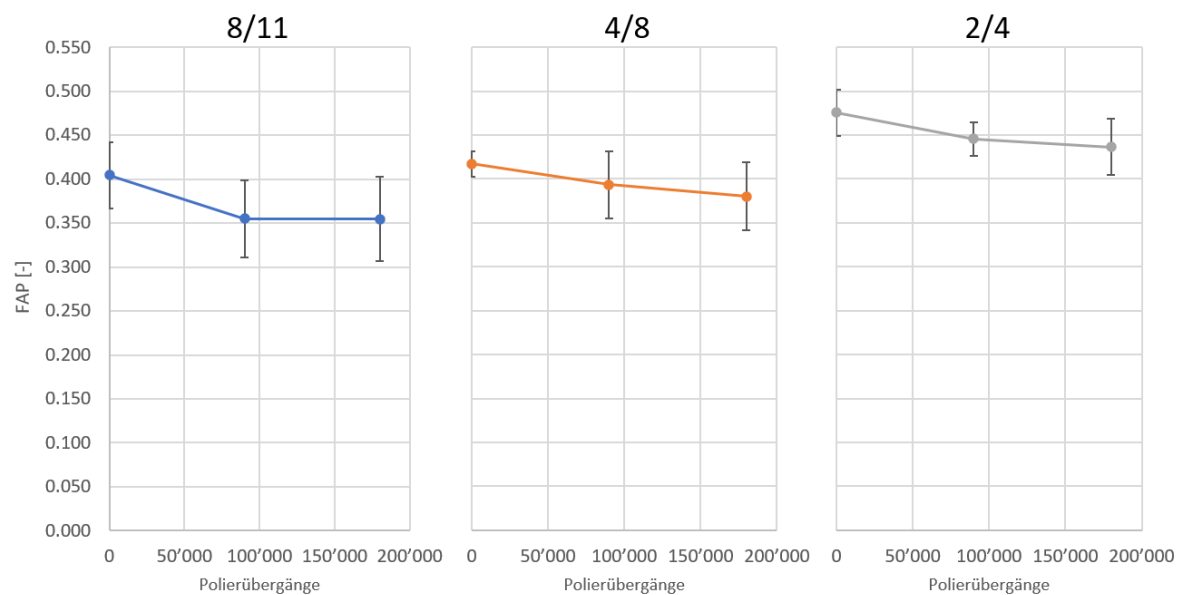


Abbildung 50: Darstellung der Ergebnisse (Mastix-Proben) des Ringversuches mit insgesamt 5 Laboratorien.

Wir sind uns bewusst, dass es für eine statistische Auswertung zur Bestimmung der Vergleichspräzision, eine breitere Datenbasis braucht. Leider fand während der Projektdauer keine international organisierte Vergleichsuntersuchung statt; wir konnten lediglich 4 weitere Prüfstellen in Irland, Spanien, Italien und Frankreich miteinbeziehen.

8 Schlussfolgerungen

8.1 Bewertungshintergrund

- Die Methode zur Prüfkörperherstellung sowie zur Durchführung der Bestimmung des Polierwiderstandes wurden analysiert und präzisiert. Als Methode zur Herstellung der Prüfkörper wird dem Mastix-Verfahren der Vorrang gegeben. Die Anzahl erforderlicher Polierübergänge wird für Routine-Untersuchungen auf 90'000 festgelegt.
- Für die Fraktion 8/11 konnte eine befriedigende Korrelation zwischen dem PWS (Wehner/Schulze) und dem PSV festgestellt werden.
- Die Unterschiede im Polierwiderstand zwischen den einzelnen Fraktionen kann je nach Provenienz sehr unterschiedlich sein. Daraus kann gefolgert werden, dass die Ergebnisse der Prüfung des Polierwiderstandes an einer Fraktion nicht auf andere Fraktionen übertragen werden können. Dies bedeutet, dass die PSV-Werte (an der Fraktion 8/11 bestimmt), keinen zuverlässigen Hinweis auf den Polierwiderstand anderer Fraktionen sein können.
- Auf der Basis der durchgeführten Untersuchungen konnten provisorische Anforderungen für die Fraktionen 2/4, 4/8 und 8/11 vorgeschlagen werden.
- Es wird festgehalten, dass die provisorischen Anforderungen auf der Untersuchung von lediglich 10 verschiedenen Gesteinskörnungen basiert. Hierzu besteht ein erheblicher Bedarf an weiteren, grossflächig angelegten Untersuchungen zur breiteren Abstützung des Bewertungshintergrund.
- Die vorliegende Arbeit hat ein Modell vorgeschlagen, mit welchem die Anforderungen an den Polierwiderstand von Gesteinskörnungen festgelegt werden kann.

8.2 Akustik

- Die für die akustischen Eigenschaften wichtigen Parameter: mittlere Profiltiefe (MPD), Gestaltfaktor (G-Faktor) und Lambda-Wert (λR_{\max}), erfahren nach einer gewissen Einlaufzeit keine wesentlichen Änderungen mehr. Es kann dann von einem eher unveränderten akustischen Verhalten ausgegangen werden.

8.3 Rezeptoptimierung

Generell ist festzustellen, dass die Unterschiede in den gemessenen Griffigkeiten der verschiedenen Deckschichten nach der Polierung sehr gross sind. Dies unterstreicht die grosse Bedeutung der Polierbarkeit der Gesteinskörnungen hinsichtlich der Griffigkeit von Deckschichten.

Die gemessenen Werte der Griffigkeit nach der Polierung (FAP Friction after Polishing) der Asphaltproben können im vorliegenden Bericht nicht direkt mit denjenigen der Betonproben verglichen werden, da bei der Messung aus diversen Gründen (siehe Kapitel 4.2.1.) unterschiedliche Auswerteverfahren gewählt wurden. Dies tangiert den relativen Vergleich zwischen den Proben innerhalb einer Belagssorte nicht.

8.3.1 Asphalt

- Der AC MR 8 hat im Allgemeinen eine höhere Griffigkeit als ein AC 8 S, was auf die unterschiedliche Oberfläche zurückzuführen ist; ein AC MR ist per Definition rauer und hat eine deutlich grössere Rautiefe.
- Der Unterschied zwischen dem tiefsten und höchsten Wert der Endgriffigkeit ist beim AC mit 0.187 grösser als beim AC MR mit 0.140. Dies untermauert das erfolgreiche Konzept des AC MR hinsichtlich der Griffigkeit. Offenbar fängt die Korngrössenverteilung einen Teil des Einflusses der Polierbarkeit der Gesteinskörnungen auf.
- Beim AC 8 ist die Korngruppe 0/4 entscheidend für die Griffigkeit der Deckschicht; beim AC MR 8 hat die Korngruppe 4/8 einen dominanten Einfluss. Allgemein kann ausgesagt werden, dass diejenige Korngruppe, welche den grössten Anteil an der Zusammensetzung hat, entscheidend ist, unabhängig vom Grösstkorn der Korngruppe.

8.3.2 Beton

Waschbeton:

- Der Abfall der Griffigkeit durch das Polieren ist erwartungsgemäss bei der Probe, welche zu 100 % aus polierfähigem Gestein besteht, deutlich grösser als bei den übrigen 3 Proben mit unterschiedlichen Anteilen an polierresistentem Gestein.
- Da die Korngruppe 4/8 in der Mischung Waschbeton 8 dominierend ist, ist sie auch die wichtigste Komponente in Bezug auf die Griffigkeit. Dies erklärt, warum die Mischung K3 (4/8 aus GK_h) höhere Werte aufweist als die Mischung K2 (4/8 aus GK_t).
- Offenbar kann bereits mit einem relativ geringen Anteil an polierresistenten Gesteinskörnungen viel erreicht werden, denn die drei Mischungen K2, K3 und K4 heben sich deutlich von der Mischung (K1) ab welche zu 100 % aus ungeeignetem Material besteht.

Beton mit Besenstrich:

- Sowohl beim Stroh- wie auch beim Strassenbesen haben die Gesteinskörnungen einen entscheidenden Einfluss auf die Endgriffigkeit
- Es ist davon auszugehen, dass die Textur des Besenstriches – unabhängig von der Zusammensetzung des Betons abgefahren wird.
- Die nach der Polierung der Besenstrich-Textur verbleibende Griffigkeit ist von der Zusammensetzung des Betons abhängig.
- Auch beim G-Beton 22 spielt der Polierwiderstand der Korngruppe 0/4 eine dominante Rolle.

9 Weiterer Forschungsbedarf

Untenstehend wird der allfällige weitere Forschungsbedarf für die drei Teilprojekte aufgeführt und darüberhinausgehende Themen erwähnt:

Anforderungen an die Gesteinskörnungen

In der Arbeit konnten bisherige Erfahrungen, wonach die heutige Prüfmethode zur Beurteilung der Polierbarkeit von Gesteinskörnungen in mehrfacher Hinsicht nicht befriedigt, weiter erhärtet werden. Zudem konnte aufgezeigt werden, dass mit der Prüfmethode nach Wehner Schulze ein taugliches Instrument zur Verfügung steht, um die bestehende Lücke zu schliessen. Es wurde aufgezeigt, wie Anforderungswerte definiert werden könnten.

Was zurzeit fehlt, ist ein breit abgestützter Bewertungshintergrund der schweizerischen Gesteinskörnungen. Hierzu wären Reihenuntersuchungen erforderlich, um Anforderungswerte auf der Basis eines robusteren Datenkollektivs festlegen zu können. Es ist auch zu prüfen, ob Anforderungen an Sekundärsplitt definiert werden sollen.

Akustik

Die durchgeführten Arbeiten haben gezeigt, dass die Polierung der Oberfläche von Deckschichten zwar deren Griffigkeit beeinflusst, hingegen auf die akustischen Eigenschaften keinen nennenswerten Einfluss ausübt.

Somit wurde die offene Frage beantwortet. In Bezug auf lärmarme Beläge gibt es allgemein einen erheblichen Forschungsbedarf; in Bezug auf die Thematik Polierbarkeit / Akustik sehen wir jedoch keinen weiteren Forschungsbedarf.

Optimierung von Rezepturen

Anforderungen an die Griffigkeit von Asphalt- und Beton-Deckschichten

Die Arbeit hat aufgezeigt, dass auch bei den in der Schweiz verwendeten Deckschichten mit einer geschickten Wahl der Gesteinskörnungen gute Griffigkeiten erreicht werden können. Dabei können auch Gesteinskörnungen verwendet werden, welche die heutigen Anforderungen (in Bezug auf den Polierwiderstand) nicht erfüllen.

Die heutigen Normen schreiben die Eigenschaften der einzelnen Komponenten vor, ohne sich um das Endergebnis der Deckschicht zu kümmern. Im Sinne von leistungsorientierten Anforderungen würden Anforderungen an die Griffigkeit des fertig eingebauten Belages einen zukunftssträchtigen Schritt bedeuten. Möglicherweise könnte dies zu Anforderungen im Rahmen von Erstprüfungen führen.

Bei Deckschichten wird der Anteil RAP aus Gründen der Griffigkeit niedrig gehalten. Hinsichtlich der Kreislaufwirtschaft wäre es wünschenswert auch bei Deckschichten höhere Anteile an RAP zu ermöglichen. Mit Griffigkeitsanforderungen an den fertig aufbereiteten Asphalt wäre dies möglich.

Weiterer Forschungsbedarf

Prognosemodell

Das angewendete Prognosemodell wurde auf der Basis ausländischer Bedingungen (oft SMA-Deckschichten) entwickelt. Es wäre dringend erforderlich, das Prognosemodell hinsichtlich folgender Punkte zu überprüfen:

- Besteht auch für SDA, AC MR, MA, Waschbeton etc. ein Zusammenhang zwischen der im Labor erstellten Prognose der Griffigkeitsentwicklung und der tatsächlich gemessenen Griffigkeit in situ?
- Verhalten sich die unterschiedlichen Mischgutsorten im Prognosemodell ähnlich oder müsste das Modell mischgutspezifisch angepasst werden?
- Welchen Einfluss hat der Anteil an Schwerverkehr (LW) bei der Entwicklung der Griffigkeit? Wie kann dieser Einfluss im Prognosemodell berücksichtigt werden?
- Kann das Prognosemodell im Rahmen von Erstprüfungen verwendet werden?

Einfluss der Witterung auf die Griffigkeit

Die Umwelteinflüsse wie Witterung bleiben bei der Wehner/Schulze-Prüfung unberücksichtigt, obwohl bekannt ist, dass (saurer) Regen, Frost und UV-Strahlung die Griffigkeit beeinflussen; es stellen sich folgende Fragen:

- Kann das Potential einer Gesteinskörnung die Griffigkeit durch Witterungseinflüsse wieder ansteigen zu lassen quantifiziert werden?
- Haben die in der Schweiz vorkommenden, verschiedenen klimatischen Bedingungen unterschiedliche Auswirkungen auf die Entwicklung der Griffigkeit im Verlaufe der Nutzungsdauer?
- Sind die schlechteren Griffigkeitswerte in Tunnels ausschliesslich auf die fehlende Bewitterung zurückzuführen oder gibt es weitere Gründe?
- Kann ein ungünstiger Polierwiderstand einer Gesteinskörnung in Kauf genommen werden, falls die Gesteinskörner durch Witterungseinflüsse wieder aufgeraut werden?

10 Literaturverzeichnis

- [1] SN-EN 1097-8 (2020). *Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen; Teil 8: Bestimmung des Polierwertes*. FGSV.
- [2] Angst, Ch., Bürgisser, Ph. (2011). *Forschungspaket «Poligrip – Einfluss der Polierbarkeit von Gesteinskörnungen auf die Deckschichten – Initialprojekt*. Forschungsprojekt VSS 2011/401,2013.
- [3] SN-EN 12697-49 (2022). *Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 49: Messung der Griffigkeit nach Polierung*. FGSV.
- [4] TP Gestein-StB. Teil 5.4.2 (2020). *Bestimmung des Polierwertes von feinen Gesteinskörnungen mit dem Prüfverfahren Wehner/Schulze*. FGSV.
- [5] TP Gestein-StB. Teil 5.4.4 (2020). *Bestimmung des Polierwertes von groben Gesteinskörnungen mit dem Prüfverfahren Wehner/Schulze*. FGSV.
- [6] Humm, W., Junker, J., Neubauer, O. (1989). *Polierwiderstand von Mineralstoffen*. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Forschungsarbeit 10/86.
- [7] Dudenhöfer, B., Rückert, P. (2016). *Bewertungshintergrund für den Widerstand gegen Polieren von Gesteinskörnungen nach dem PWS-Verfahren*. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen, Heft S 96.
- [8] Senatsverwaltung für Bau- und Wohnungswesen (1996). *Ausführungsvorschriften zu § 7 des Berliner Strassengesetzes über Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Strassenbau*. Einführung TL Min-StB 94.
- [9] RSV 08.97.05 (2010). *Technische Vertragsbedingungen. Baustoffe. Anforderungen an Asphaltmischgut*. Forschungsgesellschaft Strasse - Schiene - Verkehr FSV.
- [10] RSV 08.17.02 (2011). *Technische Vertragsbedingungen. Betondecken. Deckenherstellung*. Forschungsgesellschaft Strasse - Schiene - Verkehr FSV.
- [11] Patzak, M. (2018). *Möglichkeiten der Optimierung des Wehner/Schulze-Verfahrens zur Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Asphalten*. Dissertation der TU München.

- [12] Wehner, B. (1965). *Ergebnisse von Griffigkeitsmessungen und Verkehrssicherheit*. Strasse und Autobahn, Nr. 8/1965, Bad Godesberg, S. 266-268.
- [13] Kirchmaier, L. (2011). *Einfluss feiner Gesteinskörnungen auf die Griffigkeit von Deckschichten im Strassenbau*. Dissertation TU Wien.
- [14] Pfeifer, A. (2004). *Erhöhung der Griffigkeit von Asphaltstrassen. Der Einfluss der Polierresistenz feiner Gesteinskörnung auf das Griffigkeitsverhalten von Asphaltdeckschichten*. Dissertation TU Wien.
- [15] Angst, C., Beltzung, F., Bosshard, H.-J., Pestalozzi, H. (2007). *Lärmarme Strassenbeläge innerorts*. Schlussbericht, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Strassen (ASTRA).
- [16] Rohleder, M., Kunz, K., Wasser, B., Pullwitt, E., Müller, I., Ripke, O., Zöller, M., Pöppel-Decker, M. (2010). *Griffigkeitsprognosen an offenporigen Asphalten (OPA) – Teil 1: Bestandesaufnahme an vorhandenen Strecken*. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen (BASt). Strassenbau, Heft 64.
- [17] Kuijper, P.M. (2010). *Validation of the Wehner/Schulzetest*. Delft: Centre for Transport and Navigation.
- [18] Allen, B., Phillips, P., Woodward, D., Woodside, A. (2013). *Prediction of UK surfacing skid resistance using Wehner-Schulze and PSV*. Airfield and Highway Pavement.
- [19] Kugler, H., Hofko, B., Spielhofer, R., Ganchev, G. (2017). *Griffigkeitsprognose von Autobahnen – das «Wiener Modell»*. Strasse und Autobahn, 68. Jahrgang, Heft 1/2017, Kirschbaum Verlag Bonn.
- [20] Rauschenbach, V., Borek, J. (2010). *Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 14937BR/1 Griffigkeit ausgewählter Beobachtungsstrecken im Freistaat Sachsen in Abhängigkeit der Zeit*. Zentrum für angewandte Forschung und Technik e.V. an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden.
- [21] Arampamoorthy, H., Patrik, J. (2011). *Potential of the Wehner-Schulze test to predict the on-road friction performance of aggregate*. NZ Transport Agency research report 433.
- [22] EN 13043:2002 / AC 2004 (2004). *Gesteinskörnungen für Asphalte und Oberflächenbehandlungen für Strassen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen*. BSI.
- [23] EN 12620:2002 / A1:2008 (2008). *Gesteinskörnungen für Beton*. VSS.

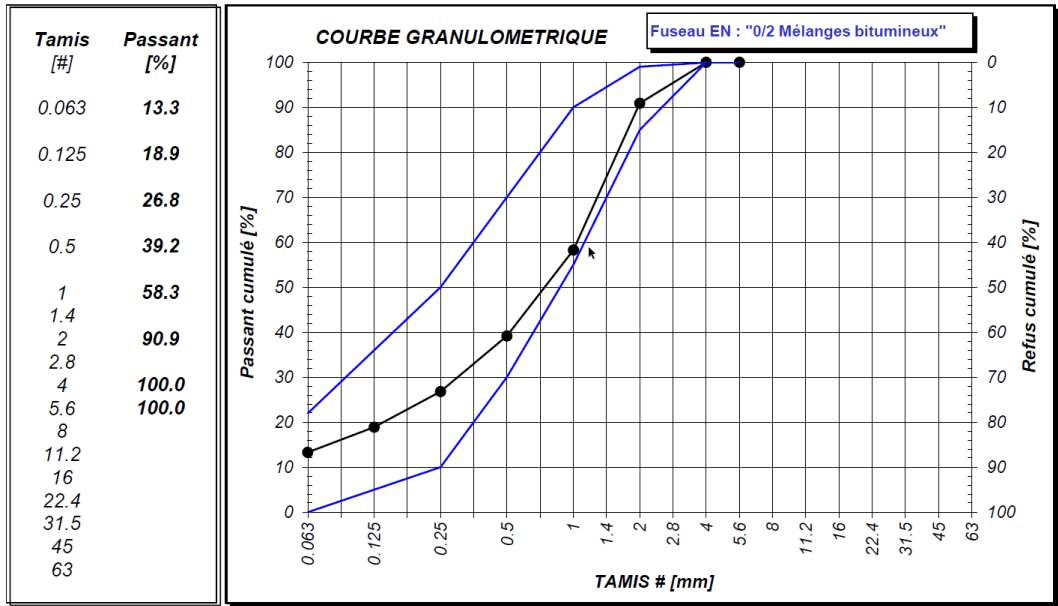
- [24] Angst, Ch., Bürgisser, Ph., Beckenbauer, Th. (2016). *Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP 2: Labortechnische Bestimmung der Dauerhaftigkeit lärmarmen Beläge*. Forschungsprojekt ASTRA 2010/011.
- [25] Beckenbauer, Th., Belcher, D., Kneib, G., Angst, Ch. (2016). *Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP 4: Labormethoden für die Bestimmung akustischer Eigenschaften lärmarmen Beläge*. Forschungsprojekt ASTRA 2010/013.
- [26] Kuijpers, A., Peeters, B., Kropp, W., Beckenbauer, Th. (2008). *Acoustic Optimization Tool. RE4 – Modelling refinements in the SPERoN framework*. Rep. M+P.
- [27] EMPA (1987). *Computermodell zur Berechnung von Strassenlärm*. Bern: Bundesamt für Umweltschutz.
- [28] Spengler, A., Skarabis, J., Gehlen, C. (2015). *Simulation der Beanspruchung von Betonfahrdecken*. TU München, Centrum für Baustoffe und Materialprüfung (cbm) Forschungsauftrag, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- [29] Leiser Strassenverkehr 2 (2010). *Leiser Strassenverkehr 2 – Gemeinsamer Schlussbericht*. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen (BASt).
- [30] Beckenbauer, T., Spiegler, P. (2001). *Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch*. Bundesministerium für Verkehr Bonn.
- [31] ASTRA (2024). *21001 Fachhandbuch Trasse / Umwelt*. Bundesamt für Strassen ASTRA.
- [32] Röthlisberger, F. (2018). *Bewertungshintergrund für den Widerstand gegen Polieren; Teil 2 Petrografie; Strasse und Autobahn*.
- [33] Sandberg, U., Eismont, J.A. (2002). *Tyre/Roa Noise Reference Book*; ISBN 13: 9789163126109.

11 Anhänge

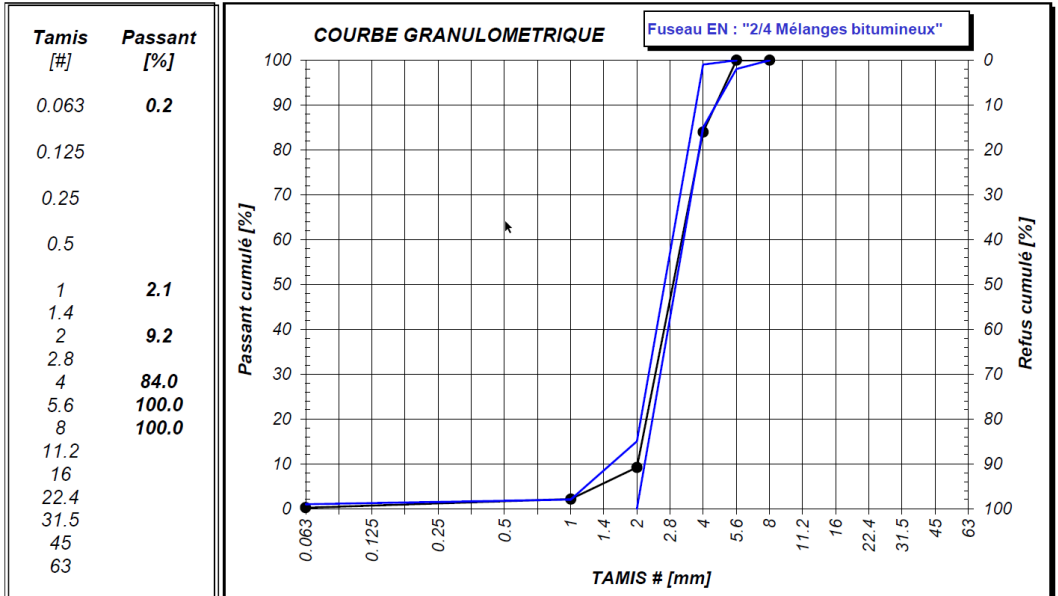
11.1 Gesteinskörnungen

Provenienz 1

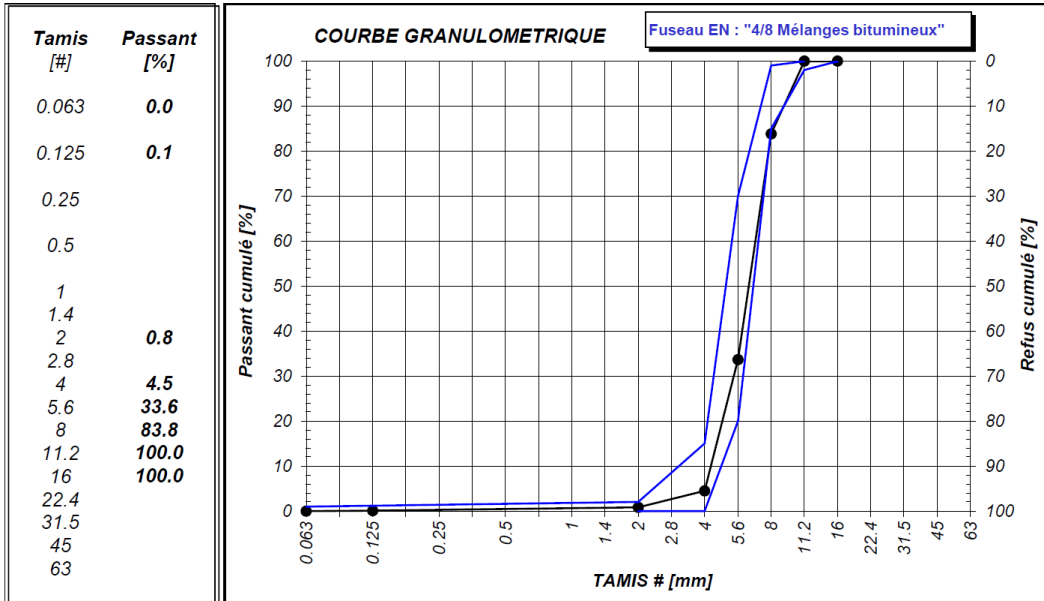
0/2



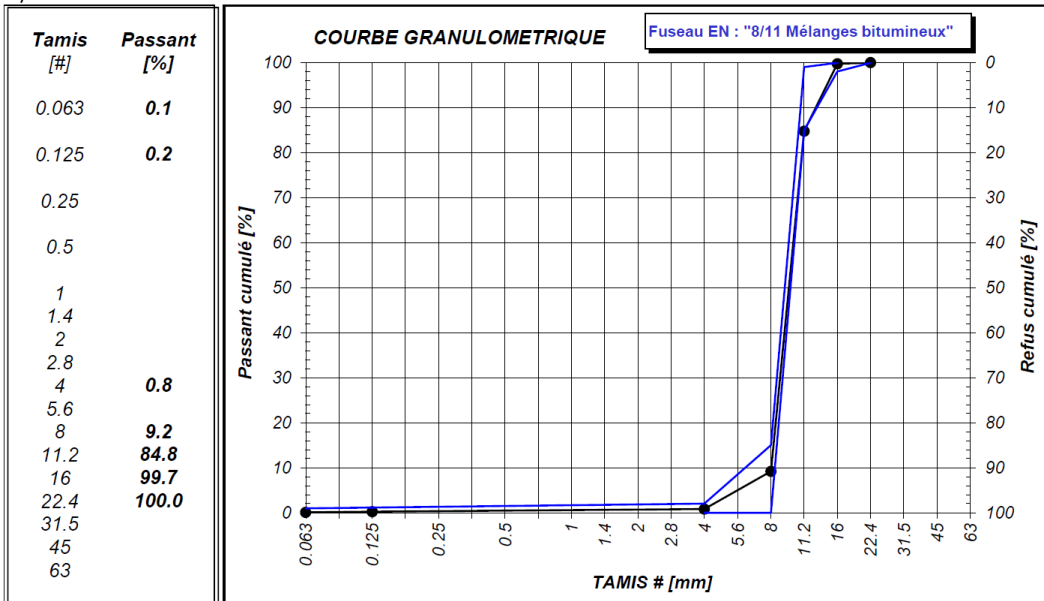
2/4



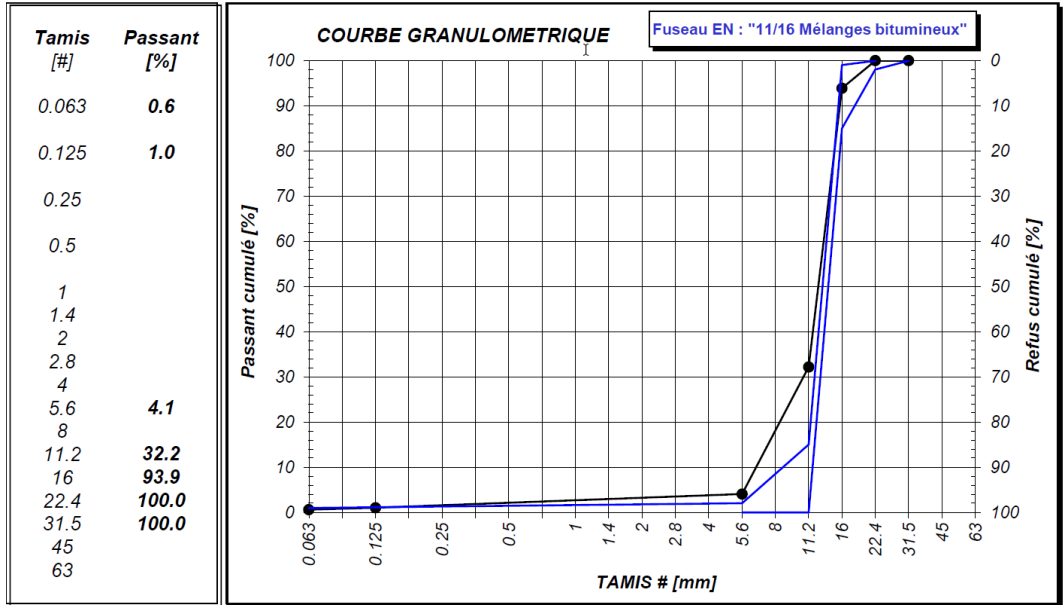
4/8



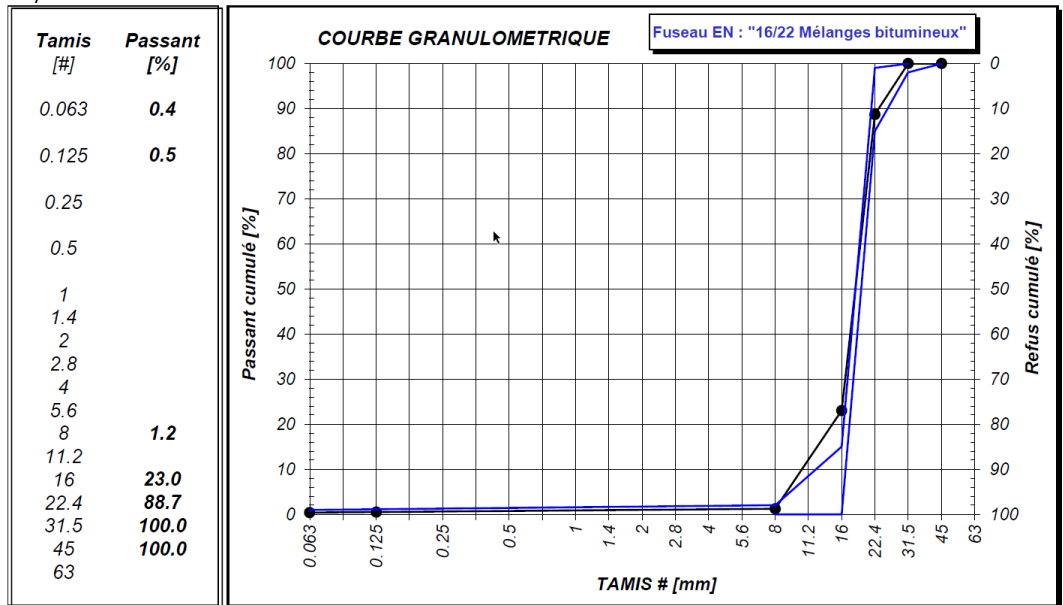
8/11



11/16

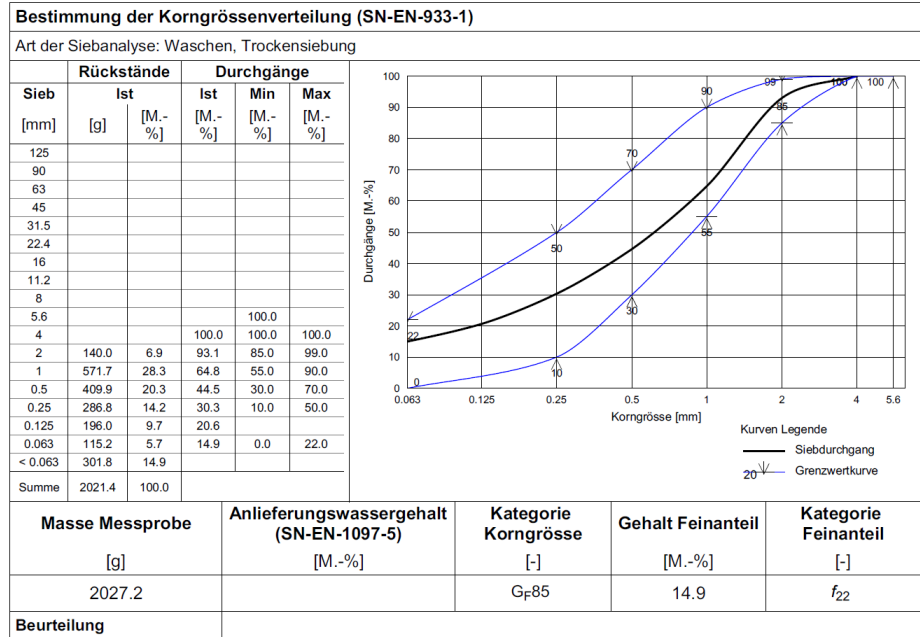


16/22

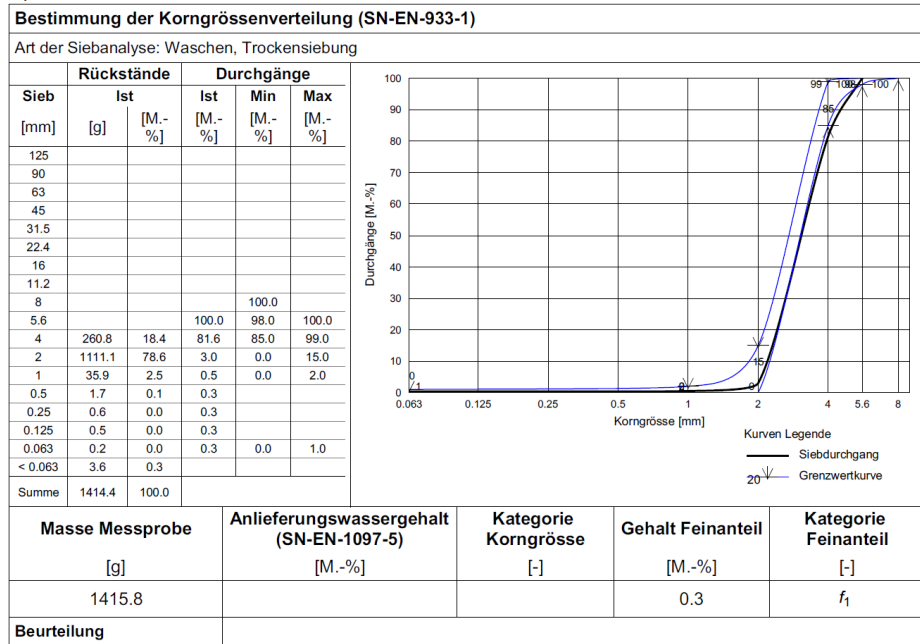


Provenienz 2

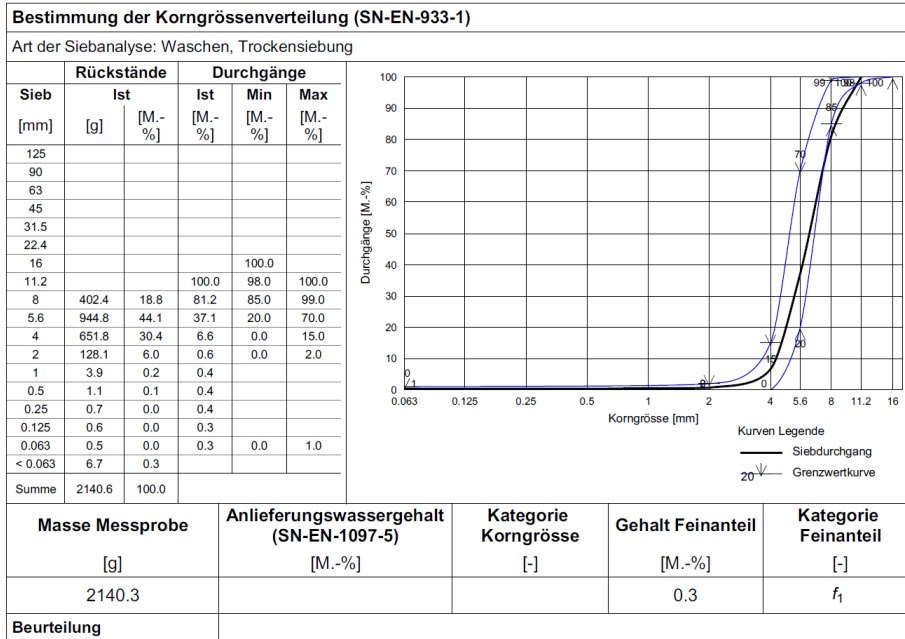
0/2



2/4

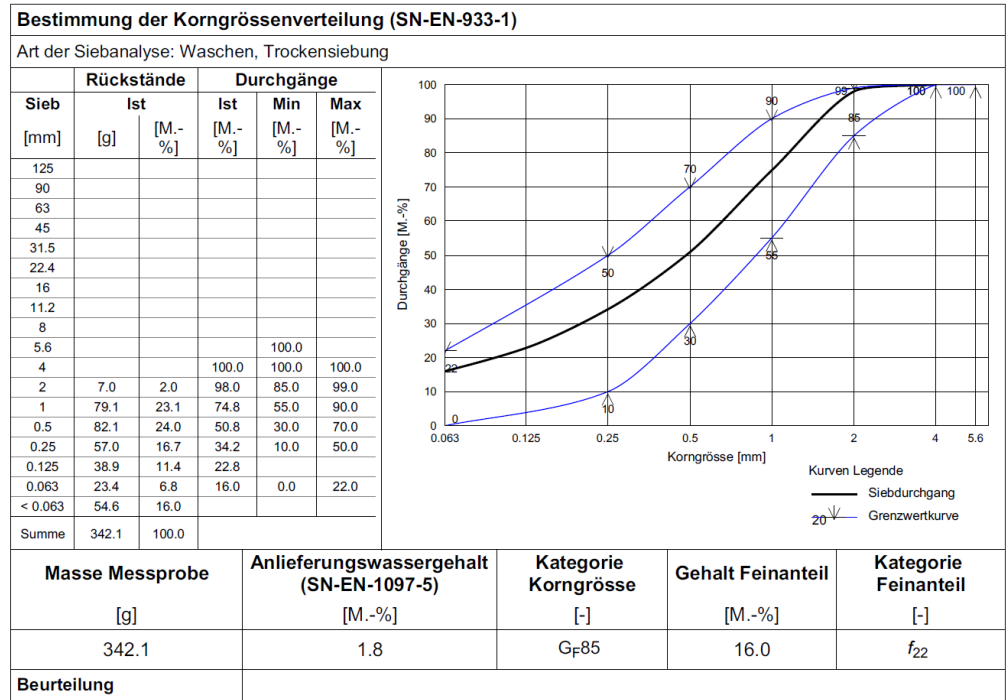


4/8

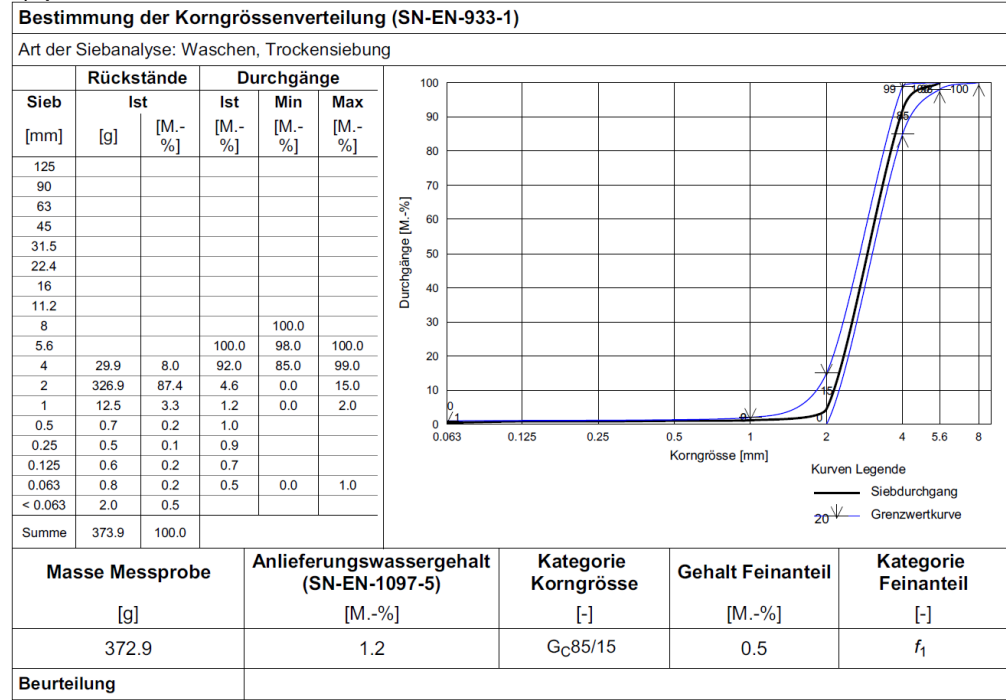


Provenienz 3

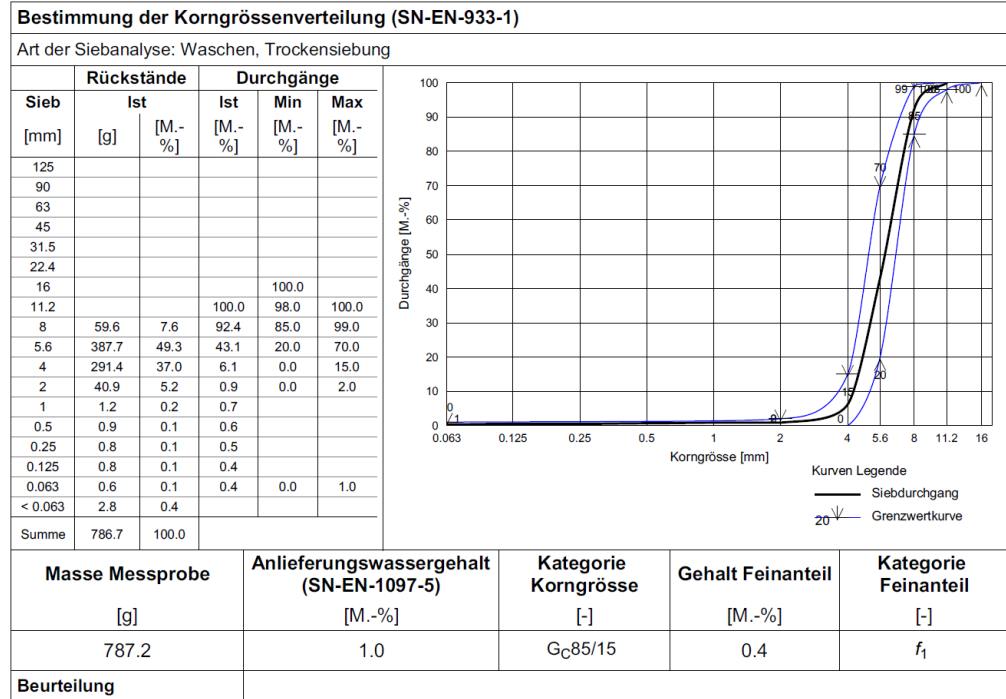
0/2



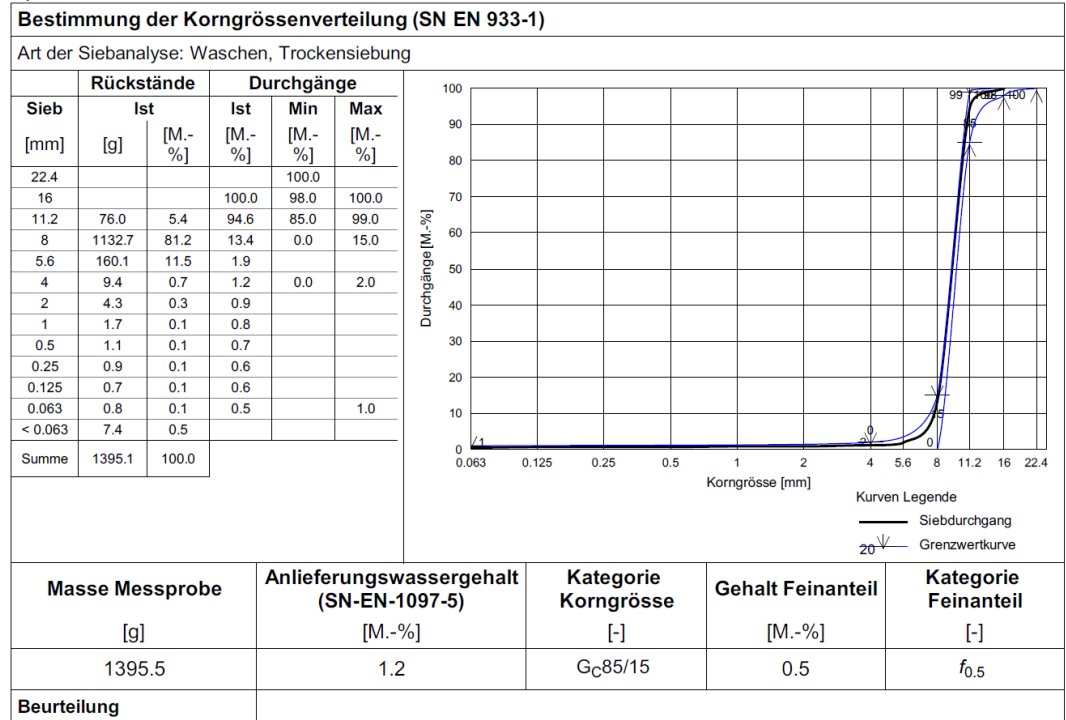
2/4



4/8

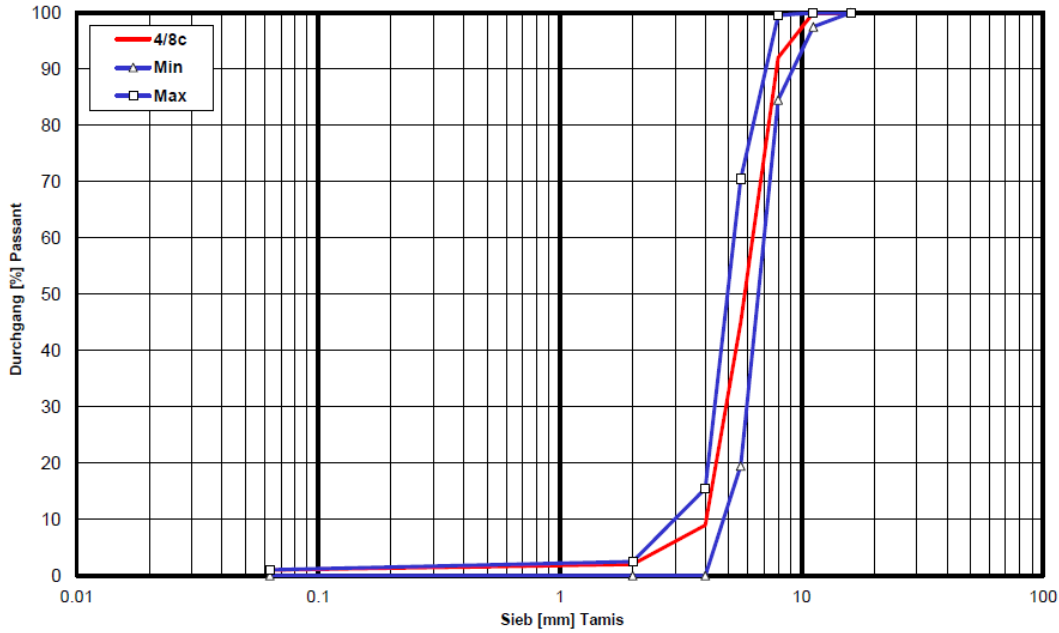


8/11



Provenienz 7

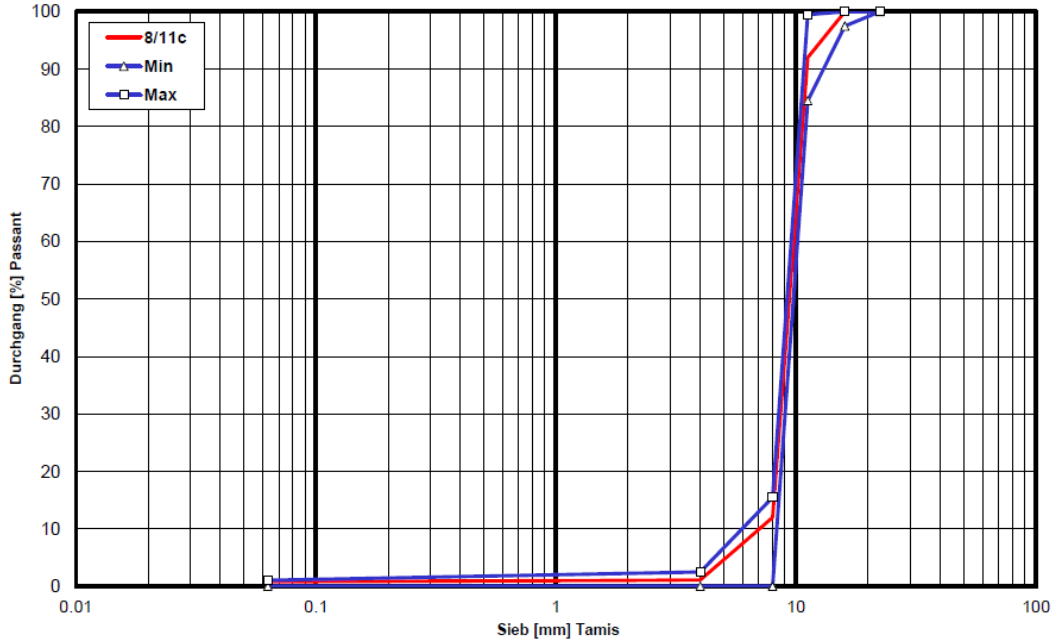
4/8



Tamis [mm]	0.063	2	4	5.6	8	11.2	16
Passant [%]	1.0	2.0	9.0	45	92	100	100
Min	0	0	0	20	85	98	100
Max	1	2	15	70	99	100	100

SN EN 933-1

8/11

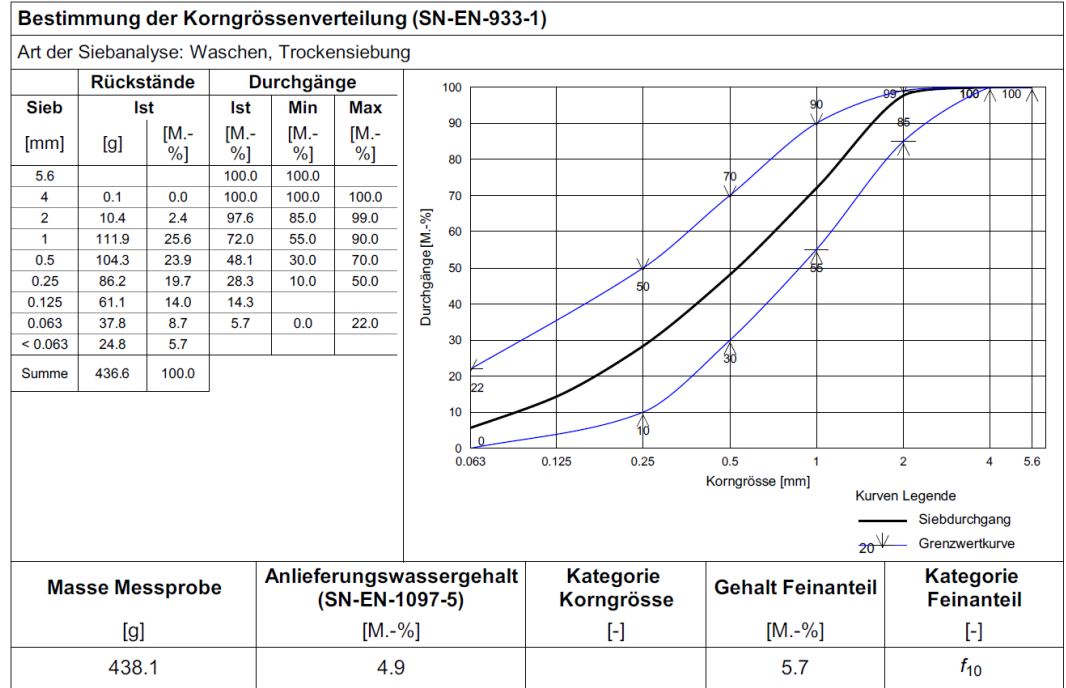


Tamis [mm]	0.063	4	8	11.2	16	22.4
Passant [%]	0.8	1.1	12	92	100	100
Min	0	0	0	85	98	100
Max	1	2	15	99	100	100

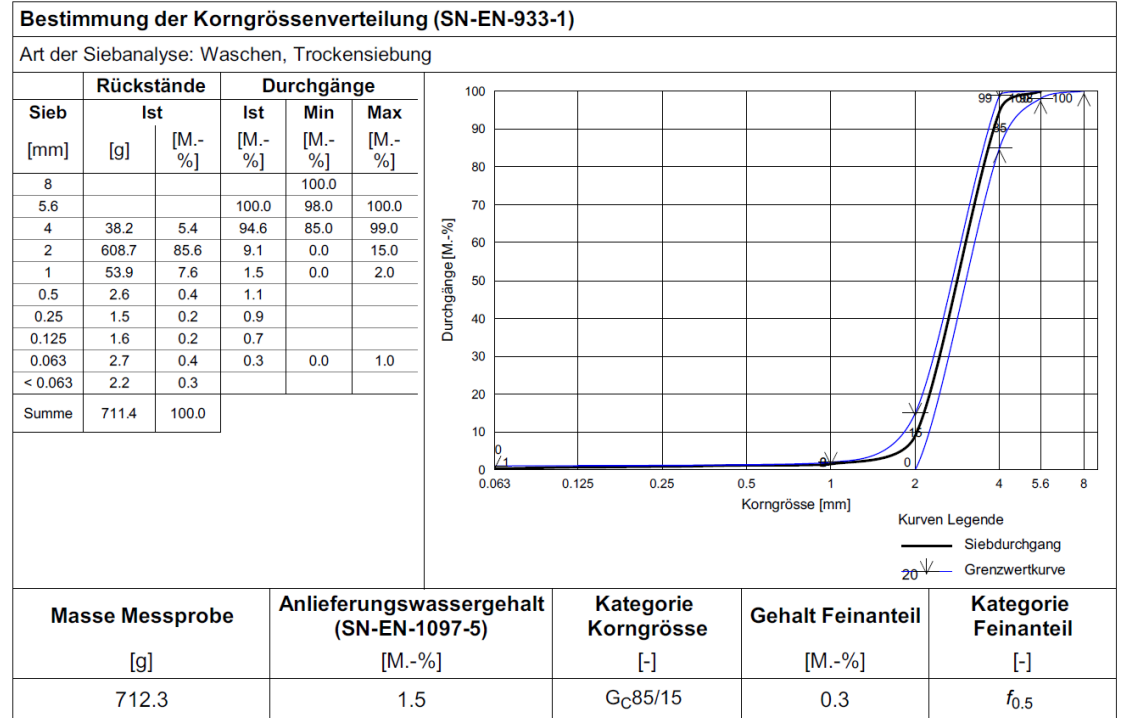
SN EN 933-1

Provenienz 8 - GK_h

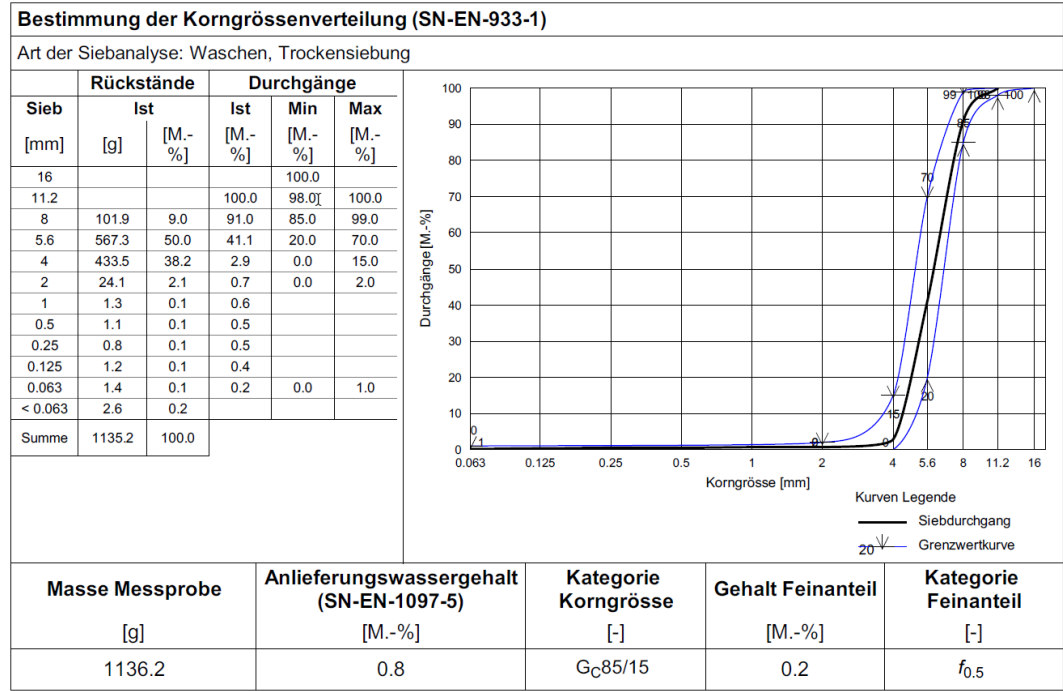
0/2



2/4

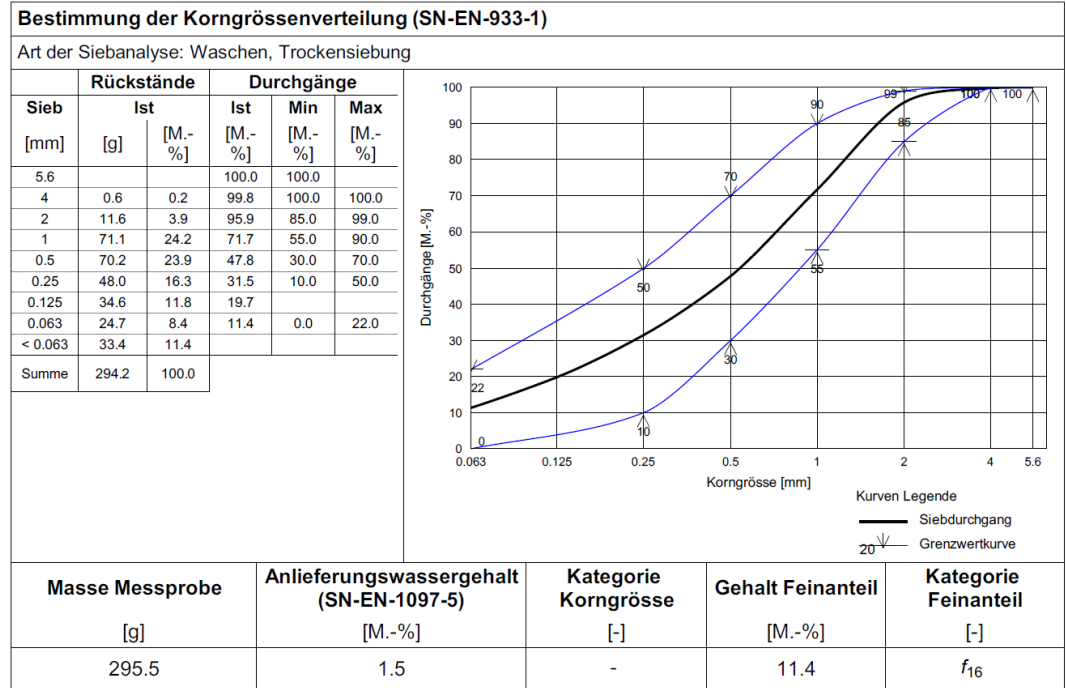


4/8

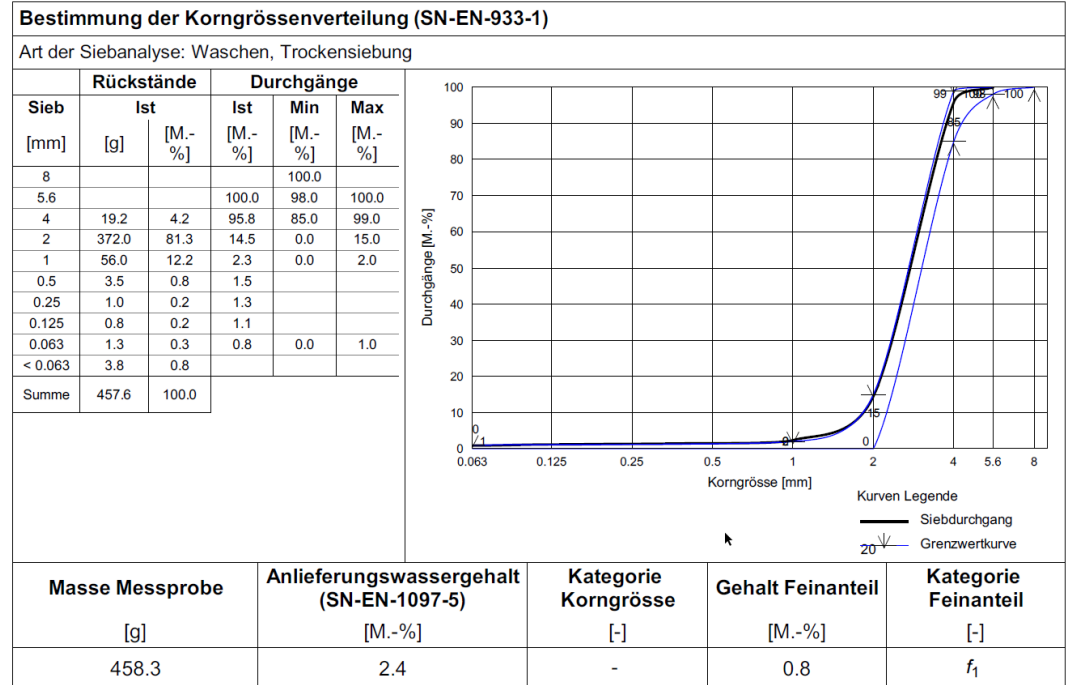


Provenienz 10 - GKt

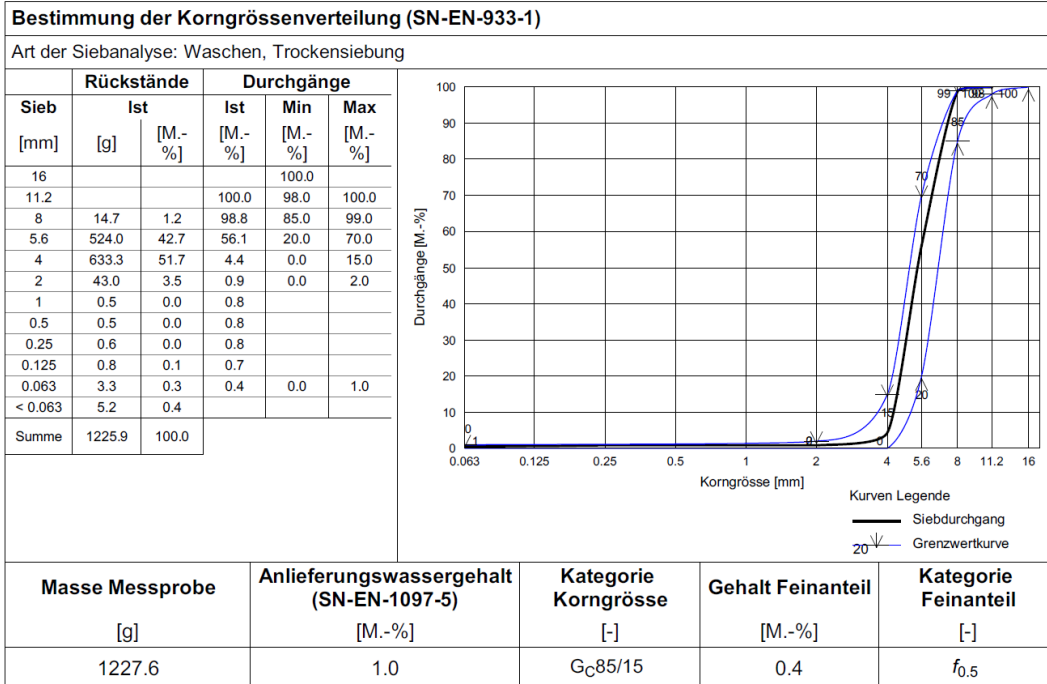
0/2



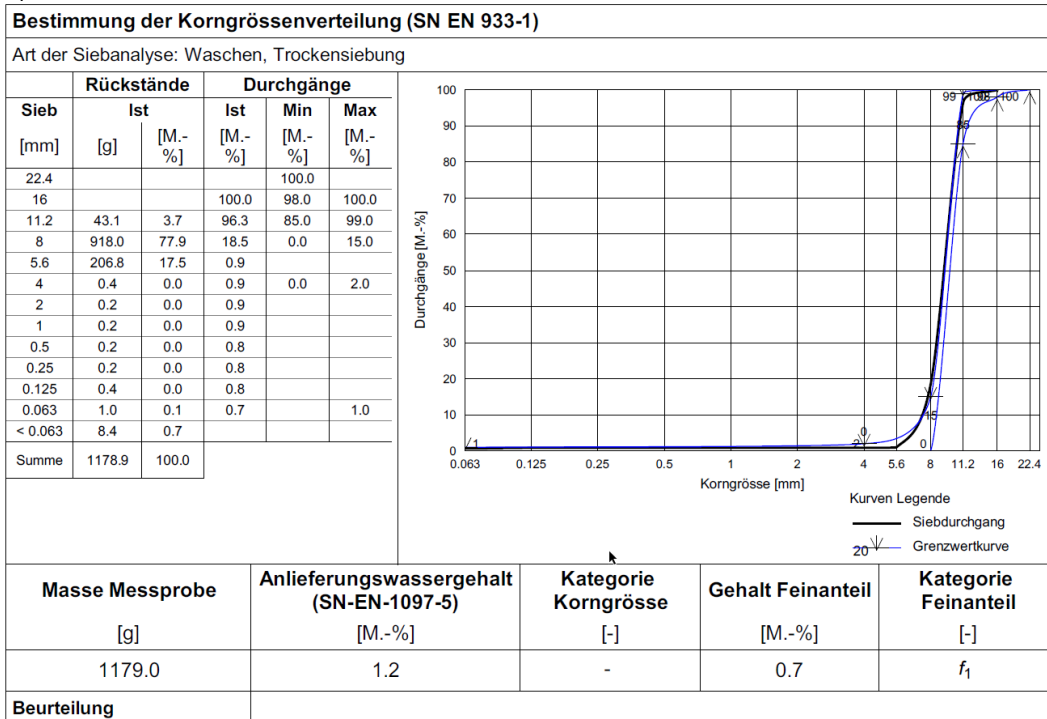
2/4



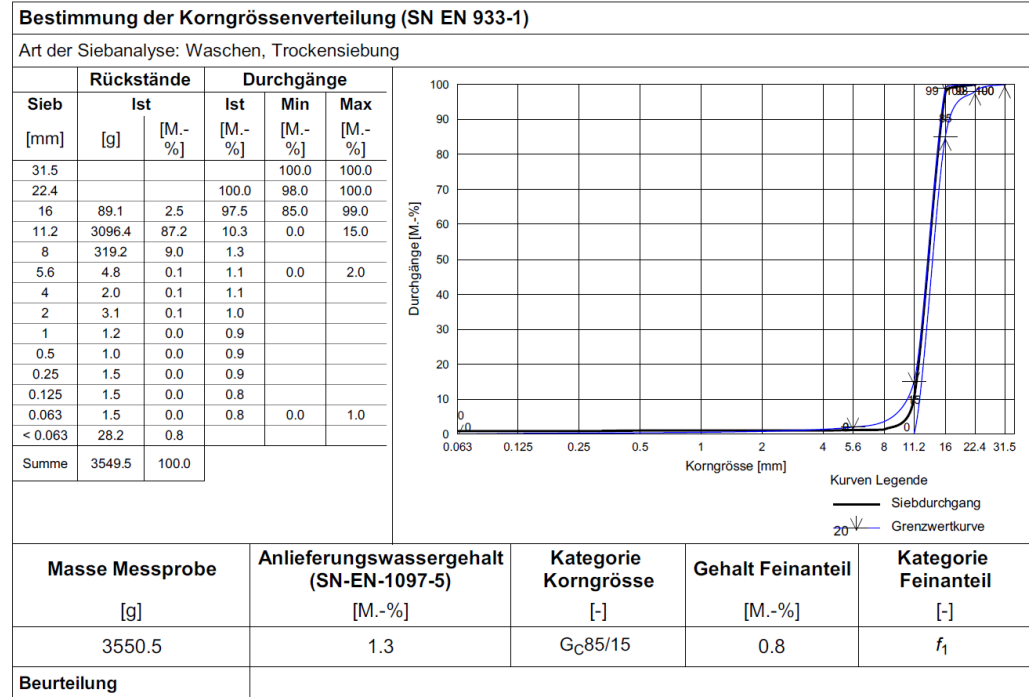
4/8



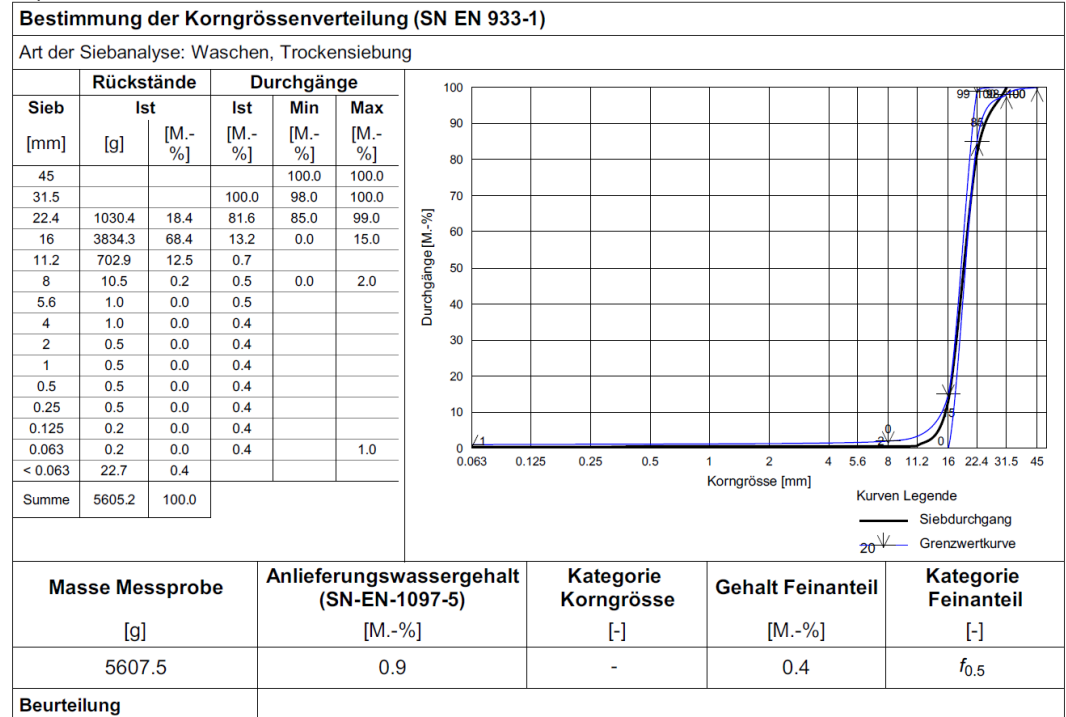
8/11



11/16



16/22



11.2 Asphaltmischungen Kapitel 2

SDA 8-12 GKk

Bindemittel		Einheit	Ergebnis	Sollwert gem. EP	Bereich der zul. Abweichung	unzulässige Abweichung
Löslicher Bindemittelgehalt	SN-EN-12697-1	[M.-%]	5.71		min. 5.4	
Nadelpenetration	SN-EN-1426	[1/10mm]				
Erweichungspunkt Ring und Kugel	SN-EN-1427	[°C]				
Penetrationsindex	SN-EN-12591	[-]				
Elastische Rückstellung	SN-EN-13398	[%]				
Module de Richesse	SN-EN-13108-1	[-]				
PAK in Asphalt	eigenes Verfahren	[mg/kg]				
Marshall-Versuch (SN-EN-12697-30; SN-EN-12697-34)			Mineralrohddichte [Mg/m³]:			
Stahlamboss 1)=bestimmt, Toluol, 25°C 2)=berechnet			Verdichtungstemperatur [°C]: 155.0			
Rohdichte Mischgut 1)	SN-EN-12697-5	[Mg/m³]	2.453			
Raumdichte	SN-EN-12697-6, Verfahren	[Mg/m³]	2.130			
Hohlraumgehalt Va	SN-EN-12697-8	[Vol.-%]	13.2		10.0 - 14.0	
Bindemittelausfüllungsgrad VFB	SN-EN-12697-8	[%]				
Marshall Stabilität S	SN-EN-12697-34	[kN]	9.2			
Marshall Fließwert F	SN-EN-12697-34	[mm]	2.6			
Tangentialer Fließwert Ft	SN-EN-12697-34	[mm]	1.0			
Marshall-Quotient S/F	SN-EN-12697-34	[kN/mm]	3.5			
Korngrößenverteilung SN-EN-12697-2		Sieb [mm]	Durchgang M.-%	Sollwerte M.-%	Bereich der zul. Abweichung M.-%	unzulässige Abweichung M.-%
Sollwertbereich der Korngrößenverteilung		45.0				
		31.5				
		22.4				
		16.0				
		11.2	100.0		min. 100.0	
		8.0	98.4		90.0 - 100.0	
		5.6	63.6		50.0 - 70.0	
		4.0	34.7		15.0 - 52.0	
		2.0	20.2		10.0 - 35.0	
		1.0	14.8		7.0 - 26.0	
		0.5	12.0		4.0 - 21.0	
		0.25	9.5			
		0.125	7.8			
		0.063	6.7		3.0 - 12.0	

SDA 8-12 GKt

Bindemittel		Einheit	Ergebnis	Sollwert gem. EP	Bereich der zul. Abweichung	unzulässige Abweichung
Löslicher Bindemittelgehalt	SN-EN-12697-1	[M.-%]	5.78		min. 5.4	
Nadelpenetration	SN-EN-1426	[1/10mm]				
Erweichungspunkt Ring und Kugel	SN-EN-1427	[°C]				
Penetrationsindex	SN-EN-12591	[-]				
Elastische Rückstellung	SN-EN-13398	[%]				
Module de Richesse	SN-EN-13108-1	[-]				
PAK in Asphalt	eigenes Verfahren	[mg/kg]				
Marshall-Versuch (SN-EN-12697-30; SN-EN-12697-34)			Mineralrohddichte [Mg/m³]:			
Stahlamboss 1)=bestimmt, Toluol, 25°C 2)=berechnet			Verdichtungstemperatur [°C]: 155.0			
Rohdichte Mischgut 1)	SN-EN-12697-5	[Mg/m³]	2.532			
Raumdichte	SN-EN-12697-6, Verfahren	[Mg/m³]	2.214			
Hohlraumgehalt Va	SN-EN-12697-8	[Vol.-%]	12.6		10.0 - 14.0	
Bindemittelausfüllungsgrad VFB	SN-EN-12697-8	[%]				
Marshall Stabilität S	SN-EN-12697-34	[kN]	8.9			
Marshall Fließwert F	SN-EN-12697-34	[mm]	2.2			
Tangentialer Fließwert Ft	SN-EN-12697-34	[mm]	0.9			
Marshall-Quotient S/F	SN-EN-12697-34	[kN/mm]	4.0			
Korngrößenverteilung SN-EN-12697-2		Sieb [mm]	Durchgang M.-%	Sollwerte M.-%	Bereich der zul. Abweichung M.-%	unzulässige Abweichung M.-%
Sollwertbereich der Korngrößenverteilung		45.0				
		31.5				
		22.4				
		16.0				
		11.2	100.0		min. 100.0	
		8.0	98.7		90.0 - 100.0	
		5.6	64.6		50.0 - 70.0	
		4.0	34.9		15.0 - 52.0	
		2.0	19.9		10.0 - 35.0	
		1.0	15.4		7.0 - 26.0	
		0.5	12.4		4.0 - 21.0	
		0.25	10.7			
		0.125	9.3			
		0.063	8.7		3.0 - 12.0	

SDA 4-12 GKh

Bindemittel		Einheit	Ergebnis	Sollwert gem. EP	Bereich der zul. Abweichung	unzulässige Abweichung	
Löslicher Bindemittelgehalt	SN-EN-12697-1	[M.-%]	6.10		min. 5.6		
Nadelpenetration	SN-EN-1426	[1/10mm]					
Erweichungspunkt Ring und Kugel	SN-EN-1427	[°C]					
Penetrationsindex	SN-EN-12591	[-]					
Elastische Rückstellung	SN-EN-13398	[%]					
Module de Richesse	SN-EN-13108-1	[-]					
PAK in Asphalt	eigenes Verfahren	[mg/kg]					
Marshall-Versuch (SN-EN-12697-30)				Mineralrohddichte [Mg/m³]: 2.812			
Stahlamboss		1)=bestimmt, Toluol, 25°C 2)=berechnet		Verdichtungstemperatur [°C]: 155.0			
Rohddichte Mischgut	1) SN-EN-12697-5	[g/cm³]	2.456				
Raumddichte	SN-EN-12697-6, Verfahren D	[g/cm³]	2.099				
Hohlraumgehalt	SN-EN-12697-8	[Vol.-%]	14.5		10.0 - 14.0		
Bindemittelausfüllungsgrad	SN-EN-12697-8	[%]					
Marshall Stabilität S	SN-EN-12697-34	[kN]	12.1				
Marshall Fließwert F	SN-EN-12697-34	[mm]	2.0				
Tangentiale Fließwert Ft	SN-EN-12697-34	[mm]	1.0				
Marshall-Quotient S/F	SN-EN-12697-34	[kN/mm]	6.1				
Korngrößenverteilung		SN-EN-12697-2	Sieb	Durchgang	Sollwerte	Bereich der zul. Abweichung	unzulässige Abweichung
Sollwertbereich der Korngrößenverteilung 		[mm]	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	
		45.0					
		31.5					
		22.4					
		16.0					
		11.2					
		8.0					
		5.6	100.0		min. 100.0		
		4.0	96.4		90.0 - 100.0		
		2.0	26.5		12.0 - 50.0		
		1.0	16.0		7.0 - 29.0		
		0.5	13.1		4.0 - 24.0		
		0.25	10.7				
0.125	9.0						
0.063	8.0		3.0 - 12.0				

SDA 4-12 GKt

Bindemittel		Einheit	Ergebnis	Sollwert gem. EP	Bereich der zul. Abweichung	unzulässige Abweichung	
Löslicher Bindemittelgehalt	SN-EN-12697-1	[M.-%]	6.40		min. 5.6		
Nadelpenetration	SN-EN-1426	[1/10mm]					
Erweichungspunkt Ring und Kugel	SN-EN-1427	[°C]					
Penetrationsindex	SN-EN-12591	[-]					
Elastische Rückstellung	SN-EN-13398	[%]					
Module de Richesse	SN-EN-13108-1	[-]	4.2				
PAK in Asphalt	eigenes Verfahren	[mg/kg]					
Marshall-Versuch (SN-EN-12697-30; SN-EN-12697-34)				Mineralrohddichte [Mg/m³]: 2.812			
Stahlamboss		1)=bestimmt, Toluol, 25°C 2)=berechnet		Verdichtungstemperatur [°C]: 155.0			
Rohddichte Mischgut	1) SN-EN-12697-5	[Mg/m³]	2.532				
Raumddichte	SN-EN-12697-6, Verfahren	[Mg/m³]	2.193				
Hohlraumgehalt Va	SN-EN-12697-8	[Vol.-%]	13.4		10.0 - 14.0	2.8	
Bindemittelausfüllungsgrad VFB	SN-EN-12697-8	[%]					
Marshall Stabilität S	SN-EN-12697-34	[kN]	9.7				
Marshall Fließwert F	SN-EN-12697-34	[mm]	1.7				
Tangentiale Fließwert Ft	SN-EN-12697-34	[mm]	1.0				
Marshall-Quotient S/F	SN-EN-12697-34	[kN/mm]	5.7				
Korngrößenverteilung		SN-EN-12697-2	Sieb	Durchgang	Sollwerte	Bereich der zul. Abweichung	unzulässige Abweichung
Sollwertbereich der Korngrößenverteilung 		[mm]	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	
		45.0					
		31.5					
		22.4					
		16.0					
		11.2					
		8.0					
		5.6	100.0		min. 100.0		
		4.0	97.2		90.0 - 100.0		
		2.0	32.6		12.0 - 50.0		
		1.0	16.0		7.0 - 29.0		
		0.5	12.8		4.0 - 24.0		
		0.25	11.3				
0.125	10.0						
0.063	9.4		3.0 - 12.0				

AC 8 H GK_h

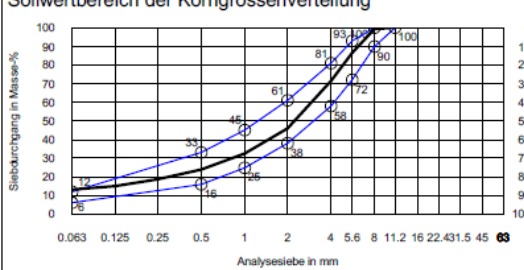
Bindemittel		Einheit	Ergebnis	Sollwert gem. EP	Bereich der zul. Abweichung	unzulässige Abweichung
Löslicher Bindemittelgehalt	SN-EN-12697-1	[M.-%]	6.04		min. 5.4	
Nadelpenetration	SN-EN-1426	[1/10mm]				
Erweichungspunkt Ring und Kugel	SN-EN-1427	[°C]				
Penetrationsindex	SN-EN-12591	[-]				
Elastische Rückstellung	SN-EN-13398	[%]				
Module de Richesse	SN-EN-13108-1	[-]	3.5			
PAK in Asphalt	eigenes Verfahren	[mg/kg]				
Marshall-Versuch (SN-EN-12697-30; SN-EN-12697-34)				Mineralrohddichte [Mg/m ³]: 2.709		
Stahlamboss 1)=bestimmt, Toluol, 25°C 2)=berechnet				Verdichtungstemperatur [°C]: 155.0		
Rohddichte Mischgut	1) SN-EN-12697-5	[Mg/m ³]	2.466			
Raumddichte	SN-EN-12697-6, Verfahren B	[Mg/m ³]	2.395			
Hohlraumgehalt Va	SN-EN-12697-8	[Vol.-%]	2.9		3.0 - 6.0	-0.1
Bindemittelausfüllungsgrad VFB	SN-EN-12697-8	[%]				
Marshall Stabilität S	SN-EN-12697-34	[kN]	24.3			
Marshall Fließwert F	SN-EN-12697-34	[mm]	4.7			
Tangentialer Fließwert Ft	SN-EN-12697-34	[mm]	2.3			
Marshall-Quotient S/F	SN-EN-12697-34	[kN/mm]	5.2			
Korngrößenverteilung SN-EN-12697-2		Sieb [mm]	Durchgang M.-%	Sollwerte M.-%	Bereich der zul. Abweichung M.-%	unzulässige Abweichung M.-%
Sollwertbereich der Korngrößenverteilung						
		45.0				
		31.5				
		22.4				
		16.0				
		11.2	100.0		min. 100.0	
		8.0	99.1		90.0 - 100.0	
		5.6	80.2		72.0 - 93.0	
		4.0	69.8		58.0 - 81.0	
		2.0	48.2		38.0 - 61.0	
		1.0	35.0		25.0 - 45.0	
		0.5	27.2		16.0 - 33.0	
		0.25	20.4			
		0.125	15.5			
		0.063	13.1		6.0 - 12.0	1.1

AC 8 H GK_t

Bindemittel		Einheit	Ergebnis	Sollwert gem. EP	Bereich der zul. Abweichung	unzulässige Abweichung
Löslicher Bindemittelgehalt	SN-EN-12697-1	[M.-%]	5.97		min. 5.4	
Nadelpenetration	SN-EN-1426	[1/10mm]				
Erweichungspunkt Ring und Kugel	SN-EN-1427	[°C]				
Penetrationsindex	SN-EN-12591	[-]				
Elastische Rückstellung	SN-EN-13398	[%]				
Module de Richesse	SN-EN-13108-1	[-]				
PAK in Asphalt	eigenes Verfahren	[mg/kg]				
Marshall-Versuch (SN-EN-12697-30; SN-EN-12697-34)				Mineralrohddichte [Mg/m ³]:		
Stahlamboss 1)=bestimmt, Toluol, 25°C 2)=berechnet				Verdichtungstemperatur [°C]: 155.0		
Rohddichte Mischgut	1) SN-EN-12697-5	[Mg/m ³]	2.514			
Raumddichte	SN-EN-12697-6, Verfahren B	[Mg/m ³]	2.387			
Hohlraumgehalt Va	SN-EN-12697-8	[Vol.-%]	5.1		3.0 - 6.0	
Bindemittelausfüllungsgrad VFB	SN-EN-12697-8	[%]				
Marshall Stabilität S	SN-EN-12697-34	[kN]	24.2			
Marshall Fließwert F	SN-EN-12697-34	[mm]	4.2			
Tangentialer Fließwert Ft	SN-EN-12697-34	[mm]	1.8			
Marshall-Quotient S/F	SN-EN-12697-34	[kN/mm]	5.8			
Korngrößenverteilung SN-EN-12697-2		Sieb [mm]	Durchgang M.-%	Sollwerte M.-%	Bereich der zul. Abweichung M.-%	unzulässige Abweichung M.-%
Sollwertbereich der Korngrößenverteilung						
		45.0				
		31.5				
		22.4				
		16.0				
		11.2	100.0		min. 100.0	
		8.0	99.6		90.0 - 100.0	
		5.6	86.5		72.0 - 93.0	
		4.0	76.9		58.0 - 81.0	
		2.0	50.3		38.0 - 61.0	
		1.0	35.3		25.0 - 45.0	
		0.5	26.0		16.0 - 33.0	
		0.25	20.6			
		0.125	16.9			
		0.063	15.0		6.0 - 12.0	3.0

11.3 Asphaltmischungen Kapitel 3

AC 8 S

Bemerkung	Mischung M1: 100% Gkt						
Probe-Nr.	22-07475	Probenahme durch	-				
Probe-Nr. extem	-	Probenahmezeit					
Unternehmung	-	Mischguttemperatur	-	[°C]			
Aufbereitungsanlage	-	Rezept-Nr.	-				
Einbauschicht	-	Lieferschein-Nr.	-				
Zielbindemittel	B 70/100_gültig bis 30.09.2022	Anteil Ausbausphal	-	[M.-%]			
Zusätze	-	[M.-%] Zusätze	-		[M.-%]		
Prüfergebnisse							
Bindemittel		Einheit	Ergebnis	Sollwert gem. EP	Bereich der zul. Abweichung	unzulässige Abweichung	
Löslicher Bindemittelgehalt	SN-EN-12697-1	[M.-%]	6.16		min. 5.4		
Nadelpenetration	SN-EN-1426	[1/10mm]					
Erweichungspunkt Ring und Kugel	SN-EN-1427	[°C]					
Penetrationsindex	SN-EN-12591	[-]					
Elastische Rückstellung	SN-EN-13398	[%]					
Module de Richesse	SN-EN-13108-1	[-]	3.7				
PAK in Asphalt	eigenes Verfahren	[mg/kg]					
Marshall-Versuch (SN-EN-12697-30; SN-EN-12697-34)			Mineralrohddichte [Mg/m³]: 2.795				
Stahlamboss 1)=bestimmt, Toluol, 25°C 2)=berechnet			Verdichtungstemperatur [°C]: 145.0				
Rohddichte Mischgut 1)	SN-EN-12697-5	[Mg/m³]	2.528				
Raumddichte	SN-EN-12697-6, Verfahren B	[Mg/m³]	2.444				
Hohlraumgehalt Va	SN-EN-12697-8	[Vol.-%]	3.3		3.0 - 6.0		
Bindemittelausfüllungsgrad VFB	SN-EN-12697-8	[%]					
Marshall Stabilität S	SN-EN-12697-34	[kN]	11.6				
Marshall Fließwert F	SN-EN-12697-34	[mm]	3.2				
Tangentialer Fließwert Ft	SN-EN-12697-34	[mm]	1.8				
Marshall-Quotient S/F	SN-EN-12697-34	[kN/mm]	3.6				
Korngrößenverteilung		SN-EN-12697-2	Sieb	Durchgang	Sollwerte	Bereich der zul. Abweichung	unzulässige Abweichung
			[mm]	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
Sollwertbereich der Korngrößenverteilung			45.0				
			31.5				
			22.4				
			16.0				
			11.2	100.0		min. 100.0	
			8.0	99.5		90.0 - 100.0	
			5.6	86.4		72.0 - 93.0	
			4.0	71.5		58.0 - 81.0	
			2.0	45.9		38.0 - 61.0	
			1.0	32.6		25.0 - 45.0	
			0.5	24.0		16.0 - 33.0	
			0.25	18.6			
			0.125	15.1			
			0.063	13.1		6.0 - 12.0	1.1

AC 8 S

Bemerkungen Mischung M2: 100% Gkh

Probe-Nr.	22-07476	Probenahme durch	-
Probe-Nr. extern	-	Probenahmezeit	
Unternehmung	-	Mischguttemperatur	[°C]
Aufbereitungsanlage	-	Rezept-Nr.	-
Einbauschicht	-	Lieferschein-Nr.	-
Zielbindemittel	B 70/100_gültig bis 30.09.2022	Anteil Ausbauasphalt	[M.-%]
Zusätze	-	[M.-%] Zusätze	- [M.-%]

Prüfergebnisse

Bindemittel		Einheit	Ergebnis	Sollwert gem. EP	Bereich der zul. Abweichung	unzulässige Abweichung	
Löslicher Bindemittelgehalt	SN-EN-12697-1	[M.-%]	6.03		min. 5.4		
Nadelpenetration	SN-EN-1426	[1/10mm]					
Erweichungspunkt Ring und Kugel	SN-EN-1427	[°C]					
Penetrationsindex	SN-EN-12591	[-]					
Elastische Rückstellung	SN-EN-13398	[%]					
Module de Richesse	SN-EN-13108-1	[-]	3.7				
PAK in Asphalt	eigenes Verfahren	[mg/kg]					
Marshall-Versuch (SN-EN-12697-30; SN-EN-12697-34)			Mineralrohddichte [Mg/m³]: 2.704				
Stahlamboss 1)=bestimmt, Toluol, 25°C 2)=berechnet			Verdichtungstemperatur [°C]: 145.0				
Rohddichte Mischgut 1)	SN-EN-12697-5	[Mg/m³]	2.463				
Raumddichte	SN-EN-12697-6, Verfahren B	[Mg/m³]	2.339				
Hohlraumgehalt Va	SN-EN-12697-8	[Vol.-%]	5.0		3.0 - 6.0		
Bindemittelausfüllungsgrad VFB	SN-EN-12697-8	[%]					
Marshall Stabilität S	SN-EN-12697-34	[kN]	11.4				
Marshall Fließwert F	SN-EN-12697-34	[mm]	2.7				
Tangentialer Fließwert Ft	SN-EN-12697-34	[mm]	1.1				
Marshall-Quotient S/F	SN-EN-12697-34	[kN/mm]	4.2				
Korngrößenverteilung SN-EN-12697-2		Sieb [mm]	Durchgang M.-%	Sollwerte M.-%	Bereich der zul. Abweichung M.-%	unzulässige Abweichung M.-%	
<p>Sollwertbereich der Korngrößenverteilung</p>		45.0					
		31.5					
		22.4					
		16.0					
		11.2	100.0		min. 100.0		
		8.0	95.6		90.0 - 100.0		
		5.6	83.3		72.0 - 93.0		
		4.0	67.1		58.0 - 81.0		
		2.0	37.8		38.0 - 61.0		-0.2
		1.0	25.6		25.0 - 45.0		
		0.5	19.5		16.0 - 33.0		
		0.25	14.6				
		0.125	11.2				
0.063	9.6		6.0 - 12.0				

AC 8 S

Bemerkungen Mischung M3: 0/4 Gkt, 4/8 Gkh

Probe-Nr.	22-07477	Probenahme durch	-
Probe-Nr. extern	-	Probenahmezeit	
Unternehmung	-	Mischguttemperatur	[°C]
Aufbereitungsanlage	-	Rezept-Nr.	-
Einbauschicht	-	Lieferschein-Nr.	-
Zielbindemittel	B 70/100_gültig bis 30.09.2022	Anteil Ausbausphal	[M.-%]
Zusätze	-	[M.-%] Zusätze	- [M.-%]

Prüfergebnisse

Bindemittel		Einheit	Ergebnis	Sollwert gem. EP	Bereich der zul. Abweichung	unzulässige Abweichung
Löslicher Bindemittelgehalt	SN-EN-12697-1	[M.-%]	6.04		min. 5.4	
Nadelpenetration	SN-EN-1426	[1/10mm]				
Erweichungspunkt Ring und Kugel	SN-EN-1427	[°C]				
Penetrationsindex	SN-EN-12591	[-]				
Elastische Rückstellung	SN-EN-13398	[%]				
Module de Richesse	SN-EN-13108-1	[-]	3.6			
PAK in Asphalt	eigenes Verfahren	[mg/kg]				
Marshall-Versuch (SN-EN-12697-30; SN-EN-12697-34)				Mineralrohddichte [Mg/m ³]: 2.753		
Stahlamboss 1)=bestimmt, Toluol, 25°C 2)=berechnet				Verdichtungstemperatur [°C]: 145.0		
Rohddichte Mischgut	1) SN-EN-12697-5	[Mg/m ³]	2.500			
Raumddichte	SN-EN-12697-6, Verfahren B	[Mg/m ³]	2.420			
Hohlraumgehalt Va	SN-EN-12697-8	[Vol.-%]	3.2		3.0 - 6.0	
Bindemittelausfüllungsgrad VFB	SN-EN-12697-8	[%]				
Marshall Stabilität S	SN-EN-12697-34	[kN]	13.5			
Marshall Fließwert F	SN-EN-12697-34	[mm]	3.2			
Tangentialer Fließwert Ft	SN-EN-12697-34	[mm]	1.6			
Marshall-Quotient S/F	SN-EN-12697-34	[kN/mm]	4.2			
Korngrößenverteilung SN-EN-12697-2		Sieb [mm]	Durchgang M.-%	Sollwerte M.-%	Bereich der zul. Abweichung M.-%	unzulässige Abweichung M.-%
<p>Sollwertbereich der Korngrößenverteilung</p>		45.0				
		31.5				
		22.4				
		16.0				
		11.2	100.0		min. 100.0	
		8.0	94.8		90.0 - 100.0	
		5.6	82.3		72.0 - 93.0	
		4.0	74.1		58.0 - 81.0	
		2.0	50.0		38.0 - 61.0	
		1.0	34.4		25.0 - 45.0	
		0.5	25.0		16.0 - 33.0	
		0.25	19.0			
		0.125	15.3			
0.063	13.5		6.0 - 12.0	1.5		

AC 8 S

Bemerkungen Mischung M4: 0/4 Gkh, 4/8 Gkt

Probe-Nr.	22-07478	Probenahme durch	-
Probe-Nr. extern	-	Probenahmezeit	
Unternehmung	-	Mischguttemperatur	[°C]
Aufbereitungsanlage	-	Rezept-Nr.	-
Einbauschicht	-	Lieferschein-Nr.	-
Zielbindemittel	B 70/100_gültig bis 30.09.2022	Anteil Ausbaumasphalt	[M.-%]
Zusätze	-	[M.-%] Zusätze	- [M.-%]

Prüfergebnisse

Bindemittel	Einheit	Ergebnis	Sollwert gem. EP	Bereich der zul. Abweichung	unzulässige Abweichung
Löslicher Bindemittelgehalt	SN-EN-12697-1	[M.-%]	5.97	min. 5.4	
Nadelpenetration	SN-EN-1426	[1/10mm]			
Erweichungspunkt Ring und Kugel	SN-EN-1427	[°C]			
Penetrationsindex	SN-EN-12591	[-]			
Elastische Rückstellung	SN-EN-13398	[%]			
Module de Richesse	SN-EN-13108-1	[-]	3.5		
PAK in Asphalt	eigenes Verfahren	[mg/kg]			

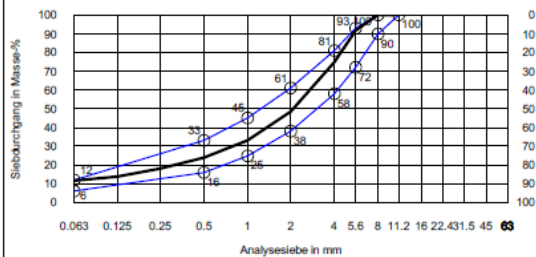
Marshall-Versuch (SN-EN-12697-30; SN-EN-12697-34) Mineralrohddichte [Mg/m³]: 2.688
 Stahlamboss 1)=bestimmt, Toluol, 25°C 2)=berechnet Verdichtungstemperatur [°C]: 145.0

Rohddichte Mischgut	1) SN-EN-12697-5	[Mg/m³]	2.452		
Raumddichte	SN-EN-12697-6, Verfahren B	[Mg/m³]	2.384		
Hohlraumgehalt Va	SN-EN-12697-8	[Vol.-%]	2.8	3.0 - 6.0	
Bindemittelausfüllungsgrad VFB	SN-EN-12697-8	[%]			
Marshall Stabilität S	SN-EN-12697-34	[kN]	11.2		
Marshall Fließwert F	SN-EN-12697-34	[mm]	3.4		
Tangentialer Fließwert Ft	SN-EN-12697-34	[mm]	1.6		
Marshall-Quotient S/F	SN-EN-12697-34	[kN/mm]	3.3		

Korngrößenverteilung

SN-EN-12697-2

Sollwertbereich der Korngrößenverteilung



Sieb [mm]	Durchgang M.-%	Sollwerte M.-%	Bereich der zul. Abweichung M.-%	unzulässige Abweichung M.-%
45.0				
31.5				
22.4				
16.0				
11.2	100.0		min. 100.0	
8.0	99.9		90.0 - 100.0	
5.6	91.8		72.0 - 93.0	
4.0	74.7		58.0 - 81.0	
2.0	48.5		38.0 - 61.0	
1.0	33.1		25.0 - 45.0	
0.5	23.9		16.0 - 33.0	
0.25	18.0			
0.125	13.9			
0.063	11.8		6.0 - 12.0	

AC MR 8

Bemerkungen Mischung M5: 100% Gkt

Probe-Nr.	22-07479	Probenahme durch	-
Probe-Nr. extern	-	Probenahmezeit	
Unternehmung	-	Mischguttemperatur	- [°C]
Aufbereitungsanlage	-	Rezept-Nr.	-
Einbauschicht	-	Lieferschein-Nr.	-
Zielbindemittel	PmB-E 45/80-65 Grisolast E60 R	Anteil Ausbauasphalt	[M.-%]
Zusätze	-	[M.-%] Zusätze	- [M.-%]

Prüfergebnisse

Bindemittel	Einheit	Ergebnis	Sollwert gem. EP	Bereich der zul. Abweichung	unzulässige Abweichung	
Löslicher Bindemittelgehalt	SN-EN-12697-1	[M.-%]	5.91	min. 5.4		
Nadelpenetration	SN-EN-1426	[1/10mm]				
Erweichungspunkt Ring und Kugel	SN-EN-1427	[°C]				
Penetrationsindex	SN-EN-12591	[-]				
Elastische Rückstellung	SN-EN-13398	[%]				
Module de Richesse	SN-EN-13108-1	[-]	3.8			
PAK in Asphalt	eigenes Verfahren	[mg/kg]				
Marshall-Versuch (SN-EN-12697-30; SN-EN-12697-34)		I		Mineralrohddichte [Mg/m³]: 2.798		
Stahlamboss 1)=bestimmt, Toluol, 25°C 2)=berechnet				Verdichtungstemperatur [°C]: 155.0		
Rohddichte Mischgut	1) SN-EN-12697-5	[Mg/m³]	2.540			
Raumddichte	SN-EN-12697-6, Verfahren B	[Mg/m³]	2.298			
Hohlraumgehalt Va	SN-EN-12697-8	[Vol.-%]	9.5	3.0 - 6.0	3.5	
Bindemittelausfüllungsgrad VFB	SN-EN-12697-8	[%]				
Marshall Stabilität S	SN-EN-12697-34	[kN]	8.1			
Marshall Fließwert F	SN-EN-12697-34	[mm]	2.1			
Tangentialer Fließwert Ft	SN-EN-12697-34	[mm]	0.9			
Marshall-Quotient S/F	SN-EN-12697-34	[kN/mm]	3.9			
Korngrößenverteilung	SN-EN-12697-2	Sieb [mm]	Durchgang M.-%	Sollwerte M.-%	Bereich der zul. Abweichung M.-%	unzulässige Abweichung M.-%
Sollwertbereich der Korngrößenverteilung						
		45.0				
		31.5				
		22.4				
		16.0				
		11.2	100.0		min. 100.0	
		8.0	99.3		90.0 - 100.0	
		5.6	68.9			
		4.0	32.0		32.0 - 42.0	
		2.0	18.7		21.0 - 31.0	-2.3
		1.0	15.1			
		0.5	13.0		13.0 - 21.0	
		0.25	12.0			
0.125	10.8					
0.063	9.7		6.0 - 11.0			

AC MR 8

Bemerkungen		Mischung M6: 100% Gkh				
Probe-Nr.	22-07480	Probenahme durch	-			
Probe-Nr. extern	-	Probenahmezeit	-			
Unternehmung	-	Mischguttemperatur	-	[°C]		
Aufbereitungsanlage	-	Rezept-Nr.	-			
Einbauschicht	-	Lieferschein-Nr.	-			
Zielbindemittel	PmB-E 45/80-65 Grisolast E60 R	Anteil Ausbauasphalt	-	[M.-%]		
Zusätze	-	[M.-%] Zusätze	-	[M.-%]		
Prüfergebnisse						
Bindemittel		Einheit	Ergebnis	Sollwert gem. EP	Bereich der zul. Abweichung	unzulässige Abweichung
Löslicher Bindemittelgehalt	SN-EN-12697-1	[M.-%]	5.95		min. 5.4	
Nadelpenetration	SN-EN-1426	[1/10mm]				
Erweichungspunkt Ring und Kugel	SN-EN-1427	[°C]				
Penetrationsindex	SN-EN-12591	[-]				
Elastische Rückstellung	SN-EN-13398	[%]				
Module de Richesse	SN-EN-13108-1	[-]	3.7			
PAK in Asphalt	eigenes Verfahren	[mg/kg]				
Marshall-Versuch (SN-EN-12697-30; SN-EN-12697-34)			Mineralrohddichte [Mg/m³]: 2.706			
Stahlamboss 1)=bestimmt, Toluol, 25°C 2)=berechnet			Verdichtungstemperatur [°C]: 155.0			
Rohddichte Mischgut	1) SN-EN-12697-5	[Mg/m³]	2.467			
Raumddichte	SN-EN-12697-6, Verfahren B	[Mg/m³]	2.291			
Hohlraumgehalt Va	SN-EN-12697-8	[Vol.-%]	7.1		3.0 - 6.0	1.1
Bindemittelausfüllungsgrad VFB	SN-EN-12697-8	[%]				
Marshall Stabilität S	SN-EN-12697-34	[kN]	8.8			
Marshall Fließwert F	SN-EN-12697-34	[mm]	2.2			
Tangentialer Fließwert Ft	SN-EN-12697-34	[mm]	1.0			
Marshall-Quotient S/F	SN-EN-12697-34	[kN/mm]	4.0			
Korngrößenverteilung		Sieb	Durchgang	Sollwerte	Bereich der zul. Abweichung	unzulässige Abweichung
SN-EN-12697-2		[mm]	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
Sollwertbereich der Korngrößenverteilung						
		45.0				
		31.5				
		22.4				
		16.0				
		11.2	100.0		min. 100.0	
		8.0	85.8		90.0 - 100.0	-4.2
		5.6	50.4			
		4.0	31.1		32.0 - 42.0	-0.9
		2.0	18.1		21.0 - 31.0	-2.9
		1.0	15.4			
		0.5	13.6		13.0 - 21.0	
		0.25	12.1			
		0.125	10.6			
		0.063	9.7		6.0 - 11.0	

AC MR 8

Bemerkungen Mischung M7: 0/4 Gkt, 4/8 Gkh

Probe-Nr.	22-07481	Probenahme durch	-
Probe-Nr. extern	-	Probenahmezeit	
Unternehmung	-	Mischguttemperatur	- [°C]
Aufbereitungsanlage	-	Rezept-Nr.	-
Einbauschicht	-	Lieferschein-Nr.	-
Zielbindemittel	PmB-E 45/80-65 Grisolast E60 R	Anteil Ausbausphal	- [M.-%]
Zusätze	-	[M.-%] Zusätze	- [M.-%]

Prüfergebnisse

Bindemittel	Einheit	Ergebnis	Sollwert gem. EP	Bereich der zul. Abweichung	unzulässige Abweichung
Löslicher Bindemittelgehalt	SN-EN-12697-1	[M.-%]	5.75		min. 5.4
Nadelpenetration	SN-EN-1426	[1/10mm]			
Erweichungspunkt Ring und Kugel	SN-EN-1427	[°C]			
Penetrationsindex	SN-EN-12591	[-]			
Elastische Rückstellung	SN-EN-13398	[%]			
Module de Richesse	SN-EN-13108-1	[-]	3.5		
PAK in Asphalt	eigenes Verfahren	[mg/kg]			

Marshall-Versuch (SN-EN-12697-30; SN-EN-12697-34)

Mineralrohndichte [Mg/m³]: 2.695

Stahlamboss 1)=bestimmt, Toluol, 25°C 2)=berechnet

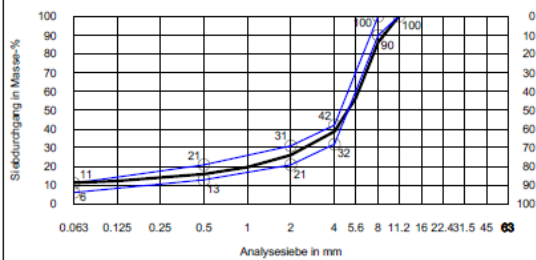
Verdichtungstemperatur [°C]: 155.0

Rohdichte Mischgut	1) SN-EN-12697-5	[Mg/m³]	2.466		
Raumdichte	SN-EN-12697-6, Verfahren B	[Mg/m³]	2.379		
Hohlraumgehalt Va	SN-EN-12697-8	[Vol.-%]	3.5		3.0 - 6.0
Bindemittelausfüllungsgrad VFB	SN-EN-12697-8	[%]			
Marshall Stabilität S	SN-EN-12697-34	[kN]	10.3		
Marshall Fließwert F	SN-EN-12697-34	[mm]	2.4		
Tangentialer Fließwert Ft	SN-EN-12697-34	[mm]	1.1		
Marshall-Quotient S/F	SN-EN-12697-34	[kN/mm]	4.3		

Korngrößenverteilung

SN-EN-12697-2

Sollwertbereich der Korngrößenverteilung



Sieb [mm]	Durchgang M.-%	Sollwerte M.-%	Bereich der zul. Abweichung M.-%	unzulässige Abweichung M.-%
45.0				
31.5				
22.4				
16.0				
11.2	100.0		min. 100.0	
8.0	86.1		90.0 - 100.0	-3.9
5.6	56.4			
4.0	38.7		32.0 - 42.0	
2.0	26.0		21.0 - 31.0	
1.0	19.6			
0.5	16.0		13.0 - 21.0	
0.25	14.1			
0.125	12.3			
0.063	11.3		6.0 - 11.0	0.3

12 Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 13.05.2024

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS218/330

Projekttitel: Polierbarkeit - Griffigkeit und Akustik von Deckschichten (PoGrifAk)

Enddatum: 31.12.2024

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Das Forschungsprojekt verfolgt drei unterschiedliche Ziele, welche sich aus drei verschiedenen Problemstellungen ableiten:

- Polierbarkeit der Gesteinskörnungen; es wurden Entscheidungsgrundlagen für die Festlegung von Anforderungen an den Polierwiderstand für die FAP-Methode (Friction after polishing) mit den in der Schweiz typischen Gesteinskörnungen GK erarbeitet. Dazu wurden 10 Provenienzen von GK mittels FAP (Kornfraktionen 2/4, 4/8, 8/11) und mittels PSV-Prüfung (nur für Fraktion 8/11 möglich) untersucht. Einerseits wurde, eine systematische Zunahme der FAP-Werte mit abnehmendem Grösstkorn der Fraktion festgestellt, andererseits konnte bei der Kornfraktion 8/11 eine gute Korrelation zwischen FAP und PSV bestätigt werden. Daraus wurden provisorische Richtwerte für die Anforderung an den FAP-Wert für die Kornfraktionen 2/4, 4/8 und 8/11 abgeleitet.
- Optimierung von Mischgut- und Beton-Rezepturen hinsichtlich der Griffigkeit von Deckschichten; durch die Kombination von GK mit hohem und mit niedrigem Polierwiderstand, konnten die für die jeweiligen Mischungen entscheidenden Kornfraktionen festgestellt und Empfehlungen abgeleitet werden. Während bei einem AC 8 die Kornfraktion 0/4 für die Griffigkeit der Gesamtmischung entscheidend ist, ist es bei einem AC MR die Fraktion 4/8. Beim Waschbeton (mit Ausfallkörnung) ist die Fraktion 4/8, bei einem NPK G-Beton mit Grösstkorn 22 mm die Fraktion 0/4 von Bedeutung.
- Akustik; es war die Frage zu beantworten, ob ein Zusammenhang zwischen den akustischen Eigenschaften einer Deckschicht und der Polierbarkeit der Gesteinskörnungen besteht. Probplatten wurden unterschiedlich stark poliert und bezüglich Griffigkeit und den akustischen Eigenschaften untersucht. Während bei der Griffigkeit eine klare Abhängigkeit vom Polierzustand festgestellt wurde, veränderten sich die akustischen Eigenschaften marginal. Somit wurde der Nachweis erbracht, dass die Polierbarkeit der GK keinen Einfluss auf die akustischen Eigenschaften hat.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Beim Teilprojekt "Anforderungen an die Polierbarkeit" konnte aufgezeigt werden, wie Anforderungen festgelegt werden können. Auf der Basis der Untersuchung von 10 Provenienzen aus der Schweiz können allerdings keine Anforderungen definiert werden, da die Datenbasis zu klein ist. Das Ziel wurde soweit möglich erreicht.
Bei der Optimierung der Rezepturen hinsichtlich der Griffigkeit, konnte klar aufgezeigt werden, dass auch mit weniger geeigneten Gesteinskörnungen, eine hohe Griffigkeit der Deckschicht erreicht werden kann, wenn die Rezeptur entsprechend optimiert wird. Es wurden diesbezügliche Empfehlungen formuliert. Das Ziel wurde erreicht.
Es konnte belegt werden, dass die Polierbarkeit der Gesteinskörnungen - wenn überhaupt - nur einen marginalen Einfluss auf die Veränderung der akustischen Eigenschaften ausübt. Auch dieses Ziel wurde erreicht.

Folgerungen und Empfehlungen:

Es konnte aufgezeigt werden, dass die Wehner/Schulze-Prüfmaschine ein hervorragendes Instrument zur Bearbeitung von Fragen der Polierbarkeit und Griffigkeit darstellt. Mit dem heutigen Prüfverfahren zur Beurteilung des Polierwiderstandes von Gesteinskörnungen (PSV), können keine Anforderungen an die für Deckschichten entscheidenden Korngrößen 2/4 und 4/8 festgelegt werden, da das Verfahren für die Korngrösse 8/11 definiert ist. Mittels FAP kann diese Lücke geschlossen werden. Um dies zu erreichen muss die Datenbasis deutlich ausgeweitet werden.
Dank optimierter Rezepturen ist es möglich, eine gute Griffigkeit des Belages zu erzielen; auch unter Anwendung einzelner Korngrößen mit ungenügendem Polierwiderstand. Dieses Erkenntnis könnte neue Wege zur Verwendung von Sekundärsplitt und/oder Asphaltgranulat in Deckschichten öffnen, da auch die Problematik der Griffigkeit untersucht werden kann.

Publikationen:

keine ausser dem ASTRA-Schlussbericht

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Angst

Vorname: Christian

Amt, Firma, Institut: IMP Bautest AG; Laborweg 1; 4625 Oberbuchsitzen

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Forschungsstelle hat die drei Teilprojekte systematisch und umfassend bearbeitet. Entscheidende Weichenstellungen im Projekt, wie etwa die Wahl der zu untersuchenden Provenienzen der Gesteinskörnungen oder der Mischgut- und Beton-Rezepturen, wurden gemeinsam mit der Begleitkommission gefällt. In zwei der drei Fragestellungen (Akustik und Rezepturen) wurden die Ziele konkret erreicht. Bei der Festlegung von Anforderungen konnte die Forschungsstelle zwar keinen umfassenden Anforderungskatalog erarbeiten, jedoch konnte ein Weg aufgezeigt werden, wie Anforderungen festgelegt werden können. Somit wurde das Ziel, Entscheidungsgrundlagen zur Festlegung von Anforderungen zu liefern, ebenfalls erreicht, ohne dass Anforderungen definiert werden konnten.

Umsetzung:

Um Anforderungen an den Polierwiderstand festlegen zu können, sind weitere Reihenuntersuchungen erforderlich. Die BK anerkennt die Prüfmethode Wehner/Schulze als geeignetes Verfahren. Anschliessend an die Erweiterung des Erfahrungshintergrundes sind Anforderungswerte in einem Regelwerk zu definieren. Im Sinne von leistungsorientierten Anforderungen, sind Spezifikationen an die Griffigkeit/Polierbarkeit von Deckschichten anzustreben, mit welchen die Anforderungen an die Polierbarkeit der einzelnen Komponenten ergänzt oder sogar ersetzt werden könnten.

weitergehender Forschungsbedarf:

Reihenuntersuchungen an einer grossen Anzahl Gesteinskörnungen des Schweizer Marktes und an Endprodukt wie Deckbeläge und Betonoberflächen sind erforderlich.
Es sind Grundlagen zu erarbeiten, um die Anforderungen an die einzelnen Komponenten (Gesteinskörnungen) durch Anforderungen an das Endprodukt (Deckschicht) zu ersetzen.

Einfluss auf Normenwerk:

heute noch kein unmittelbarer Einfluss auf Normen.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Schellenberg

Vorname: Urs

Amt, Firma, Institut: Baudirektion Kanton Zürich, Tiefbaumt, Strasseninspektorat, Oberbau und Geotechnik

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission: