

Bewertungshintergrund für den Widerstand gegen Polieren von Gesteinskörnungen nach dem PWS-Verfahren

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 96

bast

Bewertungshintergrund für den Widerstand gegen Polieren von Gesteinskörnungen nach dem PWS-Verfahren

von

Bernd Dudenhöfer
Philipp Rückert

ASPHALTA
Prüf- und Forschungslaboratorium
Berlin

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 96

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BAST-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE-Nr. 06.0098/2012/DGB:
Bewertungshintergrund für den Widerstand gegen
Polieren von Gesteinskörnungen nach dem PWS-Verfahren

Fachbetreuung

Christine Kellermann-Kinner
Dirk Jansen

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9323

ISBN 978-3-95606-244-5

Bergisch Gladbach, April 2016

Kurzfassung – Abstract – Summary

Bewertungshintergrund für den Widerstand gegen Polieren von Gesteinskörnungen nach dem PWS-Verfahren

In den Jahren ab 1959 wurde an der Technischen Universität Berlin von B. WEHNER und seinem Assistenten K.-H. SCHULZE eine Prüfeinrichtung entwickelt, mit der die Polierresistenz von groben und feinen Gesteinskörnungen ermittelt werden konnte. Ende der 90er Jahre waren die noch existierenden Prüfeinrichtungen nicht mehr gebrauchstauglich. Dies bewog 1999 dazu, einen modernisierten Nachbau unter Beibehaltung wesentlicher Maschinenparameter durchzuführen. Bei Vergleichsuntersuchungen stellte sich heraus, dass mit den Prüfeinrichtungen der 2. Generation ein abweichendes Messwertniveau ermittelt wird. Um den aus einer Vielzahl von Forschungsarbeiten aufgestellten Bewertungshintergrund und die daraus abgeleiteten Anforderungswerte weiter nutzen zu können, musste dieser auf die neue Gerätegeneration übertragen werden.

Durch Untersuchungen an unterschiedlichen Prüfkörnungen verschiedener Gesteine wurde der Erwartungsbereich für die Polierwerte PWS ermittelt und damit ein Bewertungshintergrund aufgestellt. Durch die Vergleichsuntersuchungen an den Rückstellproben aus der TU Berlin konnte für die Prüfkörnungen 8/11 und 0,2/0,4 mm eine direkte Übertragung von bestehenden Anforderungswerten auf die aktuelle Gerätegeneration vorgenommen werden. Die Unterschiede in den Messwertniveaus zwischen den Gerätegenerationen konnten quantifiziert werden. Die Spreizung der Polierwerte bleibt trotz dieser Veränderung gleich.

Um einen aktuellen Vergleich zwischen den Polierverfahren PWS und PSV herzustellen, wurden Gesteinskörnungen aus Lagerstätten aufgenommen, die auch in einer parallel laufenden PSV-Forschungsarbeit genutzt wurden. Für die 2. Gerätegeneration der Prüfanlage WEHNER/SCHULZE wurde somit erstmalig ein Zusammenhang zum Polierverfahren PSV hergestellt.

Es wird empfohlen, den bestehenden Anforderungswert für die Polierresistenz von feinen Gesteinskörnungen in Deckschichten aus Beton auf Grund der durchgeführten Untersuchungen anzupassen und die vorgeschlagenen Anforderungswerte für die groben Gesteinskörnungen durch eine Datensammlung abzusichern

Valuation background on the polishing resistance of aggregates according to the PWS method

In the years since 1959, B. WEHNER and his assistant K.-H. SCHULZE developed a testing device at the Technical University of Berlin that could determine the polishing resistance of coarse and fine aggregates. By the late 1990s, however, these extant testing devices were no longer fit for use. This prompted the university in 1999 to create an updated redesign that retained the essential machine parameters. Comparison studies demonstrated that a deviating measured value level results from the 2nd generation testing devices. In order to continue to use the valuation background from numerous research projects and the specification values derived thereof, this background had to be transferred to the new device generation.

Tests on different test grit sizes of different rocks determined the expectancy range for the PWS polished stone values and thus established a valuation background. The comparison studies on TU Berlin's reference samples could directly transfer the existing specification values to the current device generation for the 8/11 and 0.2/0.4 mm test grit sizes. It was possible to quantify the differences in the measured value levels between the device generations. Despite this change, the spread of the polished stone values remains the same.

In order to make a current comparison between the PWS and PSV polishing methods, aggregates were taken from deposits that were also used in a parallel PSV research project. For the first time, a correlation with the PSV polishing method was established for the 2nd device generation of the WEHNER/SCHULZE testing device.

Because of these tests, it is recommended to adapt the existing specification value for the polishing resistance of fine aggregates in road surface course layers made of concrete and secure the proposed specification values for the coarse aggregates with a data collection.

Valuation background on the polishing resistance of aggregates according to the PWS method

1 Tasks and objectives

Scientific studies conducted in the 1960s and 1970s already proved a significant correlation between the polishing resistance of aggregate sizes and the skid resistance of road surfaces [1]. "Road grip" is currently predicted via the PSV of the 8/10 aggregate size when designing the material compounds for road surface course layers made of asphalt and concrete. This procedure is proven not to be conclusive and leads to erroneous assessments [2]. A logical derivation is only possible by examining the actual grit size distribution of the aggregate mixture. These findings are based on studies using the TU Berlin's testing equipment according to the WEHNER/SCHULZE test method [3].

The procedure is described in TP Gestein-StB, Teil 5.4.2 (Technical test requirements for aggregates used in road construction) [4]. There is a valuation background for this testing procedure that is based on an over 30-year-old compendium of test data from research project findings and routine tests for the aggregates industry.

Requirement values were derived from this valuation background which were then implemented in Germany's state agreements [5] or the M OB [6] (Code of practice for the production of surface textures on road surfaces made of concrete) of Germany's FGSV (Research Association for Roads and Traffic).

In the late 1990s, the still existing testing facilities based on the Berlin model in Germany's Federal Highway Research Institute (BASt), Delft and Vienna were no longer fit for use in. This prompted an updated redesign in 1999 that retained the essential machine parameters. Internal and unpublished comparative testing revealed that a different measured value level is calculated when using 2nd generation testing facilities [7]. Austria already responded and created a new valuation background with requirement values for fine aggregates that occur in Austria [8].

Since the 1st generation testing facilities are no longer available, it is not possible to use comparison tests to transform the valuation background.

The aim of the research project is to reevaluate the valuation background for the aggregates used in surface course layers in the 0.2/0.4, 2/5, 5/8, 8/11 mm test grit sizes for the current 2nd device generation.

2 Approach

To achieve this research objective, the tests were divided into 2 phases.

- Phase 1: Testing different aggregates in the grit size classes 8/11, 5/8, 2/5 and 0.2/0.4 mm and determining an expectancy range of the polished stone values (PSV).
- Phase 2: Regression between the valuation background of the 1st and 2nd device generations based on TU Berlin's existing reference samples.

Aggregates from 25 deposits in the 2/5, 5/8 and 8/11 delivery grit sizes were included in the testing program for Phase 1 testing. These are referred to as "currently sampled aggregates" below. Moreover, fine aggregates were included in the form of 15 crushed sands and natural sands respectively. The database was supplemented by the results from 12 years of routine testing by the research institute. The results of the grip tests from Phase 2 were also included to supplement the data.

To validate the test results, comparison tests were performed on selected rocks at the Technical University of Munich and the RWTH Aachen.

3 Results

3.1 Expectancy range of the polished stone values

Summation curves with a probability of 95% were created for every test grit size from the existing data material following sufficient mathematical and statistical analyses. The deviation of the mean value from the sampling error was also taken into account (depicted as grey hatched lines in Figure 1).

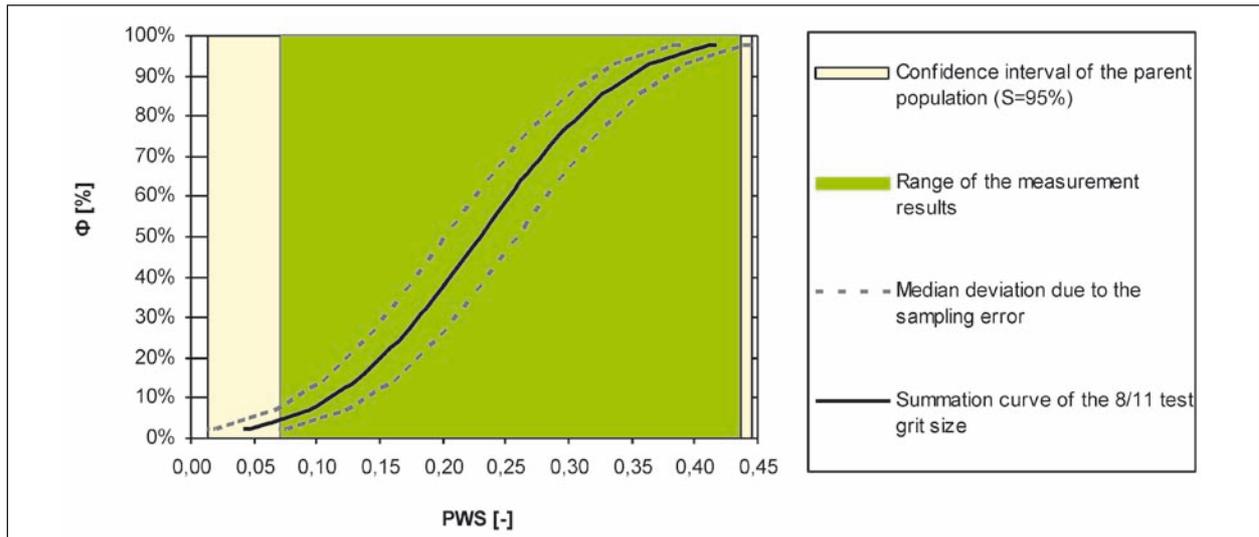


Fig. 1: Example summation curve of the 8/11 test grit size

Test grit size and test specimen type		Upper limit of the expectancy range	Lower limit of the expectancy range
Sand plates 0.2/0.4	Natural sand	0.60	0.35
	Crushed sand	0.75	0.26
Mastic test-specimen	2/5	0.53	0.08
	5/8	0.51	0.07
	8/11	0.44	0.02

Tab. 1: Limits of the expectancy ranges for the test grit sizes

The green area in Figure 1 represents the range of measurements made from the random sample. The black summation curve indicates that the extreme values are insufficiently and inaccurately rendered by the random sample in the lower PSV range. The PSV of the tested rocks thus do not represent the PSV range of the parent population of all available rocks but only a proportion thereof. The sampling error was included in order to draw a representative conclusion about the possible parent population based on the analyzed random sample by only one laboratory. With the help of the sampling error, the summation curve shifts on both sides (see grey-shaded lines in Figure 1).

The culmination of the shifted cumulative probabilities on both sides extends the expectancy range of possible polished stone values for the 8/11 test grit size. This amplification regarding the tested PSV range is referred to as an arithmetical proportion. The sampling error takes the random deviations between laboratories into account.

According to the comparative test results, the polished stone values calculated by the research customer in lab testing are close to the mean value

of the 3 laboratories. The mean deviation is -0.003 PWS units. Compared to the ring test, the test specimens of the comparative test were created and prepared in the research customer's laboratory. The deviations thus arose as systematic errors due to how the testing device was handled. The valuation background did not take the differences of every test grit size into account. The deviations, which are accurate to 3 decimal places, have no effects on the valuation background, which has a final accuracy of two decimal places.

3.2 Transferring threshold values

The threshold values of the 1st device generation should be transferred to a valuation background for the 2nd device generation using the reference samples in the form of mastic test specimens with a 8/11 (test grit) size from the research report for determining the final polished stone values [3] and various fine aggregates from routine tests performed by TU Berlin.

The coarse aggregate was examined in that past research project in the form of mastic and mosaic test specimens. Mosaic test specimens are not

suitable for multiple testing because they cannot be regenerated for renewed testing. The existing mastic specimens were therefore used to transfer the valuation background. Preliminary tests on mastic test specimens from TU Berlin's own stock could prove that multiple testing on a test specimen is possible with very good precision if an appropriate regeneration method is used. The test specimens used in the private stock originate from the 2009 [9] ring test. The test specimen surfaces were wet grinded and subsequently sandblasted for two minutes using special high-grade 0.5/1 mm corundum.

The results in the procedure's confidence interval (see Figure 2) depict the quality of the regeneration method.

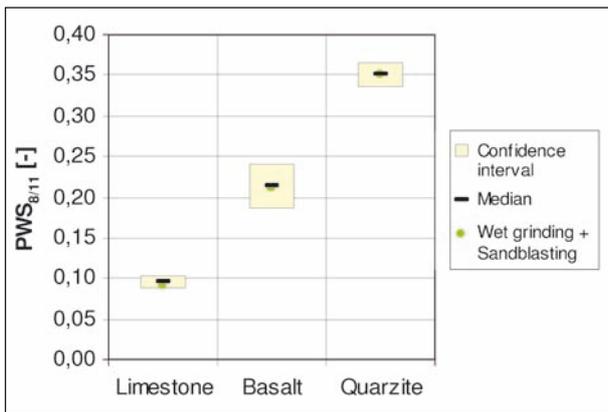


Fig. 2: Results from preliminary experiments on 8/11 mastic test specimens

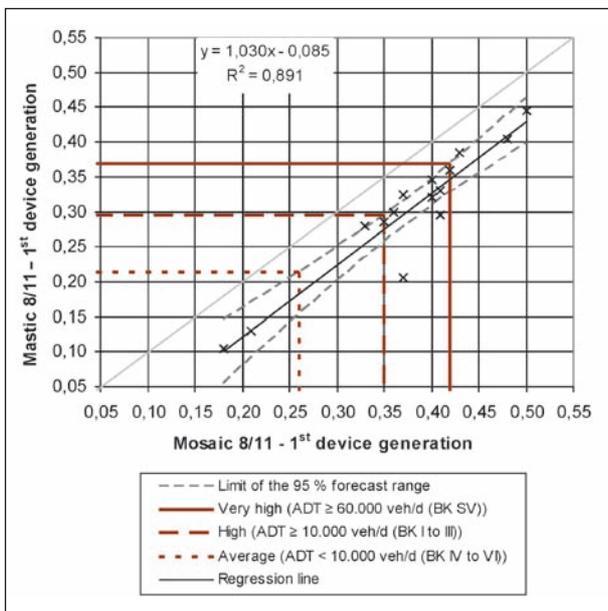


Fig. 3: Regression between 1st device generation mastic and mosaic test specimens

As a result of the test results from the reprocessed reference samples using regressions (see Figure 3 to Figure 5), it was possible to transfer the “Berliner” [5] specification values to the 2nd device generation based on a predefined algorithm.

In the first step (see Figure 3), the formerly valid requirement values [5] for mosaic test specimens were transferred to the measured value level of the 1st device generation for mastic test specimens. In doing so, a safety allowance was taken into account via the reading in the upper forecast range. The second step (see Figure 4 and

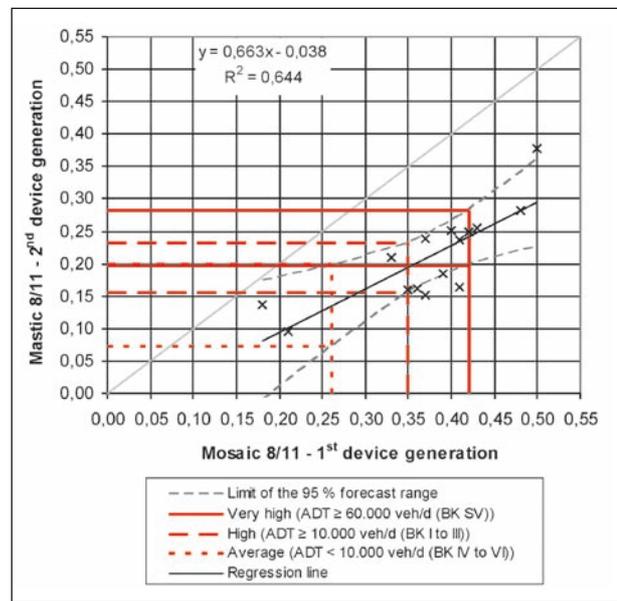


Fig. 4: Regression between 2nd and 1st device generation mosaic test specimens

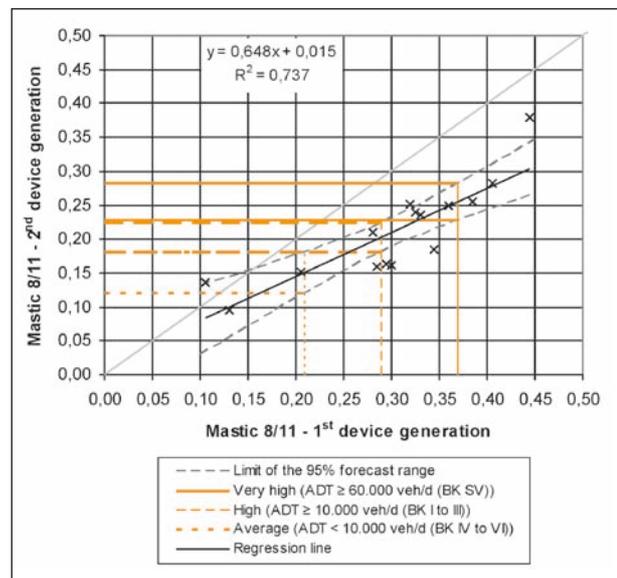


Fig. 5: Regression between 2nd and 1st device generation mastic test specimens

Figure 5) compared the measured value level between the 1st and 2nd device generations. The requirement values were transferred via the forecast ranges.

The threshold values for the coarse 5/8 und 2/5 test grit sizes could not be directly transferred. This was because, on the one hand, the TU Berlin had no suitable reference samples available. On the other hand, so far there was also no valuation background for the 5/8 test grit size from the 1st device generation era.

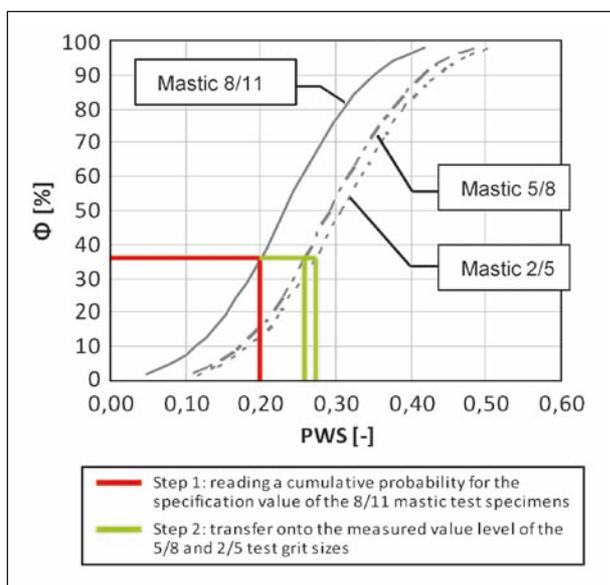


Fig. 6: Transferring the transformed "Berliner" specification values for the 8/11 to the 5/8 and 2/5 test grit sizes

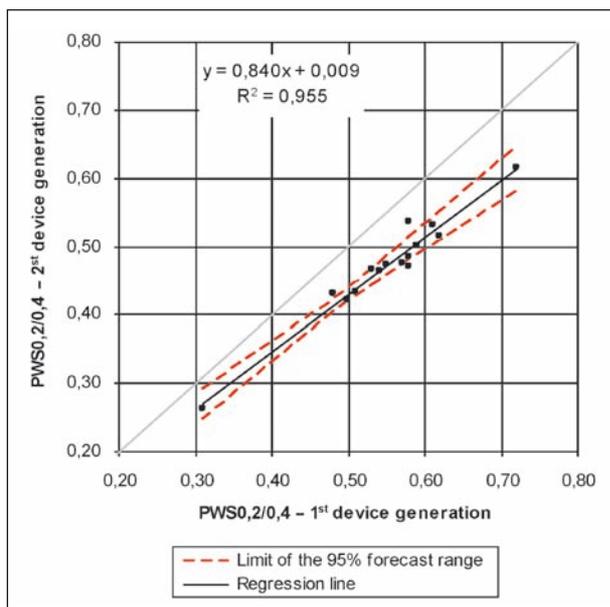


Fig. 7: Regression between the 1st and 2nd device generations with 0.2/0.4 sand plates

The threshold values were thus transferred via a transformation with equivalent probabilities from the 8/11 to the 5/8 and 2/5 test grit sizes.

It becomes clear, based on the regression of fine aggregates, that the specification value from the 1st device generation era and the specification value valid according to the M OB [6] is significantly lower for the use of a fine aggregate in road surfaces made from 0.55 PWS unit concrete for the 2nd device generation.

3.3 Comparing the PWS and PSV polishing values

The PSV polishing value according to DIN EN 1097-8 S was tested on some coarse aggregates at the Technical University Darmstadt in the course of the research project "Determining the PSV calculation formula when using quartz grit as a polishing agent and granite grit as the control rock" [10]. During subsequent comparisons with the polishing procedures, reference is made to the results of the research with national control rocks (GER) and English control rocks (UK) and corundum as a polishing agent. The offset of the regression with national control rocks to the regression with English control rocks confirms the test findings from Darmstadt [10].

For the first time, there is a relationship with the PSV polishing method for the 2nd device generation

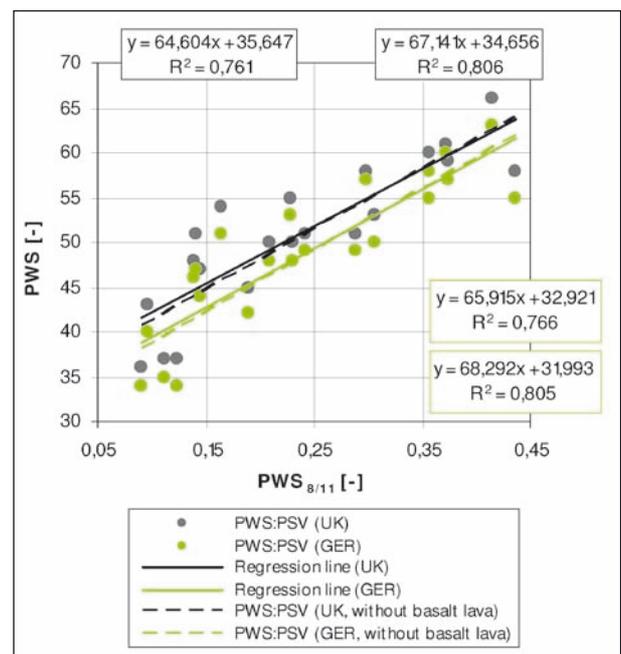


Fig. 8: Regression between the PSV and PWS polishing methods

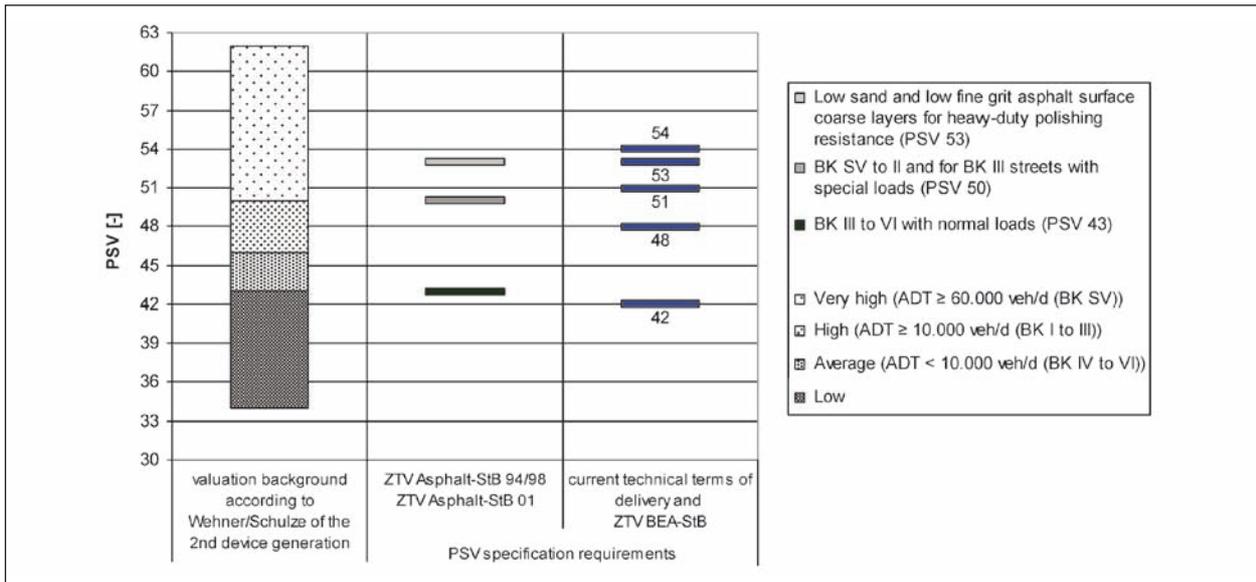


Fig. 9: Comparison of the PSV specification values [11, 12, 13, 14, 15] with the valuation background for 8/11 mastic test specimens for the 2nd device generation based on the “Berliner” specification values of the WEHNER/SCHULZE (PWS) 1st device generation

using the WEHNER/SCHULZE test method. The regression includes a determination, as is known from the first generation of devices. The Figure 9 shows the relationship between the transmitted “Berliner” specification values for 8/11 mastic test specimens via the PSV specification values [11, 12, 13, 14, 15].

Conversion to the specification values of the ZTV Asphalt-StB [11, 12] (Supplementary technical contract conditions and guidelines for the construction of asphalt pavements) is based on the test standard TP Gestein-StB Teil 5.4.1 edition 2010 with national control rock (Herrnholzer granite). The PSV specification values were changed due to later adaptations of the technical rules and regulations to the European material standards. Thus, only a limited comparison is possible. The minimum polished stone value for the implementation of an aggregate in the surface coarse layers of road construction is on the same level of 42 PSV for both methods. The level of the remaining specification values must be adjusted in order to take the changes of the 2001 [12] regulations and today’s standards [13, 14, 15] into account.

4 Summary

Within the scope of this project, a comprehensive analysis of the polishing resistance of fine and coarse aggregates according to the TP Gestein-StB Part 5.4.2 procedure, as well as the inclusion of

available results from routine testing, resulted in an updated valuation background of the procedure for the 2nd device generation based on the “Berliner” specification values.

Figure 10 provides a summary of the calculated expectation ranges as well as “Berlin” requirement values transmitted from the 1st to the 2nd generation of testing equipment. The expectation ranges were determined by the span of the study results complemented by a mathematical-statistical ratio. In this way, the ranges determined by test results have been extended to theoretical limits [16].

The systematic error of the random samples was determined by a comparative test. The deviations that arose from the comparative tests consisted of the test’s reproducibility and the repeatability during test specimen production. The deviation by the research contractor can be defined as a systematic error from how the testing device was handled. The results of the comparative test validate the valuation background.

Because of the TU Berlin’s reference samples and material, the “Berliner” requirement values from the 1st device generation could be directly transferred for the 8/11 and 0.2/0.4 test grit sizes. Equivalent requirement values for the 2/5 and 5/8 test grit sizes could be derived from indirect relationships.

The regressions of the 8/11 course test grit size between the device generations exhibit a good correlation. The specification values could thus be

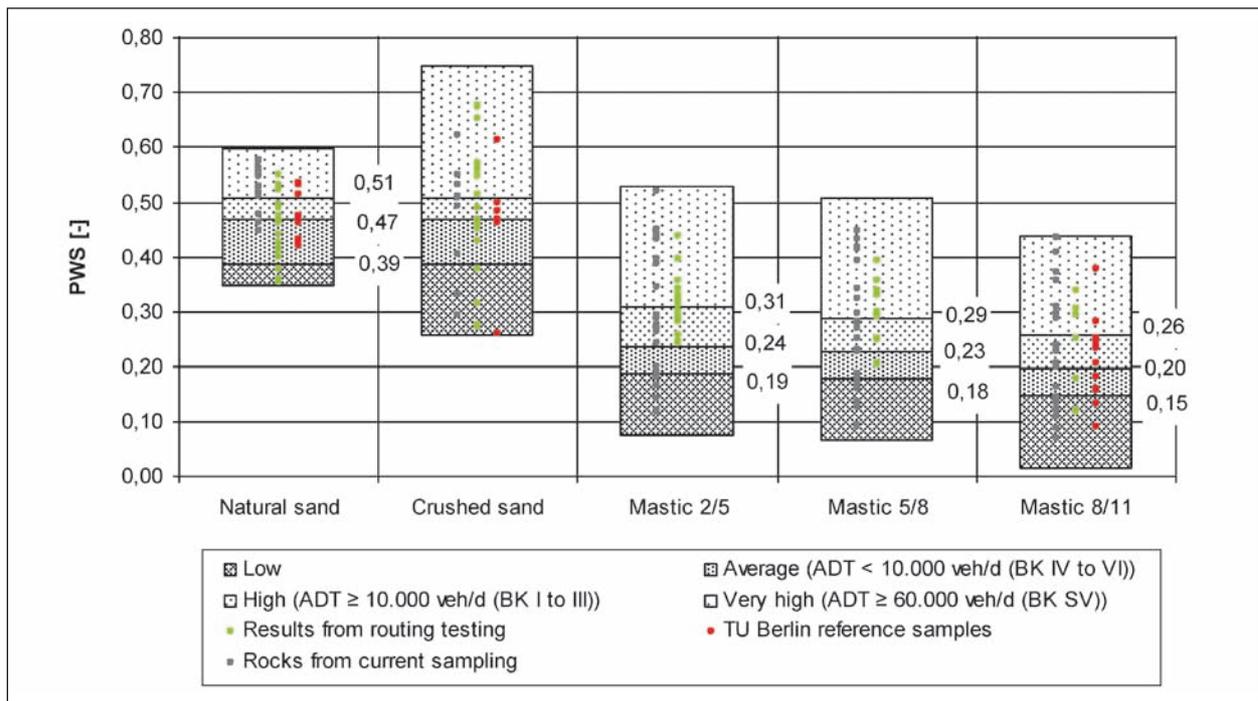


Fig. 10: PWS valuation background for the 2nd device generation derived from the specification values of the 1st device generation and the calculated upper and lower limits of the PWS polished stone values

transferred to a secured level with the help of the results of the mosaic test specimens from the 1st device generation era. In doing so, it was determined that the measured value level for mastic test specimens with the 8/11 test grit size were approx. 30% lower compared to the 1st device generation.

With a correlation of approx. 97% (see Figure 7), the relationship to the device generation is apparent for the 0.2/0.4 fine grit sizes. The measured value level of the 2nd standardized device generation is approx. 15% lower on average compared to the 1st device generation for the sand plates.

The reasons for the lower level of measured values of the current generation of device have not been studied. As essential machine parameters were retained during the redesign of the testing equipment, obviously other reasons must have been responsible for the systematically measured lower polishing values.

- Reduced bearing friction in the grip measuring device of the 2nd generation of devices compared to the 1st generation of devices based on new machine technology.
- Changes in the measured gums, since it is known that at the time of the 1st generation three producers have made the measurement gums.

- Changes in the sample preparation in the manufacture of mastic specimens.
- Stronger polishing effect through improved recycling of quartz-suspension.

In determining the new valuation background, a correlation to the “Determining the PSV calculation formula when using quartz grit as a polishing agent and granite grit as the control rock” [10] research project was taken into account when selecting the rocks so that the correlation between the PWS and PSV testing methods could also be established for the new device generation (see Figure 8).

A direct comparison with the polishing methods demonstrates that the transferred “Berliner” specification values must be calibrated. Moreover, the recommendations for the specification values are based on tests conducted by two laboratories and a single random sample of aggregates that is not representative for the rocks available and used in German road construction. Before introducing specification values to the WEHNER/SCHULZE test method, the PWS polished stone value calculation should be included in the collection of experiences. This procedure has proved its worth when the new test methods were introduced due to European standardization and will soon make a reliable database for checking preliminary specification values possible. The indirect

transformation proposed here can then be used to derive specification values for the 2/5 and 5/8 test grit sizes from the data collection.

5 Literature

- [1] DAMES, J.; LINDNER, J. (1990): Zusammenhang zwischen dem Polierwiderstand von Mineralstoffen und der Griffigkeit von Straßendecken; Forschungsarbeit FE 06.049 G86 C
- [2] DAMES, J.; LINDNER, J. (1988): Untersuchungen über den Einfluss des Größtkorns in bituminösen Deckschichten auf die Griffigkeit; Forschungsarbeit FE 7.109 G 83 F
- [3] DAMES, J.; LINDNER, J. (1989): Ermittlung der Endpolierwerte von im Straßenbau verwendeten Gesteinen; Forschungsarbeit FE 6.048 G 85 C
- [4] TP Gestein-StB – Teil 5.4.2 (Ausgabe 2008): Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau – Teil 5.4.2: Bestimmung des Polierwertes mit dem Verfahren nach WEHNER/SCHULZE
- [5] Senatsverwaltung für Bau- und Wohnungswesen: Ausführungsvorschriften zu § 7 des Berliner Straßengesetzes über Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau (Einführung TL Min-StB 94 (17. Februar 1996)
- [6] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Betonbauweisen: Merkblatt für die Herstellung von Oberflächentexturen auf Verkehrsflächen aus Beton (M OB), (Ausgabe 2009)
- [7] LINDNER, J.; DUDENHÖFER, B. (Januar 2004): Bericht über die Auswertung der ersten Vergleichsuntersuchung PWS mit der Prüfeinrichtung nach WEHNER/SCHULZE – neu; unveröffentlicht
- [8] KIRCHMAIER, L.; PFEILER, A. (Mai 2009): Griffigkeit von Betonstraßen – gesicherte Qualität durch neue Prüftechnik; Zeitschrift zement + beton
- [9] LINDNER, J.; DUDENHÖFER, B.; LI, A. (Juni 2009): Bestimmung des Polierwertes mit dem Verfahren nach WEHNER/SCHULZE, Durchführung von Ringversuchen zur Ermittlung der Präzision unter Vergleichsbedingungen; FGSV-Nr. 3/07
- [10] BÖHM, St.; SCHWEBEL, N. (Januar 2014): Bestimmung der PSV-Berechnungsformel bei Verwendung von Quarzkörnung als Poliermittel und Granitsplitt als Kontrollgestein, Forschungsarbeit FE-Nr. 06.0093/2011/BGB
- [11] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Asphaltstraßen: Zusätzlich Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt. ZTV Asphalt-StB (Ausgabe 1994, Fassung 1998)
- [12] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Asphaltstraßen: Zusätzlich Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt. ZTV Asphalt-StB (Ausgabe 2001)
- [13] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen: Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen. TL Asphalt-StB 07/13 (Ausgabe 2007, Fassung 2013)
- [14] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Betonbauweisen: Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton. TL Beton-StB 07 (Ausgabe 2007)
- [15] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen: Zusätzlich Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die bauliche Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen – Asphaltbauweisen. ZTV BEA-StB 09 (Ausgabe 09)
- [16] SCHULZE (2007): Beschreibende Statistik, 6. Auflage; Oldenburger Wissenschaftsverlag GmbH; München

Inhalt

1	Einleitung	13	7.1.3	Vorhandener Datenbestand aus Routineprüfungen	26
2	Problemstellung	13	7.1.4	Zusammenfassung der Messergebnisse	27
3	Rückblick	14	7.1.5	Vergleichsuntersuchungen	29
3.1	Entwicklung der Prüfanlage	14	7.2	Neuer Bewertungshintergrund	33
3.2	Entwicklung des Bewertungshintergrundes	16	7.2.1	Obere und untere Grenze des Polierwertes	33
4	Konzept der Untersuchungen	19	7.2.2	Übertragung der Anforderungswerte der 1. Gerätegeneration	35
5	Gesteinskörnungen	19	7.3	Vergleich der Polierwerte PWS und PSV	40
5.1	Auswahl der Gesteine	19	7.3.1	Zusammenhang der Polierwerte	40
5.1.1	Grobe Gesteinskörnung	19	7.3.2	Übertragung der PSV-Anforderungswerte auf das Verfahren nach WEHNER/SCHULZE	42
5.1.2	Feine Gesteinskörnung	20	8	Zusammenfassung	43
5.2	Rückstellproben	21	8.1	Ermittlung der oberen und unteren Grenzen des Polierwertes PWS	43
5.3	Gesteinswahl für Vergleichsuntersuchungen	22	8.2	Vergleich der Gerätegenerationen nach WEHNER/SCHULZE	43
6	Griffigkeitsuntersuchungen nach Polierbeanspruchung	22	8.3	Empfehlung für aktualisierte Anforderungswerte an die Polierresistenz nach dem Verfahren WEHNER/SCHULZE	44
6.1	Probenvorbereitung und Probekörperherstellung aus Gesteinskörnung	22	8.3.1	Grobe Gesteinskörnung	45
6.1.1	Grobe Gesteinskörnung – Mastixprüfkörper	22	8.3.2	Feine Gesteinskörnung	45
6.1.2	Feine Gesteinskörnung – Sandplatten	24	9	Weiterer Forschungsbedarf	46
6.2	Versuchsdurchführung	24	9.1	Auswirkungen der Probekörperherstellung auf die Vergleichspräzision des Verfahrens	46
6.3	Regeneration von Mastixprüfkörpern aus Rückstellproben	24	11	Literatur	47
6.3.1	Wissensstand	24	Anhänge	50	
6.3.2	Vorversuche	25	Anhang 1 – Prüfergebnisse	50	
7	Ergebnisse	25	Anhang 2 – Weiterführende mathematisch-statistische Betrachtungen	56	
7.1	Untersuchungsergebnisse	25	Anhang 3 – Mathematisch-statistische Analysen	60	
7.1.1	Gesteinskörnung aktueller Probenahme	25			
7.1.2	Gesteinskörnung aus Rückstellproben	26			

1 Einleitung

Die wichtigste Anforderung an eine Fahrbahnbefestigung ist die Verkehrssicherheit, die maßgebend durch die Oberflächeneigenschaften der Straße geprägt wird. Neben den Attributen „lärmarm“ und „kontrastreich hell“ ist daher der Griffigkeit ein besonders hoher Stellenwert beizumessen, die nachweislich Auswirkungen auf das Unfallgeschehen hat.

Zur Reduzierung des daraus entstehenden volkswirtschaftlichen Schadens und vor allem der tödlichen Unfälle wurden Prüfverfahren entwickelt, die Untersuchungen der Griffigkeit einer Fahrbahnoberfläche sowohl vor Ort als auch im Laboratorium unter definierten Prüfbedingungen ermöglichen. Die Prüfverfahren sollten sowohl die Fahrbahnoberfläche vor Ort messen als auch die Möglichkeit bieten, vor Beginn der Baumaßnahme einen Belag mit dauerhaft hoher Griffigkeit zu entwerfen. Während für Griffigkeitsmessungen in situ seit Ende der 50er Jahre Großgeräte zur Verfügung standen (Stuttgarter Reibungsmesser und Skiddometer), fehlte noch ein geeignetes Laborverfahren.

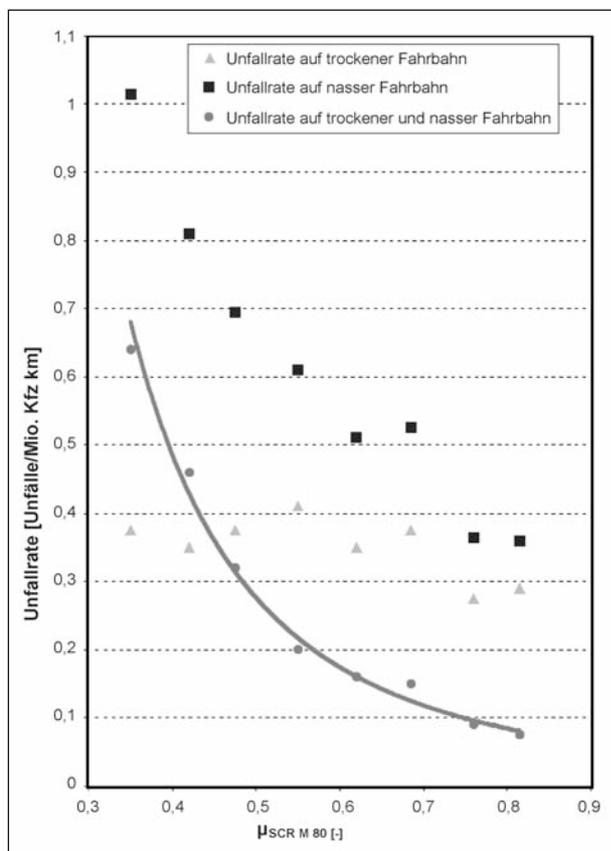


Bild 1: Unfallrate über die Griffigkeit in Abhängigkeit vom Fahrbahnzustand [1]

WEHNER und SCHULZE entwickelten an der TU Berlin ein solches im Rahmen der Forschungsarbeit „Laborversuch zur Bestimmung der Griffigkeit und Polierbarkeit von Straßendecken“. Das Prüfverfahren hat sich etabliert und ist als „Prüfung zur Ermittlung des Polierwertes von Gesteinskörnungen“ Bestandteil der TP Gestein-StB. Für die Prognose der Griffigkeit nach Polieren wird das Prüfverfahren derzeit in das europäische Normenwerk umgesetzt.

2 Problemstellung

Bereits aus wissenschaftlichen Untersuchungen der 60er und 70er Jahre ist bekannt, dass ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Polierwiderstand von Gesteinskörnungen und der Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen besteht [10]. Derzeit wird das Merkmal „Griffigkeit“ bei der Konzeption von Baustoffgemischen für Fahrbahndeckschichten aus Asphalt und Beton über den PSV (Polished Stone Value) der Gesteinskörnung 8/10 prognostiziert. Diese Vorgehensweise ist nachgewiesenermaßen nicht schlüssig und führt zu Fehlbeurteilungen [7]. Eine folgerichtige Ableitung ist nur möglich, wenn das Gesteinskörnungsgemisch in seiner realen Korngrößenverteilung untersucht wird. Diese Erkenntnisse basieren auf Untersuchungen mit der Prüfanlage nach WEHNER/SCHULZE an der TU Berlin [6]. Das Verfahren ist in den TP Gestein-StB, Teil 5.4.2 [4] beschrieben. Es existiert ein Bewertungshintergrund für das Prüfverfahren auf Basis einer über 30-jährigen Sammlung von Untersuchungsdaten aus Forschungsvorhaben und Routineprüfungen für die Gesteinsindustrie. Die Standardprüfungen werden an feinen Gesteinskörnungen 0,2/0,4 mm, an groben Gesteinskörnungen 2/5, 5/8 und 8/11 mm durchgeführt. Um den Bezug zum Prüfverfahren nach BS 812 zu erhalten, wurden die Prüfungen zunächst an Mosaik-Probekörpern aus grober Gesteinskörnung 8/10 durchgeführt. Für die feineren Körnungen wurden andere Probekörperoberflächen gewählt, die weniger abhängig sind von den Einflüssen der Herstellung. Aus dem Bewertungshintergrund wurden Anforderungswerte abgeleitet, die in Länderregelungen [11] bzw. einem Merkblatt der FGSV [14] umgesetzt wurden.

Ende der 90er Jahre waren die noch existierenden Prüfeinrichtungen nach dem Berliner Vorbild in der BAST, in Delft und Wien nicht mehr gebrauchstauglich. Dies bewog 1999 dazu, einen modernisierten

Nachbau durchzuführen, der die wesentlichen Maschinenparameter beibehält. Bei internen und unveröffentlichten Vergleichsuntersuchungen stellte sich heraus, dass mit den Prüfeinrichtungen der neuen Generation ein abweichendes Messwertniveau ermittelt wird [15]. In Österreich hat man bereits reagiert und einen neuen Bewertungshintergrund mit Anforderungswerten für die in Österreich vorkommenden feinen Gesteinskörnungen geschaffen [16].

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

Derzeit existieren 19 Prüfeinrichtungen der neuen 2. Gerätegeneration in Europa. 16 dieser Anlagen haben im Jahre 2009 an einem Ringversuch zur Ermittlung der Vergleichspräzision bei der Prüfung von Gesteinskörnungen [21] nach der in Deutschland aufgestellten technischen Prüfanweisung teilgenommen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Präzision des Verfahrens einen Einsatz in der Routineprüfung von Gesteinen ermöglicht. Für die an den Prüfanlagen ermittelten Ergebnisse steht jedoch kein nationaler oder europäischer Bewertungshintergrund zur Verfügung. Die Ergebnisse können nur auf vergleichender Basis genutzt werden. Ziel des Forschungsvorhabens ist die Neuermittlung eines Bewertungshintergrundes für die in Deckschichten eingesetzten Gesteine in den Prüfkörnungen 0,2/0,4, 2/5, 5/8 mm. Weiterhin soll ein Bewertungshintergrund für die Prüfkörnung 8/11 mm geschaffen werden, der die zukünftig veränderte Probekörperherstellung berücksichtigt. Die Herstellung dieser Probekörper ist gegenüber dem Mosaik-Auslegeverfahren deutlich vereinfacht und weniger abhängig von den Einflüssen der Laboranten. Die gewonnene Datenbasis kann als Grundlage für die in Bearbeitung befindliche europäische Norm genutzt werden.

3 Rückblick

3.1 Entwicklung der Prüfanlage

1959 begannen der Universitätsprofessor B. WEHNER und sein Assistent K.-H. SCHULZE an der Technischen Universität Berlin im Rahmen eines Forschungsauftrages des Bundesministeriums für Verkehr mit der Entwicklung eines Laborversuches zur Bestimmung der Griffigkeit und



Bild 2: Stuttgarter Reibungsmesser (SRM)

Polierbarkeit von Straßendecken. Erste Berichte der Fachpresse über die Prüfeinrichtung und Ergebnisse erfolgten im Jahr 1967 auf dem XIII. Internationalen Straßenkongress in Tokio und dem von WEHNER initiierten Internationalen Kolloquium über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit in Berlin.

Die entwickelte Prüfanlage simulierte Verkehrsüberrollungen mit Gummireifen und konnte die Griffigkeit eines Probekörpers im Labor messen, um die Griffigkeit einer Fahrbahnoberfläche vor Baubeginn zu prüfen. Das Laborgriffigkeitsmessgerät sollte den Messvorgang und das Messprinzip des Stuttgarter Reibungsmessers (siehe Bild 2) nachempfinden und auf Bohrkernen bzw. Ausbaustücken ähnliche Griffigkeitsergebnisse liefern wie die in situ mit dem Stuttgarter Reibungsmesser gemessenen.

Die erste Anlage der Technischen Universität (TU) in Berlin bestand aus zwei Geräteeinheiten (siehe Bild 3). Die Poliereinrichtung simulierte die Verkehrsbelastung mittels dreier konischer profilierter Gummirollen, die auf einer Kreisbahn mit 30.000 Überrollungen je Gummirolle und Stunde über die Prüfkörperoberfläche liefen. Die dabei stattfindende Polierwirkung auf der Kontaktfläche zwischen der Prüfkörperoberfläche und den Gummirollen konnte über den Anpressdruck variiert werden. Somit war eine Anpassung des Anpressdruckes an die verschiedenen Belastungen der Verkehrsarten möglich. Der Standardkontaktdruck für Routineprüfungen betrug 0,4 MPa entsprechend dem Reifeninnendruck eines mittleren Lastkraftwagens. Bei der Herstellung der Neugeräte wurde ein einheitlicher, nicht veränderbarer Kontaktdruck von 0,4 MPa für alle Prüfungen festgelegt. In der Polierstation wurde während des Poliervorgangs eine kontinuier-



Bild 3: Prüfanlage nach WEHNER/SCHULZE – 1. Prüfanlage der TU Berlin (links: Poliereinrichtung; rechts: Laborgriffigkeitsmessgerät)

liche Menge an Wasser-Quarzmehl-Suspension zugegeben, um den Poliervorgang zu straffen.

Direkt nach der Polierbeanspruchung wurde die Probe im Laborgriffigkeitsmessgerät (LGM) eingespannt. Im LGM wurde mittels dreier rotierender Messgummis, die Ausschnitten eines Lkw-Reifens entsprechen, die Griffigkeit als Quotient der Reibungskraft zur Normalkraft (Coulomb'sches Gesetz) bei einer Geschwindigkeit von 60 km/h während einer Bremsung von 100 km/h auf 0 km/h gemessen. Weiterhin wurde der zurückgelegte Bremsweg aufgezeichnet. Die Messungen für Gesteinskörnungen wurden nach einer Polierbeanspruchung von insgesamt 90.000 Überrollungen durchgeführt. Diese Polierdauer ergab sich aus der Forschungsarbeit zur Ermittlung der Endpolierwerte von im Straßenbau verwendeten Gesteinen [7] und stellt einen Kompromiss zwischen ausreichender Spreizung der Prüfergebnisse und praxisgerechter Polierdauer dar. Der Endpolierwert wird dabei nicht erreicht. Zur Kontrolle der Messgummis wurde bis 2002 neben der Sichtkontrolle auf Beschädigungen eine Kontrolloberfläche in Form eines Wurzelbleches (texturiertes Metallblech) genutzt. Optional wurde mit der Neufassung der „Technischen Prüfvorschrift für Mineralstoffe – Teil

5.5.2: Bestimmung des Polierwertes mit dem Verfahren nach WEHNER/SCHULZE“ [2] von 1999 auch eine Kontrolloberfläche aus Glas oder frisch sandgestrahltem Naturstein zugelassen. Auf der Kontrolloberfläche wurde eine vollständige Messung vor und nach dem eigentlichen Versuch durchgeführt, um etwaige Beschädigungen der Messgummis während des Versuches messtechnisch zu erfassen. Mit der neuen Gerätegeneration wurde auf eine texturierte Glasplatte umgestellt.

In verschiedenen Forschungsarbeiten wurden Vergleiche zwischen den Griffigkeitsmessungen auf Oberflächen entnommener Ausbauproben und Griffigkeitsmessungen auf Straßen mit dem Stuttgarter Reibungsmesser durchgeführt, die einen sehr guten Zusammenhang zwischen der Verkehrssimulation und der realen Griffigkeitsentwicklung auf hoch beanspruchten Verkehrsflächen aufweisen [5, 23]. Mit der Prüfmaschine konnte somit nicht nur der Polierwert von Gesteinskörnungen ermittelt werden, sondern auch eine Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Fahrbahnoberflächen durchgeführt werden.

Weitere Untersuchungen wiesen den Einfluss der Gesteinskörnung, speziell der Gesteinsart und der Korngröße, auf die Griffigkeitsentwicklung nach

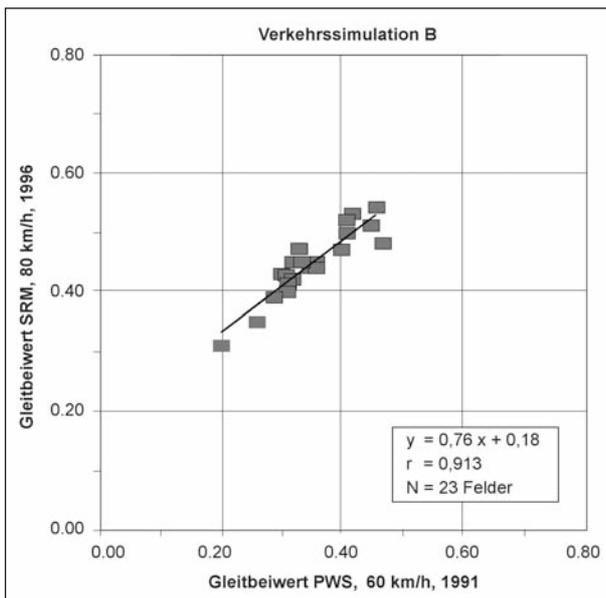


Bild 4: Zusammenhang zwischen den im Labor ermittelten Griffigkeitsmessungen und dem SRM [5]



Bild 5: Standardprüfkörper nach TP Gestein [4] (oben: Mosaik 8/11; unten links: Sandplatte; unten rechts: Mastix 2/5)

[6, 7, 8, 9 und 10]. Der Einfluss der Korngröße auf den Polierwert wurde schon in einer sehr frühen Phase der Entwicklung des Prüfverfahrens von Prof. B. WEHNER erkannt und in einem korngroßenabhängigen Bewertungshintergrund dargestellt.

Zur Prüfung der Polierwerte von Gesteinskörnungen wurden drei standardisierte Prüfkörper verwendet, die je nach Korngröße der Prüfkörnung unterschiedlich beschaffen waren. Für die grobe Gesteinskörnung 8/11 wurden, in Anlehnung an das englische Polierverfahren, Prüfkörper nach dem Mosaik-Auslegeverfahren hergestellt. Das Auslegeverfahren wurde aufgrund des zu hohen Aufwandes nicht für feinkörnigere Lieferkörnungen genutzt. Die

feineren Prüfkörnungen bis zu einer unteren Siebgröße von 2 mm wurden in einem Mastix-Gemisch eingebettet und anschließend wurde die Prüfoberfläche aus der Probe herausgearbeitet. Die Prüfung an der feinen Gesteinskörnung erfolgte an der als repräsentativ festgelegten Prüfkörnung 0,2/0,4. Diese wurde auf Holzplatten mit einem geeigneten Harz oder Kleber in Anlehnung an das Sandpapierverfahren aufgeklebt. 1999 wurde das Prüfverfahren in die Technische Prüfvorschrift für Mineralstoffe – Teil 5.5.2 [2] aufgenommen und 2008 in den Teil 5.4.2 der Technischen Prüfvorschrift für Gesteinskörnungen überführt [5].

3.2 Entwicklung des Bewertungshintergrundes

Zunächst wurden mit der Prüfanlage nach WEHNER/SCHULZE nur die grobe Prüfkörnung 8/11 als Mosaikprüfkörper, die Prüfkörnung 2/5 als Mastixprüfkörper und die feine Prüfkörnung 0,2/0,4 als Sandplatten geprüft. In einer 1982 abgeschlossenen Forschungsarbeit von SCHULZE und LINDNER [8] wurden neben dem Standard-Mosaikprüfkörper für die Prüffraktion 8/11 auch vergleichende Untersuchungen durchgeführt, bei denen die Prüfkörnung 8/11 nach dem Mastix-Einbettverfahren im Probekörper gebunden wurde. Somit entstanden bereits im Jahre 1982 zwei unterschiedliche Bewertungshintergründe für die Prüfkörnung 8/11, von denen einer zunächst in den Routineprüfungen keine Bedeutung erlangte.

Bis 1988 wurden die Polierwerte nach WEHNER/SCHULZE (PWS) der Gesteinskörnungen nur in zwei Klassen kategorisiert (siehe Bild 6). Erst ab 1988 entstand der bekannte dreistufige Bewertungshintergrund. Auf Grundlage der Forschungsergebnisse von DAMES und LINDNER [10] an den Verkehrsstrecken B 295 Weilimdorf (Stuttgart), A 39 Salzgitter, B 1 Potsdamer Chaussee (Berlin) wurden, aufgrund des nachgewiesenen Zusammenhangs zwischen dem Polierwiderstand von Mineralstoffen und der Griffigkeit von Straßendecken in der gleichnamigen Forschungsarbeit, erstmals verkehrsbelastungsabhängige Mindestwerte für den Polierwiderstand von Gesteinskörnungen vorgeschlagen.

Da diese Mindestwerte auf Untersuchungen an Strecken mit geringer Verkehrsbeanspruchung basierten, wurde 1996 nach weiteren Untersuchungen der PWS-Bewertungshintergrund auch für hohe

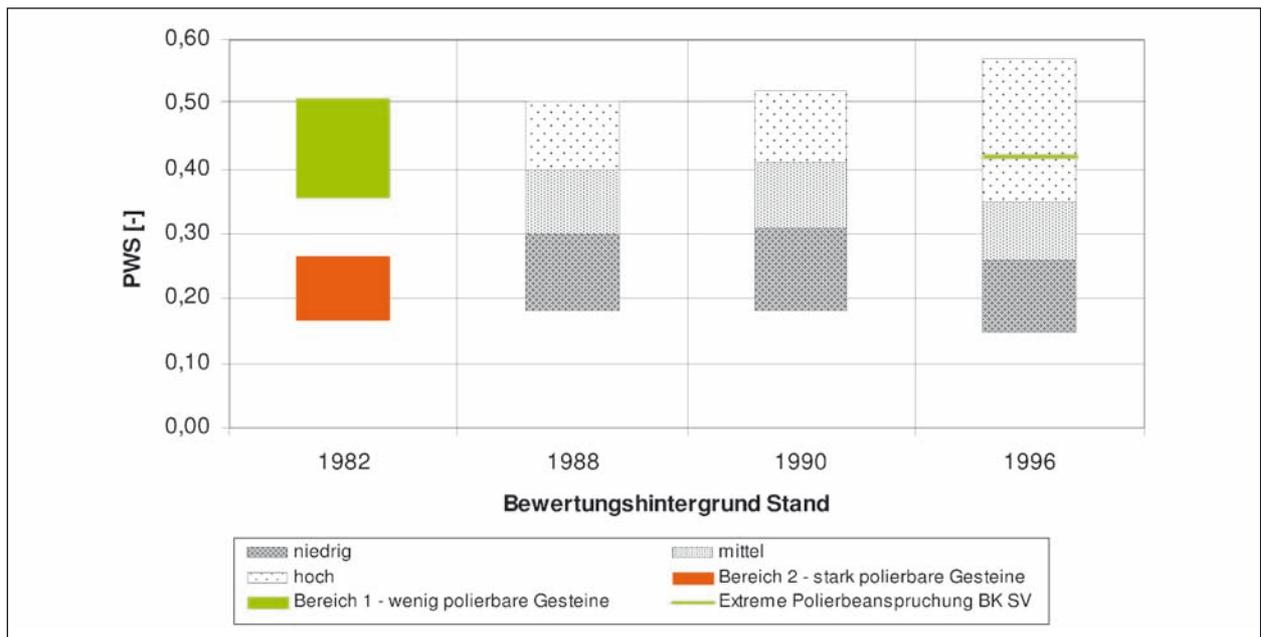


Bild 6: Entwicklung des Bewertungshintergrundes für Mosaik 8/11 [8, 7, 10, 11]

Polierbeanspruchung der Fahrbahnoberfläche	Prüfkörnung		
	8/11	2/5	0,2/0,4
Normale Polierbeanspruchung BK VI bis IV	≥ 0,26	≥ 0,29	≥ 0,45
Starke Polierbeanspruchung BK I bis III	≥ 0,35	≥ 0,39	≥ 0,55
Extreme Polierbeanspruchung BK SV	≥ 0,42	≥ 0,46	≥ 0,60

Tab. 1: Anforderungen an den Polierwiderstand von Mineralstoffen in Berlin (1996) [11]

Bauklassen fortgeschrieben. Die daraus abgeleiteten Anforderungswerte für den Polierwiderstand von Gesteinskörnungen für Deckschichten sollten in das Regelwerk des Straßenbaus Eingang finden (siehe Tabelle 1). Zu einer bundesweit einheitlichen Einführung von korngößen- und beanspruchungsabhängigen Anforderungswerten ist es aber bis heute nicht gekommen. Lediglich in den Regelwerken des Landes Berlin wurden die Anforderungswerte als Ausführungsvorschrift zum Berliner Straßengesetz bei der Einführung der Technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau (TL Min-StB 94) aufgenommen [11]. Im Nachfolgenden werden diese Anforderungswerte „Berliner“ Anforderungswerte genannt. Neben den Grenzen wurde die Spannweite der Polierwerte mit fortschreitender Anzahl und Vielfalt der Gesteine erweitert.

Die Verwendung von Mastixprüfkörpern für die Polierprüfung war bis 1990 stetig zunehmend (siehe Bild 7), sodass vergleichbare Entwicklungen im Bewertungshintergrund von Mastixprüfkörpern erfolgt sind wie bei der Prüfung von Mosaikprüfkörpern. Der letzte Schritt der Korrelation von der Simulation

im Labor zur Polierbeanspruchung auf der Fahrbahnoberfläche wurde 1996 jedoch nicht für die Mastixprüfkörper durchgeführt. Die abgeleiteten Anforderungswerte galten für Prüfergebnisse, die nach den Bedingungen der später eingeführten TP Min-StB – Teil 5.5.2 [2] (Mosaikprobekörper) durchgeführt worden waren.

Der Bewertungshintergrund für die Polierresistenz von feinen Gesteinskörnungen basiert auf Untersuchungen an der Prüfkörnung 0,2/0,4 (siehe Bild 8). Die Entwicklung des Bewertungshintergrundes erfolgte parallel zu dem für die groben Gesteinskörnungen. In der historischen Entwicklung zeigt sich der Trend einer immer größer werdenden Spannweite der Polierwerte im gleichen Maße wie bei den groben Prüfkörnungen. Die Spannweite der Polierwerte ist jedoch deutlich größer als bei den groben Prüfkörnungen. Aus verschiedenen Forschungsarbeiten ist bekannt, dass der Polierwert der feinen Gesteinskörnung bei sandreichen Baustoffgemischen einen hohen Einfluss auf die Polierresistenz der Deckschicht hat [9, 17, 18]. Dennoch bestehen, mit Ausnahme der Länderregelung in Berlin aus

1996, keine Anforderungen an die Polierresistenz von feinen Gesteinskörnungen beim Bau von Fahrbahnbefestigungen in Asphaltbauweise. Die einzig bundesweit geltende Anforderung für den Polierwert feiner Gesteinskörnungen wurde für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen in Betonbauweise im Regelwerk aufgenommen. Im Merkblatt M OB [14] wird als Empfehlung der Anforderungswert des Bewertungshintergrundes von 1996 für starke Polierbeanspruchung ($PWS_{0,2/04} \geq 0,55$) für „Betondecken ohne Entfernen des Oberflächenmörtels“ übernommen. Die Forschungsarbeit [22] belegt den

Einfluss feiner Gesteinskörnungen auf die Griffigkeitsentwicklung von Verkehrsflächenbefestigungen in Betonbauweise.

Da in den letzten Jahren aus Gründen der Griffigkeit und Lärmemission die Verwendung von Asphaltdeckschichten mit kleinerem Größtkorn (8 bzw. 5 mm) zugenommen hat, stieg auch der Bedarf an Kenntnissen über den Polierwert der groben Gesteinskörnung 5/8. Ein zuverlässiger Bewertungshintergrund bzw. Anforderungswerte bestehen für diese Lieferkörnung derzeit nicht.

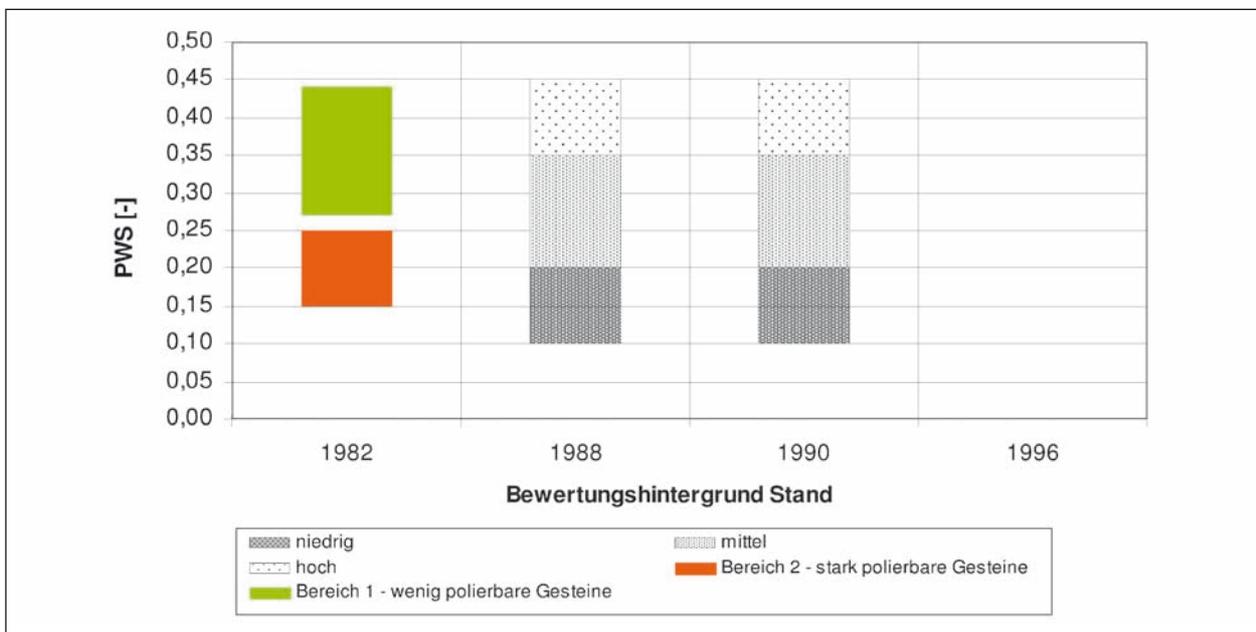


Bild 7: Entwicklung des Bewertungshintergrundes für Mastix 8/11 [8, 9, 10]

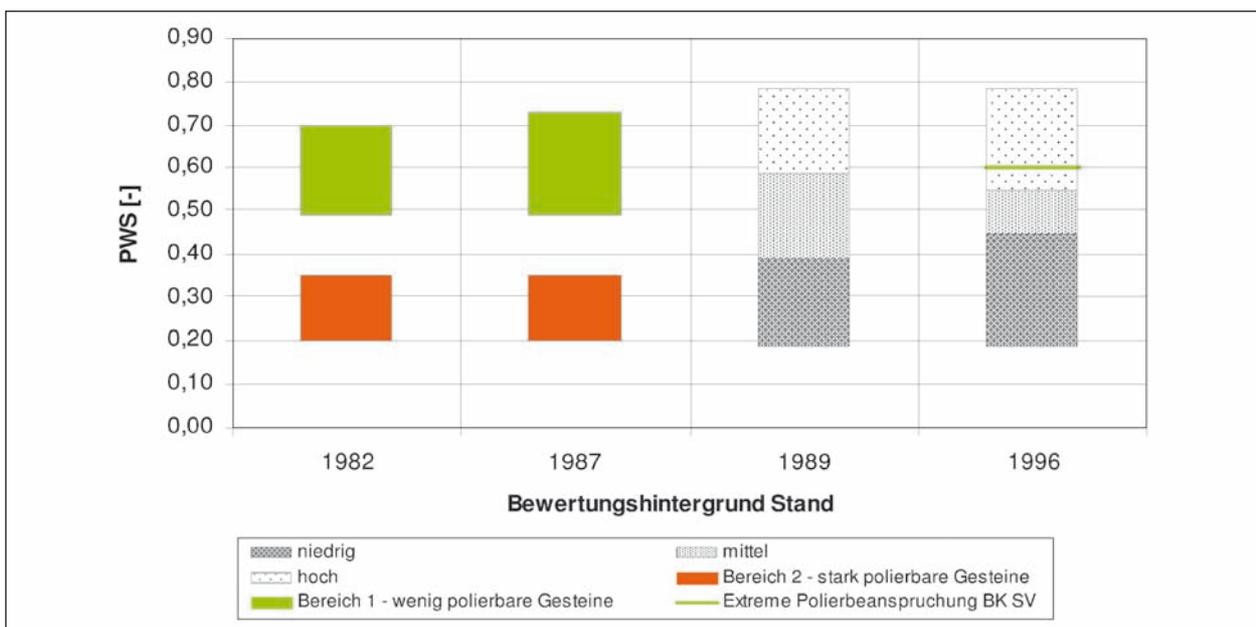


Bild 8: Entwicklung des Bewertungshintergrundes für feine Gesteinskörnungen 0,2/0,4 [8, 9, 6, 11]

4 Konzept der Untersuchungen

Das Forschungsziel bestand in der Aufstellung eines für die standardisierte 2. Gerätegeneration gültigen Bewertungshintergrundes. Dabei sollten nicht nur die Spannweiten der Polierwerte für unterschiedliche Lieferkörnungen der im Straßenbau verwendeten Gesteinsarten ermittelt werden, sondern auch die Anforderungswerte aus der Zeit der 1. Gerätegeneration (Prüfmaschine der TU Berlin) in ein aktuelles Bewertungssystem überführt werden. Zur Erreichung des Forschungsziels wurden die Untersuchungen in 2 Phasen geteilt.

- Phase 1: Untersuchung unterschiedlicher Gesteine in den Kornklassen 8/11, 5/8, 2/5 und 0,2/0,4 mm und Ermittlung der Ober- und Untergrenzen für den Polierwert PWS.
- Phase 2: Regression zwischen dem Bewertungshintergrund der 1. und 2. Gerätegeneration auf der Basis von vorhandenen Rückstellproben der TU Berlin. Übertragung der „Berliner“ Anforderungswerte auf die Prüfergebnisse der 2. Gerätegeneration.

Für die Untersuchungen der Phase 1 wurden Gesteine aus 25 Lagerstätten in den Lieferkörnungen 2/5, 5/8 und 8/11 in das Untersuchungsprogramm aufgenommen. Im Nachfolgenden werden diese als „Gesteinskörnung aktueller Probenahme“ bezeichnet. Weiterhin wurden feine Gesteinskörnungen herangezogen in Form von je 15 Brech- und Natursand. Die Datenbasis wurde durch Ergebnisse aus 12 Jahren Routineprüfungen des Forschungsnehmers ergänzt. Die Ergebnisse der Griffigkeitsuntersuchungen aus der 2. Phase wurden ebenfalls ergänzend hinzugezogen.

Zur Validierung der Untersuchungsergebnisse wurden 6 Gesteine der 25 groben Gesteinskörnungen sowie 3 Brechsande und 3 Natursande ausgewählt, an denen an der Technischen Universität München und der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen die Polierwerte nach dem Verfahren WEHNER/SCHULZE untersucht worden waren. Mit den Vergleichsuntersuchungen soll der im Labor des Forschungsnehmers neu ermittelte Bewertungshintergrund abgesichert werden.

5 Gesteinskörnungen

5.1 Auswahl der Gesteine

5.1.1 Grobe Gesteinskörnung

Die Auswahl der Gesteine wurde in Zusammenarbeit mit der zeitgleich stattfindenden Forschungsarbeit „Bestimmung der PSV-Berechnungsformel bei Verwendung von Quarzkörnung als Poliermittel und Granitsplitt als Kontrollgestein“ (FE 06.0093/2011/BGB) der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt. Die Intention dieser Zusammenarbeit bestand in der Regression zwischen den beiden Polierverfahren WEHNER/SCHULZE und PSV. Bei der Auswahl der groben Gesteinskörnungen wurde vor allem auf die Varietät der Gesteine geachtet. Es sollte eine möglichst breite Auswahl aus dem gesamten Spektrum der natürlichen Gesteine gewählt werden. Weiterhin sollte das gesamte Spektrum der Polierwerte möglichst gleichmäßig abgedeckt werden. Das Bild 9 zeigt das Ergebnis der Gesteinsbeschaffung für die Lieferkörnungen 2/5, 5/8 und 8/11.

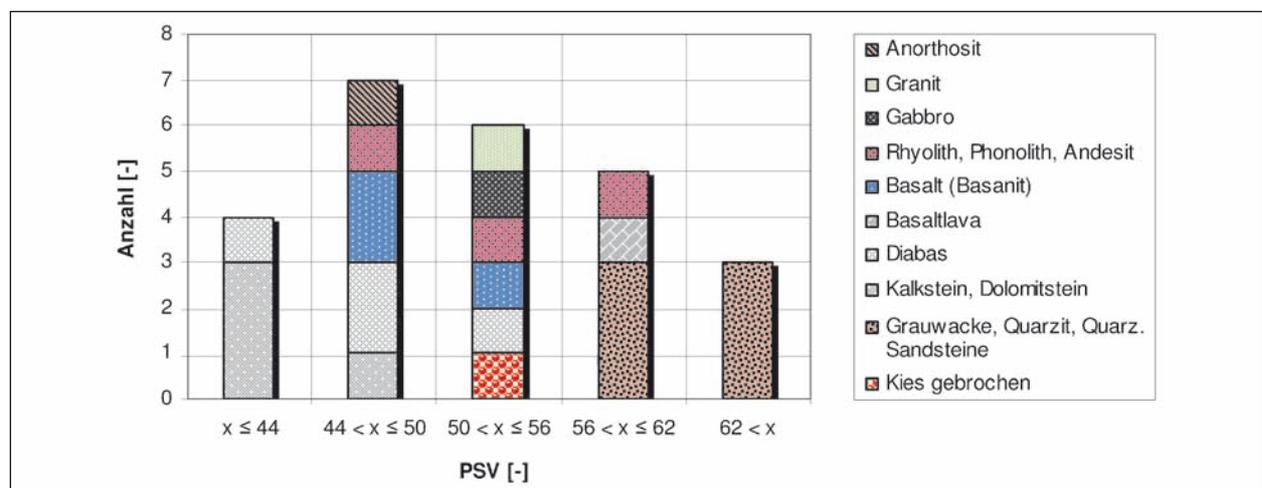


Bild 9: Verteilung der groben Gesteinskörnungen nach den PSV-Werten (Angaben der Lieferanten) und der Gesteinsgruppe [12]

Die angegebenen Polierwerte PSV sind die vom Gesteinshersteller deklarierten Ergebnisse aus der regelmäßigen Überwachung. Zur Differenzierung der Gesteinsvielfalt wurden die Gesteine den Gesteinsgruppen der TL Gestein-StB 07 [12] zugeordnet.

Die Gesamtverteilung zeigt die Problematik bei der Gesteinsbeschaffung. Gesteine mit mittlerer und hoher Polierresistenz sind häufig, während Gesteine niedriger Polierresistenz eher rar sind. Die Problematik erklärt sich damit, dass Gesteine mit niedrigem Polierwert nicht in Deckschichten eingesetzt werden und daher keine Prüfergebnisse vorliegen. Dennoch konnte im Sinne einer homogenen

FE-Nr.	Gestein	Gesteinsgruppe gemäß [12]
1	Kies	11
2	Granit	1
3	Sandstein	9
4	Kalkstein	8
5	Andesit	3
6	Basalt	4
7	Basalt	4
8	Diabas	7
9	Diabas	7
10	Diabas	7
11	Diabas	7
12	Gabbro	2
13	Grauwacke	9
14	Grauwacke	9
15	Dolomit	8
16	Kalkstein	8
17	Quarzit	9
18	Rhyolith	3
19	Schluffstein	9
20	Anorthosit	*
21	Sandstein	9
22	Kalkstein	8
23	Basanit	4
24	Basaltlava	5
25	Phonolith	3

* nicht in der Einklassifizierung der TP Gestein berücksichtigt

Tab. 2: Gesteine der groben Prüfkörnungen

Verteilung der Polierresistenz eine relativ gleichmäßig verteilte Stichprobe für die Polieruntersuchungen beschafft werden.

Erkennbar wird in dieser Darstellung bereits die Abhängigkeit zwischen Petrografie und Polierresistenz. So sind die Kalksteine überwiegend als schwach polierresistente Gesteine zu klassifizieren, dem gegenüber steht die Gruppe 9 der quarzreichen Sedimentgesteine und Metamorphite mit einer hohen Polierresistenz.

5.1.2 Feine Gesteinskörnung

Bei der Auswahl der feinen Gesteinskörnungen bis 2 mm Größtkorn wurden sowohl gebrochene Körnungen aus Hartgesteinen (nachfolgend Brechsande genannt) als auch ungebrochene Körnungen aus Lockergesteinen (nachfolgend Natursande genannt) berücksichtigt. Die 25 untersuchten Brechsande wurden exemplarisch aus den Gesteinslagerstätten ausgewählt, die auch in der Lieferkörnung > 2 mm untersucht wurden. Dabei wurde auf eine gleichmäßige Verteilung im Bereich der Polierresistenz und der Gesteinsvarietät geachtet. Die Natursande wurden unter dem Aspekt einer bundesweiten Stichprobe mittels einer Gebietsstichprobe aus Deutschland bestellt.

FE-Nr.	Gestein	Gesteinsgruppe gemäß [12]
1	Kies	11
2	Granit	1
5	Andesit	3
7	Basalt	4
9	Diabas	7
11	Diabas	7
12	Gabbro	2
13	Grauwacke	9
15	Dolomit	8
16	Kalkstein	8
17	Quarzit	9
18	Rhyolith	3
21	Sandstein	9
23	Basanit	4
24	Basaltlava	5

Tab. 3: Brechsande der feinen Prüfkörnung

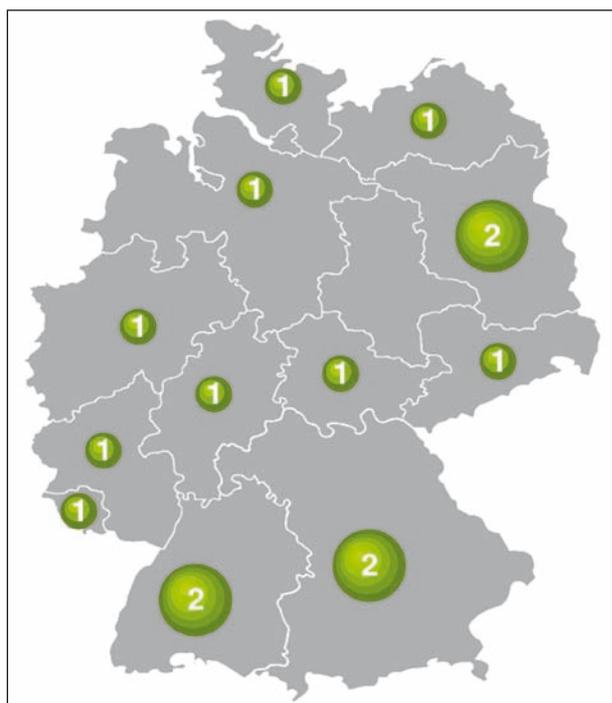


Bild 10: Gebietsstichprobe der Natursande mit Angabe der Anzahl an Natursanden je Bundesland

FE-Nr.	Bundesland
26	Brandenburg
27	Hessen
28	Niedersachsen
29	Baden-Württemberg
30	Brandenburg
31	Rheinland-Pfalz
32	Bayern
33	Bayern
34	Thüringen
35	Mecklenburg-Vorpommern
36	Nordrhein-Westfalen
37	Baden-Württemberg
38	Saarland
39	Sachsen
40	Schleswig-Holstein

Tab. 4: Natursande der feinen Prüfkörnung

5.2 Rückstellproben

In Zusammenarbeit mit Prof. HUSCHEK wurden Proben aus dem Lager der Technischen Universität Berlin ausgewählt, deren Polierwerte (1. Gerätegeneration) aus Forschungsarbeiten oder Routineprüfungen bekannt waren.

FE-Nr.	Gestein	PWS 1. Gerätegeneration	
		Mosaik	Mastix*
56	Diabas 1	0,35	0,285
57	Quarzit 1	0,48	0,405
58	Basalt 1	0,36	0,300
59	Basalt 2	0,41	0,295
60	Quarzprophyr 1	0,37	0,325
61	Granit 1	0,41	0,330
62	Granit 2	0,42	0,360
63	Gabbro 2	0,39	0,345
64	Alpine Moräne	0,43	0,385
65	Grauwacke	0,50	0,445
66	Muschelkalk	0,21	0,130
67	dev. Massenkalk	0,18	0,105
68	Kulmplattenkalk	0,33	0,280
69	Hochofenschlacke	0,37	0,205
70	Gabbro 1	0,40	0,320

* Mittelwert aus zwei Serien

Tab. 5: Rückstellproben der Prüfkörnung 8/11

FE-Nr.	Gestein	PWS _{0,2/0,4} 1. Gerätegeneration
41	Quarzit	0,72
42	Diabas	0,58
43	Kalkstein	0,31
44	Basalt	0,58
45	Basalt	0,59
46	Diabas	0,54
47	Natursande	0,61
48		0,48
49		0,57
50		0,58
51		0,51
52		0,53
53		0,62
54		0,50
55		0,55

Tab. 6: Rückstellproben der feinen Prüfkörnung 0,2/0,4 mm

So konnten 15 feine Gesteinskörnungen als loses Material für die Neuermittlung des Bewertungshintergrundes beschafft werden.

Bei der Auswahl wurde auf eine möglichst große Spreizung der Polierwerte geachtet. Jedoch sind



Bild 11: Mastixprüfkörper der Prüfkörnung 8/11 aus dem Forschungsprojekt [6] der TU Berlin

die Unterschiede vor allem bei den Natursanden als gering einzustufen.

Loses Prüfgestein der groben Gesteinskörnungen war nicht in ausreichenden Mengen vorhanden. Aufgrund dessen wurden Mastixprobekörper für die Vergleichsuntersuchung herangezogen. Es konnten die Probekörper aus dem Forschungsprojekt „Ermittlung der Endpolierwerte von im Straßenbau verwendeten Gesteinen“ [6] für die Prüfungen genutzt werden.

In der vorgenannten Arbeit wurden die Prüfkörper nach dem Mastix-Einbettverfahren und nach dem Mosaik-Auslegeverfahren hergestellt und die Griffigkeit der Probekörperoberfläche wurde nach mehreren Polierzyklen gemessen. Das Ziel der Forschungsarbeit bestand in der Ermittlung eines Polierwertes, der das niedrigste Griffigkeitsniveau für das Prüfgestein unter den vorliegenden Prüfbedingungen darstellte. Auch in dieser Arbeit wurden die Gesteine so ausgewählt, dass eine hohe Spreizung der Polierwerte gewährleistet war und das komplette Spektrum der Polierwerte von groben Gesteinskörnungen abgedeckt wurde. Die Mastix Probekörper wurden in zwei Serien hergestellt.

5.3 Gesteinswahl für Vergleichsuntersuchungen

Zur Sicherstellung einer Auswahl der Gesteine über das gesamte Spektrum der Polierresistenz wurden zunächst alle Gesteine im Labor des Forschungsnehmers untersucht. Anhand der Ergebnisse wurde eine repräsentative Auswahl von groben und feinen Gesteinskörnungen für die Vergleichsuntersuchungen ausgewählt. Die Auswahl der Gesteine sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

FE-Nr.	Gestein	gGk			fGk 0,2/0,4
		2/5	5/8	8/11	
1	Kies	X	X	X	*
5	Andesit	X	X	X	*
9	Diabas	X	X	X	*
12	Gabbro	X	X	X	X
15	Dolomit	X	X	X	X
18	Rhyolith	X	X	X	X
28					X
32	Natursand				X
33					X

* nicht in der Vergleichsuntersuchung berücksichtigt

Tab. 7: Gesteine und Prüfkörnungen für Vergleichsuntersuchungen

Je Gestein und Prüfkörnung wurden für die Teilnehmer im Labor des Forschungsnehmers jeweils zwei Mastixprüfkörper bzw. drei Sandplatten hergestellt und zu der Technischen Universität München und der Rheinisch-Westfälisch Technischen Hochschule Aachen versandt. An den Prüfkörpern sollte der Polierwert durch Doppelbestimmung gemäß TP Gestein-StB – Teil 5.4.2 [4] ermittelt werden.

6 Griffigkeitsuntersuchungen nach Polierbeanspruchung

Die Herstellung und Untersuchung an den Proben wurden gemäß den Technischen Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau – Teil 5.4.2: Bestimmung des Polierwertes mit dem Verfahren nach WEHNER/SCHULZE [4] durchgeführt. Nachfolgend werden die jeweiligen Prozesse der Prüfungen näher beschrieben.

6.1 Probenvorbereitung und Probekörperherstellung aus Gesteinskörnung

6.1.1 Grobe Gesteinskörnung – Mastixprüfkörper

Aus den groben Gesteinskörnungen 2/5, 5/8 und 8/11 wurden mittels des Mastix-Eingussverfahrens weitgehend hohlraumfreie Asphaltkörper hergestellt. Der Anteil an Über- und Unterkorn wurde vorab durch eine Trockensiebung entfernt. Der

Mastix besteht aus einem Bitumen-Füllergemisch (3:7), welches vorab gemischt und mit den Gesteinskörnungen und der Zylinderschalung (Durchmesser 22,5 cm, Höhe 20,0 cm) auf 200 °C temperiert wurde. Anschließend wurden die Gesteinskörnungen in zwei Lagen in der Zylinderschalung auf einem Rütteltisch in dichteste Lagerung eingerüttelt (Höhe je Lage 7,0-8,0 cm). Nach jeder Lage wurde das Mastix-Gemisch satt eingegossen und nach der letzten Lage wurden die einzelnen Einbaulagen mittels eines Holzstabes miteinander verzahnt und vermischt. Nach einer entsprechenden Nachverdichtungszeit, die abhängig vom eingesetzten Rütteltisch ist, wurden die gefüllten Zylinderformen für mindestens eine Stunde bei 200 °C im Trockenschrank nacherwärmt, um die Hohlräume komplett mit Mastix auszufüllen. Als Bitumen eignet sich ein hartes Bindemittel, vorzugsweise Straßenbaubitumen 20/30, da es sich im späteren Verlauf der Probekörperherstellung bei der Sandstrahlung besser abstrahlt als ein weiches Bindemittel.

Nach einem Tag Abkühlzeit wurden aus den Mastixproben mittels Nassschnitt Probekörper in erforderlicher Höhe von maximal 5 cm geschnitten, sodass aus jedem Asphaltzylinder zwei Prüfkörper hergestellt werden konnten. Die Homogenität der Prüfoberflächen wurde durch anschließendes Nassschleifen erhöht. Als Prüfoberflächen wurden die gegenüberliegenden Flächen des untersten

Schnittes gewählt. Der Mastix zwischen den Gesteinskörnern wurde durch Sandstrahlen mit Korund 0,5/1 mm von der Prüfoberfläche der zuvor auf 5 °C gekühlten Probekörper in erforderlicher Menge abgetragen. Durch das zweiminütige Sandstrahlen wurden auch die geglätteten Gesteinsoberflächen aufgeraut. Die in dieser Weise hergestellten Probekörper werden im Folgenden als Mastixprüfkörper bezeichnet.

Das Herstellungsverfahren der Rückstellproben nach dem Mastix-Einguss-Verfahren unterscheidet sich geringfügig von der derzeitigen Verfahrensweise [4]. Denn gemäß DAMES und LINDNER [6] beträgt die Höhe der eingesetzten Zylinderschalung 8,5 cm.

Als letzter Arbeitsgang bei der Prüfkörperherstellung wurde die Oberfläche durch Sandstrahlen vom Mastix in den Zwischenräumen der Gesteinskörner befreit und ein definiertes Relief hergestellt. Dieses Verfahren unterlag im Laufe der Entwicklung mehreren Veränderungen, die in Tabelle 8 dargestellt sind.

Die Sandstrahlung bei Durchführung dieses Vorhabens erfolgte gemäß der TP Gestein-StB – Teil 5.4.2 (2008), Abschnitt 6.2.3.1.3 Herstellung [4]. Das geforderte Oberflächenrelief konnte nach 2 Minuten Sandstrahlung bei allen Probekörpern erreicht werden, sodass auf einen zweiten Sandstrahlvorgang verzichtet werden konnte.

Quelle	Zitat
F.A. 4.037 G 76 C (1982) [8] Erweiterung der Möglichkeiten für die Beurteilung von Mineralstoffen bezüglich Polierbarkeit	„Das Sandstrahlen [...] erfolgte unter festgelegten Versuchsbedingungen mit einer Normstrahlanlage vom Gerätetyp ST 700 D des Institutes Verkehrsplanung der TU Berlin, wobei als Strahlmittel Elektrokorund der Körnung 0,5/1,0 mm verwendet wurde. Die Sandstrahldauer je Sägeschnitt betrug bei einem Betriebsdruck von 5 bar sechs Minuten.“
FE 6.048 G 85 C (1989) [6] Ermittlung der Endpolierwerte von im Straßenbau verwendeten Gesteinen	„[...] 5 Minuten lang in der Strahlanlage ST 700 D [...]“
FE 6.049 G 86 C (1990) [10] Zusammenhang zwischen dem Polierwiderstand von Mineralstoffen und der Griffigkeit von Straßendecken	„[...] 5 Minuten lang in der Strahlanlage ST 700 D [...]“
TP Min-StB – Teil 5.5.2 (1999), Abschnitt 6.2 [3] basierend auf der internen Anweisung der TU Berlin	„[...] vorsichtiges Sandstrahlen mit Korund 0,5/1 mm von Asphaltmörtel so weit befreit, dass ein etwa 1 mm tiefes Oberflächenrelief entsteht.“
TP Gestein-StB – Teil 5.4.2 (2008), Abschnitt 6.2.3.1.3 Herstellung [4]	„Die geschnittene/geschliffene Asphaltoberfläche wird durch Sandstrahlen in einer Druckstrahlkabine (2 min bei einem Druck von 6 bar mit einer Rundstrahldüse 6,3 mm, mit Korund 0,5/1 mm) von Asphaltmastix befreit; nach dem Sandstrahlvorgang soll der Asphaltmastix ca. 1 mm unterhalb der Gesteinsoberfläche liegen. Ist dieser Zustand nach dem ersten Sandstrahlvorgang nicht erreicht, so ist ein zweiter Sandstrahlvorgang erforderlich.“

Tab. 8: Veränderung bei der Durchführung des Sandstrahlverfahrens

6.1.2 Feine Gesteinskörnung – Sandplatten

Die Prüfkörnung wurde aus Lieferkörnungen 0/2, 0/4 oder 0/5 auf die Prüfkörnung 0,2/0,4 trocken abgeseibt und durch Waschen von Feinstoffen befreit. Anschließend wurden die Prüfkörnungen auf 9 mm dicke und mit durchsichtigem Bootsack lackierte Sperrholzplatten mit einem Durchmesser von 225 mm aufgeklebt. Als Kleber wurde ein Zwei-Komponenten-Grundierharz verwendet.

6.2 Versuchsdurchführung

Die Prüfkörper wurden gemäß dem in Bild 12 dargestellten Ablaufschema geprüft.

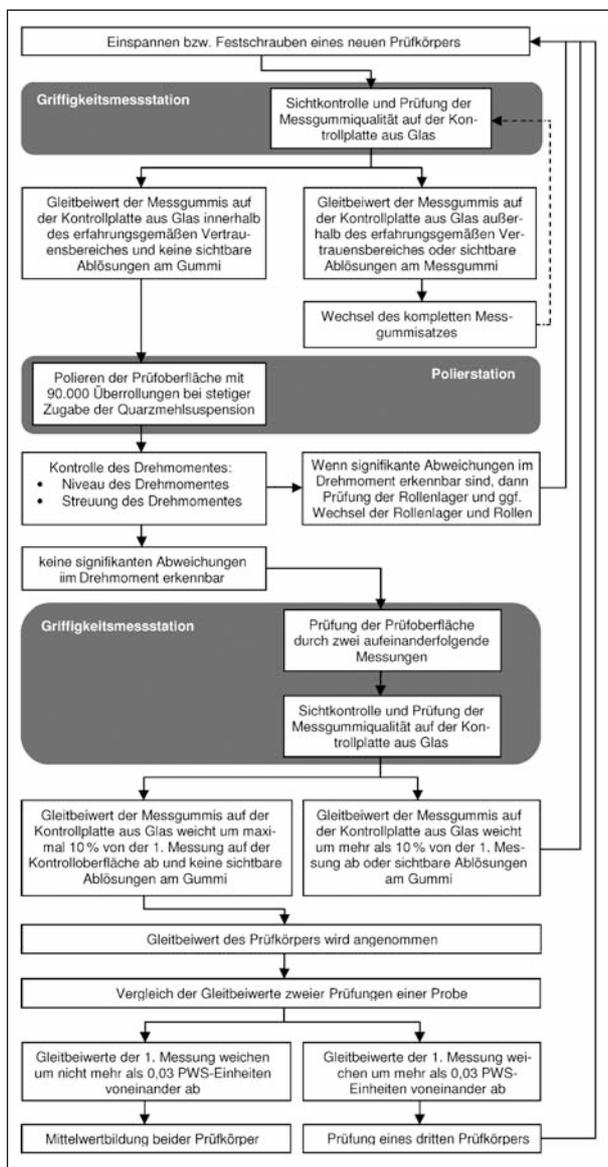


Bild 12: Ablaufschema der Versuchsdurchführung zur Prüfung des Polierwertes nach WEHNER/SCHULZE gemäß [4]

6.3 Regeneration von Mastixprüfkörpern aus Rückstellproben

6.3.1 Wissensstand

In einer Arbeit von SCHULZE und LINDNER [8] wurde durch Untersuchungen belegt, dass nach einem festgelegten Regenerationsverfahren behandelte Mastixprüfkörper nur geringe Abweichungen der Polierwerte in den Wiederholungsprüfungen aufweisen.

Dafür wurde der Mastixprüfkörper nach 4 Zyklen mit jeweils 30.000 Überrollungen, insgesamt somit 120.000 Überrollungen, aufbereitet, indem die Oberfläche erneut sandgestrahlt wurde. Die Prüfprozedur wurde an zwei Gesteinen achtmalig wiederholt und in einer Mittelwertkurve dargestellt.

Das Resümee dieser Untersuchung ist im Bild 13 durch die Mittelwertkurve und einen Streuungsbereich, bestehend aus der einfachen Standardabweichung (entspricht einer statistischen Wahrscheinlichkeit von circa 68 %), dargestellt. Zusammenfassend konnte die Aussage getroffen werden, dass die Reproduzierbarkeit der Gleitbeiwerte unabhängig von der Gesteinsart und Messgeschwindigkeit ist. Die mittlere Wiederholpräzision wurde in Form der Standardabweichung mit $\sigma_r = 0,016$ angegeben.

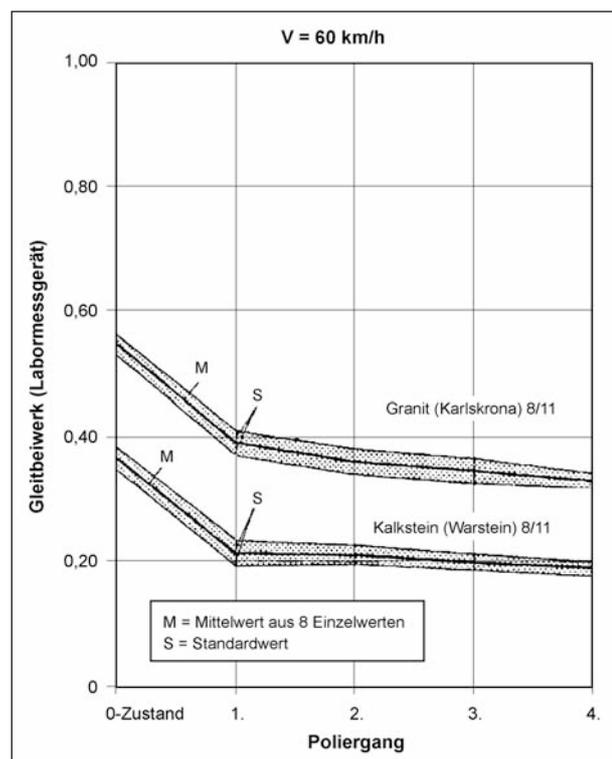


Bild 13: Mittelwertkurve und dazugehöriger Streuungsbereich [8]

Eine weitere Möglichkeit der Nutzung von Gesteinen aus vorhandenen Mastixprobekörpern hätte darin bestanden, das Gestein durch Extraktion aus dem Asphaltmastix zurückzugewinnen und neue Probekörper im Mastix-Eingussverfahren herzustellen. Von RADENBERG und KRASS durchgeführte Untersuchungen hinsichtlich der „Auswirkungen der Extraktion von Gesteinskörnungen aus Asphalt sowie der Porosität von Gesteinen auf den PSV“ [19] zeigen, dass die Rückgewinnung durch Extraktion einen Einfluss auf den Polierwert haben kann. Die Messergebnisse der extrahierten Gesteinskörnung streuten um ± 2 PSV-Einheiten, mit Ausnahme der Elektroofenschlacke mit ± 3 PSV-Einheiten, um die an der unbeanspruchten Gesteinskörnung ermittelten Polierwerte PSV.

Die Entscheidung fiel zugunsten der Regenerierung von Mastixprüfkörpern durch Sandstrahlen.

An den Rückstellproben der TU Berlin mussten, nach circa 24 Jahren nicht immer idealer Lagerung der Probekörper, entsprechende Verformungen/Deformationen festgestellt werden, sodass das Aufbereitungsverfahren nach LINDNER und SCHULZE [8] modifiziert werden musste.

6.3.2 Vorversuche

Durch Vorversuche sollten die Untersuchungen von SCHULZE und LINDNER [8] zudem nochmals überprüft werden. Hierzu wurden eigene Rückstellproben aus der Ringuntersuchung „Ermittlung der Präzision unter Vergleichsbedingungen“ [21] verwendet.

Aus der Ringuntersuchung wurden je zwei Mastixprüfkörper von drei Gesteinen (Basalt, Quarzit und Kalkstein) zur Untersuchung der Reproduzierbar-

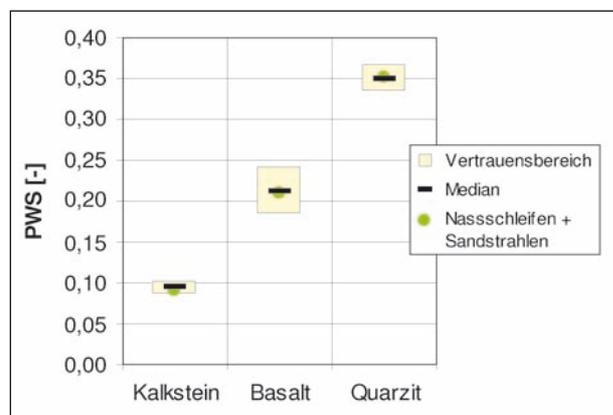


Bild 14: Ergebnisse der Vorversuche an Mastixprüfkörpern 8/11

keit der Polierwerte an einem Mastixprüfkörper genutzt. Als Aufbereitungsmethodik wurde das folgende Konzept an den Prüfkörpern der Ringuntersuchung durchgeführt:

- Glättung der Prüfoberfläche durch Nassschleifen (circa 1-5 mm, je nach Zustand der Oberfläche),
- Sandstrahlen der Prüfoberfläche nach TP Asphalt-StB zum Herausarbeiten der Gesteinskörnung aus dem Mastix.

Anschließend wurden die Gleitbeiwerte an den aufbereiteten Prüfkörpern ermittelt und dem Vertrauensbereich der Mediane der jeweiligen Gesteine aus der damaligen Ringuntersuchung gegenübergestellt.

Die auf den aufbereiteten Prüfkörpern gemessenen Gleitbeiwerte weisen im Mittel eine absolute Abweichung zum Median von 0,003 PWS-Einheiten auf. Dies entspricht einem Fünftel des von LINDNER und SCHULZE [8] ermittelten Bereiches für eine statistische Wahrscheinlichkeit von ca. 68 %. Die Aufbereitungsmethodik ermöglicht es somit, eine präzise Wiederholung der Messungen an einem Mastixprüfkörper durchzuführen.

7 Ergebnisse

7.1 Untersuchungsergebnisse

7.1.1 Gesteinskörnung aktueller Probenahme

Die Untersuchungsergebnisse der Gesteine in den jeweiligen Prüfkörnungen sind dem Anhang 1 zu entnehmen. Nachfolgend wird auf die Spannweiten und die Verteilung der Stichproben jeder Prüfkörnung eingegangen (siehe Bild 15).

Bei den groben Gesteinskörnungen ist eine Zunahme der Polierresistenz von 8/11 zu 2/5 erkennbar. Dieser Trend ist aus dem bestehenden Bewertungshintergrund und Forschungsarbeiten bekannt. Auffällig ist der geringe Anstieg der arithmetischen Mittelwerte der Polierwerte von der Prüfkörnung 5/8 auf die Prüfkörnung 2/5. Die Ursache wird im weiteren Verlauf diskutiert (siehe Kapitel 7.1.4).

Die arithmetischen Mittelwerte der groben Gesteinskörnungen liegen unterhalb der Mediane. Dies deutet darauf hin, dass der Anteil von Gesteinen mit hoher Polierresistenz in den aktuellen Probenahmen geringer war als der Anteil von Gesteinen mit geringer Polierresistenz.

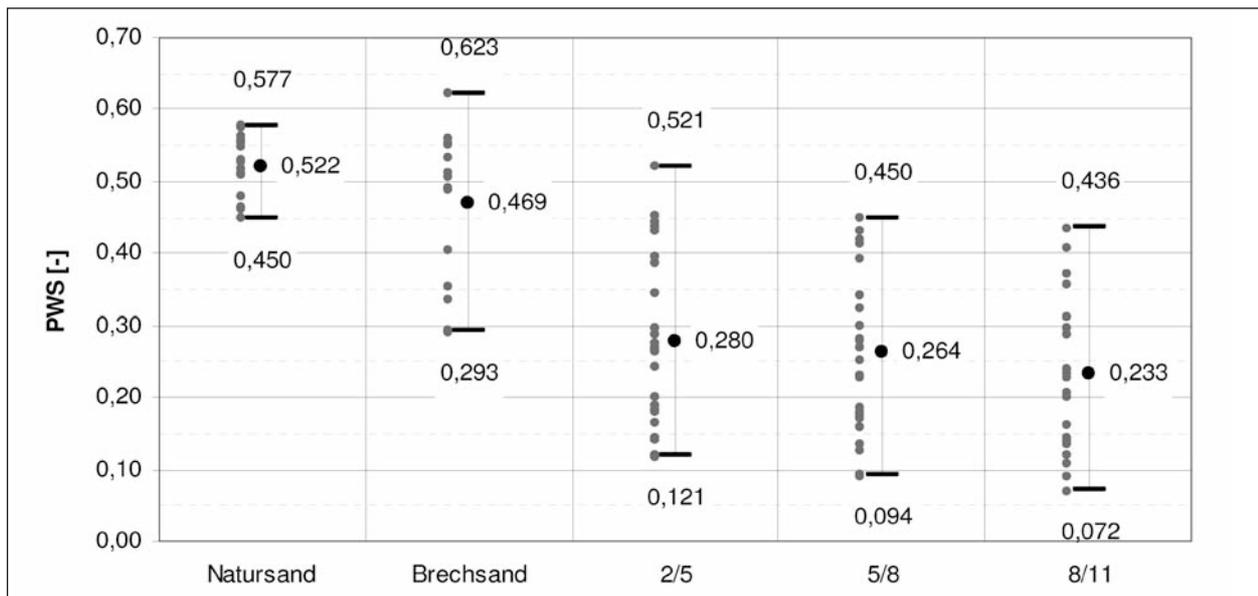


Bild 15: Spannweiten der Messergebnisse jeder Prüfkörnung der Gesteinskörnungen aus aktueller Probenahme und Lage des arithmetischen Mittelwertes

Die Verteilung der feinen Gesteinskörnung ist im Bezug zum Verhältnis von Median zu arithmetischem Mittelwert als normal zu bewerten. Es wurden gleich viele Gesteine mit hoher und niedriger Polierresistenz untersucht.

7.1.2 Gesteinskörnung aus Rückstellproben

Die Rückstellproben sollten nicht nur zur Übertragung der Anforderungswerte von der 1. Gerätegeneration auf die 2. Gerätegeneration genutzt werden, sondern ebenfalls mit herangezogen werden, um die Datenbasis zu erhöhen und die Spannweite der Polierwerte zu ermitteln. Die einzelnen Ergebnisse der Gesteine sind im Anhang 1 beigefügt.

Auffällig ist bei der Prüfkörnung 8/11 der unterhalb des Medianes liegende arithmetische Mittelwert, der auf einen überproportional hohen Anteil gering polierresistenter Gesteine zurückzuführen ist (siehe Bild 16). Die Grauwacke (FE-Nr. 65) hebt sich von den übrigen Gesteinen im Bereich der Prüfkörnung 8/11 deutlich nach oben ab und setzt das Niveau des Medianes gegenüber dem arithmetischen Mittelwert höher.

Die Untersuchungsergebnisse der Brechsande weisen eine gegenteilige Charakteristik auf. So wurden tendenziell mehr Gesteine mit hoher Polierresistenz geprüft. Der Kalkstein (FE-Nr. 43) weist gegenüber den übrigen Gesteinen eine deutlich geringere Polierresistenz auf und setzt das Niveau des Medianes gegenüber dem arithmetischen Mittelwert dementsprechend niedriger.

Die arithmetischen Mittelwerte der Natursande und Brechsande liegen auf einem vergleichbaren Niveau, die Spreizung der Polierresistenz ist bei den Brechsanden jedoch deutlich ausgeprägter.

7.1.3 Vorhandener Datenbestand aus Routineprüfungen

Beim Forschungsnehmer existiert ein Datenbestand von insgesamt 55 Gesteinslagerstätten, die in unterschiedlichen Prüfkörnungen bei Routineprüfungen in der Zeit zwischen 2002 und 2013 auf ihre Polierresistenz untersucht wurden. Obwohl der regionale Schwerpunkt der Lagerstätten im Osten und Norden Deutschlands zu finden ist, kann damit die Datenbasis erweitert werden und zur Ermittlung der Spannweite der Polierwerte und somit für die Neuermittlung des Bewertungshintergrundes genutzt werden.

Die zusammenfassende Darstellung der Prüfergebnisse aus Routineprüfungen (siehe Bild 17) deutet auf den gleichen Trend hin wie die Ergebnisse der Gesteine aus den aktuellen Probenahmen und den Rückstellproben. Auffällig ist die deutliche Verschiebung des Messwertenniveaus zwischen den groben Gesteinskörnungen 2/5 und 5/8. Da bei den Routineprüfungen nicht zwingend alle Prüfkörnungen in den Untersuchungen gleichermaßen betrachtet wurden, liegen der statistischen Auswertung unterschiedliche Anzahlen von Prüfergebnissen für die Prüfkörnungen zugrunde.

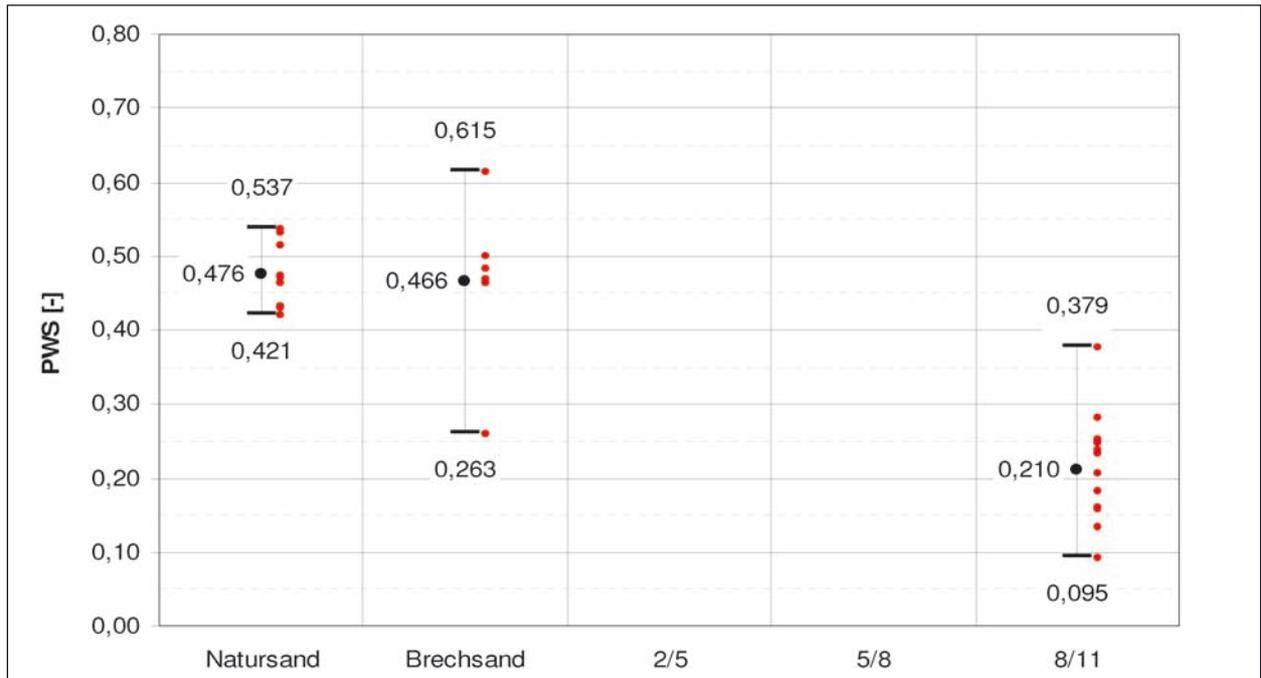


Bild 16: Spannweiten der Messergebnisse jeder Prüfkörnung der Rückstellproben und Lage des arithmetischen Mittelwertes

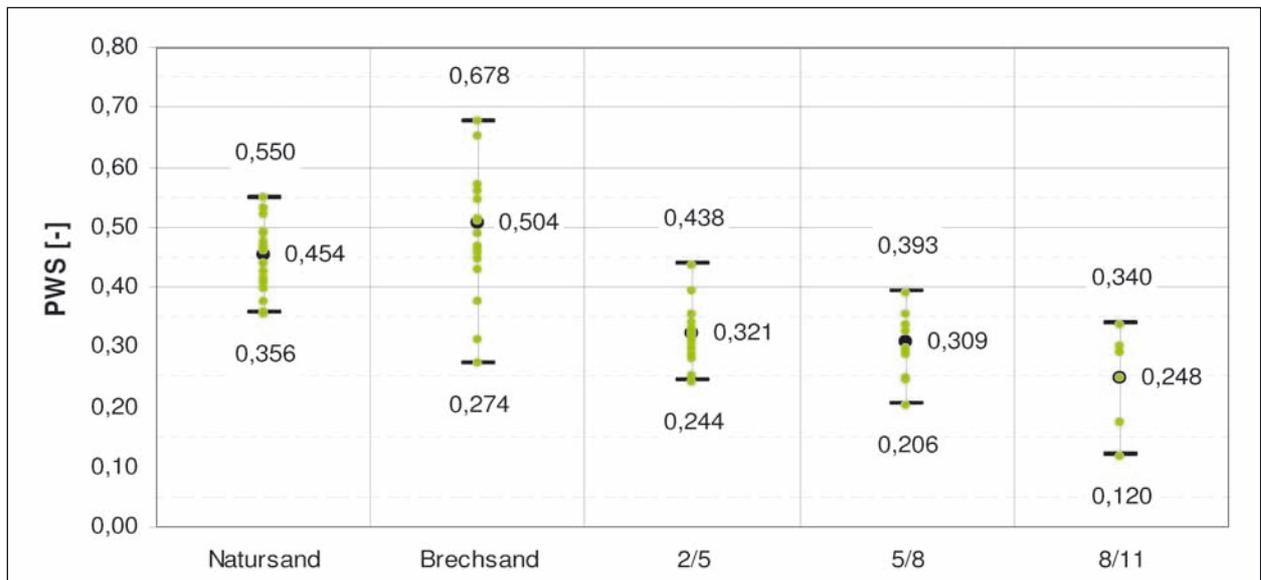


Bild 17: Spannweiten der Messergebnisse jeder Prüfkörnung des Datenbestandes aus Routineprüfungen und Lage des arithmetischen Mittelwertes

7.1.4 Zusammenfassung der Messergebnisse

Die Zusammenführung aller Messergebnisse führt zu den in Bild 18 dargestellten Spannweiten der jeweiligen Prüfkörnung.

Bei den feinen Gesteinskörnungen wird das unterschiedliche Niveau der höchsten und niedrigsten Polierwerte zwischen den Brechsanden und Natursanden ausgeprägter. So erscheint die mögliche Spannweite der Messwerte von Natursanden nur

halb so groß wie die Spannweite der Brechsande. Die Ergebnisse der Forschungsarbeit „Einfluss der Sandeigenschaften auf die Oberflächendauerhaftigkeit von Straßenbetonen“ [22], in der Natursande mit unterschiedlicher mineralogischer Zusammensetzung geprüft wurden, bestätigen mit einem Messwertenniveau der Polierwerte PWS von 0,41 bis 0,54 die geringere Spannweite der Natursande.

Die arithmetischen Mittelwerte liegen bei allen Prüfkörnungen dicht an den Medianen. Die Zusammen-

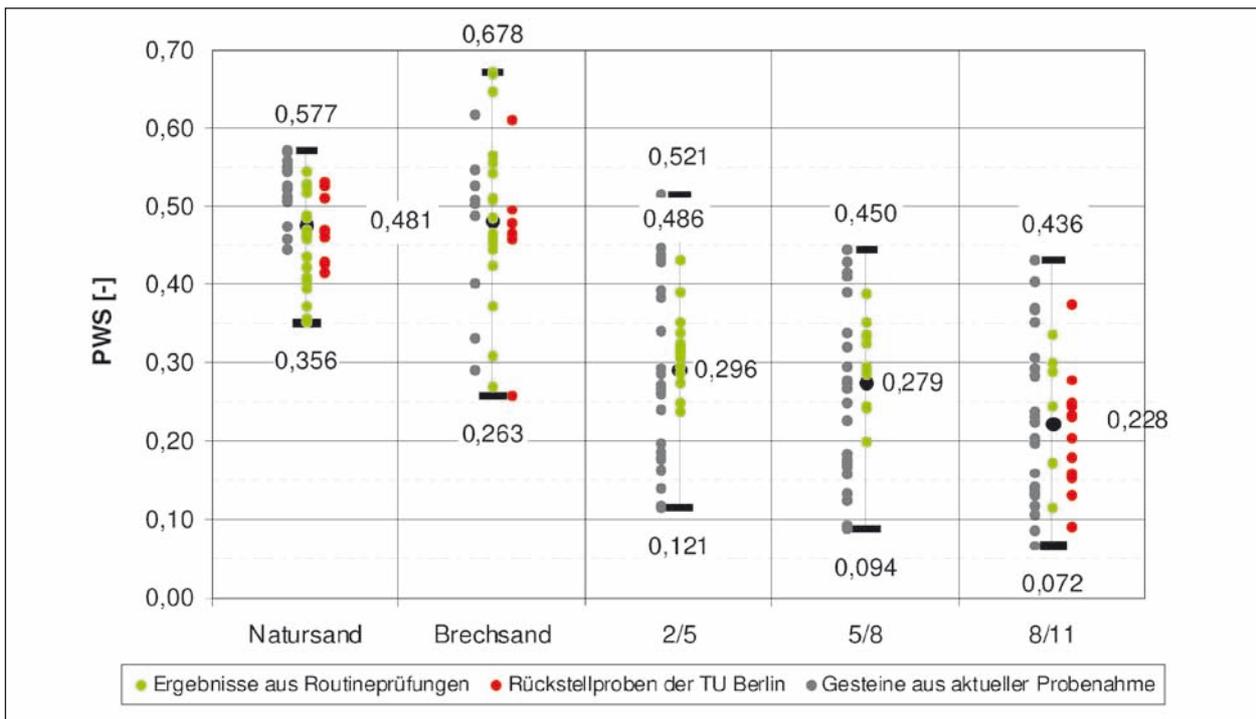


Bild 18: Spannweiten unter Berücksichtigung aller Messergebnisse und Lage des arithmetischen Mittelwertes

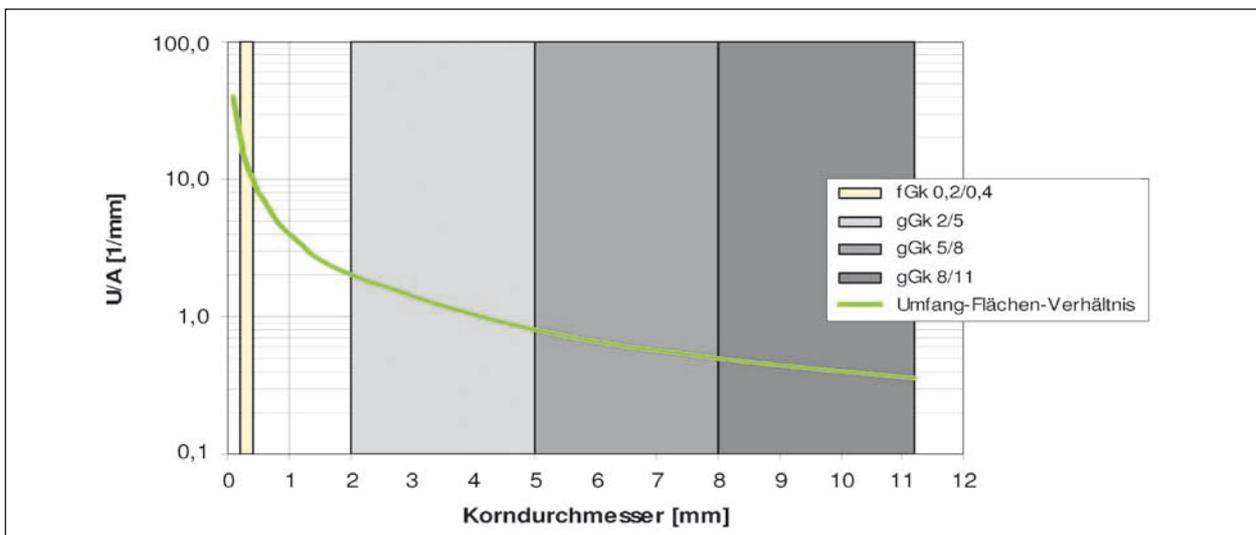


Bild 19: Umfang-Flächen-Verhältnis in Abhängigkeit zum Korndurchmesser

führung aller Messergebnisse führt zu gleichen Anteilen an Polierwerten mit hoher und niedriger Polierresistenz.

Die Abnahme der Polierwerte mit steigender Korngröße wird an den arithmetischen Mittelwerten erkennbar. Die Abnahme der Polierwerte von der Körnung 2/5 zur Körnung 5/8 ist geringer als die Abnahme von der Körnung 5/8 zur Körnung 8/11. LINDNER stellte dazu in einer Forschungsarbeit [8] eine einfache mathematische Betrachtung über das zunehmende Umfang-Flächen-Verhältnis der idea-

lisierten runden Gesteinskörnung mit abnehmender Korngröße und der daraus resultierenden effektiven Prüfoberfläche vor.

Bild 19 zeigt das Umfang-Flächen-Verhältnis in Abhängigkeit vom Korndurchmesser. Dies erklärt aber nur zum Teil den Anstieg der Polierwerte bei abnehmendem Korndurchmesser, zusätzliche Einflüsse können erfahrungsgemäß die Kantenschärfe, Korngrößenverteilung innerhalb der Lieferkörnung, Kornform und mineralogische Zusammensetzung sein.

7.1.5 Vergleichsuntersuchungen

Allgemeines zur Durchführung der Vergleichsuntersuchung

Es wurden je 6 Gesteine der groben Gesteinskörnung und je 3 Brech- und Natursande (siehe Tabelle 7) für die Vergleichsuntersuchungen ausgewählt. Die Prüfkörper wurden, wie im Kapitel 6.1 beschrieben, vom Forschungsnehmer hergestellt und an die Teilnehmer verschickt. Die Abweichungen bei den Vergleichsuntersuchungen setzen sich zusammen aus der Vergleichspräzision der Prüfung und der Wiederholpräzision bei der Prüfkörperherstellung.

Die Teilnehmer wurden in der Ergebnisdarstellung anonymisiert. Der Buchstabe A steht für die Ergebnisse des Forschungsnehmers.

Prüfergebnisse der Vergleichsuntersuchung

Die Ergebnisse der Doppelbestimmungen jedes Laboratoriums zur jeweiligen Prüfkörnung werden in den Bildern 20 bis 23 grafisch dargestellt und werden anschließend diskutiert. Die Polierwerte der Laboratorien sind dem Anhang 1 beigefügt.

Die Diagramme (Bilder 20-23) zeigen die Spannweite der Prüfergebnisse bei der Prüfung in den drei Laboratorien, die sich aus den Einzelergebnis-

sen der Doppelbestimmung ergibt. Die schwarze Linie zeigt den Mittelwert der Einzelwerte aller Labore. Das Labor C übermittelte bei der Prüfung des Mastixprüfkörpers 8/11 mit der FE-Nr. 1 nur einen Polierwert für das Gestein.

Vor der Auswertung wurde geprüft, ob mögliche Ausreißer die Ergebnisse beeinflussen. Die Prüfung erfolgte unter den Bedingungen, dass der wahre Mittelwert und die Streuung der Grundgesamtheit nicht bekannt sind. Die Bestimmung der Ausreißer erfolgte dann über die Methode der Ausreißerkriterien für eine Stichprobenanzahl ≤ 25 [31]. Als Ausreißer wurden die nachfolgenden Einzelwerte mit einem Sicherheitsniveau von 95 % bestimmt:

Labor C:

- Mastix 8/11
 - 1 – Kies
 - 12 – Gabbro: höchster Einzelwert
 - 15 – Dolomit: höchster Einzelwert
- Mastix 2/5
 - 18 – Rhyolith: niedrigster Einzelwert
- fGk 0,2/0,4
 - 12 – Gabbro: niedrigster Einzelwert

Auffällig ist, dass Labor C hohe Einzelspannweiten aufweist. Weiterhin ist ebenfalls erkennbar, dass

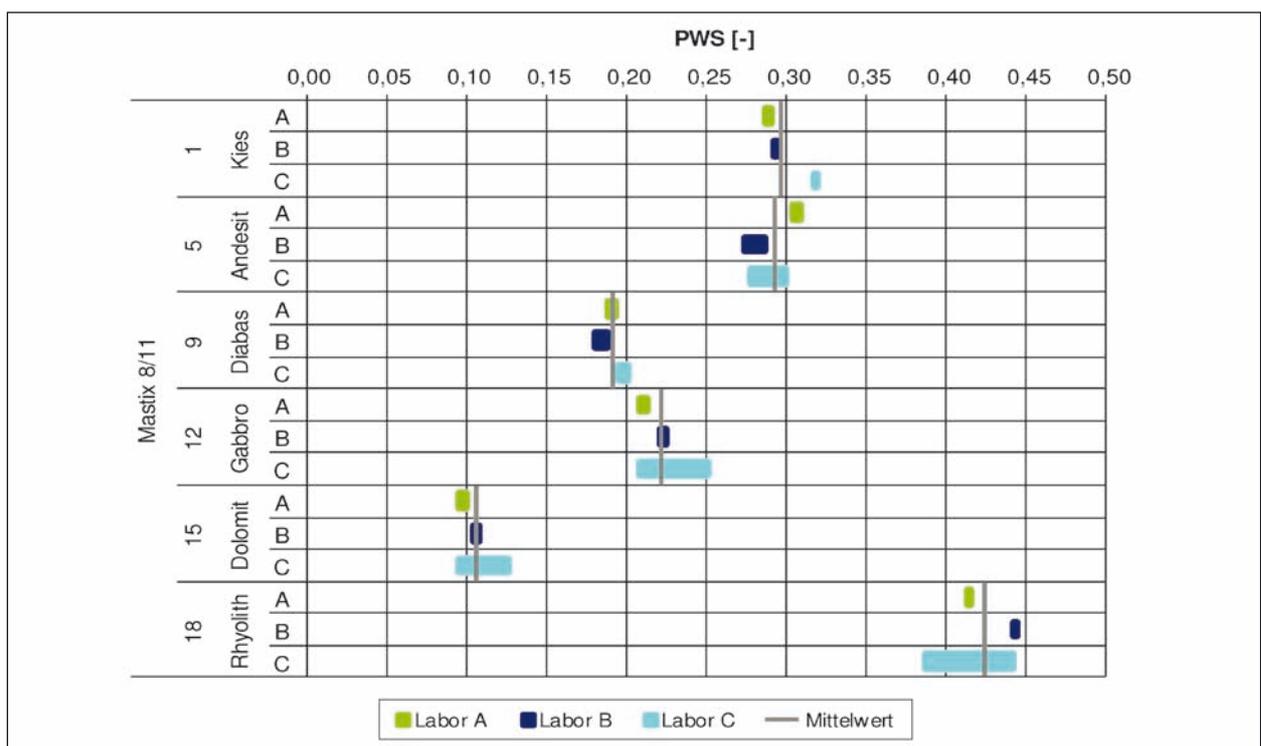


Bild 20: Einzelergebnisse der Vergleichsuntersuchung an der Prüfkörnung 8/11, daraus resultierende Spannweiten und Mittelwerte

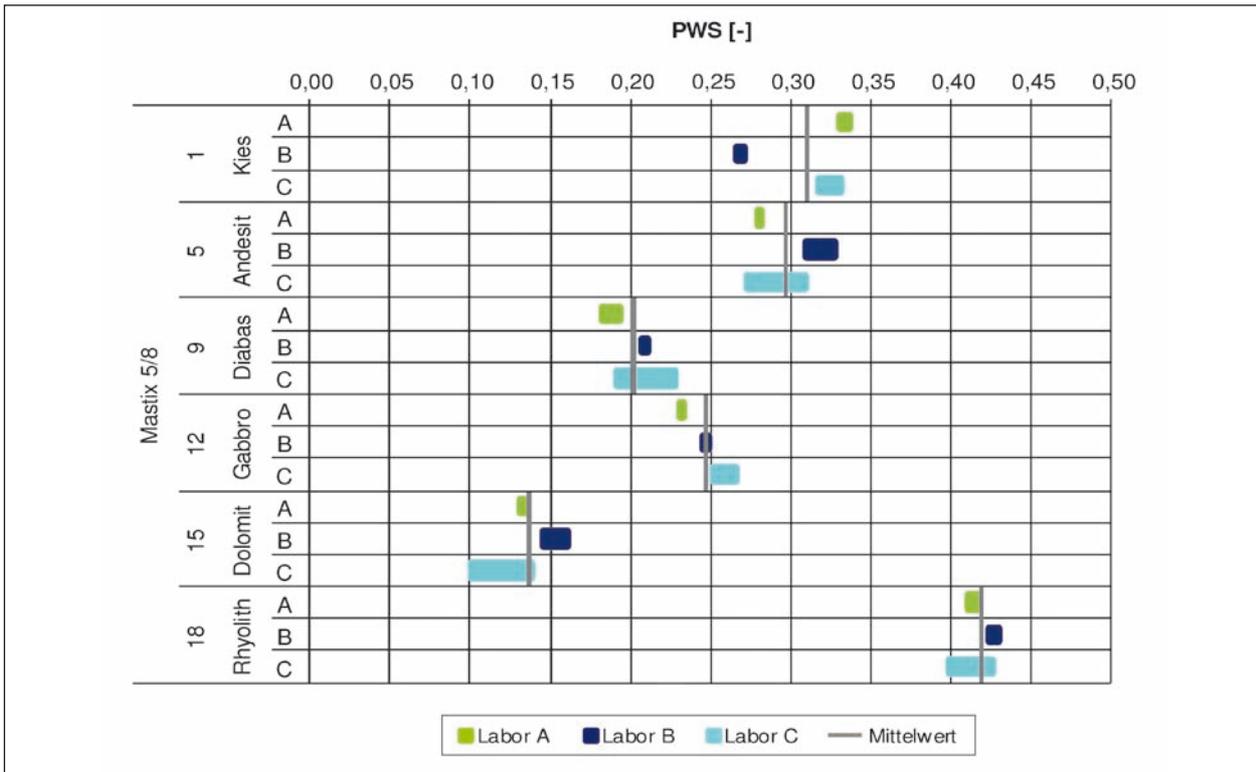


Bild 21: Einzelergebnisse der Vergleichsuntersuchung an der Prüfkörnung 5/8, daraus resultierende Spannweiten und Mittelwerte

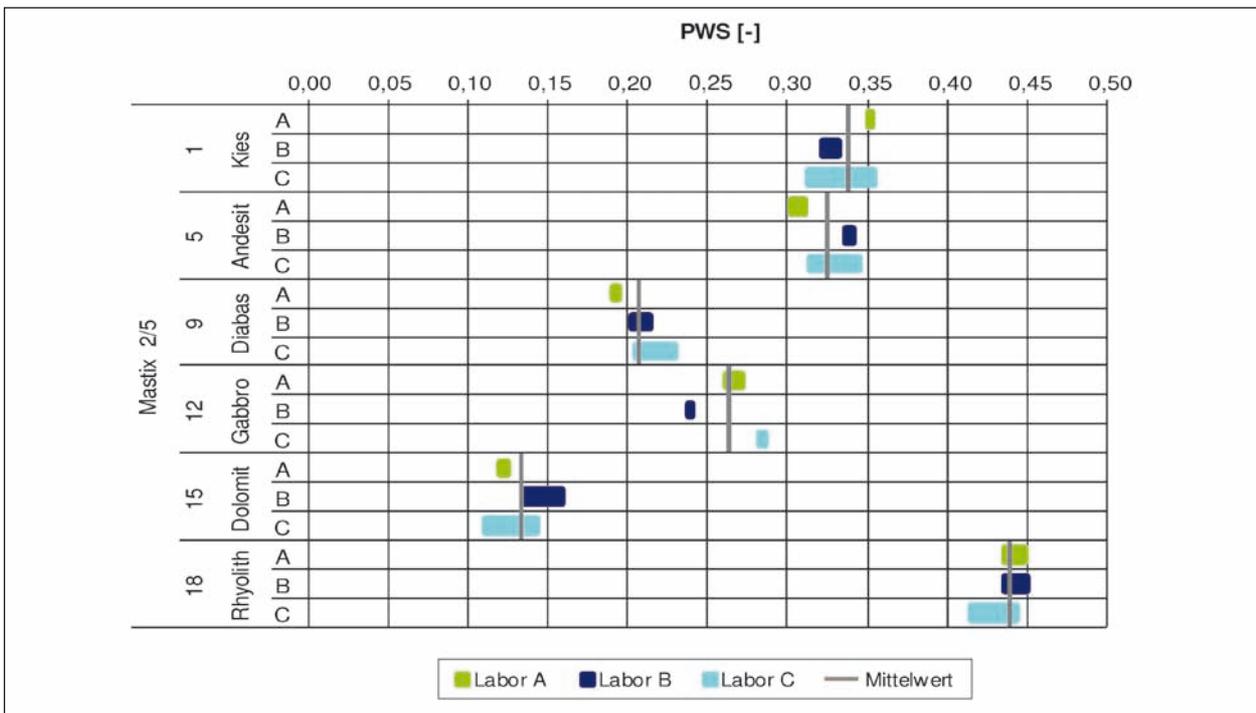


Bild 22: Einzelergebnisse der Vergleichsuntersuchung an der Prüfkörnung 2/5, daraus resultierende Spannweiten und Mittelwerte

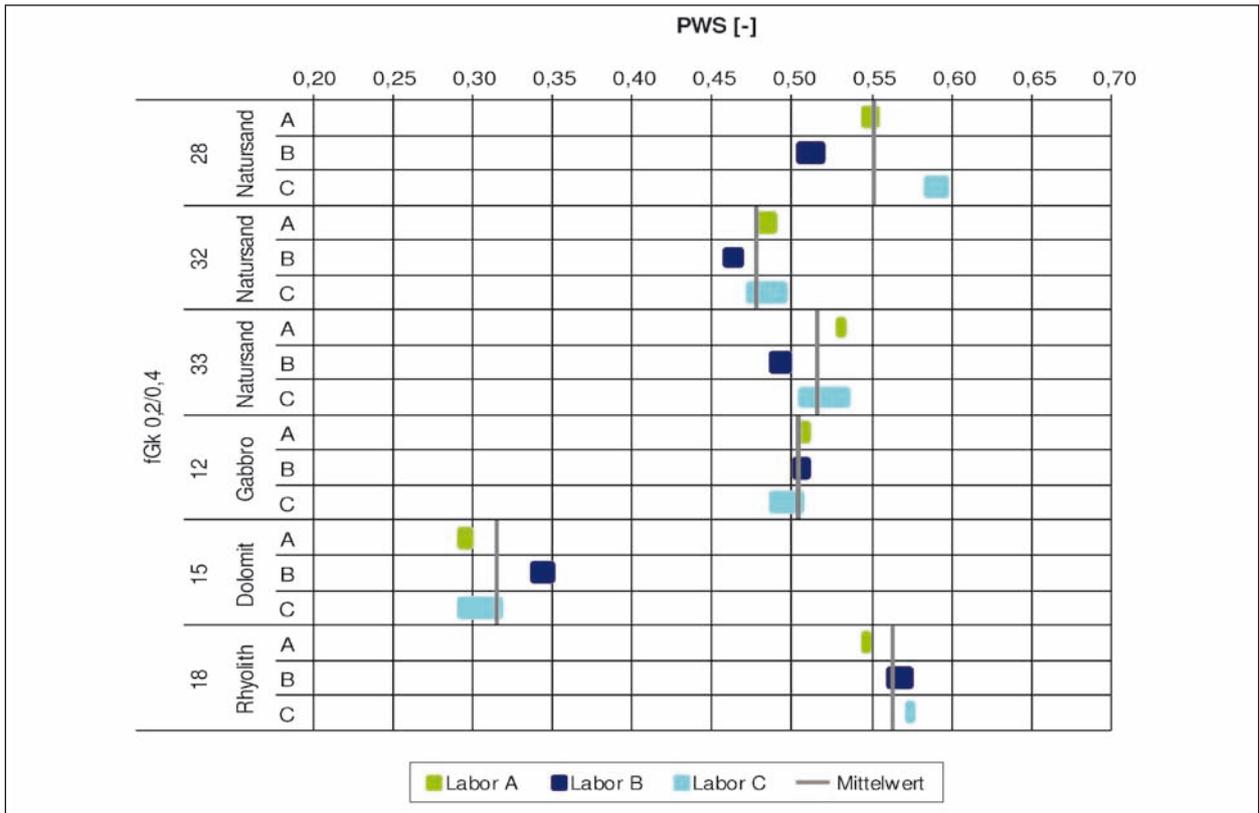


Bild 23: Einzelergebnisse der Vergleichsuntersuchung an der Prüfkörnung 0,2/0,4, daraus resultierende Spannweiten und Mittelwerte

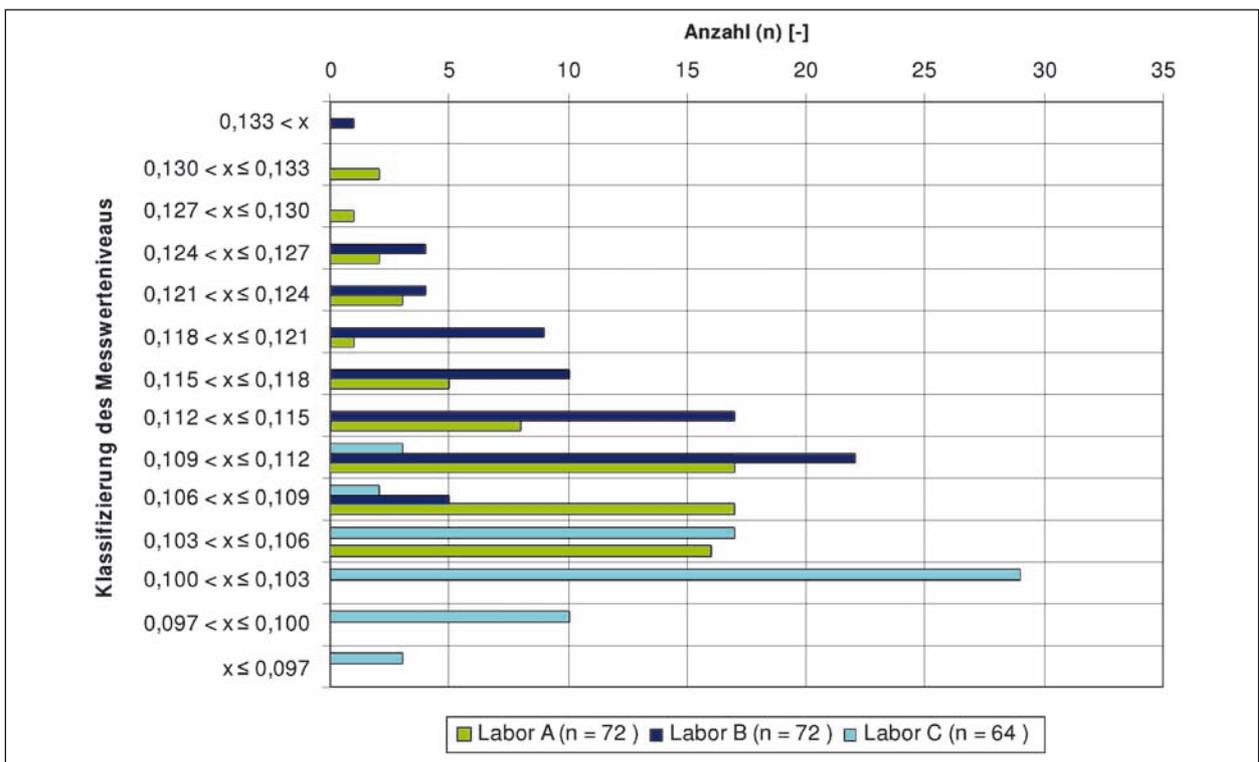


Bild 24: Histogramm des Messwertniveaus der verwendeten Messgummis auf der Kontrolloberfläche aus Glas vor und nach Messung der Prüfoberfläche

die Spannweite des Teilnehmers C bei den stark streuenden Einzelmessungen dennoch den Mittelwert aller Einzelwerte tangiert. Worauf diese Streuungen der Einzelwerte zurückzuführen sind, wurde nicht ermittelt.

Das Histogramm beinhaltet nur die Messungen auf der Kontrolloberfläche aus Glas bei Durchführung einer Messung von Mastixprüfkörpern aller Prüfkörnungen. Die Daten der feinen Gesteinskörnung wurden nicht berücksichtigt, da ein Teilnehmer keine Kontrollmessung nach der Prüfung feiner Gesteinskörnungen durchgeführt hat.

Ein systematischer Zusammenhang zwischen den Messwerten auf der Kontrolloberfläche und dem Messwertniveau auf der Prüfkörperoberfläche besteht nicht. Gegenüberstellungen der Abweichungen auf der Kontrolloberfläche aus Glas und der Prüfoberfläche der Mastixprüfkörper sind im Anhang 2 beigefügt.

Die Kontrolloberfläche aus Glas ist somit weder dazu geeignet, eine Messwertkorrektur vorzunehmen, wie nach DIN EN 12697-49 [20] vorgesehen, noch besteht die Möglichkeit einer Nutzung als Kalibrierfunktion. Die Kontrolloberfläche aus Glas kann somit neben der Sichtkontrolle nur zur labor-internen Überprüfung der Messgummiqualität vor und nach der Griffigkeitsmessung genutzt werden.

Schlussfolgerung aus den Vergleichsuntersuchungen

Zur Erstellung eines Bewertungshintergrundes mit Ergebnissen eines Prüfgerätes ist es von hoher Bedeutung zu wissen, ob Abweichungen zwischen den Ergebnissen des Forschungsnehmers und anderen Prüfgeräten vorhanden sind. Diese Abweichungen können dann mit berücksichtigt werden und somit könnte ein allgemeingültiger Bewertungshintergrund erstellt werden. Dazu wurden aus den Abweichungen der Einzelmessungen jedes Teilnehmers und jeder Prüfkörnung die Abweichungen zum Mittelwert aller Labore berechnet. Anhand der berechneten Abweichungen wurden die Normalverteilungen für jede Prüfkörnung erstellt (siehe Bild 25 bis Bild 28).

In den Bildern 25 bis 28 sind die Normalverteilungen der Abweichungen der Einzelwerte zum Mittelwert jedes Laboratoriums dargestellt. Die Betrachtungen durch die Normalverteilungen wurden auf einen mathematisch-statistischen Bereich von 95 % begrenzt. Der Wert 0 der Abszisse steht für den

Mittelwert aller Labore. Weiterhin ist die mittlere Abweichung des Laboratoriums A als rote Kennlinie mit Angabe der Abweichung dargestellt.

Die mittlere Abweichung des Forschungsnehmers ist sehr gering, aber tendenziell wird durch die Arbeitsweise mit der Prüftechnik immer ein niedrigeres Messwertniveau geprüft. Es konnte keine Abhängigkeit zwischen der Abweichung und dem Messwertniveau festgestellt werden. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Ergebnisse des Laboratoriums A im Mittel um 0,003 PWS-Einheiten

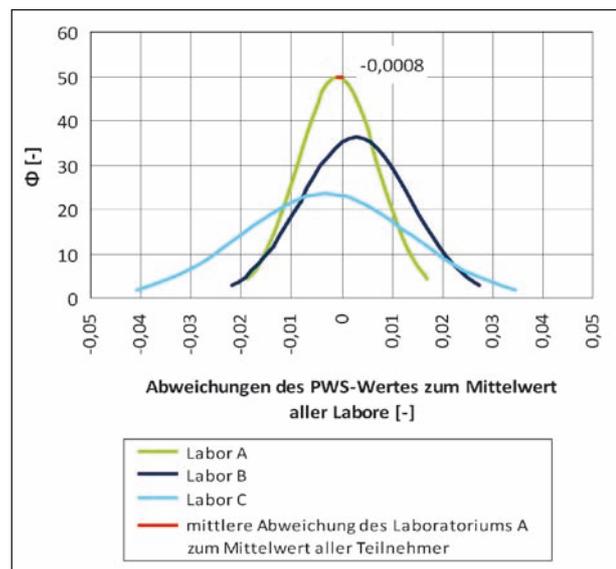


Bild 25: Normalverteilungen der Abweichungen der Einzelwerte vom Mittelwert jedes Teilnehmers – Prüfkörnung 8/11 ($n_{\text{Labor A und B}} = 12$, $n_{\text{Labor C}} = 8$)

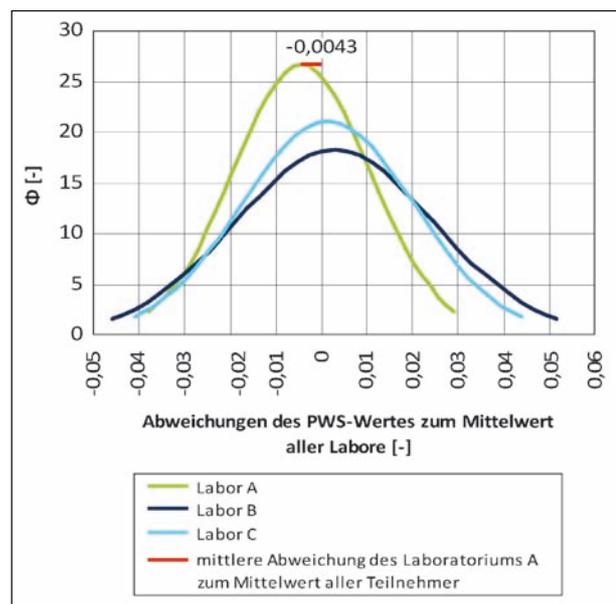


Bild 26: Normalverteilungen der Abweichungen der Einzelwerte vom Mittelwert jedes Teilnehmers – Prüfkörnung 5/8 ($n_{\text{Labor A, B und C}} = 12$)

gegenüber den Mittelwert aller Teilnehmer niedriger liegen.

Der Bewertungshintergrund wird abschließend mit einer Genauigkeit von zwei Nachkommastellen angegeben, wie es in der Ära der ersten Gerätegeneration durchgeführt wurde [7, 8, 10, 11]. Die mittleren Abweichungen beginnen bei einer Genauigkeit von drei Nachkommastellen mit der Tendenz zur vierten Nachkommastelle und haben somit keine signifikanten Auswirkungen auf den Bewertungshintergrund. Die Ergebnisse der Vergleichsuntersuchung bestätigen somit die Untersuchungsergebnisse des Forschungsnehmers.

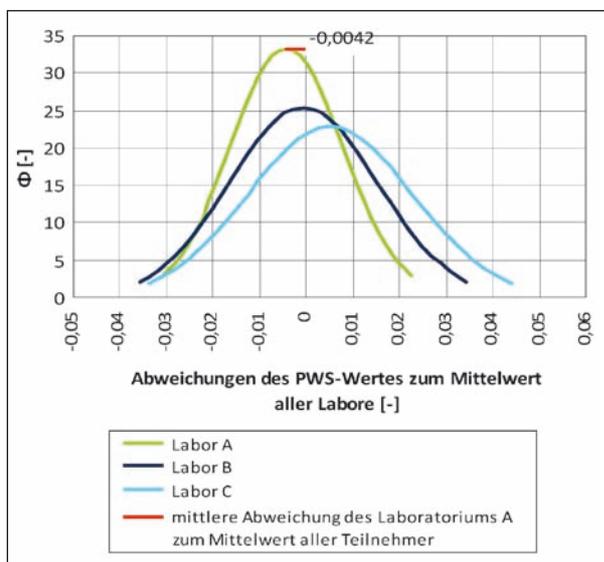


Bild 27: Normalverteilungen der Abweichungen der Einzelwerte vom Mittelwert jedes Teilnehmers – Prüfkörnung 2/5 ($n_{\text{Labor A und B}} = 12$, $n_{\text{Labor C}} = 11$)

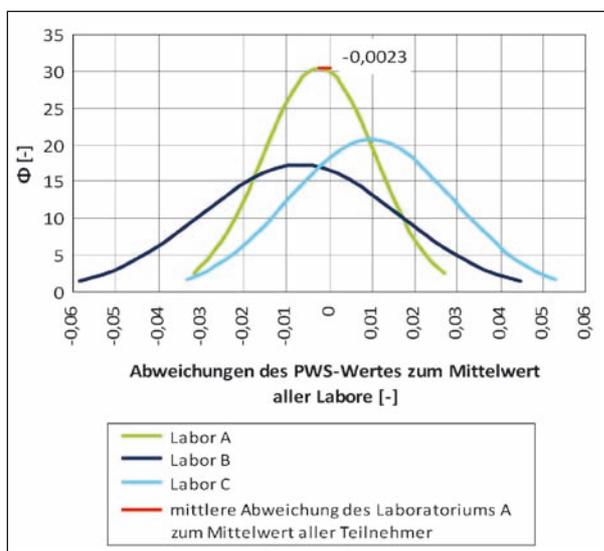


Bild 28: Normalverteilungen der Abweichungen der Einzelwerte vom Mittelwert jedes Teilnehmers – Prüfkörnung 0,2/0,4 ($n_{\text{Labor A und B}} = 12$, $n_{\text{Labor C}} = 11$)

7.2 Neuer Bewertungshintergrund

7.2.1 Obere und untere Grenze des Polierwertes

Die folgenden Betrachtungen zu den Ober- und Untergrenzen der Polierwerte basieren auf Stichproben aus einer Grundgesamtheit der Gesteinsvarietäten. Die durchgeführten Untersuchungen an den Gesteinen aus aktueller Probenahme und den Rückstellproben, ergänzt um den Datenbestand aus Routineprüfungen, ergeben in der Summe den nachfolgenden Stichprobenumfang der jeweiligen Prüfkörnung (siehe Bild 29).

Der Stichprobenumfang umfasst eine Anzahl von 40-45 Gesteinen je Prüfkörnung. Dabei wurden nicht nur Gesteinsvorkommen aus Deutschland berücksichtigt, sondern auch aus der Schweiz (4 Gesteine), Norwegen (3 Gesteine), England (1 Gestein), Frankreich (1 Gestein) und Dänemark (1 Gestein). Es kann davon ausgegangen werden, dass die Spannweite der Polierwerte aller im Forschungsauftrag untersuchten Gesteine (siehe Bild 18) die tatsächlichen minimalen und maximalen Polierwerte natürlicher und industriell hergestellter Gesteine weitgehend abbilden.

Auf eine Wichtung von Mehrfachprüfungen einer Lagerstätte wurde verzichtet. Die Begründung dieses Schrittes ist dem Anhang 2 zu entnehmen. Im Bild 30 ist die prozentuale Zusammensetzung der gebrochenen Gesteine nach den Prüfkörnungen und Gesteinsgruppen dargestellt.

Die Polierwerte aller untersuchten Gesteine bieten eine hinreichende Basis für die mathematisch-statistische Auswertung der Untersuchungsergeb-

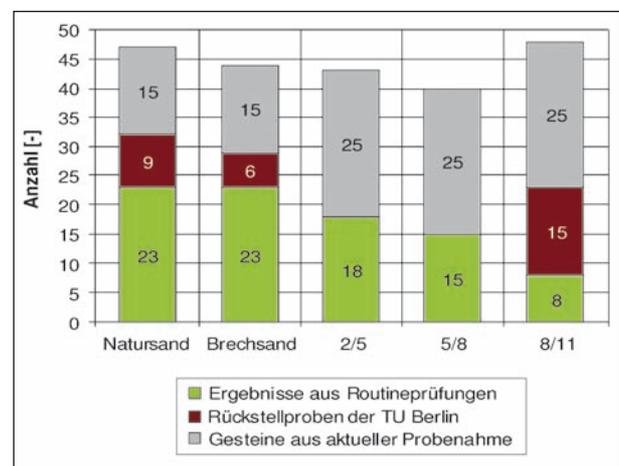


Bild 29: Grundgesamtheit der Gesteine für den neuen Bewertungshintergrund

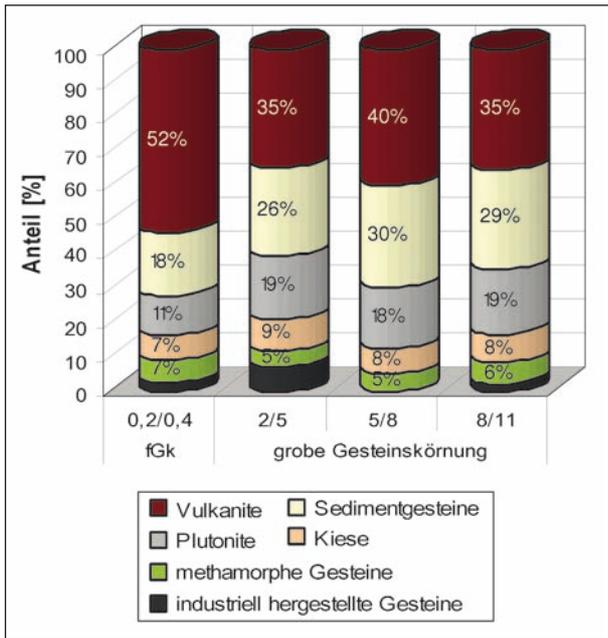


Bild 30: Prozentuale Zusammensetzung der Grundgesamtheit nach Gesteinsgruppen

nisse. Es wurde mittels eines Anpassungstests nach KOLMOGOROFF-SMIRNOW getestet, ob die Merkmalsverteilungen der Stichproben einer normalverteilten Grundgesamtheit zugehörig sind. Die Anpassungstests sind dem Anhang 3 zu entnehmen. Mit einer mathematisch-statistischen Wahrscheinlichkeit von mindestens 95 % kann von einer zweiseitig normalverteilten Grundgesamtheit jeder Prüfkörnung ausgegangen werden.

Aus dem vorhandenen Datenmaterial wurden anschließend Summenlinien mit 95%iger Wahrscheinlichkeit für jede Prüfkörnung erstellt. Weiterhin wurde die Abweichung des Mittelwertes durch den Stichprobenfehler berücksichtigt (im Bild 31 als gestrichelte Linien dargestellt). Der Stichprobenfehler berücksichtigt die Streubreite der Mittelwerte der jeweiligen Prüfkörnungen. Eine genaue Ausführung der Vorgehensweise ist dem Anhang 3 beigelegt.

Der grüne Bereich im Bild 31 stellt die Spannweite der Messungen an der Stichprobe dar. Die schwarze Summenlinie deutet darauf hin, dass im unteren Bereich der Polierwerte die Extremwerte durch die Stichprobe ungenügend wiedergegeben werden.

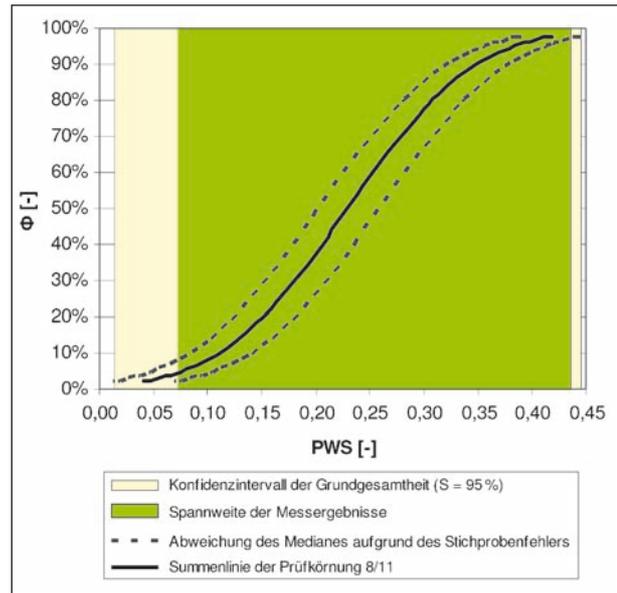


Bild 31: Exemplarische Summenlinie der Prüfkörnung 8/11

Die Polierwerte der untersuchten Gesteine repräsentieren somit nicht die Spannweite der Polierwerte der Grundgesamtheit aller verfügbaren Gesteine, sondern nur eine Stichprobe daraus. Um eine allgemeingültige Aussage über die mögliche Grundgesamtheit auf der Grundlage der untersuchten Stichprobe von nur einem Laboratorium zu erlangen, wurde der Stichprobenfehler hinzugezogen. Mithilfe des Stichprobenfehlers verschiebt sich die Summenlinie beidseitig, unter der Berücksichtigung einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %. Das Ergebnis der oberen und unteren Grenzen der möglichen Polierwerte ist das nachfolgend abgebildete Konfidenzintervall bzw. der Erwartungsbereich (siehe Bild 31 und Bild 32).

Die im Bild 32 abgebildeten Konfidenzintervalle für die jeweiligen Prüfkörnungen bilden unter Berücksichtigung einer 95%igen Wahrscheinlichkeit die möglichen Spannweiten der Polierwerte ab. Die ermittelten Konfidenzintervalle der Polierwerte weisen den gleichen Trend der Prüfkörnungen untereinander auf wie die Spannweite der Untersuchungsergebnisse. Das Konfidenzintervall der Grundgesamtheit wird sich bei Erweiterung der Datenbasis weiter festigen, sodass die Größe des Stichprobenfehlers

Parameter	feine Prüfkörnung (Sandplatten)		grobe Prüfkörnung (Mastix)		
	Natursand	Brechsand	2/5	5/8	8/11
Obere Grenze des Erwartungsbereiches	0,60	0,75	0,53	0,51	0,44
Untere Grenze des Erwartungsbereiches	0,35	0,26	0,08	0,07	0,02

Tab. 9: Grenzen der Erwartungsbereiche für die Prüfkörnungen

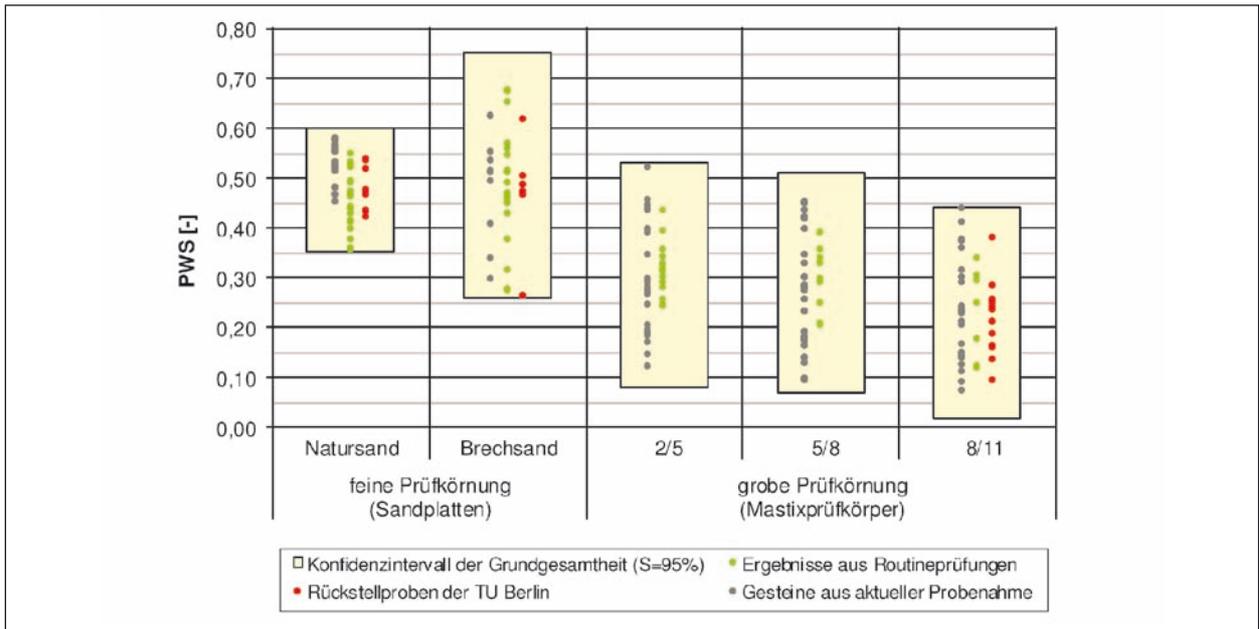


Bild 32: Ergebnis der Ermittlung von Minima und Maxima der Polierwerte der Prüfkörnungen

geringer wird. Es kann somit noch von keinem abschließenden Ergebnis ausgegangen werden, sondern von einer tendenziellen Aussage, welche den Bereich möglicher Polierwerte darstellt.

7.2.2 Übertragung der Anforderungswerte der 1. Gerätegeneration

Aufgrund von Untersuchungen über den „Einfluss der Polierresistenz von Gesteinskörnungen auf die Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen“ [11] wurden Anforderungswerte für unterschiedliche Polierbean-

spruchungen entwickelt. Diese Anforderungswerte unterteilen den Bewertungshintergrund in Kategorien. Auf Basis der Rückstellproben sollte der Versuch unternommen werden, die Anforderungswerte auf die Prüfergebnisse der 2. Gerätegeneration zu übertragen.

Grobe Gesteinskörnung – Mastixprüfkörper 8/11

Die vorliegenden Anforderungswerte für die Prüfkörnung 8/11 basieren auf Messungen an Mosaik-

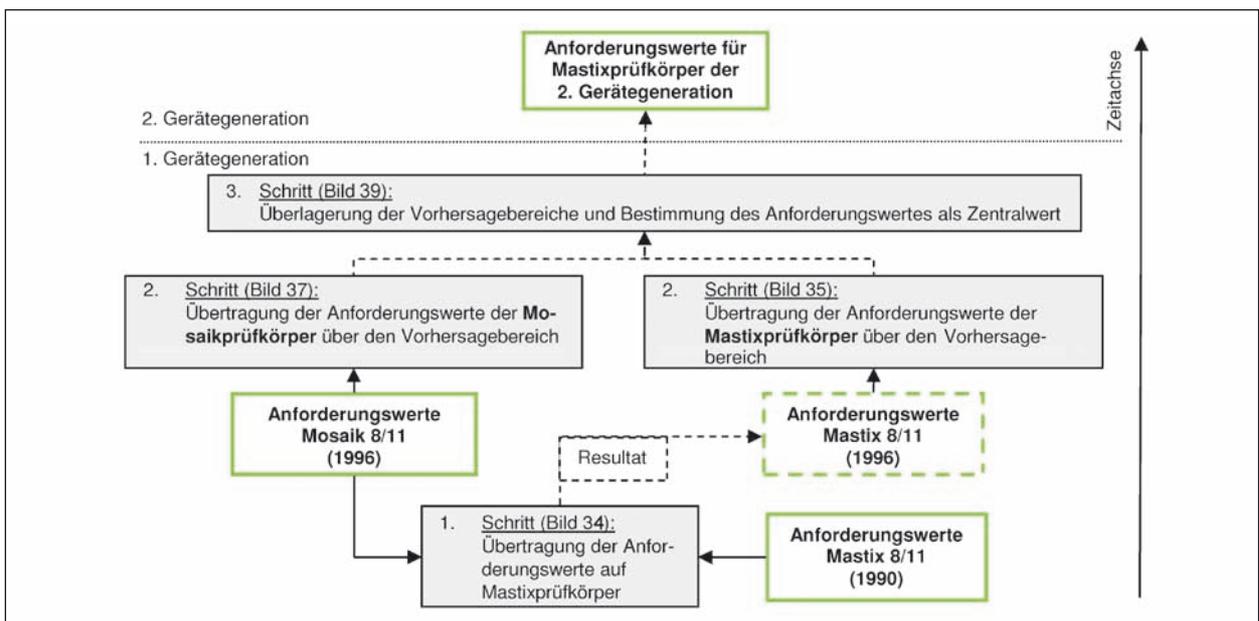


Bild 33: Algorithmus zur Transformation der Grenzwerte für die Prüfkörnung 8/11

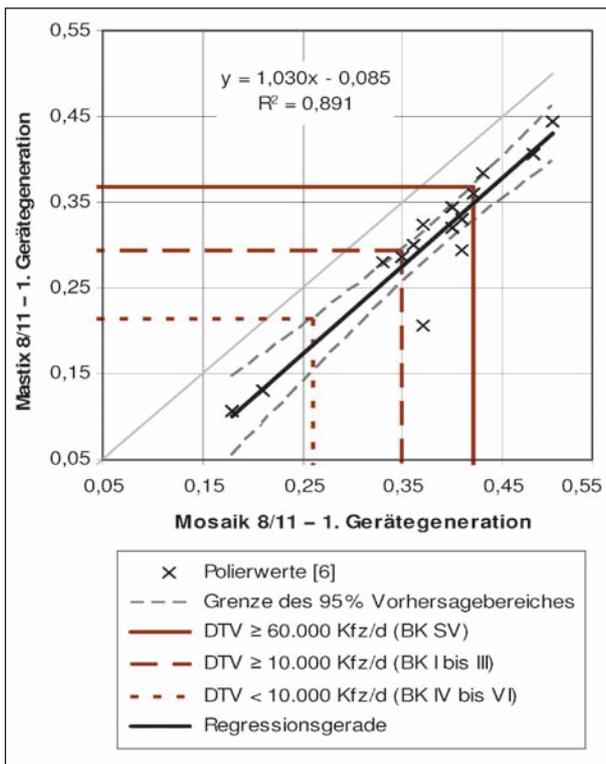


Bild 34: Regression zwischen Mastix- und Mosaikprüfkörpern der 1. Gerätegeneration

probekörpern. In Forschungsarbeiten [6, 21] wurden auch parallele Messungen an Mastix- und Mosaikprüfkörpern der gleichen Stichprobe durchgeführt, sodass gesicherte Beziehungen zwischen den beiden Probekörperarten bestehen.

Mithilfe der Rückstellproben in Form von Mastixprüfkörpern der Prüfkörnung 8/11 konnten die „Berliner“ Anforderungswerte [11] der 1. Gerätegeneration für Mosaikprobekörper auf den Bewertungshintergrund für Mastixprobekörper der 2. Gerätegeneration übertragen werden. Hierzu wurde der in Bild 33 dargestellte Algorithmus verwendet.

Als erster Schritt wurde eine Regression zwischen den Mastix- und Mosaikprüfkörpern der 1. Gerätegeneration basierend auf den Ergebnissen der Forschungsarbeit von DAMES und LINDNER [6] durchgeführt.

Mit einem Bestimmtheitsmaß von 89 % (Korrelationskoeffizient 0,94) kann von einem sehr hohen Zusammenhang zwischen den Prüfkörperarten der 1. Gerätegeneration ausgegangen werden. Zur Sicherheit wurden der obere und untere Vorhersagebereich bestimmt. Anhand dieser Regression konnten die Anforderungswerte der Mosaikprüfkörper von 1996 auf den Bewertungshintergrund der Mastixprüfkörper von 1990 übertragen werden. Um

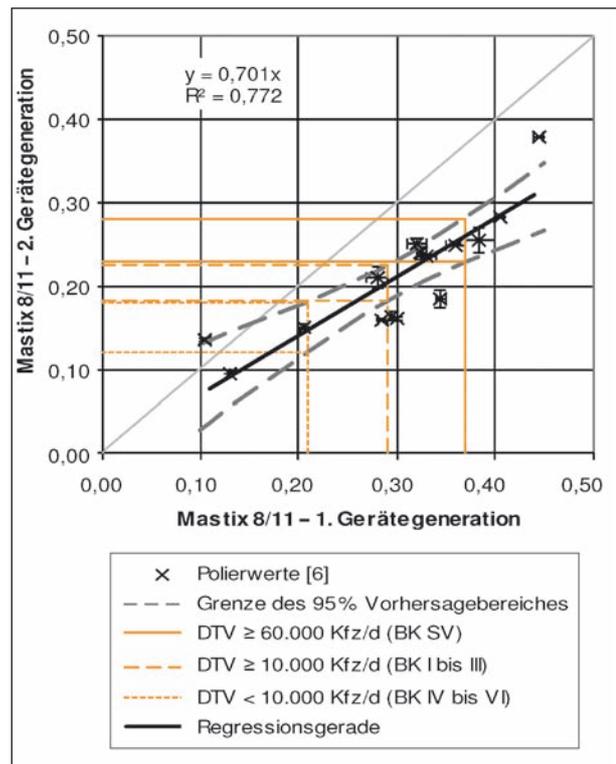


Bild 35: Regression zwischen Mastixprüfkörpern der 1. und 2. Gerätegeneration

Abweichungen der nachfolgenden Regressionen im Algorithmus zu kompensieren wurden die Anforderungswerte über den oberen Vorhersagebereich übertragen und somit wurde ein fiktiver Bewertungshintergrund für Mastixprüfkörper aus dem Jahr 1996 geschaffen.

Der arithmetische Mittelwert aller Messergebnisse an den Mastixprüfkörpern liegt 20 % unter dem mittleren Messwertniveau der Mosaikprüfkörper. Dies bestätigt die Ergebnisse aus der Ringuntersuchung [21] von 2007, bei der eine Differenz im Messwertniveau der Polierwerte an Mastixprüfkörpern gegenüber Polierwerten an Mosaikprüfkörpern von i. M. 23 % festgestellt wurde. Die damalige Datengrundlage bestand nur aus 3 Gesteinen und Messergebnissen von 16 Laboren und wird mit den vorliegenden Untersuchungsergebnissen weiter abgesichert.

Im zweiten Schritt wurden Regressionen zwischen den Ergebnissen der Mastixprüfkörper aus 1. und 2. Gerätegeneration sowie den Ergebnissen der Mosaikprüfkörper der 1. Gerätegeneration und den Mastixprüfkörpern der 2. Gerätegeneration durchgeführt (siehe Bild 35).

Die Regression zwischen den Mastixprüfkörpern (siehe Bild 36) weist mit einem Bestimmtheitsmaß

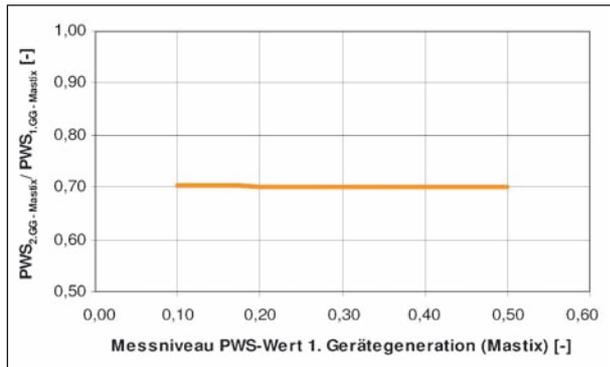


Bild 36: Messwertunterschied zwischen den Mastixprüfkörpern der 1. und 2. Gerätegeneration

von 77 % (Korrelationskoeffizient 0,88) einen guten Zusammenhang zwischen den Gerätegenerationen auf. Unter Berücksichtigung des Vorhersagebereiches bei der Übertragung der Anforderungswerte werden Bandbreiten für die 2. Gerätegeneration abgebildet, die sich aufgrund der Stärke des Zusammenhangs gegenseitig tangieren. Die Lage der Regressionsgeraden im Vergleich zur Winkelhalbierenden deutet auf eine Reduzierung des Messwertniveaus hin. Unter Berücksichtigung der Spannweite zwischen den Einzelmesswerten ist von einer niveauunabhängigen Reduzierung von 30 % im Vergleich zum Messwertniveau der 1. Gerätegeneration auszugehen.

Eine ausführliche Herleitung des Messwerteunterschiedes ist im Anhang 2 aufgeführt. Die Diskussion zur Betrachtung erfolgt im Kapitel 8.2.

Die Regression zwischen Mastix- und Mosaikprüfkörpern der 1. und 2. Gerätegeneration (siehe Bild 38) weist mit einem Bestimmtheitsmaß von 64 % (Korrelationskoeffizient 0,80) einen guten Zusammenhang zwischen den Gerätegenerationen auf. Die Regressionsgerade liegt unterhalb des Niveaus der Winkelhalbierenden mit einer geringen Steigung, was eine Reduzierung des Messwertniveaus der 2. gegenüber der 1. Gerätegeneration bedeutet (siehe Bild 37). Die ermittelten Vorhersagebereiche führen bei Übertragung der ab 1996 regional in Berlin gültigen Anforderungswerte mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % zu den im Bild 38 angegebenen Spannweiten. Die geringere Korrelation im Vergleich zur Regression zwischen den Mastixprüfkörpern der 1. und 2. Gerätegeneration (Bild 35) führt zu sich überschneidenden Bandbreiten.

Im Vergleich zur Abnahme des Messwertniveaus zwischen Mastixprüfkörpern der 2. und 1. Gerätegeneration (siehe Bild 36) ist der Unterschied zwi-

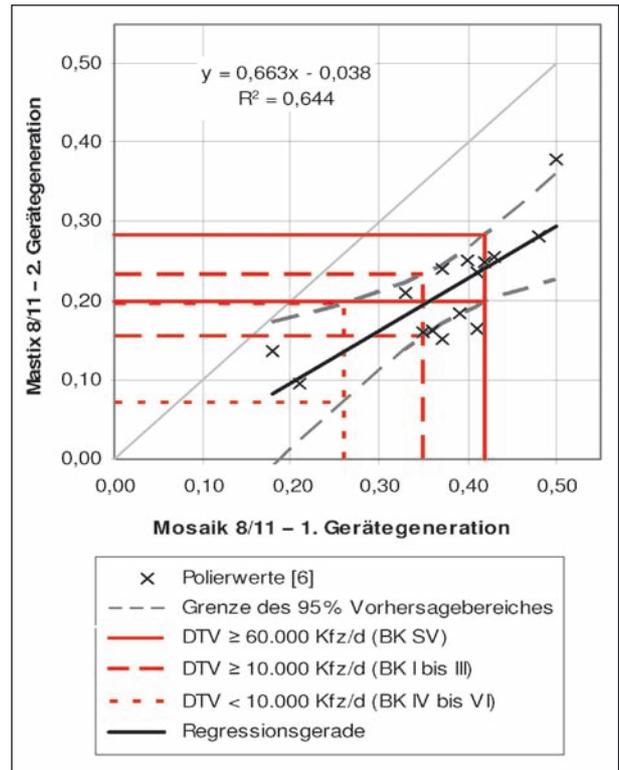


Bild 37: Regression zwischen Mastixprüfkörpern der 2. Gerätegeneration und Mosaikprüfkörpern der 1. Gerätegeneration

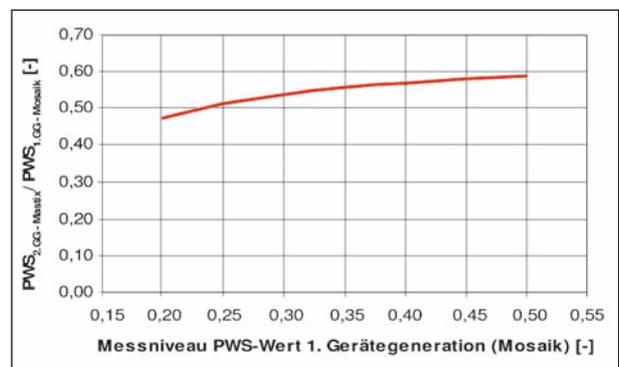


Bild 38: Messwertunterschied zwischen den Mastixprüfkörpern der 2. Gerätegeneration und Mosaikprüfkörpern der 1. Gerätegeneration

schen Mosaik- und Mastixprüfkörpern beider Gerätegenerationen nicht konstant, sondern abhängig vom Messwertniveau (siehe Bild 37). Die Ursache wurde nicht weiter untersucht, da weiterführende Untersuchungen zu Klärung nötig wären. Als Hauptbestandteil der Abhängigkeit wird jedoch die Art der Probekörpervorbereitung vermutet.

Die Bandbreiten der Regressionen zwischen 1. und 2. Gerätegeneration mit unterschiedlichen Prüfkörpern wurden im nächsten Schritt des Algorithmus (siehe Bild 33) überlagert.

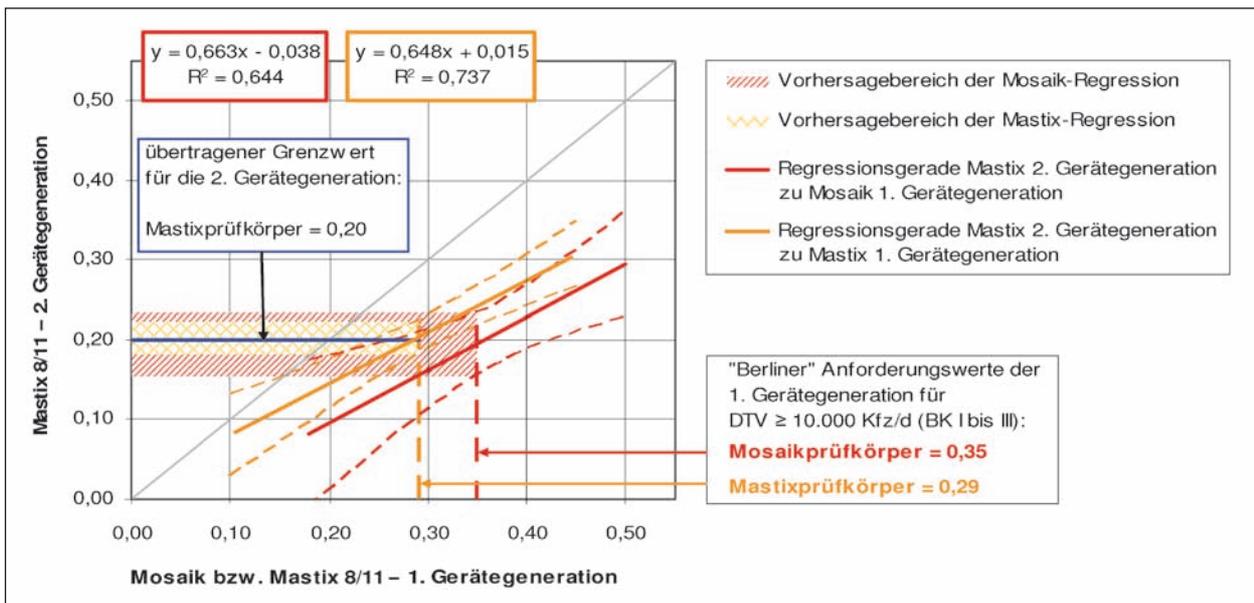


Bild 39: Exemplarische Superponierung des mittleren Grenzwertes für Mastixprüfkörper 8/11

Polierbeanspruchung der Fahrbahnoberfläche	Prüfkörnung 8/11	
	2. Gerätegeneration (Mastix)	1. Gerätegeneration (Mosaik)
Normale Polierbeanspruchung BK VI bis IV; DTV < 10.000 Kfz/d	≥ 0,15	≥ 0,26
Starke Polierbeanspruchung BK I bis III; DTV ≥ 10.000 Kfz/d	≥ 0,20	≥ 0,35
Extreme Polierbeanspruchung BK SV; DTV ≥ 60.000 Kfz/d	≥ 0,26	≥ 0,42

Tab. 10: Übertragung der Grenzwerte für Mastixprüfkörper 8/11, abgeleitet aus den „Berliner“ Anforderungen für Mosaikprüfkörper 8/11 (1996)

Die Überlagerung beider Vorhersagebereiche bildet einen Bereich mit erhöhter Wahrscheinlichkeit gegenüber den Vorhersagebereichen aus Bild 35 und Bild 38. Die Anforderungswerte wurden als Median der Überlagerungsfigur abgelesen, welche im vorstehenden Beispiel dem Vorhersagebereich der Mastix-Regression entspricht. Auf eine Ablesung bei einem höheren Sicherheitsniveau wurde verzichtet, da aus dem 1. Schritt des Algorithmus, der Übertragung der Anforderungswerte der Mosaikprüfkörper von 1996 auf die Mastixprüfkörper (siehe Bild 34), ein Sicherheitsniveau mit der Ablesung an dem oberen Vorhersagebereich vorhanden ist.

Grobe Gesteinskörnung – Mastixprüfkörper 5/8 und 2/5

Für die groben Gesteinskörnungen 2/5 und 5/8 standen in der TU Berlin keine Rückstellproben zur Verfügung, die zu einer Vergleichsprüfung hätten verwendet werden können. Die Empfehlungen für Anforderungswerte beruhen daher auf der Datenbasis der Gesteinskörnungen aus den aktuellen

Probenahmen, den Ergebnissen aus Routineprüfungen sowie indirekt den Ergebnissen der Rückstellproben in Form von Mastixprobekörpern 8/11 der TU Berlin.

Anhand des Datenmaterials wurden bei der Ermittlung des Erwartungsbereiches der Polierwerte (siehe Kapitel 7.2.1) die Summenlinien jeder Prüfkörnung erstellt. Die Summenlinien berücksichtigen das steigende Niveau der Polierwerte mit abnehmender Korngröße durch den horizontalen Versatz. Den transformierten „Berliner“ Anforderungswerten der 2. Gerätegeneration der Prüfkörnung 8/11 kann eine Über- bzw. Unterschreitungswahrscheinlichkeit über die Summenwahrscheinlichkeiten zugeordnet werden, wie es exemplarisch für den „Berliner“ Anforderungswert der Bauklasse I bis III grafisch dargestellt ist (rote Linien im Bild 40). Demnach steht der Anforderungswert von 0,20 PWS-Einheiten äquivalent für eine Wahrscheinlichkeit von 36 %. Mit der Übertragung der Summenwahrscheinlichkeit auf die Prüfkörnungen 5/8 und 2/5 kann der Anforderungswert für die Bau-

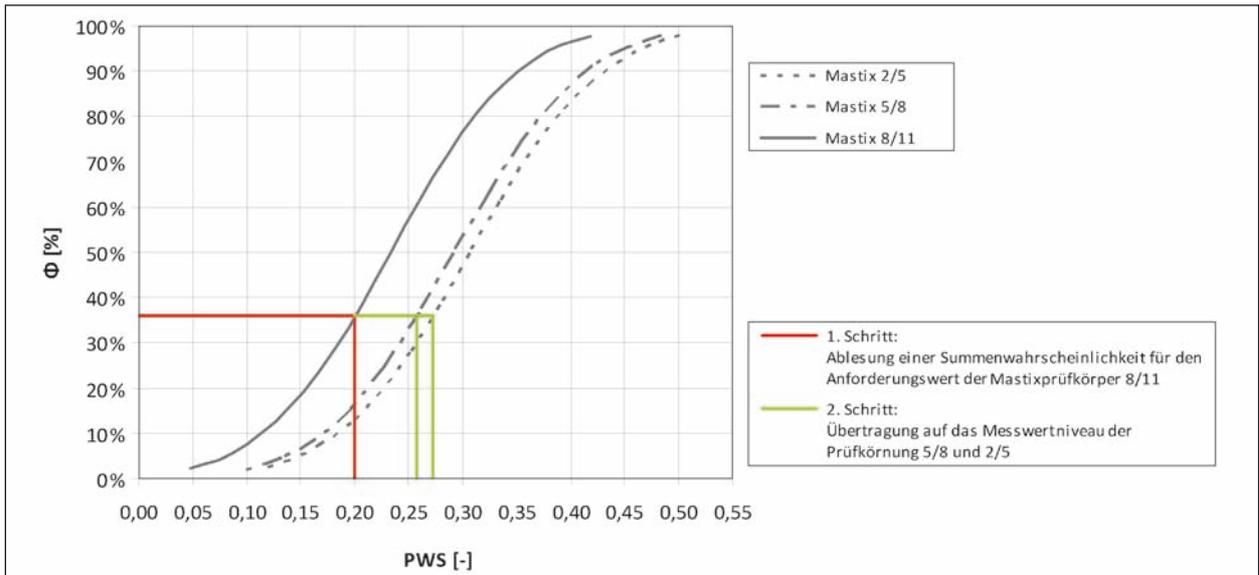


Bild 40: Übertragung der transformierten „Berliner“ Anforderungswerte für die Prüfkörnung 8/11 auf die Prüfkörnungen 5/8 und 2/5

Polierbeanspruchung der Fahrbahnoberfläche	Prüfkörnung 2/5	
	2. Gerätegeneration	1. Gerätegeneration
Normale Polierbeanspruchung BK VI bis IV; DTV < 10.000 Kfz/d	≥ 0,22	≥ 0,29
Starke Polierbeanspruchung BK I bis III; DTV ≥ 10.000 Kfz/d	≥ 0,27	≥ 0,39
Extreme Polierbeanspruchung BK SV; DTV ≥ 60.000 Kfz/d	≥ 0,33	≥ 0,46

Tab. 11: Transformation der Grenzwerte für Mastixprüfkörper 2/5, abgeleitet aus den „Berliner“ Anforderungen für Mosaikprüfkörper 8/11 (1996)

Polierbeanspruchung der Fahrbahnoberfläche	Prüfkörnung 5/8	
	2. Gerätegeneration	1. Gerätegeneration
Normale Polierbeanspruchung BK VI bis IV; DTV < 10.000 Kfz/d	≥ 0,21	k. A.*
Starke Polierbeanspruchung BK I bis III; DTV ≥ 10.000 Kfz/d	≥ 0,26	k. A.*
Extreme Polierbeanspruchung BK SV; DTV ≥ 60.000 Kfz/d	≥ 0,32	k. A.*

* k. A. – keine Anforderungen

Tab. 12: Transformation der Grenzwerte für Mastixprüfkörper 5/8, abgeleitet aus den „Berliner“ Anforderungen für Mosaikprüfkörper 8/11 (1996)

klasse I bis III auf kleinere Prüfkörnungen projiziert werden (grüne Linien im Bild 40).

Das Schema der Transformation sichert gleichbleibende Anteile an Gesteinen für einen Verwendungszweck, unabhängig vom Nennkorndurchmesser. Auf der Grundlage dieser Transformation wurden die in Tabelle 11 und Tabelle 12 dargestellten Anforderungswerte ermittelt.

Im Vergleich zu den damaligen „Berliner“ Anforderungswerten liegt eine Reduzierung des Messwertniveaus von im Mittel 28 % bei der Prüfkörnung

2/5 vor. Die Reduzierung geht konform mit derjenigen der Prüfkörnung 8/11 im Kapitel 7.2.2 „Grobe Gesteinskörnung – Mastixprüfkörper 8/11“ von im Mittel 30 %. Der geringe Unterschied im Niveau der Messwertreduzierung ist auf die Art der Ermittlung zurückzuführen.

Feine Gesteinskörnung – Sandplatten 0,2/0,4

Die lose Lieferkörnung aus dem ehemaligen Probenlager der TU Berlin wurde in gleicher Weise für die Prüfung vorbereitet wie im Kapitel 6.1.1 be-

schrieben. Im Bild 41 ist die Regression zwischen den Polierwerten der damaligen 1. Gerätegeneration und der heutigen 2. Gerätegeneration dargestellt. Die Einzelergebnisse sind dem Anhang 1 zu entnehmen.

Der Zusammenhang zwischen den Gerätegenerationen ist auf der Grundlage der Polierwerte von fei-

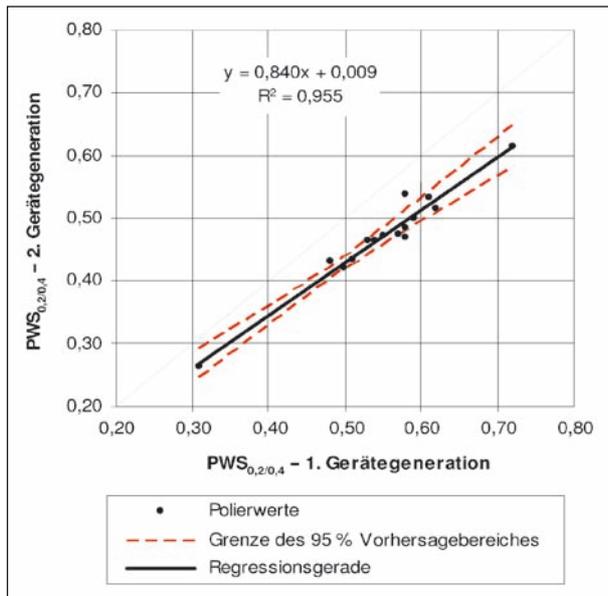


Bild 41: Regression zwischen 1. und 2. Gerätegeneration mit Sandplatten 0,2/0,4

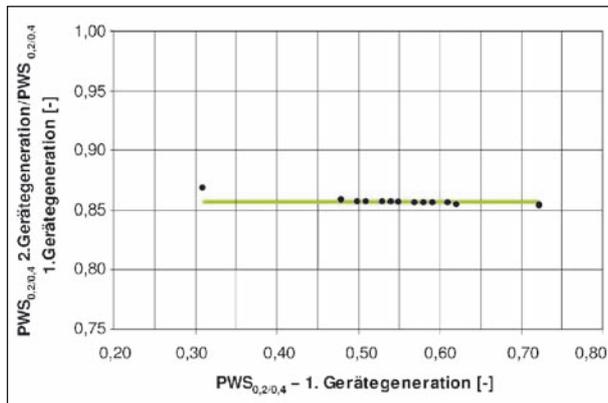


Bild 42: Messwerteunterschied zwischen der 1. und 2. Gerätegeneration auf Basis der Polierwerte von feinen Gesteinskörnungen

nen Gesteinskörnungen mit einem Bestimmtheitsmaß von 96 % (Korrelationskoeffizienten 0,98) sehr hoch. Trotz der inhomogenen Verteilung der Polierwerte im Bereich der schwach polierresistenten Gesteine ist, wie im Bild 42 dargestellt, eine konstante Abnahme von im Mittel 14 % (grüne Linie) des Messwertenniveaus von der 1. zur 2. Gerätegeneration erkennbar.

Die Übertragung der „Berliner“ Anforderungswerte der 1. Gerätegeneration für feine Gesteinskörnungen mit dem Stand von 1996 führt zu Anforderungswerten für die 2. Gerätegeneration, die in Tabelle 13 aufgeführt sind..

7.3 Vergleich der Polierwerte PWS und PSV

7.3.1 Zusammenhang der Polierwerte

Um einen möglichst aktuellen Vergleich zwischen den Polierwerten PWS und PSV herzustellen, wurden 22 der 25 groben Gesteinskörnungen aus der Forschungsarbeit „Bestimmung der PSV-Berechnungsformel bei Verwendung von Quarzkörnung als Poliermittel und Granitsplitt als Kontrollgestein“ [25] in das Untersuchungsprogramm aufgenommen. Zum Vergleich wurden das Standardpoliermittel Korund und das englische Kontrollgestein genutzt. Von den Gesteinen der Lieferkörnung 8/11 liegen Ergebnisse für den Polierwert PSV gemäß DIN EN 1097-8 [24] mit Korund als Poliermittel und nationalem und englischem Kontrollgestein von der Technischen Universität Darmstadt (TU Darmstadt) vor.

Das Forschungsprojekt der TU Darmstadt hatte planmäßig zeitlich früher begonnen, sodass einige Gesteine in der Lieferkörnung 8/11 an die TU Darmstadt schon geliefert wurden. Diese Gesteine wurden vom Forschungsnehmer von den Lieferwerken nachbestellt und stammen daher aus einer späteren Charge, ca. mit einem halben Jahr Differenz. Bei den in Tabelle 14 aufgelisteten Gesteinen stam-

Polierbeanspruchung der Fahrhahnoberfläche	Prüfkörnung 0,2/0,4	
	2. Gerätegeneration	1. Gerätegeneration
Normale Polierbeanspruchung BK VI bis IV; DTV < 10.000 Kfz/d	≥ 0,39	≥ 0,45
Starke Polierbeanspruchung BK I bis III; DTV ≥ 10.000 Kfz/d	≥ 0,47	≥ 0,55*
Extreme Polierbeanspruchung BK SV; DTV ≥ 60.000 Kfz/d	≥ 0,51	≥ 0,60

Tab. 13: Empfehlungen von Anforderungswerten für feine Gesteinskörnungen 0,2/0,4, abgeleitet aus den „Berliner“ Anforderungswerten der 1. Gerätegeneration (1996)

men die Proben durch gemeinsame Beschaffung aus derselben Charge.

FE-Nr.	Gestein	Gesteinsgruppe gemäß [12]
19	Schluffstein	9
21	Sandstein	9
22	Kalkstein	8
23	Basanit	4
24	Basaltlava	5

Tab. 14: Gesteine der groben Prüfkörnungen aus einer Charge der Lieferwerke

Bei den Vergleichen (siehe Bild 43) zwischen den Polierwerten wird auf die Ergebnisse der Forschungsarbeit der TU Darmstadt mit nationalem Kontrollgestein (Kürzel GER), englischem Kontrollgestein (Kürzel UK) und Korund als Poliermittel Bezug genommen.

Die Regressionen mit den Kontrollgesteinen wurden zunächst mit der gesamten Datenbasis aller Gesteine durchgeführt. Die Abweichung von der Regressionsgeraden ist bei der Basaltlava im Vergleich zu den übrigen Gesteinen signifikant hoch. Dies bedeutet, dass die Polierresistenz mit den beiden Prüfverfahren unterschiedlich beurteilt wird. Da

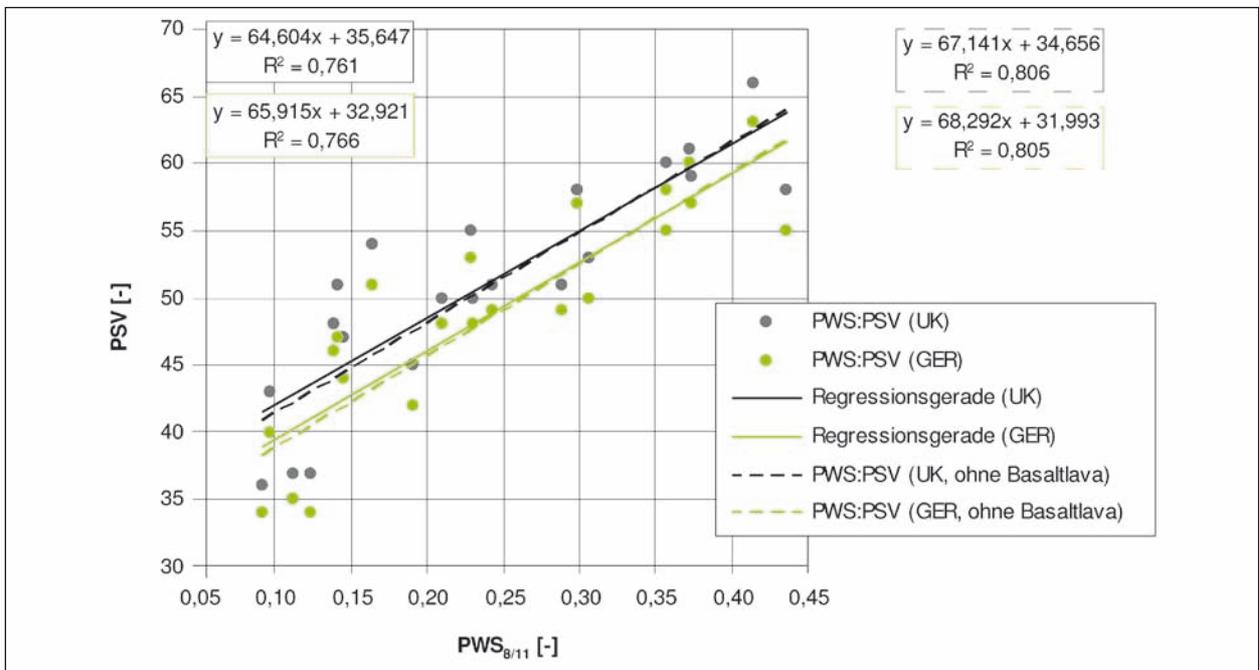


Bild 43: Regression zwischen den Polierwerten PSV und PWS

Erscheinungsjahr	Gerätegeneration	Anzahl der Proben	Art der Probekörper*	Regressionsgerade**		R*** [-]
				m	n	
1989 [6]	1.	15	Mastix	35,9	45,3	0,84
				36,0	45,2	0,80
1997 [26]		31	Mosaik	68,26	26,07	0,89
2000 [27]		88		56,61	30,10	0,89
2014	2.	22	Mastix (UK)	64,60	35,65	0,87
			Mastix (UK) ohne Basaltlava	67,14	34,66	0,90
			Mastix (GER)	65,92	32,92	0,88
			Mastix (GER) ohne Basaltlava	68,29	31,99	0,90

* bzw. Kontrollgestein bei der Ermittlung des PSV

** $PSV = m * PWS_{8/11} + n$

*** Korrelationskoeffizient $R = \sqrt{R^2}$

Tab. 15: Vergleich durchgeführter Regressionen zwischen Polierwerten PSV und PWS

Basaltlava nur durch kleinere lokale Vorkommen einen sehr geringen Teil der regional gebräuchlichen Gesteine für den Straßenbau darstellt, wurde entschieden, diese Besonderheit nicht weiter zu verfolgen. Das Gestein wurde daher für die Übertragung der Anforderungswerte vorerst vernachlässigt. Ohne Basaltlava steigt das Bestimmtheitsmaß um ca. 3,6 % an.

Im Vergleich zu Regressionen zwischen dem Polierwert PSV und dem Polierwert PWS der 1. Gerätegeneration konnte ein nahezu gleich starker Zusammenhang festgestellt werden.

7.3.2 Übertragung der PSV-Anforderungswerte auf das Verfahren nach WEHNER/SCHULZE

Nach den Ergebnissen der TU Darmstadt führt die Korrektur der PSV-Prüfergebnisse mit dem englischen Referenzgestein zu einem zu hohen PSV_{eng} , während der Messwert des nationalen Kontrollgesteins bestätigt werden konnte und somit für die Prüfung empfohlen wird [25]. Die Umrechnung auf die Anforderungswerte der ZTV Asphalt-StB [32, 33] basiert auf der TP Gestein-StB – Teil 5.4.1, Ausgabe 2010 mit nationalem Kontrollgestein (Herrnholzer Granit). Im Bild 44 ist ein zusammenfassender Vergleich des Bewertungshintergrundes PWS für die 2. Gerätegeneration und Mastixprüfkörper 8/11, basierend auf den „Berliner“ Anforderungswerten und den PSV-Anforderungswerten, dargestellt.

Die Übertragung des Bewertungshintergrundes $PWS_{8/11}$ auf die PSV-Skala wurde mit einer Genauigkeit von 1 PSV-Einheit durchgeführt. Der über mathematisch-statistische Analysen ermittelte Erwartungsbereich für Polierwerte nach WEHNER/SCHULZE (siehe Bild 32) spiegelt einen Bereich von 33 bis 62 PSV-Einheiten wider und deckt somit den Erwartungsbereich für PSV-Werte ab.

Durch spätere Anpassungen der technischen Regelwerke an die europäischen Stoffnormen, welche die Einstufung von Eigenschaften in Kategorien mit absoluten Grenzen einführen, wurden die PSV-Anforderungswerte verändert. Unabhängig davon, dass die Grundlagen der älteren Anforderungswerte für PWS und die aktuellen Anforderungswerte PSV in den Regelwerken nur noch eingeschränkt vergleichbar sind, zeigt sich eine gute Übereinstimmung beim Mindestwert von 42 PSV-Einheiten, der die grundsätzliche Möglichkeit für die Verwendung einer Gesteinskörnung in Deckschichten des Straßenbaus darstellt. Im Vergleich zu den damals gültigen Anforderungswerten der ZTV Asphalt-StB [32, 33] liegen die beanspruchungsabhängigen „Berliner“ Anforderungswerte auf einem vergleichbaren Niveau. Ein Anforderungswert für sand- und feinsplittarme Asphaltdeckschichten (z. B. SMA) ist im PWS-Bewertungshintergrund nicht enthalten. Die übrigen Anforderungswerte müssen durch eine national repräsentative und breitere Stichprobe neu definiert und abgesichert werden.

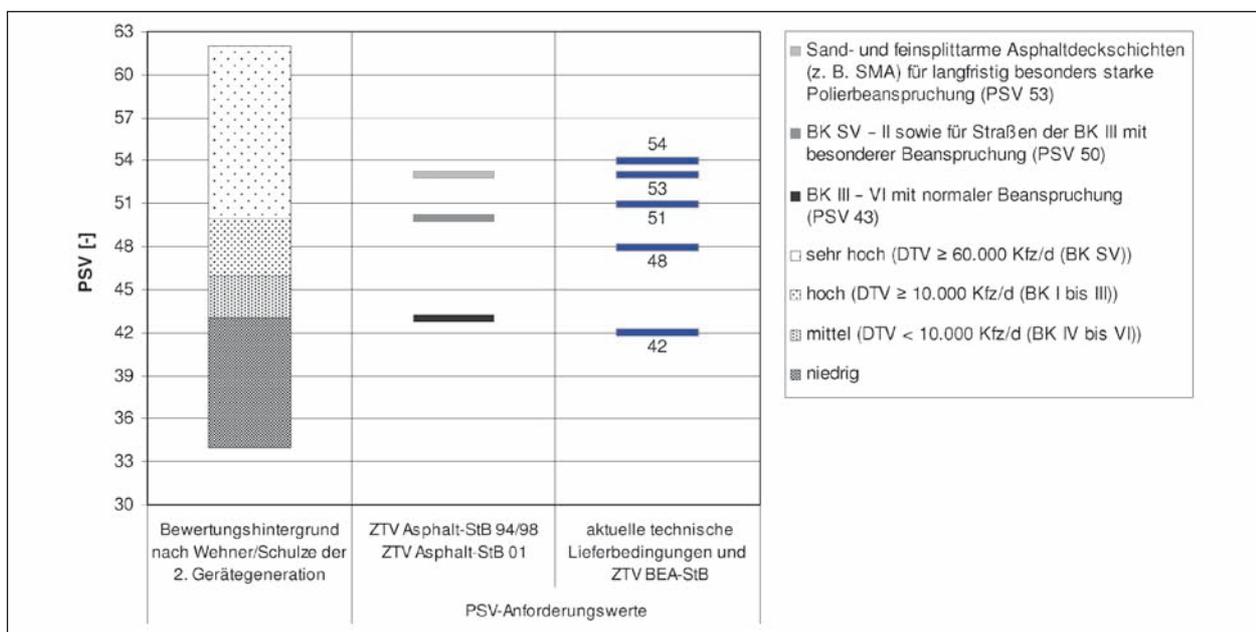


Bild 44: Vergleich der PSV-Anforderungswerte [32, 33, 34, 35, 36] mit dem Bewertungshintergrund für Mastixprüfkörper 8/11 für die 2. Gerätegeneration, basierend auf den „Berliner“ Anforderungswerten der 1. Gerätegeneration nach WEHNER/SCHULZE

8 Zusammenfassung

Eine umfassende Untersuchung des Polierwiderstandes von feinen und groben Gesteinskörnungen nach dem Verfahren der TP Gestein-StB – Teil 5.4.2 [4] sowie die Einbeziehung von vorliegenden Ergebnissen aus Routineprüfungen führten im Rahmen dieses Projektes zu einem aktualisierten Bewertungshintergrund des Verfahrens für die 2. Gerätegeneration.

8.1 Ermittlung der oberen und unteren Grenzen des Polierwertes PWS

Die Darstellung im Bild 46 stellt eine Zusammenfassung aus den ermittelten Erwartungsbereichen und übertragenen „Berliner“ Anforderungswerten der 1. auf die 2. Gerätegeneration dar. Die Erwartungsbereiche setzen sich aus den Spannweiten der Untersuchungsergebnisse zusammen, welche durch mathematisch-statistisch ermittelte Anteile ergänzt werden. Somit werden die durch Prüfung ermittelten Spannweiten erweitert. Die mathematisch-statistischen ermittelten Anteile enthalten auch den Stichprobenfehler, welcher die zufälligen Abweichungen infolge der Art der Stichprobenerhebung berücksichtigt [29].

Der systematische Fehler der Stichproben wurde durch eine Vergleichsuntersuchung bestimmt. Als systematischer Fehler wurde die Arbeitsweise mit dem Prüfgerät des Forschungsnehmers im Vergleich zu anderen Laboratorien definiert. Das

Ergebnis der Vergleichsuntersuchung validiert den Bewertungshintergrund. Eine sehr geringe Abweichung von im Mittel 0,003 PWS-Einheiten hat keine spürbaren Auswirkungen auf den Bewertungshintergrund.

Grundvoraussetzung für die Ermittlung der oberen und unteren Grenzen war eine repräsentativ verteilte Stichprobe, die sowohl die Bereiche mit niedrigen als auch mit hohen Polierwerten gleichermaßen umfasste. Aufgrund der Betrachtung über eine normalverteilte Grundgesamtheit der Prüfkörnungen ergeben sich die nachfolgend dargestellten Summenlinien, die den Hauptbestandteil des vorgestellten Bewertungshintergrundes darstellen.

Die Wahrscheinlichkeit des Betrachtungsbereiches liegt bei 95 %. Mit Weiterführung der Untersuchungsergebnisse können die möglichen Spannweiten noch präzisiert und der arithmetische Anteil im Bewertungshintergrund reduziert werden. Dabei sollte auch darauf geachtet werden, noch nicht berücksichtigte Gesteine, wie zum Beispiel Syenite oder Gneise, mit einzubeziehen. Eine Möglichkeit für weiterführende Betrachtungen im Sinne einer Datenerhebung, die als Intention die Präzisierung der Extrema der Polierwerte jeder Prüfkörnung hat, ist im Anhang 2 beschrieben.

8.2 Vergleich der Gerätegenerationen nach WEHNER/SCHULZE

Aufgrund der vorhandenen Rückstellproben und des Rückstellmaterials der TU Berlin konnte für die Prüfkörnungen 8/11 und 0,2/0,4 eine direkte Über-

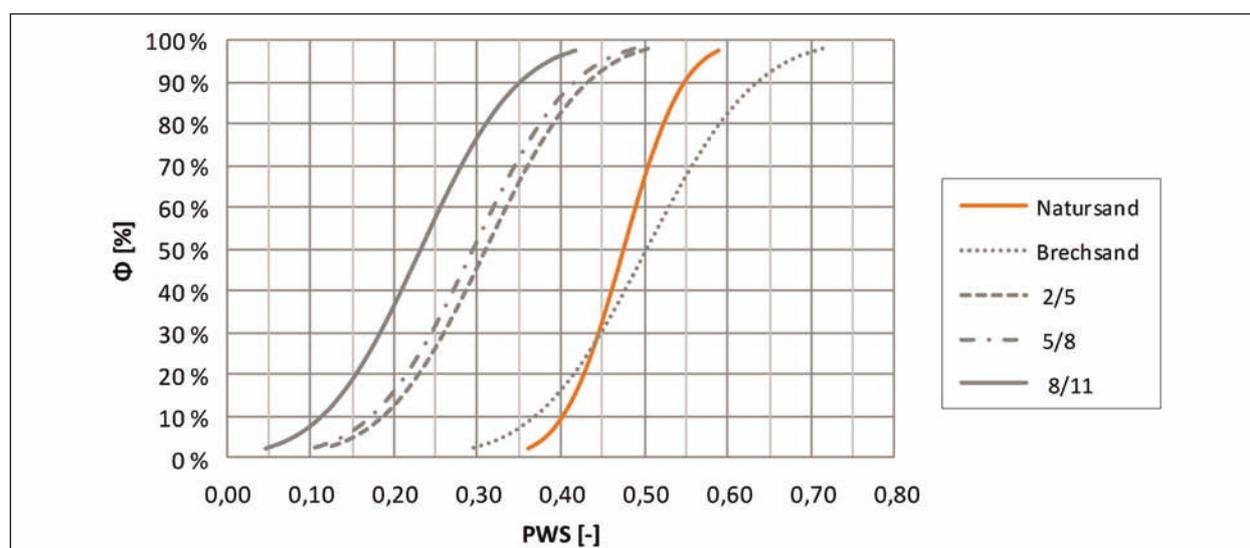


Bild 45: Summenlinien des Bewertungshintergrundes jeder Prüfkörnung ohne mathematisch-statistisch ermittelte Anteile

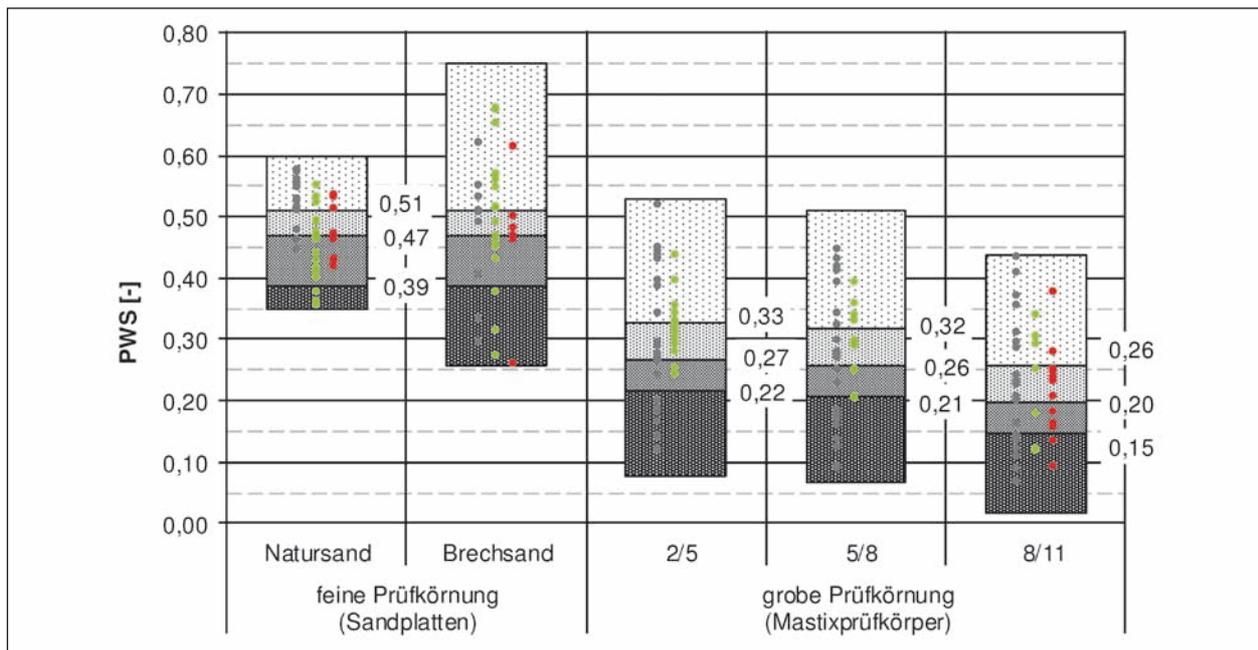


Bild 46: Bewertungshintergrund PWS für die 2. Gerätegeneration, abgeleitet aus den „Berliner“ Anforderungswerten für die 1. Gerätegeneration und den ermittelten oberen und unteren Grenzen der Polierwerte PWS

tragung der Anforderungswerte von der 1. Gerätegeneration vorgenommen werden. Für die Prüfkörnungen 2/5 und 5/8 wurden über indirekte Beziehungen äquivalente Anforderungswerte abgeleitet.

Die Regressionen der groben Prüfkörnung 8/11 zwischen den Gerätegenerationen weisen gute Korrelationen auf. So konnten mithilfe der Ergebnisse der Mosaikprüfkörper aus der Ära der 1. Gerätegeneration die Anforderungswerte auf einem abgesicherten Niveau mit 95%iger Wahrscheinlichkeit übertragen werden. Weiterhin wurde festgestellt, dass das Messwertniveau der Prüfkörnung 8/11 in Form von Mastixprüfkörpern um ca. 30 % abgenommen hat.

Die Polierwerte für die feinen Gesteinskörnungen 0,2/0,4 konnten mit einer sehr hohen Korrelation von ca. 97 % (siehe Bild 41) übertragen werden. Das Messwertniveau der 2. standardisierten Gerätegeneration ist auf den Sandplatten im Mittel um ca. 14 % niedriger als jenes der 1. Gerätegeneration.

Die Gründe für das niedrigere Messwertniveau der aktuellen Gerätegeneration wurden nicht untersucht. Obwohl bei der Neukonstruktion der Anlage die wesentlichen Maschinenparameter beibehalten wurden, führen offensichtlich andere Ursachen zu systematisch geringeren Polierwerten. Mögliche Ursachen sind in folgenden Randbedingungen zu vermuten:

- reduzierte Lagerreibung in der Griffigkeitsmess-einrichtung der 2. Gerätegeneration gegenüber der 1. Gerätegeneration aufgrund neuer Maschinentechnik,
- Änderungen in Zusammensetzung und Eigenschaften der Messgummis, da bekannt ist, dass zur Zeit der 1. Gerätegeneration drei aufeinanderfolgende Produzenten die Messgummis hergestellt haben,
- Änderungen in der Probekörpervorbereitung bei der Herstellung von Mastixprüfkörpern,
- stärkere Polierwirkung durch verbesserte Rückführung des Quarzmehl-Poliermittels.

Eine zusammenfassende Darstellung des Bewertungshintergrundes für alle Prüfkornklassen sowie die übertragenen „Berliner“ Anforderungswerte gibt das Bild 46 wieder.

8.3 Empfehlung für aktualisierte Anforderungswerte an die Polierresistenz nach dem Verfahren WEHNER/SCHULZE

Die nachfolgenden Empfehlungen für Anforderungswerte an die Polierresistenz von Gesteinskörnungen unterschiedlicher Korngröße wurden aus den Untersuchungsergebnissen abgeleitet und basieren auf der Stichprobe an untersuchten Gestei-

nen. Ohne zusätzliche Absicherungen sind diese noch nicht zur Praxisanwendung geeignet.

8.3.1 Grobe Gesteinskörnung

Die Ergebnisse der Forschungsarbeit belegen, dass die „Berliner“ Anforderungswerte für grobe Prüfkörnungen 8/11 in Form von Mosaikprüfkörpern mit den damals gültigen Anforderungswerten für Polierwerte nach DIN EN 1097-8 vergleichbar waren. Durch die direkte Übertragung der „Berliner“ Anforderungswerte (siehe Kapitel 7.2.2) über Rückstellproben der TU Berlin auf einheitliche Mastixprüfkörper für grobe Gesteinskörnungen ist diese Vergleichbarkeit immer noch gegeben. Ähnlich wie die Anpassung der PSV-Anforderungswerte von 2001 an heutige Standards (siehe Bild 46) müssen die Anforderungswerte der 2. Gerätegeneration für das Verfahren nach WEHNER/SCHULZE überprüft werden. Eine Empfehlung für Anforderungswerte,

basierend auf den Ergebnissen dieser Forschungsarbeit, sind in der Tabelle 16 dargestellt.

Auf die Differenzierung mit nur einer PSV-Einheit (PSV 53 und 54) wurde bei dieser Empfehlung verzichtet und zugunsten der Verkehrssicherheit das höhere Niveau von 54 PSV-Einheiten gewählt. Aus dem direkten Vergleich der Anforderungswerte beider Polierverfahren ist erkennbar, dass die Mindestanforderung für den Einsatz einer Gesteinskörnung in Deckschichten von Fahrbahnen (PSV 42) über beide Verfahren auf gleichem Niveau abgebildet wird. Belastungsabhängige Anforderungswerte für höhere Kategorien und Bauweisen müssen auf Basis von Erfahrungen aus der Praxis neu definiert werden.

Die Empfehlungen der Tabelle 16 basieren auf Untersuchungen von zwei Laboratorien und einer Stichprobe von Gesteinskörnungen, die für die in Deutschland im Verkehrswegebau verfügbaren und eingesetzten Gesteine nicht repräsentativ ist. Vor einer Einführung von Anforderungswerten für das Prüfverfahren WEHNER/SCHULZE bedarf es somit einer Absicherung durch eine breitere Datenbasis. Bei den für die regelmäßige Güteüberwachung von Gesteinskörnungen relevanten Verfahren sollte die Ermittlung des Polierwertes PWS zur Erfahrungssammlung mit aufgenommen werden. Diese Verfahrensweise hat sich bei der Einführung neuer Prüfverfahren durch die europäische Normung bewährt und wird in relativ kurzer Zeit eine abgesicherte Datenbasis zur Überprüfung der vorgeschlagenen Anforderungswerte ermöglichen.

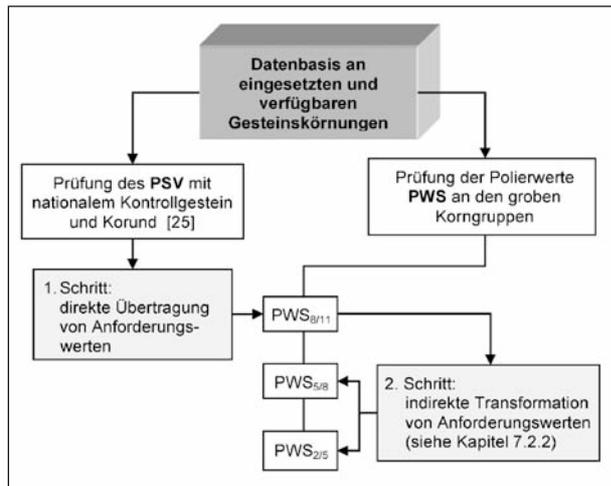


Bild 47: Empfohlene Vorgehensweise zur Absicherung empfohlener Anforderungswerte für den Polierwiderstand von groben Gesteinskörnungen unterschiedlicher Lieferkörnungen mit dem Verfahren WEHNER/SCHULZE

8.3.2 Feine Gesteinskörnung

Die Empfehlungen für Anforderungswerte an die feine Gesteinskörnung basieren auf der direkten Übertragung der „Berliner“ Anforderungswerte von

„Berliner“ Anforderungswerte für PWS _{8/11} *	PSV-Anforderungswerte nach aktuellen Regelwerken [34, 35, 36]	Empfehlung für Anforderungswerte PWS _{8/11} **
0,15	42	0,15
0,20	-	-
0,26	48	0,23
-	51	0,28
-	54	0,32

* abgeleitet aus der Ära der 1. Gerätegeneration (siehe Kapitel 7.2.2)

** abgeleitet aus der Regression mit nationalen Kontrollgestein (siehe Bild 43)

Tab. 16: Empfehlung für Anforderungswerte an die Polierresistenz von groben Gesteinskörnungen 8/11 nach dem Verfahren WEHNER/SCHULZE

„Berliner“ Anforderungswerte für fGk 1. Gerätegeneration	Empfehlung für Anforderungswerte für fGk 2. Gerätegeneration
≥ 0,45	≥ 0,39
≥ 0,55*	≥ 0,47
≥ 0,60	≥ 0,51

* Anforderungswert für feine Gesteinskörnungen in Betondecken nach dem M OB [14]

Tab. 17: Empfehlung für Anforderungswerte an die Polierresistenz von feinen Gesteinskörnungen nach dem Verfahren WEHNER/SCHULZE

1996 [11] (siehe Kapitel 7.2.2). Die Übertragung kann durch den starken Zusammenhang der Regression (siehe Bild 41) und die geringen systematischen Abweichungen des Forschungsnehmers (siehe Kapitel 7.1.5) bei der Prüfung von Sandplatten als abgesichert angesehen werden.

Die Beibehaltung des derzeitigen Anforderungswertes für den Bau von Fahrbahndecken in Betonbauweise [14] ist auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Arbeit nicht vertretbar.

9 Weiterer Forschungsbedarf

9.1 Auswirkungen der Probekörperherstellung auf die Vergleichspräzision des Verfahrens

Im Unterschied zur 2009 durchgeführten Ringuntersuchung zur Ermittlung der Vergleichspräzision wurden bei der Vergleichsuntersuchung zur Validierung der Prüfergebnisse die Probekörperherstellung und Probenvorbereitung nicht von jedem Teilnehmer selbst, sondern von einem Laboranten in einer Prüfstelle durchgeführt. Durch diese Änderung im Ablauf wird der Einfluss der Probekörperherstellung auf die Gesamtvarianz reduziert.

In einer älteren Ringuntersuchung wird der Zusammenhang von mehreren Varianzen aufeinanderfolgender Prozesse sehr allgemeingültig wie folgt beschrieben:

„In vielen Bereichen der Technik ist zu beobachten (und das gilt vermutlich auch für den bituminösen Sektor), dass für die drei Varianzen σ_H^2 (Herstellung), σ_P^2 (Probenahme und Probenteilung) und σ_M^2 (Messfehler) die Relation $\sigma_H^2 > \sigma_P^2 > \sigma_M^2$ gilt.“

Diese Tatsache hat aus folgenden genannten Gründen große Bedeutung“ [28] (siehe auch Bild 48).

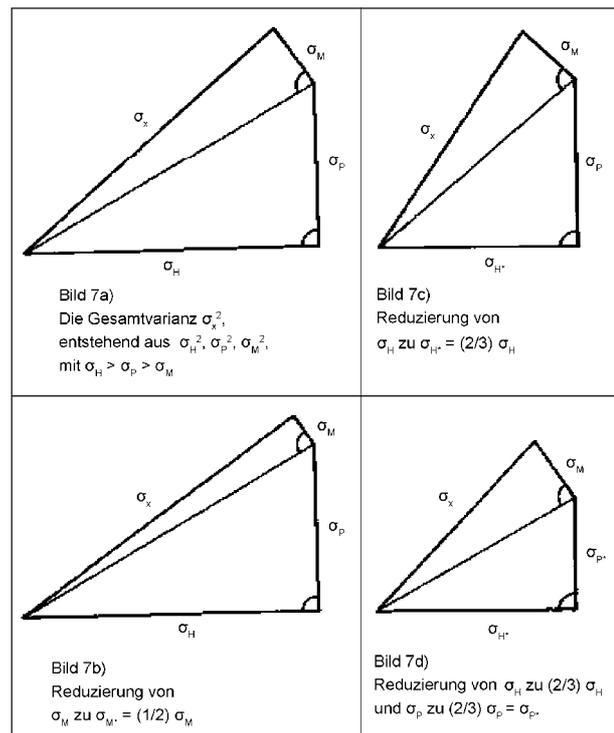


Bild 48: Reduzierung der Gesamtvarianz durch Reduzierung eines Anteils [28]

Wenn ein Anteil der Gesamtvarianz reduziert wird, so wird zu einem bestimmten Anteil auch die daraus resultierende Gesamtvarianz bzw. Abweichung zu einem bestimmten Teil reduziert. Auf Basis dieser These wurde ein Vergleich zwischen der durchgeführten Vergleichsuntersuchung und der Ringuntersuchung von 2009 [21] durchgeführt (siehe Tabelle 18).

Die These nach [28] kann auf der Grundlage des Vergleiches bestätigt werden. Die Gesamtvarianz der durchgeführten Vergleichsuntersuchung beträgt gerade einmal 10 % gegenüber der Gesamtvarianz der damaligen Ringuntersuchung.

Der Vergleich zeigt den hohen Einfluss der Probekörperherstellung und Probenvorbereitung auf das Prüfergebnis des Polierwertes nach WEHNER/SCHULZE. Die 2009 [21] ermittelte Präzision ist auf einem guten Niveau. Bei der steigenden Anzahl an Prüfgeräten in Europa und dem wachsenden Interesse an Polierwerten für verschiedene Korngruppen muss die Präzision des Verfahrens verbessert werden. Weiterführende Projekte sollten die Einflüsse der Probekörperherstellung auf das Prüfergebnis untersuchen und Rahmenbedingungen für die Messungen des Polierwertes nach WEHNER/SCHULZE daraus ableiten. So wird zum Beispiel in den bestehenden Regelwerken erlaubt, die Prüfoberfläche durch ein verlängertes Sandstrahlen

Beschreibung		Vergleichsuntersuchung des Forschungsprojektes	Ringuntersuchung von 2009 [21]
Teilnehmeranzahl		3	14
Anzahl der untersuchten groben Gesteinskörnungen 8/11 in Form von Mastixprüfkörpern		6	3
Gesteinsbereitstellung		Probenahme durch ein Labor	
Probekörperherstellung		durch ein Labor	durch unterschiedliche Labore
Anzahl der Messungen je Teilnehmer		2 (Doppelbestimmung)	
Gesamtanzahl der Einzelwerte		32	81
Deskriptive Statistik der Abweichung der Einzel- werte zum Mittelwert aller Teilnehmer	Median	-0,0010	-0,0028
	arithmetischer Mittelwert	0,0000	0,0000
	Maximum	0,0200	0,0934
	Minimum	-0,0370	-0,1021
	Spannweite	0,0570	0,1955
	Standardabweichung	0,0116	0,0375
	Gesamtvarianz	0,00014	0,00141

Tab. 18: Vergleich der durchgeführten Vergleichsuntersuchung mit der Ringuntersuchung von 2009 [21]

herzustellen. Nach Meinung des Forschungsnehmers aber hat die Sandstrahlung durch die Veränderung der Kanten und der Oberflächenbeschaffenheit am bzw. auf dem Einzelkorn der Prüfoberfläche einen signifikanten Einfluss auf das Prüfergebnis.

11 Literatur

- [1] KAMPLADE, J. (1988): Auswirkungen von Verschleiß und Verformung der Fahrbahnoberfläche auf die Verkehrssicherheit; Internationale Straßen- und Verkehrskonferenz, Berlin, Band 2/B, S. 311-316
- [2] TP Min-StB – Teil 5.5.2 (Ausgabe 1999; Fassung 2002): Technische Prüfvorschriften für Mineralstoffe im Straßenbau – Teil 5.5.2: Bestimmung des Polierwertes mit dem Verfahren nach WEHNER/SCHULZE
- [3] TP Min-StB – Teil 5.5.2 (Ausgabe 1999): Technische Prüfvorschriften für Mineralstoffe im Straßenbau – Teil 5.5.2: Bestimmung des Polierwertes mit dem Verfahren nach WEHNER/SCHULZE
- [4] TP Gestein-StB – Teil 5.4.2 (Ausgabe 2008): Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau – Teil 5.4.2: Bestimmung des Polierwertes mit dem Verfahren nach WEHNER/SCHULZE; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Gesteinskörnungen, ungebundene Bauweisen
- [5] DAMES, J.; LINDNER, J. (1997): Untersuchungen über den Einfluss unterschiedlicher Mineralstoffe auf das Gebrauchsverhalten von Asphaltdeckschichten hinsichtlich Griffbarkeit, Querebenheit und Reifengeräuschen; Forschungsarbeit FE 6.061 G 93 E
- [6] DAMES, J.; LINDNER, J. (1989): Ermittlung der Endpolierwerte von im Straßenbau verwendeten Gesteinen; Forschungsarbeit FE 6.048 G 85 C
- [7] DAMES, J.; LINDNER, J. (1988): Untersuchungen über den Einfluss des Größtkorns in bituminösen Deckschichten auf die Griffbarkeit; Forschungsarbeit FE 7.109 G 83 F
- [8] SCHULZE, K. H.; LINDNER, J. (1982): Erweiterung der Möglichkeiten für die Beurteilung von Mineralstoffen bezüglich Polierbarkeit; Forschungsarbeit F. A. 4.037 G 76 C
- [9] DAMES, J.; RODEWALD, H.; LINDNER, L. (1987): Einfluss der Polierbarkeit von Sand auf die Griffbarkeit von Asphaltbetondeckschichten; Forschungsarbeit F. A. 6.038 G 81 C
- [10] DAMES, J.; LINDNER, J. (1990): Zusammenhang zwischen dem Polierwiderstand von Mineralstoffen und der Griffbarkeit von Straßen-decken; Forschungsarbeit FE 06.049 G86 C

- [11] Senatsverwaltung für Bau- und Wohnungswesen: Ausführungsvorschriften zu § 7 des Berliner Straßengesetzes über Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau (Einführung TL Min-StB 94 (17. Februar 1996)
- [12] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Gesteinskörnungen, ungebundene Bauweisen: TL Gestein-StB 04 (Ausgabe 2004, Fassung 2007): Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau
- [13] DAMES, J.: Brief an die Senatsverwaltung für Bau- und Wohnungswesen VI C 1 (10.01.1996): Polieranforderungen TL Min, unveröffentlicht
- [14] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Betonbauweisen: Merkblatt für die Herstellung von Oberflächentexturen auf Verkehrsflächen aus Beton; M OB (Ausgabe 2009)
- [15] LINDNER, J.; DUDENHÖFER, B. (Januar 2004): Bericht über die Auswertung der ersten Vergleichsuntersuchung PWS mit der Prüfeinrichtung WEHNER/SCHULZE – neu; unveröffentlicht
- [16] KIRCHMAIER, L.; PFEILER, A. (Mai 2009): Griffigkeit von Betonstraßen – gesicherte Qualität durch neue Prüftechnik; Zeitschrift zement + beton
- [17] GEHLEN, Chr.; LOWKE, D.; SKARABIS, J. (September 2011): Einfluss der Sandeigenschaften auf die Oberflächendauerhaftigkeit von Straßenbetonen; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1061
- [18] HUSCHEK, S.; BÖHNISCH, S. (Februar 2004): Einfluss des Sandes auf die Griffigkeit von Betonfahrbahnen; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 883
- [19] RADENBERG, M.; KRASS, K. (2007): Auswirkungen der Extraktion von Gesteinskörnungen aus Asphalt sowie der Porosität von Gesteinen auf den PSV, Forschungsarbeit FE 06.0080/2004/BGB
- [20] DIN EN 12697-49 (Mai 2014): Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 49: Messung der Griffigkeit nach Polierung
- [21] LINDNER, J.; DUDENHÖFER, B.; LI, A. (Juni 2009): Bestimmung des Polierwertes mit dem Verfahren nach WEHNER/SCHULZE, Durchführung von Ringversuchen zur Ermittlung der Präzision unter Vergleichsbedingungen; FGSV-Nr.: 3/07
- [22] GEHLEN, Chr.; LOWKE, D.; SKARABIS, J. (September 2011): Einfluss der Sandeigenschaften auf die Oberflächendauerhaftigkeit von Straßenbetonen; Forschungsarbeit FE 08.188/2006/LGB
- [23] HUSCHEK, S. (März 2002): Die Griffigkeitsprognose mit der Verkehrssimulation nach WEHNER/SCHULZE; Zeitschrift Bitumen, 64. Jahrgang, Heft 1
- [24] DIN EN 1097-8 (Oktober 2009): Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 8: Bestimmung des Polierwertes
- [25] BÖHM, St.; SCHWEBEL, N. (Januar 2014): Bestimmung der PSV-Berechnungsformel bei Verwendung von Quarzkörnung als Poliermittel und Granitsplitt als Kontrollgestein, Forschungsarbeit FE 06.0093/2011/BGB
- [26] DAMES, J.; HUSCHEK, S.; LINDNER, J. (1997): Untersuchungen über den Einfluss unterschiedlicher Mineralstoffe auf das Gebrauchsverhalten von Asphaltdeckschichten hinsichtlich Griffigkeit, Querebenheit und Reifengeräuschen – Bamberg A 70; Forschungsarbeit FE 06.061 G 93 E
- [27] DAMES, J. (2000): Untersuchungen zur Sandpolierprüfung in Anlehnung an BS 812; Forschungsarbeit FE 06.068/1996/CGB
- [28] Strabag Bau-A.G. & Deutag-Mischwerke GmbH (1972): Streuungen der Prüfergebnisse von bituminösen Mischgut. Köln
- [29] SCHULZE (2007): Beschreibende Statistik, 6. Auflage; Oldenburger Wissenschaftsverlag GmbH; München
- [30] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen: TP Asphalt-StB (Ausgabe 2009): Technische Prüfvorschriften für Asphalt – Teil 0: Statistische Grundlagen zur Auswertung der Untersuchungen, Schiedsuntersuchungen, Allgemeine Angaben zum Prüfbericht

-
- [31] GRAF, U.; HENNING, H.-J.; STANGE, K.; WILRICH, P.-T. (1966): Formeln und Tabellen der mathematischen Statistik – zweite Auflage; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York
- [32] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Asphaltstraßen: ZTV Asphalt-StB (Ausgabe 1994, Fassung 1998); Zusätzlich Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt
- [33] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Asphaltstraßen: ZTV Asphalt-StB (Ausgabe 2001); Zusätzlich Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt
- [34] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen: TL Asphalt-StB 07/13 (Ausgabe 2007, Fassung 2013); Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen
- [35] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Betonbauweisen: TL Beton-StB 07 (Ausgabe 2007); Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton
- [36] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen: ZTV BEA-StB 09 (Ausgabe 09); Zusätzlich Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die bauliche Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen – Asphaltbauweisen

Anhänge

Anhang 1 – Prüfergebnisse

Prüfergebnisse der Gesteine aus aktueller Probenahme

Gesteinsbezeichnung	Bezeichnung in [25]	PWS _{0,2/0,4}	PWS _{2/5}	PWS _{5/8}	PWS _{8/11}
1 – Kies	17	0,623	0,352	0,334	0,289
2 – Granit 4	3	0,532	0,291	0,283	0,243
3 – Sandstein	1		0,444	0,420	0,373
4 – Muschelkalkstein	2		0,121	0,094	0,092
5 – Andesit	19	0,493	0,307	0,280	0,306
6 – Basalt	*		0,253	0,237	0,202
7 – Basalt	15	0,336	0,192	0,173	0,141
8 – Diabas	4		0,273	0,255	0,230
9 – Diabas	12	0,407	0,193	0,188	0,191
10 – Diabas	14		0,185	0,181	0,139
11 – Diabas	16	0,513	0,278	0,273	0,229
12 – Gabbro	9	0,508	0,267	0,232	0,210
13 – Grauwacke	6	0,552	0,453	0,450	0,374
14 – Grauwacke	11		0,397	0,395	0,358
15 – Dolomit	5	0,296	0,123	0,134	0,097
16 – devonischer Massenkalk	7	0,293	0,145	0,129	0,112
17 – Quarzit	8	0,553	0,346	0,326	0,299
18 – Rhyolith	13	0,547	0,443	0,415	0,415
19 – quarz. Sandstein	20		0,521	0,449	0,436
20 – Anorthosit	*		0,269	0,300	0,312
21 – Sandstein	22	0,488	0,433	0,433	0,358
22 – Kalkstein	23		0,146	0,139	0,124
23 – Basanit	24	0,354	0,183	0,177	0,145
24 – Basaltlava	25	0,560	0,203	0,189	0,165
25 – Phonolith	*		0,169	0,163	0,148

* Gesteine, die nicht in der Forschungsarbeit [25] untersucht wurden

Tab. 19: Mittlere Polierwerte der gebrochenen Gesteine aus aktuellen Probenahmen

Gesteinsbezeichnung	PWS _{0,2/0,4}
26 – Natursand	0,519
27 – Natursand	0,577
28 – Natursand	0,549
29 – Natursand	0,574
30 – Natursand	0,480
31 – Natursand	0,563
32 – Natursand	0,485
33 – Natursand	0,531
34 – Natursand	0,526
35 – Natursand	0,513
36 – Natursand	0,553
37 – Natursand	0,464
38 – Natursand	0,557
39 – Natursand	0,450
40 – Natursand	0,463

Tab. 20: Mittlere Polierwerte der Natursande aus aktuellen Probenahmen

Prüfergebnisse der Rückstellproben der TU Berlin

Gesteinsbezeichnung	PWS _{0,2/0,4}
41 – Quarzit (Brechsand)	0,623
42 – Diabas (Brechsand)	0,537
43 – Kalkstein (Brechsand)	0,267
44 – Basalt (Brechsand)	0,480
45 – Basalt (Brechsand)	0,506
46 – Diabas (Brechsand)	0,468
47 – Natursand	0,532
48 – Natursand	0,431
49 – Natursand	0,475
50 – Natursand	0,537
51 – Natursand	0,433
52 – Natursand	0,465
53 – Natursand	0,515
54 – Natursand	0,526
55 – Natursand	0,473

Tab. 21: Mittlere Polierwerte der Rückstellproben in der Prüfkörnung 0,2/0,4

Gesteinsbezeichnung	PWS _{8/11}
56 – Diabas 1	0,160
57 – Quarzit 1	0,283
58 – Basalt 1	0,162
59 – Basalt 2	0,164
60 – Quarzprophyr	0,240
61 – Granit 1	0,236
62 – Granit 2	0,249
63 – Norit	0,185
64 – Alpine Moräne	0,255
65 – Grauwacke	0,379
66 – Muschelkalkstein	0,095
67 – devonischer Massenkalk	0,136
68 – Kulmplattenkalk	0,210
69 – Hochofenschlacke	0,151
70 – Gabbro	0,252

Tab. 22: Mittlere Polierwerte der Rückstellproben in der Prüfkörnung 8/11

Prüfergebnisse der Vergleichsuntersuchung

Bezeichnung	Labor	Probe Nr.	PWS* _{Glas-vor} [-]	PWS [-]	PWS* _{Glas-nach} [-]	Labor-mittelwert	Mittelwert aller Labore
1 – Kies	A	1	0,113	0,290	0,111	0,289	0,296
		2	0,111	0,288	0,110		
	B	1	0,114	0,292	0,116	0,293	
		2	0,115	0,293	0,116		
	C	1	0,104	0,317	0,104	-	
		2	**	**	**		
5 – Andesit	A	1	0,106	0,304	0,105	0,306	0,292
		2	0,105	0,308	0,106		
	B	1	0,109	0,286	0,110	0,280	
		2	0,110	0,274	0,111		
	C	1	0,110	0,299	0,105	0,289	
		2	0,104	0,278	0,106		
9 – Diabas	A	1	0,126	0,192	0,124	0,191	0,191
		2	0,111	0,189	0,107		
	B	1	0,123	0,181	0,119	0,184	
		2	0,120	0,187	0,119		
	C	1	0,103	0,195	0,106	0,198	
		2	***	0,200	0,103		
12 – Gabbro	A	1	0,106	0,212	0,106	0,210	0,221
		2	0,106	0,208	0,107		
	B	1	0,120	0,222	0,122	0,223	
		2	0,120	0,224	0,120		
	C	1	0,101	0,208	0,102	0,229	
		2	0,099	0,250	***		
15 – Dolomit	A	1	0,106	0,099	0,106	0,097	0,105
		2	0,106	0,095	0,107		
	B	1	0,111	0,107	0,111	0,106	
		2	0,112	0,105	0,109		
	C	1	0,099	0,095	0,099	0,111	
		2	0,110	0,126	0,105		
18 – Rhyolith	A	1	0,110	0,414	0,110	0,415	0,424
		2	0,110	0,415	0,111		
	B	1	0,115	0,443	0,112	0,444	
		2	0,113	0,444	0,115		
	C	1	0,100	0,387	0,104	0,414	
		2	0,103	0,441	0,107		

* Messung auf der Kontrolloberfläche aus Glas vor und nach der Prüfung auf der Prüfoberfläche
** nur eine Messung durchgeführt
*** kein Messwert in der Vorlage enthalten

Tab. 23: Polierwerte der Mastixprüfkörper 8/11 aller Laboratorien der Vergleichsuntersuchung

Bezeichnung	Labor	Probe Nr.	PWS* _{Glas-vor} [-]	PWS [-]	PWS* _{Glas-nach} [-]	Labor-mittelwert	Mittelwert aller Labore
1 – Kies	A	1	0,110	0,336	0,116	0,334	0,309
		2	0,115	0,331	0,116		
	B	1	0,116	0,267	0,114	0,269	
		2	0,114	0,271	0,112		
	C	1	0,104	0,331	0,103	0,325	
		2	0,101	0,318	0,103		
5 – Andesit	A	1	0,110	0,280	0,108	0,280	0,297
		2	0,108	0,280	0,109		
	B	1	0,110	0,327	0,110	0,319	
		2	0,110	0,310	0,110		
	C	1	0,103	0,309	0,103	0,292	
		2	0,101	0,274	0,099		
9 – Diabas	A	1	0,114	0,193	0,109	0,188	0,202
		2	0,109	0,183	0,107		
	B	1	0,113	0,208	0,109	0,210	
		2	0,109	0,211	0,109		
	C	1	0,102	0,192	0,101	0,210	
		2	0,106	0,227	0,103		
12 – Gabbro	A	1	0,105	0,231	0,107	0,232	0,246
		2	0,108	0,233	0,107		
	B	1	0,116	0,248	0,114	0,247	
		2	0,113	0,246	0,114		
	C	1	0,099	0,252	**	0,259	
		2	0,104	0,265	0,103		
15 – Dolomit	A	1	0,126	0,131	0,133	0,134	0,136
		2	0,133	0,136	0,128		
	B	1	0,125	0,146	0,120	0,154	
		2	0,119	0,161	0,122		
	C	1	0,103	0,138	0,102	0,120	
		2	0,111	0,101	0,101		
18 – Rhyolith	A	1	0,110	0,418	0,115	0,415	0,418
		2	0,114	0,411	0,114		
	B	1	0,115	0,424	0,115	0,427	
		2	0,119	0,430	0,122		
	C	1	0,104	0,426	0,107	0,413	
		2	0,097	0,399	**		
* Messung auf der Kontrolloberfläche aus Glas vor und nach der Prüfung auf der Prüfoberfläche							
** kein Messwert in der Vorlage enthalten							

Tab. 24: Polierwerte der Mastixprüfkörper 5/8 aller Laboratorien der Vergleichsuntersuchung

Bezeichnung	Labor	Probe Nr.	PWS* _{Glas-vor} [-]	PWS [-]	PWS* _{Glas-nach} [-]	Labor-mittelwert	Mittelwert aller Labore
1 – Kies	A	1	0,106	0,352	0,111	0,352	0,338
		2	0,112	0,351	0,110		
	B	1	0,115	0,323	0,115	0,328	
		2	0,110	0,332	0,115		
	C	1	0,099	0,313	0,102	0,334	
		2	0,101	0,354	0,106		
5 – Andesit	A	1	0,108	0,303	0,112	0,307	0,325
		2	0,111	0,310	0,111		
	B	1	0,111	0,337	0,112	0,339	
		2	0,111	0,341	0,111		
	C	1	0,104	0,345	0,099	0,330	
		2	0,101	0,314	0,103		
9 – Diabas	A	1	0,108	0,194	0,106	0,193	0,206
		2	0,105	0,191	0,106		
	B	1	0,116	0,203	0,118	0,209	
		2	0,117	0,214	0,112		
	C	1	0,102	0,206	0,101	0,218	
		2	0,098	0,229	**		
12 – Gabbro	A	1	0,106	0,262	0,108	0,267	0,263
		2	0,107	0,271	0,107		
	B	1	0,114	0,238	0,116	0,239	
		2	0,116	0,240	0,117		
	C	1	0,103	0,283	0,103	0,285	
		2	0,103	0,286	0,104		
15 – Dolomit	A	1	0,113	0,121	0,123	0,123	0,132
		2	0,119	0,124	0,124		
	B	1	0,110	0,135	0,110	0,147	
		2	0,111	0,159	0,111		
	C	1	0,097	0,112	0,100	0,128	
		2	0,103	0,143	0,102		
18 – Rhyolith	A	1	0,115	0,437	0,117	0,443	0,438
		2	0,116	0,448	0,116		
	B	1	0,134	0,449	0,127	0,443	
		2	0,126	0,436	0,126		
	C	1	0,105	0,443	0,106	0,430	
		2	0,097	0,416	**		

* Messung auf der Kontrolloberfläche aus Glas vor und nach der Prüfung auf der Prüfoberfläche
** kein Messwert in der Vorlage enthalten

Tab. 25: Polierwerte der Mastixprüfkörper 2/5 aller Laboratorien der Vergleichsuntersuchung

Bezeichnung	Labor	Probe Nr.	PWS* _{Glas-vor} [-]	PWS [-]	PWS* _{Glas-nach} [-]	Labor-mittelwert	Mittelwert aller Labore
28 – Natursand	A	1	0,142	0,546	0,146	0,549	0,551
		2	0,123	0,552	0,134		
	B	1	0,132	0,518	0,135	0,512	
		2	0,133	0,506	0,136		
	C	1	0,108	0,596	**	0,591	
		2	**	0,586	**		
32 – Natursand	A	1	0,112	0,489	0,123	0,485	0,478
		2	0,132	0,480	0,136		
	B	1	0,130	0,460	0,133	0,464	
		2	0,132	0,467	0,134		
	C	1	**	0,474	**	0,485	
		2	0,111	0,495	**		
33 – Natursand	A	1	0,147	0,531	0,149	0,531	0,515
		2	0,148	0,530	0,145		
	B	1	0,121	0,498	0,128	0,493	
		2	0,129	0,488	0,128		
	C	1	**	0,507	**	0,521	
		2	0,108	0,534	**		
12 – Gabbro	A	1	0,135	0,509	0,134	0,508	0,504
		2	0,133	0,506	0,134		
	B	1	0,129	0,509	0,133	0,506	
		2	0,133	0,503	0,136		
	C	1	**	0,488	**	0,497	
		2	**	0,506	**		
15 – Dolomit	A	1	0,120	0,298	0,124	0,296	0,315
		2	0,117	0,293	0,122		
	B	1	0,134	0,350	0,136	0,345	
		2	0,132	0,339	0,129		
	C	1	0,102	0,293	**	0,305	
		2	0,106	0,317	**		
18 – Rhyolith	A	1	0,117	0,546	0,118	0,547	0,563
		2	0,109	0,548	0,117		
	B	1	0,128	0,574	0,133	0,568	
		2	0,132	0,562	0,132		
	C	1	0,102	0,573	**	0,574	
		2	0,110	0,575	**		

* Messung auf der Kontrolloberfläche aus Glas vor und nach der Prüfung auf der Prüfoberfläche
** kein Messwert in der Vorlage enthalten

Tab. 26: Polierwerte der Sandplatten 0,2/0,4 aller Laboratorien der Vergleichsuntersuchung

Anhang 2 – Weiterführende mathematisch-statistische Betrachtungen

Einfluss des mehrfachen Vorkommens eines Gesteines auf den Erwartungsbereich der Polierwerte – PWS

Anhand der zur Verfügung stehenden Daten wurde eine Betrachtung an zwei Stichproben durchgeführt:

- Stichprobe 1
Verwendung der kompletten zur Verfügung stehenden Datenbasis. Mit Mehrfachnennungen von Gesteinen gleicher Lagerstätte (wie es den Betrachtungen im Hauptteil zugrunde liegt).
- Stichprobe 2
Verwendung der kompletten zur Verfügung stehenden Datenbasis. Ohne Mehrfachnennungen von Gesteinen gleicher Lagerstätte.

An beiden Stichproben wurden die oberen und unteren Polierwerte ermittelt, wie es im Kapitel 7.2.1 erläutert wurde. Nachfolgend sind die Ergebnisse dieser Betrachtung grafisch zusammengestellt und werden diskutiert.

Die arithmetischen Mittelwerte unterscheiden sich kaum innerhalb der Prüfkörnungen. Auch die ermittelten Extrema der Polierwerte weisen keine deutliche Abweichung auf. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Größe des Stichprobenumfangs ausreicht, um den Einfluss der Mehrfachnennung sehr gering zu halten.

Die Konsequenz ist, dass eine Weiterführung der Daten durch mehrere Laboratorien zu einer höher gesicherten Aussage über die minimalen und maximalen Polierwerte führt. Bei einer solchen Datenerhebung müsste die Gesteinsart bekannt sein, um einen besseren Eindruck über die Gesteine zu erlangen. Durch die Anonymisierung der Herkunft aber bleibt der Gesteinslieferant unbekannt. Weiterhin wird die Mehrfachnennung zwischen den Laboratorien bei einer solchen Erhebung minimiert, da jedes Laboratorium zumeist ein eigenes Einzugsgebiet bzw. einen eigenen Kundenstamm hat.

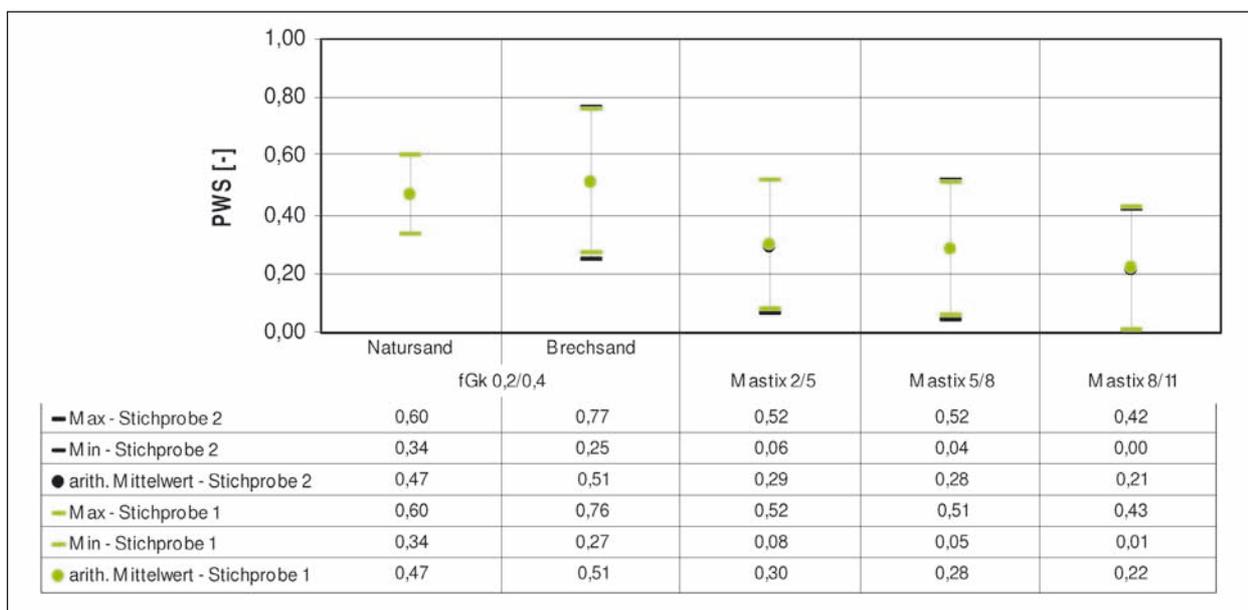


Bild 49: Mögliche minimale und maximale Polierresistenzen beider Stichproben

Divergenz des Messwertenniveaus zwischen 1. und 2. Gerätegeneration

Abweichend von der konventionellen Regression über die Mittelwerte der Einzelmessungen des Polierwertes nach WEHNER/SCHULZE wurde eine Kalibrierung der Regression über die Spannweiten zwischen den Einzelmesswerten durchgeführt. Dazu wurden neben den Einzelmesswerten der 2. Gerätegeneration die Spannweiten aus zwei Probekörperserien von [6] der 1. Gerätegeneration hinzugezogen. Jede Serie beinhaltet zwei Einzelmessungen. Als Ziel der Regression wurde ein Zusammenhang definiert, der mindestens den gleichen Korrelationskoeffizienten aufweist wie in der Regression mit den Mittelwerten. Die Durchführung erfolgte mit dem heuristischen Zusatzmodul von MS Office. Nachfolgend sind die Spannweiten der Mittelwerte für die 1. und 2. Gerätegeneration sowie

die kalibrierte Regressionsgerade auf der Grundlage innerhalb der jeweiligen Spannweiten verschobene Polierwerte dargestellt.

Die kalibrierte Regressionsgerade verläuft durch den Nullpunkt ($n = 0$) und weist somit keinen Versatz auf. Ein absoluter Messwerteunterschied bzw. ein additiver Zusammenhang zwischen den Gerätegenerationen kann somit ausgeschlossen werden. Die Dämpfung der Steigung ($m = 0,7$) weist auf einen multiplikativen Zusammenhang des reduzierten Messwertenniveaus hin. Im Messwertebereich der 2. Gerätegeneration von 0,10 bis 0,38 PWS-Einheiten kann von einer konstanten Abnahme von 30 %, unabhängig vom Messwertenniveau, ausgegangen werden.

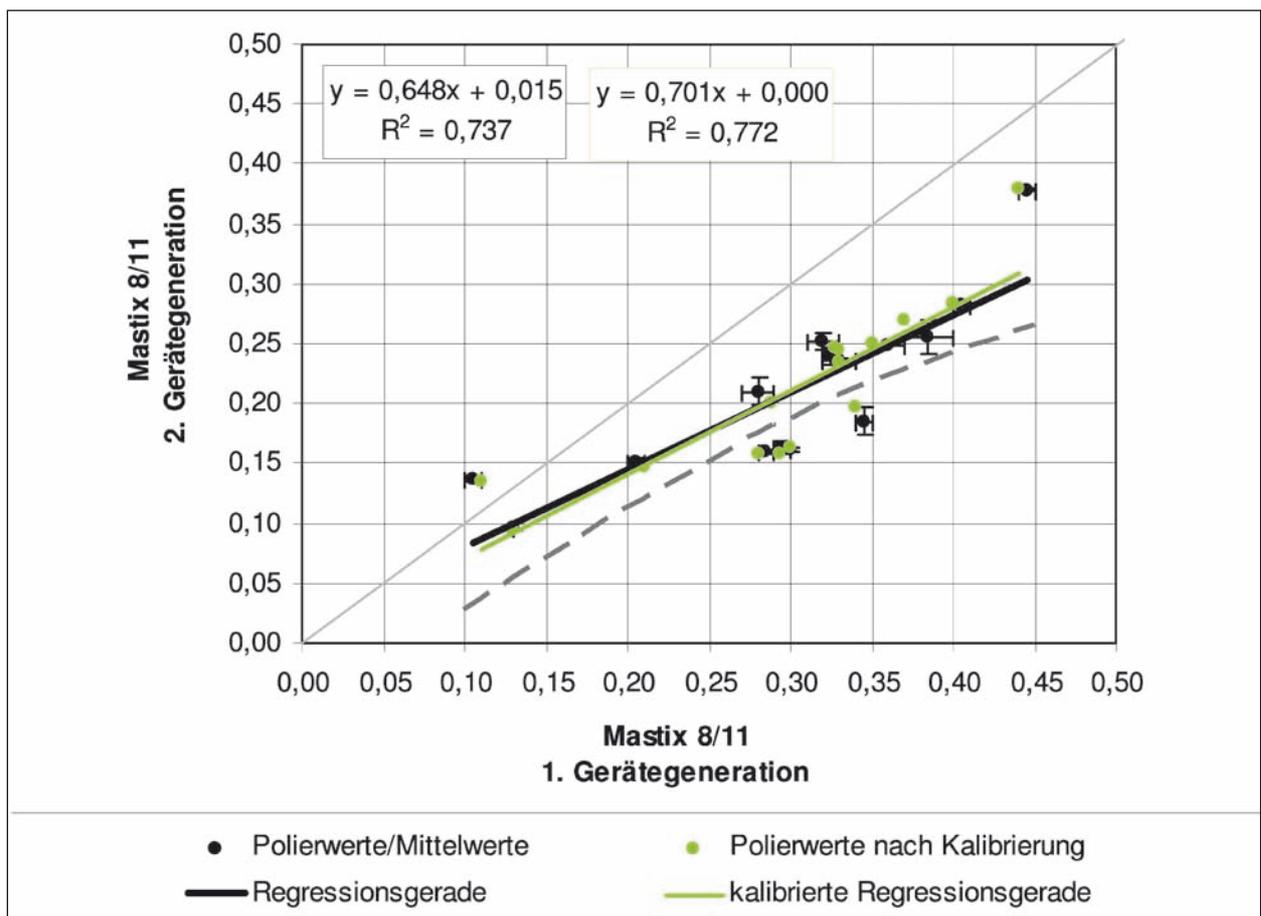


Bild 50: Kalibrierte Regression über die Spannweiten der Polierwerte

Prüfung der Abhängigkeit zwischen dem Messwertniveau der Kontrolloberfläche aus Glas und der Prüfoberfläche

Mit den Ergebnissen der Vergleichsuntersuchungen wurde geprüft, ob eine Abhängigkeit zwischen den Griffigkeitsmessungen auf der Kontrolloberfläche aus Glas und den Abweichungen der zugehörigen Einzelmessungen zum Mittelwert aller Teilnehmer vorhanden ist. Nachfolgend sind die jeweiligen Betrachtungen grafisch dargestellt.

Unabhängig von der Art der Prüfoberfläche (Mastixprüfkörper oder Sandplatte) und der Prüfkörnung ist kein Zusammenhang zwischen der Kontrolloberfläche aus Glas und den zugehörigen Abweichungen erkennbar. Es besteht ebenfalls keine Abhängigkeit zwischen den Abweichungen der Kontrolloberfläche zum Mittelwert der Kontrolloberfläche aller Teilnehmer und den Abweichungen aller Teilnehmer und den Abweichungen der Einzelwerte der Prüfoberfläche zum Mittelwert der Prüfoberfläche aller Teilnehmer, unabhängig von der Art der Prüfoberfläche (Mastixprüf-

körper oder Sandplatte) und der Prüfkörnung. Zu einem gleichen Ergebnis führt ebenfalls der Vergleich, wenn die Messungen der Kontrolloberfläche nach der Messung der Prüfoberfläche genutzt werden.

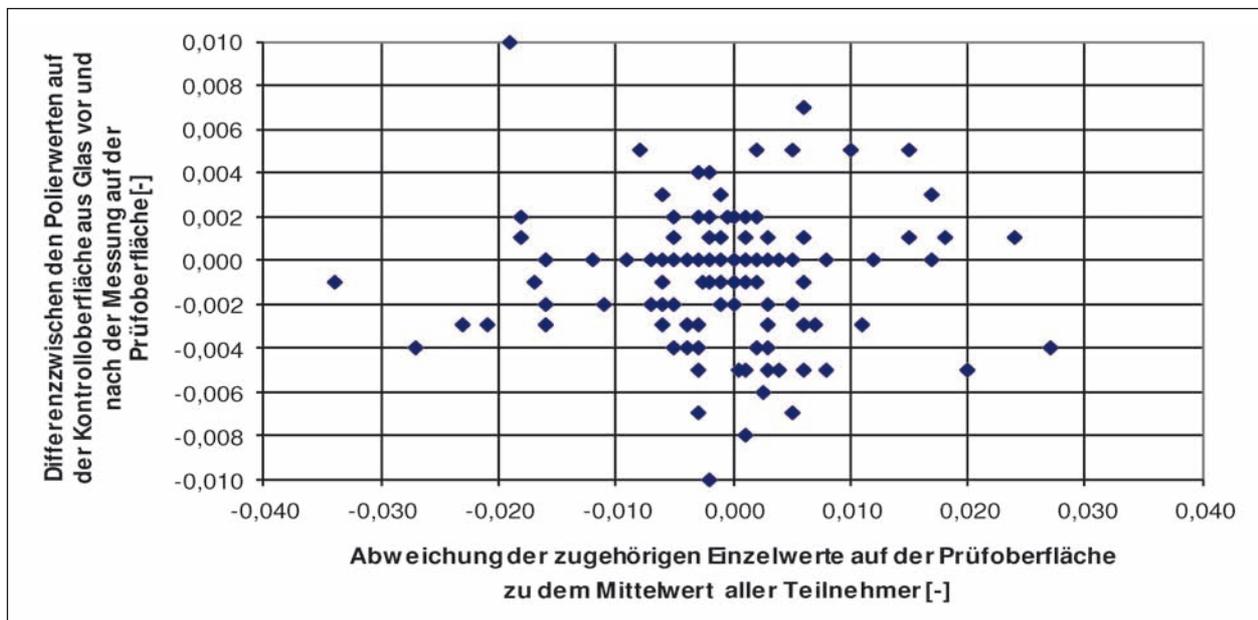


Bild 51: Vergleich des Messwerteunterschiedes der Kontrolloberfläche aus Glas vor und nach der Messung der Prüfoberfläche mit den Abweichungen zwischen den zugehörigen Einzelwerten und den Mittelwert aller Teilnehmer (n = 132)

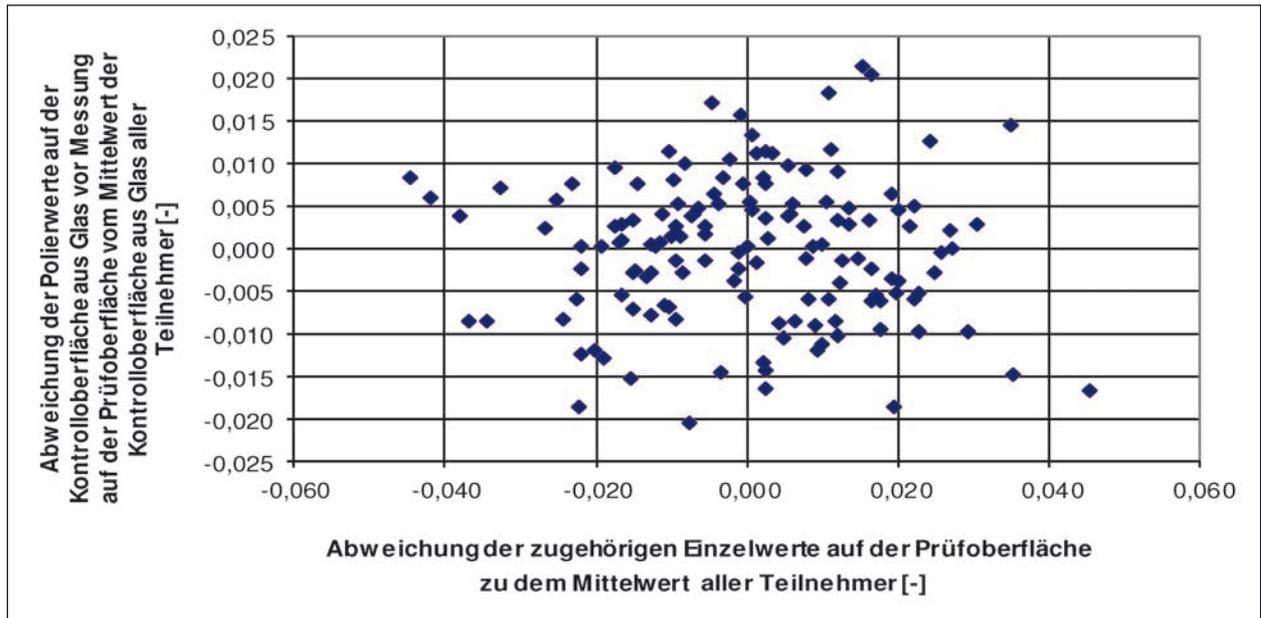


Bild 52: Vergleich der Abweichungen der Einzelwerte der Kontrolloberfläche aus Glas vor der Messung der Prüfoberfläche abzüglich Mittelwert der Kontrolloberfläche aller Teilnehmer mit den Abweichungen zwischen den zugehörigen Einzelwerten und dem Mittelwert aller Teilnehmer der Prüfoberfläche (n = 144)

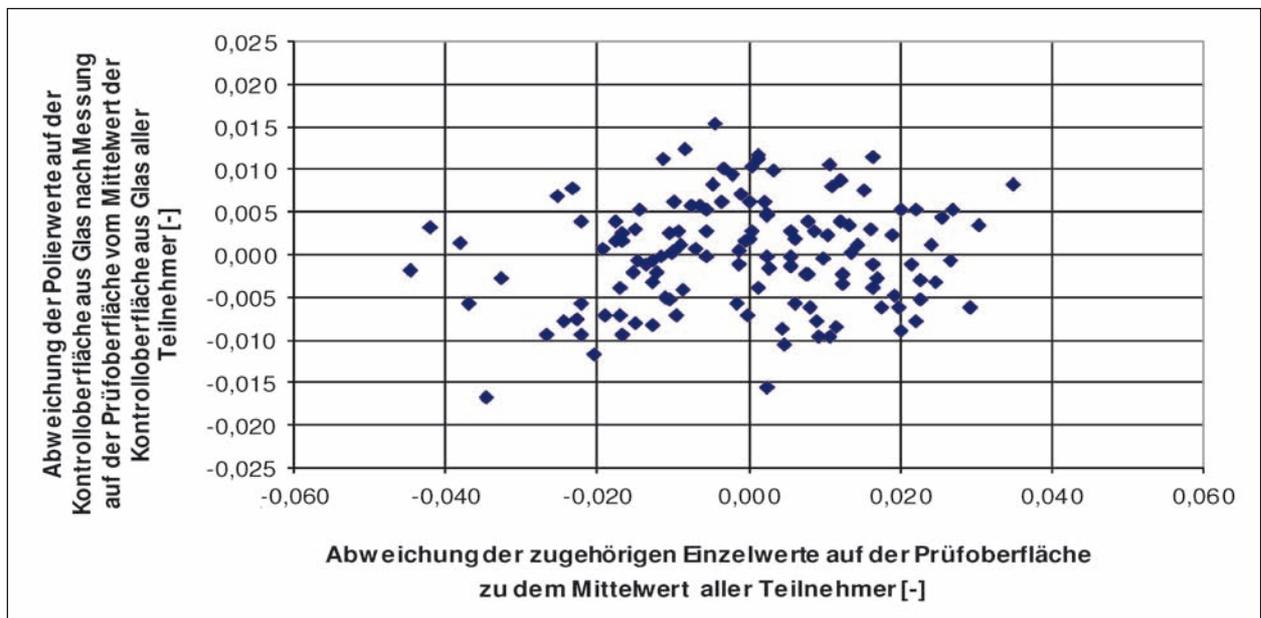


Bild 53: Vergleich der Abweichungen der Einzelwerte der Kontrolloberfläche aus Glas nach der Messung der Prüfoberfläche abzüglich Mittelwert der Kontrolloberfläche aller Teilnehmer mit den Abweichungen zwischen den zugehörigen Einzelwerten und dem Mittelwert aller Teilnehmer der Prüfoberfläche (n = 132)

Anhang 3 – Mathematisch-statistische Analysen

Für die Durchführung der mathematisch-statistischen Betrachtungen wurde das Programm Microsoft Office Excel 2003 genutzt. Nachfolgend werden daher die verwendeten Funktionen mit aufgeführt.

Definition der Begriffe und zugehörige Berechnungsformeln

- Einzelwert (x_i):
Eine Probe oder ein Messwert wird als x bezeichnet. Die Stellung der Einzelwerte in der sortierten Messreihe wird über die Größe des Index (i) ausgedrückt, wobei die Werte vom kleinsten bis zum größten sortiert sind.
- Klasse/Gruppe (p):
Die x -Proben sind in p -Gruppen eingeteilt. Im Bezug zur Terminologie dieser Betrachtungen sind die Gruppen gleich den Prüfkörnungen zu verstehen.
- Probenanzahl/Stichprobenumfang (n):
Anzahl der Proben jeder Prüfkörnung bzw. bei Betrachtung von Abweichungen ist die Anzahl der Einzelwerte als Stichprobenumfang definiert.
Excel = Anzahl (p)
- Maximum x_n :
Das Maximum ist der größte Einzelwert einer Gruppe.
Excel = Max (p)
- Minimum x_1 :
Das Minimum ist der kleinste Einzelwert einer Gruppe.
Excel = Min (p)
- Spannweite (Δ):
Die Spannweite ist die absolute Differenz zwischen dem kleinsten und größten Einzelwert einer Gruppe.
 $\Delta = x_n - x_1$
Excel = Max (p) – Min (p)
- Verhältnis (Δ_V):
Das Verhältnis gibt an, zu wie vielen Anteilen ein Einzelwert (x_i) im Bezug zu einem Einzelwert (x_j) steht.

$$\Delta_V = \frac{x_i}{x_j} \text{ z.Bsp.} = \frac{PWS_{2, \text{Gerätegeneration}}}{PWS_{1, \text{Gerätegeneration}}}$$

- Arithmetischer Mittelwert (\bar{x}):
Der Mittelwert der Gruppe wird mit dem arithmetischen Mittelwert berechnet.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Excel = Mittelwert(p)

- Median/Zentralwert (\tilde{x}):
Der Median einer Gruppe ist jener Lageparameter, der von 50 % der Gruppe über- bzw. unterschritten wird.

$$\tilde{x} = \begin{cases} \frac{x_{n+1}}{2} & n, \text{ ungerade} \\ \frac{x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1}}{2} & n, \text{ gerade} \end{cases}$$

Excel = Median (p)

- Standardabweichung (s):
Die Standardabweichung gibt die Streuung der Einzelwerte (x_i) um den Mittelwert wieder.

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Excel = Stabw (p)

- Varianz (s^2):
Das Quadrat der Standardabweichung gibt den Fehler eines Einflusses oder der gesamten Einflüsse auf eine Beobachtung wieder.

$$s^2 = (s)^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Excel = Varianz (p)

- Stichprobenfehler (δ):
Gibt die Güte der Schätzung auf die Grundgesamtheit über den Stichprobenumfang zu einer gewählten mathematisch-statistischen Sicherheit (S) an.

$$\delta = t_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{n}}$$

- Mathematisch-statistische Sicherheit (S): Beschreibt die Wahrscheinlichkeit, innerhalb derer ein Einzelwert liegen kann. Sie ist abhängig von dem gewählten Sicherheitsniveau (95 % oder 99 %). Dem gegenüber steht die Irrtumswahrscheinlichkeit (α), es gilt:

$$S = 1 - \alpha$$

Für die durchgeführten Analysen wurde ein Sicherheitsniveau von 95 %, wie es in den Technischen Prüfbestimmungen [30] standardisiert angewandt wird, gewählt. Es bleibt somit eine Unsicherheit der Aussagen von 5 %.

- t-Wert (t): Der Schwellenwert der t-Verteilung gibt die Bandbreite eines Wahrscheinlichkeitsbereiches für einen bestimmten Freiheitsgrad (f) an.

$$f = n - 1$$

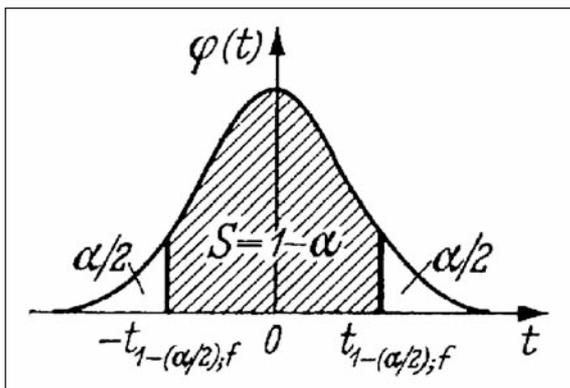


Bild 54: Grundschemata der Normalverteilung [31]

$$\text{Excel} = \text{Tinv}(\alpha; n-1)$$

- Korrelationskoeffizient (r) und Bestimmtheitsmaß (R^2): Der Korrelationskoeffizient nach BRAVAIS und PEARSON gibt die Stärke eines linearen Zusammenhangs zwischen zwei Gruppen wieder. Der Korrelationskoeffizient liegt zwischen -1 und 1. Das Bestimmtheitsmaß leitet sich als Quadrat aus dem Korrelationskoeffizienten ab und normiert die Dimensionen (0-100 %):

$$\text{Excel} = \text{Korrel}(y; x)$$

$$\text{Excel} = \text{Bestimmtheitsmaß}(y; x)$$

Anpassungstest nach KOLMOGOROFF-SMIRNOW

Der Anpassungstest soll die These validieren, dass die Stichproben der einzelnen Prüfkörnungen einer bestimmten Merkmalsverteilung zuzuordnen sind. Als Verteilungsfunktion wurde eine zweiseitige Normalverteilung gewählt. Der Anpassungstest nach KOLMOGOROFF-SMIRNOW ist ab einem Stichprobenumfang von fünf Proben anwendbar. Nachfolgend wird exemplarisch ein Anpassungstest mit den Mittelwerten der Doppelprüfung der groben Gesteinskörnung 8/11 durchgeführt (s. Tabelle 27).

Beschreibung der Stichprobe mittels deskriptiver Statistik:

$$n = 48$$

$$\bar{x} = 0,2347 \text{ PWS-Einheiten}$$

$$s = 0,0921 \text{ PWS-Einheiten}$$

Unterteilung der Messwerte in Klassen und Zählung der Einzelwerte je Klasse aus der Stichprobe (siehe Spalte 1 und 2 der Tabelle 27):

$$\text{Excel} = \text{Häufigkeit}(x_i; k)$$

Anschließend werden aus den Häufigkeiten (Spalte 2) die standardisierten t-Werte (Spalte 3) berechnet:

$$t_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s}$$

$$\text{Excel} = \text{Standardisierung}(x_i; \bar{x}; s)$$

Als Referenzverteilung wird in der Spalte 4 die Standardnormalverteilungsfunktion aus den standardisierten t-Werten mit nachfolgenden Parametern berechnet:

$$\bar{x} = 0$$

$$s = 1$$

$$\text{Excel} = \text{Standnormvert}(x_i)$$

Die Häufigkeiten der Spalte 2 werden aufsummiert und prozentual zur Gesamtanzahl als Summenfunktion SH(n) und um eine Stelle verrückte Funktion SH(n+1) der Standardnormalverteilungsfunktion gegenübergestellt.

1	2	3	4	5	6	7
Klassen (k)	Häufigkeit (n) [-]	standardisierte Werte (t) [-]	Standardnormalverteilungsfunktion (ϕ_{st}) [%]	kumulierte Häufigkeit (n) [-]	SH(n) [%]	SH(n+1) [%]
$x \leq 0,09$	0	-1,572	5,8 %	0	0,0 %	0,0 %
$0,09 < x \leq 0,11$	3	-1,354	8,8 %	3	6,3 %	0,0 %
$0,11 < x \leq 0,13$	3	-1,136	12,8 %	6	12,5 %	6,3 %
$0,13 < x \leq 0,15$	5	-0,918	17,9 %	11	22,9 %	12,5 %
$0,15 < x \leq 0,17$	5	-0,700	24,2 %	16	33,3 %	22,9 %
$0,17 < x \leq 0,19$	2	-0,483	31,5 %	18	37,5 %	33,3 %
$0,19 < x \leq 0,21$	2	-0,265	39,6 %	20	41,7 %	37,5 %
$0,21 < x \leq 0,23$	3	-0,047	48,1 %	23	47,9 %	41,7 %
$0,23 < x \leq 0,25$	5	0,171	56,8 %	28	58,3 %	47,9 %
$0,25 < x \leq 0,27$	3	0,389	65,1 %	31	64,6 %	58,3 %
$0,27 < x \leq 0,29$	2	0,607	72,8 %	33	68,8 %	64,6 %
$0,29 < x \leq 0,31$	5	0,825	79,5 %	38	79,2 %	68,8 %
$0,31 < x \leq 0,33$	2	1,042	85,1 %	40	83,3 %	79,2 %
$0,33 < x \leq 0,35$	1	1,260	89,6 %	41	85,4 %	83,3 %
$0,35 < x \leq 0,37$	2	1,478	93,0 %	43	89,6 %	85,4 %
$0,37 < x \leq 0,39$	3	1,696	95,5 %	46	95,8 %	89,6 %
$0,39 < x \leq 0,41$	0	1,914	97,2 %	46	95,8 %	95,8 %
$0,41 < x \leq 0,43$	1	2,132	98,3 %	47	97,9 %	95,8 %
$0,45 < x$	1	2,350	99,1 %	48	100,0 %	97,9 %

Tab. 27: Durchführung des Anpassungstests der Prüfkörnung 8/11

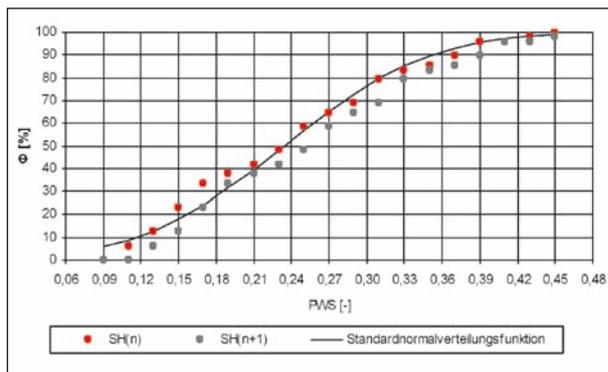


Bild 55: Gegenüberstellung der Summenhäufigkeiten mit der Standardnormalverteilung

Als Prüfgröße (P) wird die größte Abweichung der Summenhäufigkeiten $SH(n)$ und $SH(n+1)$ von der Standardnormalverteilung herangezogen:

$$P = \max \begin{bmatrix} |SH(n) - \phi_{st}| \\ |SH(n+1) - \phi_{st}| \end{bmatrix}$$

Die Hypothese, dass der Stichprobe als Merkmalsfunktion eine Normalverteilung zugrunde gelegt werden kann, wird angenommen, wenn die Prüfgröße (P) kleiner als der Schwellenwert (D) ist. Für eine zweiseitige Normalverteilung und eine statistische Sicherheit von 95 % kann D wie folgt berechnet werden [31]:

$$D = \frac{1,36}{\sqrt{n}}$$

Für die durchgeführten Anpassungstests der Prüfkörnungen konnte die Normalverteilung als Merkmalsfunktion mit nachfolgenden Prüfgrößen und Schwellenwerten zugrunde gelegt werden. Die Einzeldurchführungen der anderen Prüfkörnungen sind nachfolgend tabellarisch dargestellt.

Parameter	feine Prüfkörnung (Sandplatten)		grobe Prüfkörnung (Mastix)		
	Natursand	Brechsand	2/5	5/8	8/11
Prüfgröße (P):	0,194	0,198	0,153	0,166	0,115
Schwellenwert (D mit S = 95 %):	0,198	0,205	0,207	0,215	0,196

Tab. 28: Ergebnisse der Anpassungstests jeder Prüfkörnung

1	2	3	4	5	6	7
Klassen (k)	Häufigkeit (n) [-]	standardisierte Werte (t) [-]	Standardnormal verteilungsfunktion (ϕ_{st}) [%]	kumulierte Häufigkeit (n) [-]	SH(n) [%]	SH(n+1) [%]
$x \leq 0,12$	0	-1,857	3,2 %	0	0,0 %	0,0 %
$0,12 < x \leq 0,14$	2	-1,649	5,0 %	2	4,7 %	0,0 %
$0,14 < x \leq 0,16$	4	-1,441	7,5 %	4	9,3 %	4,7 %
$0,16 < x \leq 0,18$	5	-1,234	10,9 %	5	11,6 %	9,3 %
$0,18 < x \leq 0,2$	9	-1,026	15,2 %	9	20,9 %	11,6 %
$0,2 < x \leq 0,22$	10	-0,818	20,7 %	10	23,3 %	20,9 %
$0,22 < x \leq 0,24$	10	-0,611	27,1 %	10	23,3 %	23,3 %
$0,24 < x \leq 0,26$	13	-0,403	34,4 %	13	30,2 %	23,3 %
$0,26 < x \leq 0,28$	17	-0,195	42,3 %	17	39,5 %	30,2 %
$0,28 < x \leq 0,3$	21	0,012	50,5 %	21	48,8 %	39,5 %
$0,3 < x \leq 0,32$	27	0,220	58,7 %	27	62,8 %	48,8 %
$0,32 < x \leq 0,34$	29	0,428	66,6 %	29	67,4 %	62,8 %
$0,34 < x \leq 0,36$	34	0,636	73,7 %	34	79,1 %	67,4 %
$0,36 < x \leq 0,38$	35	0,843	80,0 %	35	81,4 %	79,1 %
$0,38 < x \leq 0,4$	37	1,051	85,3 %	37	86,0 %	81,4 %
$0,4 < x \leq 0,42$	37	1,259	89,6 %	37	86,0 %	86,0 %
$0,42 < x \leq 0,44$	39	1,466	92,9 %	39	90,7 %	86,0 %
$0,44 < x \leq 0,46$	42	1,674	95,3 %	42	97,7 %	90,7 %
$0,46 < x \leq 0,48$	42	1,882	97,0 %	42	97,7 %	97,7 %
$0,48 < x \leq 0,5$	42	2,089	98,2 %	42	97,7 %	97,7 %
$0,5 < x \leq 0,52$	42	2,297	98,9 %	42	97,7 %	97,7 %
$0,52 < x$	43	2,505	99,4 %	43	100,0 %	97,7 %

Tab. 29: Durchführung des Anpassungstests der Prüfkörnung 2/5

1	2	3	4	5	6	7
Klassen (k)	Häufigkeit (n) [-]	standardisierte Werte (t) [-]	Standardnormal verteilungsfunktion (ϕ_{st}) [%]	kumulierte Häufigkeit (n) [-]	SH(n) [%]	SH(n+1) [%]
$x \leq 0,26$	0	-2,164	1,5 %	0	0,0 %	0,0 %
$0,26 < x \leq 0,28$	2	-1,972	2,4 %	2	4,5 %	0,0 %
$0,28 < x \leq 0,3$	4	-1,781	3,7 %	4	9,1 %	4,5 %
$0,3 < x \leq 0,32$	5	-1,589	5,6 %	5	11,4 %	9,1 %
$0,32 < x \leq 0,34$	6	-1,398	8,1 %	6	13,6 %	11,4 %
$0,34 < x \leq 0,36$	7	-1,206	11,4 %	7	15,9 %	13,6 %
$0,36 < x \leq 0,38$	9	-1,014	15,5 %	9	20,5 %	15,9 %
$0,38 < x \leq 0,4$	9	-0,823	20,5 %	9	20,5 %	20,5 %
$0,4 < x \leq 0,42$	10	-0,631	26,4 %	10	22,7 %	20,5 %
$0,42 < x \leq 0,44$	11	-0,440	33,0 %	11	25,0 %	22,7 %
$0,44 < x \leq 0,46$	13	-0,248	40,2 %	13	29,5 %	25,0 %
$0,46 < x \leq 0,48$	16	-0,057	47,7 %	16	36,4 %	29,5 %
$0,48 < x \leq 0,5$	20	0,135	55,4 %	20	45,5 %	36,4 %
$0,5 < x \leq 0,52$	28	0,327	62,8 %	28	63,6 %	45,5 %
$0,52 < x \leq 0,54$	30	0,518	69,8 %	30	68,2 %	63,6 %
$0,54 < x \leq 0,56$	35	0,710	76,1 %	35	79,5 %	68,2 %
$0,56 < x \leq 0,58$	39	0,901	81,6 %	39	88,6 %	79,5 %
$0,58 < x \leq 0,6$	39	1,093	86,3 %	39	88,6 %	88,6 %
$0,6 < x \leq 0,62$	40	1,284	90,1 %	40	90,9 %	88,6 %
$0,62 < x \leq 0,64$	41	1,476	93,0 %	41	93,2 %	90,9 %
$0,64 < x \leq 0,66$	42	1,668	95,2 %	42	95,5 %	93,2 %
$0,66 < x$	44	1,859	96,9 %	44	100,0 %	95,5 %

Tab. 30: Durchführung des Anpassungstests der Prüfkörnung 0,2/0,4 – Brechsand

1	2	3	4	5	6	7
Klassen (k)	Häufigkeit (n) [-]	standardisierte Werte (t) [-]	Standardnormal verteilungsfunktion (ϕ_{st}) [%]	kumulierte Häufigkeit (n) [-]	SH(n) [%]	SH(n+1) [%]
$x \leq 0,36$	1	-2,158	1,5 %	1	2,1 %	0,0 %
$0,36 < x \leq 0,38$	3	-1,803	3,6 %	3	6,4 %	2,1 %
$0,38 < x \leq 0,4$	4	-1,448	7,4 %	4	8,5 %	6,4 %
$0,4 < x \leq 0,42$	7	-1,092	13,7 %	7	14,9 %	8,5 %
$0,42 < x \leq 0,44$	12	-0,737	23,1 %	12	25,5 %	14,9 %
$0,44 < x \leq 0,46$	14	-0,382	35,1 %	14	29,8 %	25,5 %
$0,46 < x \leq 0,48$	25	-0,027	48,9 %	25	53,2 %	29,8 %
$0,48 < x \leq 0,5$	28	0,329	62,9 %	28	59,6 %	53,2 %
$0,5 < x \leq 0,52$	32	0,684	75,3 %	32	68,1 %	59,6 %
$0,52 < x \leq 0,54$	40	1,039	85,1 %	40	85,1 %	68,1 %
$0,54 < x \leq 0,56$	44	1,394	91,8 %	44	93,6 %	85,1 %
$0,56 < x$	47	1,750	96,0 %	47	100,0 %	93,6 %

Tab. 31: Durchführung des Anpassungstests der Prüfkörnung 0,2/0,4 – Natursand

Ablauf zur Ermittlung des Erwartungsbereiches von Polierwerten – PWS

Die vorhandenen Ergebnisse jeder Prüfkörnung von im Mittel 45 verschiedenen Proben reflektieren nur einen Anteil aller verfügbaren Gesteine für den Straßenbau. Daher kann nicht davon ausgegangen werden, dass die minimalen und maximalen Polierwerte nach WEHNER/SCHULZE jeder Prüfkörnung die allgemeingültigen oberen und unteren Grenzen darstellen. Dies bewogte dazu, eine mathematisch-statistische Analyse zur Ermittlung der Extremwerte heranzuziehen. Nachfolgend soll die Analyse vorgestellt werden, um die Vor- und Nachteile besser zu verstehen. Exemplarisch wird die Ermittlung mit den Ergebnissen der Prüfkörnung 8/11 durchgeführt.

Als erster Schritt wurde eine deskriptive Statistik der Ergebnisse erstellt.

Mittels der deskriptiven Statistik wurden anschließend die Quantile der Summenwahrscheinlichkeit berechnet:

$$\Phi_{S(1-\alpha)} = \tilde{x} \pm tS$$

Dazu wurde der Betrachtungsbereich auf eine Wahrscheinlichkeit von 95 % beschränkt. Die Zusammenführung aller Ergebnisse wurde zur Dar-

stellung einer diskreten Verteilung, also der Summenwahrscheinlichkeit, genutzt.

Der Median der Prüfkörnung 8/11 steht in der Summenwahrscheinlichkeit/Summenlinie für eine Wahrscheinlichkeit von 50 %. Dies bedeutet, dass er von 50 % der Prüfwerte über- bzw. unterschritten wird.

Mit der Summenlinie wurde eine Schätzung mit 95%iger Wahrscheinlichkeit auf die Verteilung der

Beschreibung	Symbol	Wert
Anzahl	(n)	48
Median	(\tilde{x})	0,2330
Standardabweichung	(s)	0,0921
größter Einzelwert	(x_n)	0,4360
kleinster Einzelwert	(x_1)	0,0920
Spannweite	(Δ)	0,3445
t-Wert (S = 95 %)	(t)	2,013
Stichprobenfehler (S = 95 %)	(δ)	$\pm 0,0268$

Tab. 32: Deskriptive Statistik der Ergebnisse der Prüfkörnung 8/11

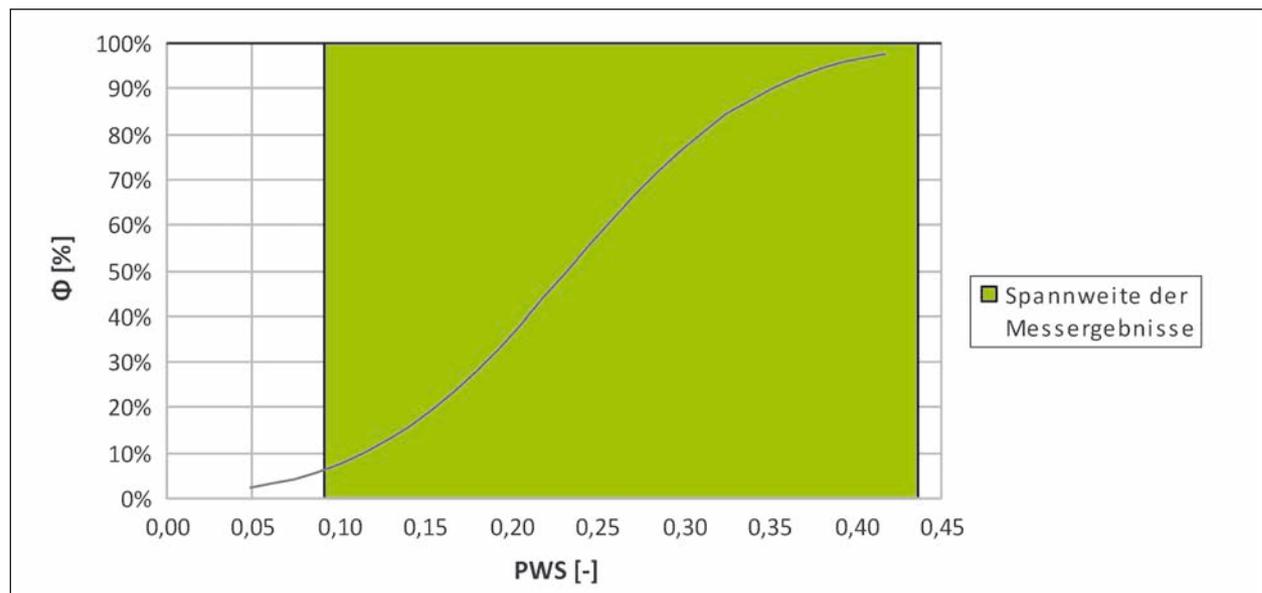


Bild 56: Summenlinie der Prüfkörnung 8/11

Grundgesamtheit durchgeführt. Die Spannweite der Messergebnisse liegt im unteren Bereich der Polierresistenz innerhalb der Verteilung. Im oberen Bereich überschreitet die Spannweite die Verteilung. Grund hierfür ist, dass die Schätzung über die Stichprobe nicht zu 100 % zutrifft. Es besteht eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %. Weiterhin basiert die Schätzung auf einer Stichprobe, die sich aus den nachfolgend dargestellten drei Gruppen zusammensetzt.

- Datenbestand aus Routineprüfungen,
- Prüfungen von Rückstellproben,
- Gesteinskörnung aus aktuellem Bestand.

Alle Ergebnisse stammen von einem Laboratorium. Der Bewertungshintergrund soll jedoch allge-

meingültig für alle Labore gelten. Somit wurde der Stichprobenfehler in die Analyse mit einbezogen. Er beschreibt die Abweichung eines Mittelwertes zu einer gewählten Wahrscheinlichkeit von 95 %.

Unter Berücksichtigung des Versatzes des Medianes ergeben sich die im Bild 45 dargestellten grauen Linien. Diese erweitern den möglichen Bereich der Polierwerte um einen bestimmten Anteil. Da dieser Anteil rein theoretisch berechnet wurde, wird dieser im Folgenden als arithmetischer Anteil bezeichnet.

Der im Bild 46 dargestellte Bewertungshintergrund besteht somit aus arithmetisch ermittelten Anteilen, die prozentual im Bezug zur Spannweite der jeweiligen Prüfkörnung, wie in Bild 57 dargestellt, mit eingehen.

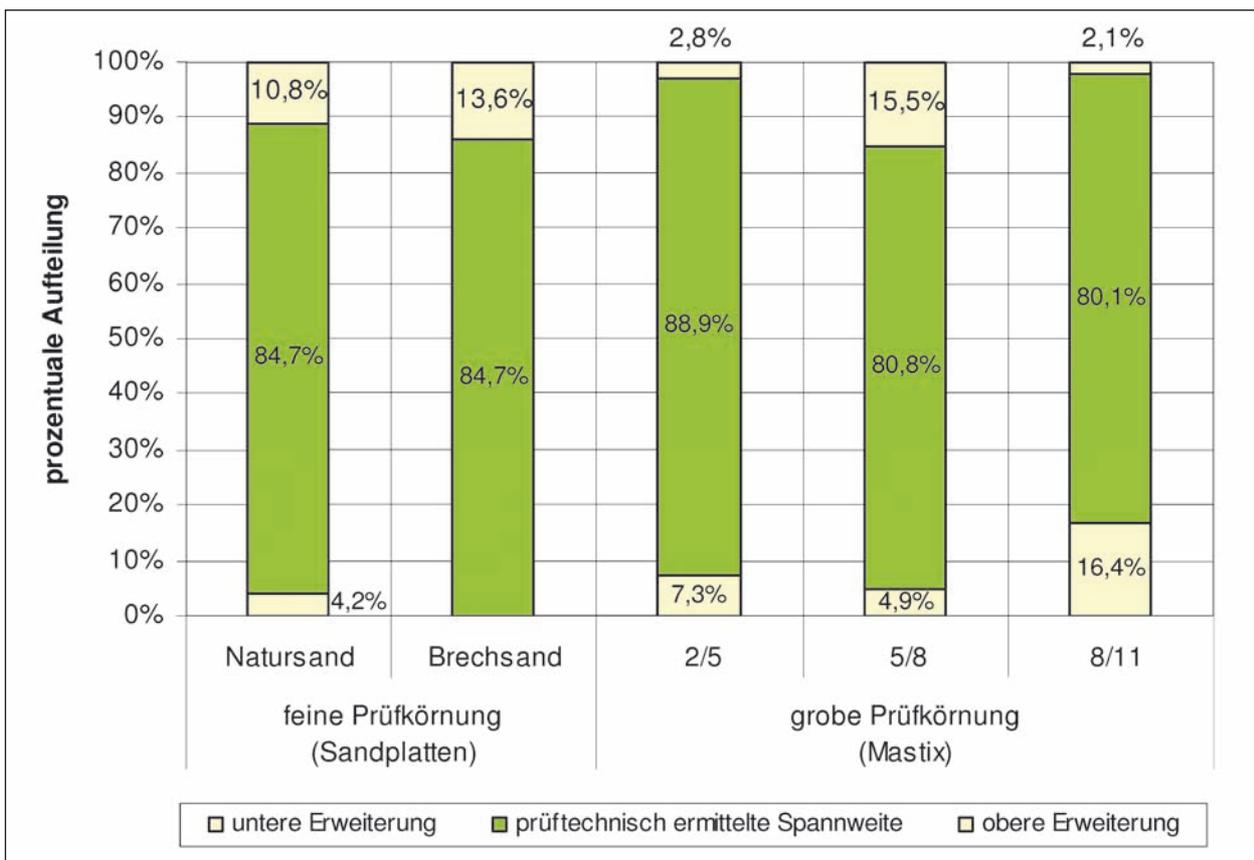


Bild 57: Prozentuale Aufteilung des ermittelten Bewertungshintergrundes

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2007

S 45: Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen
Leutner, Lorenzl, Schmoeckel, Donath, Bald, Grätz, Riedl, Möller, Oeser, Wellner, Werkmeister, Leykauf, Simon € 21,00

S 46: Analyse vorliegender messtechnischer Zustandsdaten und Erweiterung der Bewertungsparameter für Innerortsstraßen
Steinauer, Ueckermann, Maerschalk € 21,00

S 47: Rahmenbedingungen für DSR-Messungen an Bitumen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Hase, Oelkers € 24,50

S 48: Verdichtbarkeit von Asphaltmischgut unter Einsatz des Walzsektor-Verdichtungsgerätes
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Wörner, Bönisch, Schmalz, Bösel € 15,50

2008

S 49: Zweischichtiger offenporiger Asphalt in Kompaktbauweise
Ripke € 12,50

S 50: Finanzierung des Fernstraßenbaus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ der FGSV am 25./26. September 2006 in Tecklenburg-Leeden € 15,50

S 51: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Haftfestigkeit von Straßenmarkierungsfolien
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Killing, Hirsch € 14,50

S 52: Statistische Analyse der Bitumenqualität aufgrund von Erhebungen in den Jahren 2000 bis 2005
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Hirsch € 16,00

S 53: Straßenrecht und Föderalismus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 24./25. September 2007 in Bonn € 15,50

S 54: Entwicklung langlebiger dünner Deckschichten aus Beton
Silwa, Roßbach, Wenzl € 12,50

S 55: Dicke Betondecke auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSuB)
Leykauf, Birmann, Weller € 13,50

2009

S 56: Vergangenheit und Zukunft der deutschen Straßenverwaltung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 22./23. September 2008 in Bonn € 14,00

S 57: Vergleichende Untersuchung zweischichtiger offenporiger Asphaltbauweisen
Ripke € 13,50

S 58: Entwicklung und Untersuchung von langlebigen Deckschichten aus Asphalt
Ludwig € 15,50

S 59: Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontaktwinkelmeßmethode
Hirsch, Friemel-Göttlich € 16,00

2010

S 60: Die Zukunftsfähigkeit der Planfeststellung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2009 in Bonn € 15,50

S 61: Modell zur straßenbautechnischen Analyse der durch den Schwerverkehr induzierten Beanspruchung des BAB-Netzes
Wolf, Fielenbach € 16,50

S 62: 41. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau € 18,50

S 63: Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten
Blume € 16,00

S 64: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten (OPA)
Teil 1: Bestandsaufnahme an vorhandenen Strecken
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Rohleder, Kunz, Wasser, Pullwitt, Müller, Ripke, Zöller, Pöppel-Decker € 23,00

S 65: Untersuchungen von Dübellagen zur Optimierung des Betondeckenbaus
Freudenstein, Birmann € 14,00

2011

S 66: Qualitätssicherung von Waschbetonoberflächen
Breitenbücher, Youn € 14,50

S 67: Weiterentwicklung der automatisierten Merkmalerkennung im Rahmen des TP3
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Canzler, Winkler € 16,50

S 68: Lärmindernder Splittmastixasphalt
Ripke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 69: Untersuchung der Messunsicherheit und der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen
Müller, Wasser, Germann, Kley € 14,50

S 70: Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen
Dieser Bericht liegt außerdem in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de> heruntergeladen werden.
Jansen, Kurz € 16,00

S 71: Enteignung für den Straßenbau – Verfahrensvereinheitlichung – Privatisierung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ im September 2010 in Bonn € 15,00

S 72: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten – Teil 2: Neue Baumaßnahmen
Jansen, Pöppel-Decker € 15,00

S 73: Längsebenenheitsauswerteverfahren „Bewertetes Längsprofil“ – Weiterentwicklung der Längsebenenheitsbewertung der Zustandserfassung und -bewertung
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

2012

S 74: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche
Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr 2“ € 30,50

S 75: Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen
Krauter, Kumerics, Feuerbach, Lauterbach € 15,50

S 76: 42. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

S 77: Netzplanung – Netzbildung – Netzbereinigung
Durner € 16,50

S 78: Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Verfahren
Bürckert, Gauterin, Unrau € 16,50

2013

S 79: Gussasphalt ohne Abstreuerung
Ripke € 9,00

S 80: Entwicklung einer neuen Versuchstechnik zur Bestimmung der Grenze zwischen halbfestem und festem Boden
Vogt, Birle, Heyer, Etz € 17,50

S 81: Das straßenrechtliche Nutzungsregime im Umbruch – Aktuelle Fragen des Planungsrechts
Durner € 15,00

2014

S 82: Qualitätskontrolle PWS – Wehner/Schulze Quality Control
Teil 1: Auswertung der Kenndaten der PWS Prüfung
Teil 2: Auswertung von Vergleichsuntersuchungen zur Prüfung der Poliereinheit mittels Schleifpapier
Jansen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 83: Die Stellung der Gemeinden im Straßenrecht – aktuelle Probleme des Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 23./24. September 2013 in Bonn
Durner € 17,00

S 84: Anforderungen an die Erhaltung von Radwegen
Maerschalk, Oertelt € 19,00

S 85: Kornformbeurteilung mit dem optischen Partikelmessgerät Camsizer®
Kunz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2015

S 86: Einfluss des Asphaltgranulates auf die bemessungs- und ermüdungsrelevanten Materialeigenschaften einer zwangsgemischten, kaltgebundenen und bitumendominanten Tragschicht
Radenberg, Miljković, Schäfer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 87: Untersuchungen zur Ermittlung von Präzisionswerten für zwei AKR-Schnelltests Durchführung und Auswertung
Müller, Seidel, Böhm
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 88: Verwendung von AKR-geschädigtem Betonaufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichten
Hüniger, Börner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 89: Ermittlung von repräsentativen Substanzwerten in homogenen Abschnitten
Villaret, Frohböse, Jähmig, Karcher, Niessen, Buch, Zander
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 90: AKR-Untersuchungen für Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche
Müller, Seidel, Böhm, Stark, Ludwig, Seyfarth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 91: Straßen im Gesamtsystem der Verkehrsträger
Durner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 92: Längsebenheitsmesssysteme – Überprüfung der Signalverarbeitungsverfahren nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM)
Neubeck, Wiesebrock
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2016

S 93: Bewertung und Optimierung der Hydrophobierung zur Verminderung des AKR-Schädigungsfortschrittes in Fahrbahndeckenbetonen
Weise, Schrang € 19,50

S 94: Beanspruchung und Entfernbarekeit temporärer Fahrbahnmarkierung
Kemper, Schacht, Klaproth, Oeser, Beyer € 16,50

S 95: Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel
Bialucha, Merkel, Motz, Demond, Schmidt, Ritter, Haas € 14,50

S 96: Bewertungshintergrund für den Widerstand gegen Polieren von Gesteinskörnungen nach dem PWS-Verfahren
Dudenhöfer, Rückert
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Alle Berichte sind zu beziehen im:

Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7
28195 Bremen
Tel. (0421) 3 69 03-53
Fax (0421) 3 69 03-48
www.schuenemann-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.