

Praxisgerechte Anforderungen an den Polierwiderstand feiner Gesteinskörnungen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 186

bast

Praxisgerechte Anforderungen an den Polierwiderstand feiner Gesteinskörnungen

von

Markus Oeser
Christian K. V. Schulze
Janis Benninghoff

ISAC Institut für Straßenwesen
RWTH Aachen University

Lukas Renken

ISAC GmbH, Aachen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 186

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 Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, 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 Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 06.0116
Praxisgerechte Anforderungen an den Polierwiderstand
feiner Gesteinskörnungen

Fachbetreuung
Michael Sulzbach

Referat
Nachhaltigkeit, Ressourcenschutz und
Erdbaustoffe im Straßenbau

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
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 978-3-95606-738-9

Bergisch Gladbach, Juni 2023

Kurzfassung – Abstract

Praxisgerechte Anforderungen an den Polierwiderstand feiner Gesteinskörnungen

1 Zielsetzung

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, anhand von Laborversuchen praxisgerechte Anforderungen an den Polierwiderstand von feinen Gesteinskörnungen auszuarbeiten.

Die Regelungen der TL Asphalt-StB 07/13 sehen beispielsweise die Übertragung des an der groben Gesteinskörnung ermittelten Polierwiderstandes auf die feine Gesteinskörnung vor, welches oftmals zu nicht zutreffenden Ergebnissen führt. Weiterhin dürfen nur Gesteinskörnungen eingesetzt werden, die der Kategorie PSVangegeben(42) entsprechen. Dies kann zum Ausschluss geeigneter Gesteinskörnungen führen.

Die umfassende Analyse der vollständigen Bandbreite der relevanten feinen Gesteinskörnungen hinsichtlich des Einflusses der Polierresistenz auf das Griffigkeitspotenzial von Asphaltmischgut steht im Fokus dieses Forschungsvorhabens. Darüber hinaus sind Aspekte wie Dauerhaftigkeit, Nachhaltigkeit, Ressourcenschonung und Verfügbarkeit von Rohstoffen von Bedeutung. Unter Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte werden praxisgerechte Anforderung an den Polierwiderstand von feinen Gesteinskörnungen ausgearbeitet.

2 Untersuchungsmethodik

Das Projekt beinhaltet folgende Arbeitsschwerpunkte:

1. Internationale Literaturrecherche hinsichtlich der Identifizierung des Einflusses der feinen Gesteinskörnungen auf das Griffigkeitspotenzial von Asphaltdeckschichten.
2. Auswahl/Beschaffung von repräsentativen Gesteinskörnungen. In diesem Zusammenhang gilt es, die Spannweite der verfügbaren Gesteinskörnungen bezüglich des Polierwiderstandes sowie der Oberflächenbeschaffenheit (z. B. Natursand und Brechsand) und der petrografischen Eigenschaften vollständig abzudecken.
3. Physikalisch-technische Prüfungen. Hier stehen die labortechnische Ansprache der Charakteris-

tik der ausgewählten und verwendeten Gesteine sowie die Bestimmung des Einflusses der feinen Gesteinskörnung auf das Griffigkeitspotenzial von Asphaltdeckschichten im Vordergrund.

4. Auswertung und Ausarbeitung von Anforderungswerten. Die Ergebnisse der physikalisch-technischen Prüfungen werden umfassend statistisch ausgewertet und Vorschläge für praxisgerechte Anforderungen an den Polierwiderstand von feinen Gesteinskörnungen formuliert.

3 Statistische Auswertung

Die im Rahmen der physikalisch-technischen Prüfungen ermittelten Ergebnisse werden einer umfassenden statistischen Auswertung (Korrelations- und Regressionsanalyse) unterzogen.

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Zusammenhang zwischen der mineralogischen Zusammensetzung einer Gesteinskörnung und dessen Polierwiderstand zeigt auf Basis des Indikators „Total Hardness“ einen sehr hohen statistischen Zusammenhang auf ($R = 0,933$; $R^2 = 0,871$).
- Für die Mischgutart Asphaltbeton ist ein deutlich höherer statistischer Zusammenhang (2,4-fach) zwischen dem Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnung und dem Griffigkeitspotenzial festzustellen, als zwischen dem Polierwiderstand der groben Gesteinskörnung und dem Griffigkeitspotenzial. Der Einfluss des Polierwiderstandes der feinen Gesteinskörnung ist beim einem Größtkorndurchmesser von 8 mm größer (1,4-fach) als bei einem Größtkorndurchmesser von 11 mm.
- Für die Mischgutart Splittmastixasphalt ist ein deutlich höherer statistischer Zusammenhang (7,3-fach) zwischen dem Polierwiderstand der groben Gesteinskörnung und dem Griffigkeitspotenzial gegenüber dem Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnung festzustellen. Auf Basis der Variation des Größtkorns ist für die Mischgutart Splittmastixasphalt statistisch kein Zusammenhang zwischen dem Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnung und dem Griffigkeitspotenzial festzustellen.

- Die Analyse der Versuchsreihen zur Kombination verschiedener feiner Gesteinskörnungen zeigt, dass anhand des Griffigkeitspotenzials von zwei Probekörpern, welche jeweils mit einer unterschiedlich feinen Gesteinskörnung hergestellt werden, das Griffigkeitspotenzial eines Probekörpers, welcher mit der Kombination der beiden feinen Gesteinskörnungen hergestellt wurde, berechnet werden kann.
- Der Einfluss des Polierwiderstandes der feinen Gesteinskörnung gewinnt mit abnehmendem Polierwiderstand der groben Gesteinskörnung an Gewicht. Der statistische Nachweis ist signifikant.

4 Ausarbeitung von Anforderung

Zur Formulierung eines Vorschlages für praxisgerechten Anforderungen an den Polierwiderstand von feinen Gesteinskörnungen ist ein Modell entwickelt worden, mit dem das Griffigkeitspotenzial (FAP-Wert) eines Asphaltmischgutes (Asphaltbeton oder Splittmastixasphalt) auf Grundlage der Mischgutzusammensetzung (Polierwiderstand der feinen und groben Gesteinskörnung sowie deren Anteile am Gesteinskörnungsgemisch) abgeschätzt werden kann. Auf Basis der in den TL Asphalt-StB formulierten Anforderungen an den Polierwiderstand feiner Gesteinskörnungen und der physikalisch-technischen Prüfungen innerhalb dieses Projektes konnte das erforderliche Griffigkeitspotenzial abgeleitet werden. Unter Berücksichtigung der Datengrundlage und der Präzision des Messverfahrens WEHNER/SCHULZE wird ein Anforderungswert für den FAP-Wert nach 90.000 Überrollungen von 0,280 vorgeschlagen (Zuschlag von 0,03).

Um geeignete Gesteinskörnungen nicht von der Verwendung im Straßenbau auszuschließen, wird vorgeschlagen, keine zusätzlichen Anforderungen an den Polierwiderstand von feinen Gesteinskörnungen zu formulieren, sondern das Griffigkeitspotenzial mit dem Prüfverfahren nach WEHNER/SCHULZE zu bestimmen. Auf Basis der durchgeführten Laborversuche sollte ein FAP-Wert nach 90.000 Überrollungen von 0,280 für Asphaltbetondeckschichten und Splittmastixasphalt nicht unterschritten werden. In weiteren Untersuchungen ist dieser Wert im Zuge von Feldversuchen mit der realen Verkehrsbelastung abzugleichen.

Practical requirements for the polishing resistance of fine aggregates

1 Objective

The objective of the research project is to work out practical requirements for the polishing resistance of fine aggregates on the basis of laboratory tests.

The regulations of TL Asphalt-StB 07/13, for example, provide for the transfer of the polishing resistance determined on the coarse aggregate to the fine aggregate, which often leads to inaccurate results. Furthermore, only aggregates that correspond to category PSV(42) may be used. This can lead to the exclusion of suitable aggregates.

The comprehensive analysis of the full range of relevant fine aggregates with regard to the influence of polishing resistance on the skid resistance potential of asphalt mixtures is the focus of this research project. In addition, aspects such as durability, sustainability, resource conservation and availability of raw materials are of importance. Taking these aspects into account, practical requirements for the polishing resistance of fine aggregates will be developed.

2 Research methodology

The project includes the following main areas of work:

1. International literature review regarding the identification of the influence of fine aggregates on the skid resistance potential of asphalt wearing courses.
2. Selection/procurement of representative aggregates. In this context, it is important to fully cover the range of available aggregates in terms of polishability, surface texture (e.g. natural sand and crushed sand) and petrographic properties.
3. Physical-technical tests. Here, the focus is on laboratory testing of the characteristics of the selected and used aggregates as well as the determination of the influence of the fine aggregate on the skid resistance potential of asphalt surface courses.
4. Evaluation and elaboration of requirement values. The results of the physical-technical tests are comprehensively statistically evaluated and proposals for practical requirements for the

polishing resistance of fine aggregates are formulated.

3 Statistical evaluation

The results obtained during the physical-technical tests are subjected to a comprehensive statistical evaluation (correlation and regression analysis).

The results of the statistical evaluation can be summarised as follows:

- The correlation between the mineralogical composition of an aggregate and its polishing resistance shows a very high statistical correlation based on the indicator „Total Hardness“ ($R = 0.933$; $R^2 = 0.871$).
- For the asphalt concrete mix type, a significantly higher statistical correlation (2.4-fold) is found between the polishing resistance of the fine aggregate and the skid resistance potential than between the polishing resistance of the coarse aggregate and the skid resistance potential. The influence of the polishing resistance of the fine aggregate is greater (1.4 times) for a maximum aggregate diameter of 8 mm than for a maximum aggregate diameter of 11 mm.
- For the stone mastic asphalt mix type, a significantly higher statistical correlation (7.3-fold) between the polishing resistance of the coarse aggregate and the skid resistance potential is observed compared to the polishing resistance of the fine aggregate. Based on the variation of the maximum aggregate size, no statistical correlation between the polishing resistance of the fine aggregate and the skid resistance potential can be determined for the stone mastic asphalt mix type.
- The analysis of the test series on the combination of different fine aggregates shows that the skid resistance potential of a specimen produced with the combination of the two fine aggregates can be calculated on the basis of the skid resistance potential of two specimens, each produced with a different fine aggregate.
- The influence of the polishing resistance of the fine aggregate increases with decreasing polishing resistance of the coarse aggregate. The statistical evidence is significant.

4 Elaboration of requirement

In order to formulate a proposal for practical requirements for the polishing resistance of fine aggregates, a model has been developed with which the skid resistance potential (FAP-Value) of an asphalt mix (asphalt concrete or stone mastic asphalt) can be estimated on the basis of the mix composition (polishing resistance of the fine and coarse aggregates and their proportions in the aggregate mix). Based on the requirements for the polishing resistance of fine aggregates formulated in the TL Asphalt-StB and the physical-technical tests within this project, the required skid resistance potential could be derived. Taking into account the data basis and the precision of the WEHNER/SCHULZE measuring procedure, a requirement value for the FAP-Value after 90,000 overruns of 0.280 is proposed (allowance of 0.03).

In order not to exclude suitable aggregates from use in road construction, it is proposed not to formulate additional requirements for the polishing resistance of fine aggregates but to determine the skid resistance potential with the WEHNER/SCHULZE test method. On the basis of the laboratory tests carried out, a FAP-Value of 0.280 after 90,000 overruns should not be undercut for asphalt concrete wearing courses and stone mastic asphalt. In further investigations, this value is to be compared with the real traffic load in the course of field tests.

Summary

Practical requirements for the polishing resistance of fine aggregates

1 Objective

The objective of the research project is to work out practical requirements for the polishing resistance of fine aggregates on the basis of laboratory tests.

The regulations of TL Asphalt-StB 07/13, for example, provide for the transfer of the polishing resistance determined on the coarse aggregate to the fine aggregate, which often leads to inaccurate results. Furthermore, only aggregates that correspond to category PSV(42) may be used. This can lead to the exclusion of suitable aggregates.

The comprehensive analysis of the full range of relevant fine aggregates with regard to the influence of polishing resistance on the skid resistance potential of asphalt mixtures is the focus of this research project. In addition, aspects such as durability, sustainability, resource conservation and availability of raw materials are of importance. Taking these aspects into account, practical requirements for the polishing resistance of fine aggregates will be developed.

2 Research methodology

The project includes the following main areas of work:

1. International literature review regarding the identification of the influence of fine aggregates on the skid resistance potential of asphalt wearing courses.
2. Selection/procurement of representative aggregates. In this context, it is important to fully cover the range of available aggregates in terms of polishability, surface texture (e.g. natural sand and crushed sand) and petrographic properties.
3. Physical-technical tests. Here, the focus is on laboratory testing of the characteristics of the selected and used aggregates as well as the determination of the influence of the fine aggregate on the skid resistance potential of asphalt surface courses.

4. Evaluation and elaboration of requirement values. The results of the physical-technical tests are comprehensively statistically evaluated and proposals for practical requirements for the polishing resistance of fine aggregates are formulated.

3 Results

3.1 Literature review

The international, relevant literature sources are evaluated with regard to the influence of the fine aggregate on the skid resistance potential of asphalt wearing courses. In summary, the influence of an aggregate on the skid resistance of asphalt wearing courses has already been extensively researched and qualitative correlations have been shown. A quantification of the influence of the different parameters, e.g. the polishing degree of the fine and coarse aggregate or the particle size distribution/composition of the asphalt on the skid resistance potential is not available. This is a fundamental prerequisite for the formulation of practical requirements for the polishing consistency of fine aggregates.

3.2 Physical-technical testing

In this work package, all physical-technical tests are carried out. All selected aggregates are subjected to a basic characterisation. The characterisation includes the mineralogical/petrographical analysis of the selected aggregates, the determination of the polishing resistance of the fine and coarse aggregates with the PSV method and the method according to WEHNER/SCHULZE as well as the initial testing of the asphalt layers to be tested. Subsequently, the test plan will be finalized on the basis of the characterisation and the findings of the literature study. The test plan primarily includes the determination of the influence of the mineralogy, the particle size distribution and the polishing resistance of the aggregates on the skid resistance potential of the asphalt mix. In addition, the macrotexture of the specimens is recorded and analysed. In order to show the influence of mineralogy, siliceous, carbonaceous and quartzitic crushed and natural sands are selected taking into account the polishing resistance. In order to determine the influence of the grain size distribution of the fine aggregate, selected sands are classified into the fractions fine

(0.063 - 0.2 mm), medium (0.2 - 0.63 mm), coarse sand (0.63 - 2 mm) and then selectively reassembled. The influence of the polishing resistance of the fine aggregate is determined as a function of the asphalt surface course type (asphalt benton, stone mastic asphalt and porous asphalt), the natural/crushed sand content, the combination of different crushed and natural sands, and under variation of the largest aggregate with the method according to WEHNER/SCHULZE. In addition to the skid resistance potential determined by the WEHNER/SCHULZE method, which is determined after 90 thousand rolling cycles on laboratory specimens, the texture parameter ETD (Estimated Texture Depth) is measured to ensure a comparable surface structure when only one type of aggregate is used.

3.2.1 Influence of mineralogy and grain size distribution of fine aggregate on skid resistance of asphalt surfaces

The relationship between the mineralogical composition of the fine aggregate and the polishing resistance was determined on the basis of the mineralogical/petrographical analysis and the polishing resistance. With reference to the hardness contrast according to (TOURENQ et al. 1971), a significant correlation between the mineralogical composition and the polishing resistance was shown.

The analysis of the particle size distribution of the fine aggregate on the skid resistance potential of an asphalt concrete surface layer shows that the particle size distribution of the fine aggregate has no significant influence on the skid resistance potential (cf. Figure 3-1).

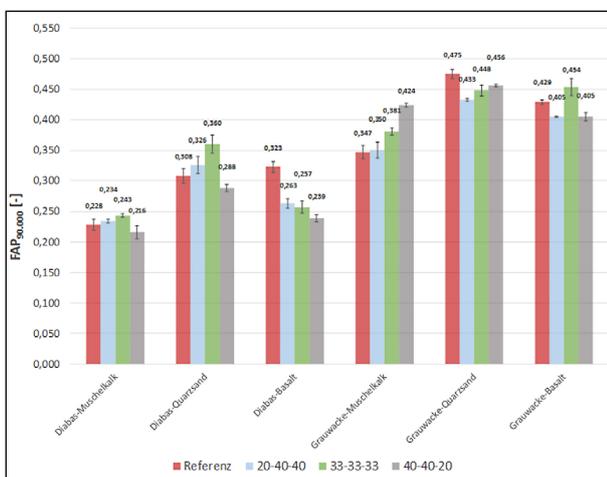


Fig. 3-1: Representation of the PWS values after 90,000 rollovers on all specimen variants

The red bars show the skid resistance values of the respective reference mix. The grain size distribution of the fine aggregate corresponds to that of the delivery condition. The other columns show the skid resistance values of the asphalt variants with a specific grain size distribution of the fine aggregate, e.g. the light blue bar describes the asphalt variants with 20 wt.% fine sand, 40 wt.% medium sand, 40 wt.% coarse sand (20-40-40). A systematic and significant correlation between the particle size distribution of the fine aggregate and the skid resistance potential cannot be demonstrated.

3.2.2 The influence of the polishing resistance of the fine aggregate on the skid resistance of asphalt surfaces

The influence of the fine aggregate on the skid resistance of asphalt concrete and stone mastic asphalt is shown in Figure 3-2. For the asphalt type asphalt concrete, an increase of the skid resistance potential, measured on the asphalt specimen, can be observed with increasing polishing resistance of the fine aggregate. This dependence is not observed for the asphalt type Stone Mastic Asphalt. Consequently, the influence of the polishing resistance of the fine aggregates is of minor importance for the asphalt type Stone Mastic Asphalt, which will be examined in more detail in the statistical analysis.

In a further step, the influence of the polishing resistance of the fine aggregate was considered as a function of the polishing resistance of the coarse aggregate. The slope of the regression line shows a higher influence of the polishing resistance of the fine aggregate on a coarse aggregate with low polishing resistance (see Figure 3-2).

Based on the comparison of the skid resistance potential of asphalt specimens with an 8 mm or 11 mm maximum grain size, no systematic and significant dependence between the maximum grain size diameter and the skid resistance potential can be identified for both asphalt concrete and stone mastic asphalt (cf. Figure 3-3).

The study of the combination of different fine aggregates shows that the skid resistance potential of two specimens, each made with a different fine aggregate, is clearly related to the skid resistance potential of a specimen made with the combination of the two fine aggregates (see Figure 3-4).

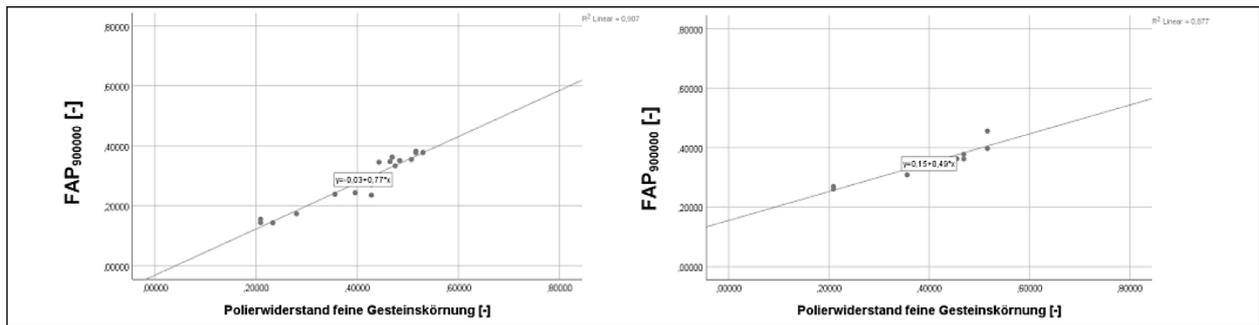


Fig. 3-2: Influence of the fine aggregate on the skid resistance of asphalt surfaces by varying the polishing resistance of the coarse aggregate (left: coarse aggregate with low polishing resistance, right: coarse aggregate with high polishing resistance)

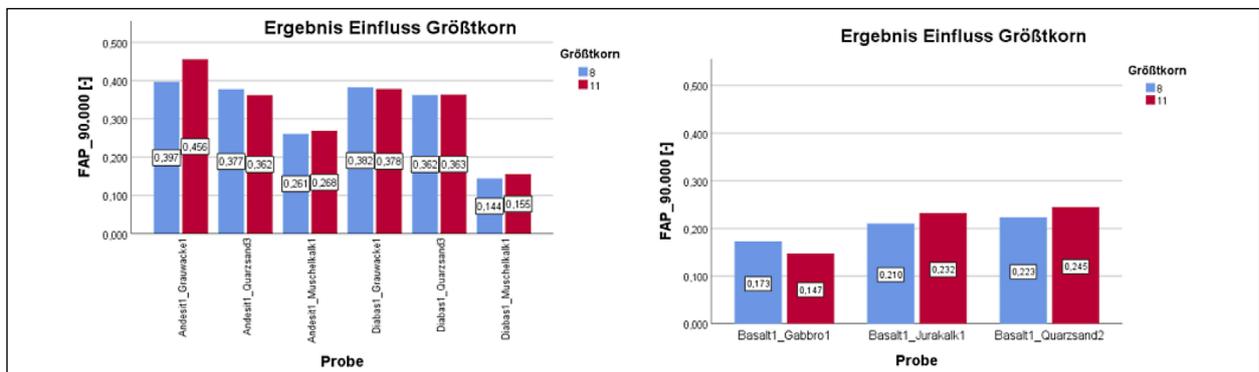


Fig. 3-3: Influence of fine aggregate size on the skid resistance of asphalt concrete (left) and stone mastic (right) due to the variation of the largest aggregate size

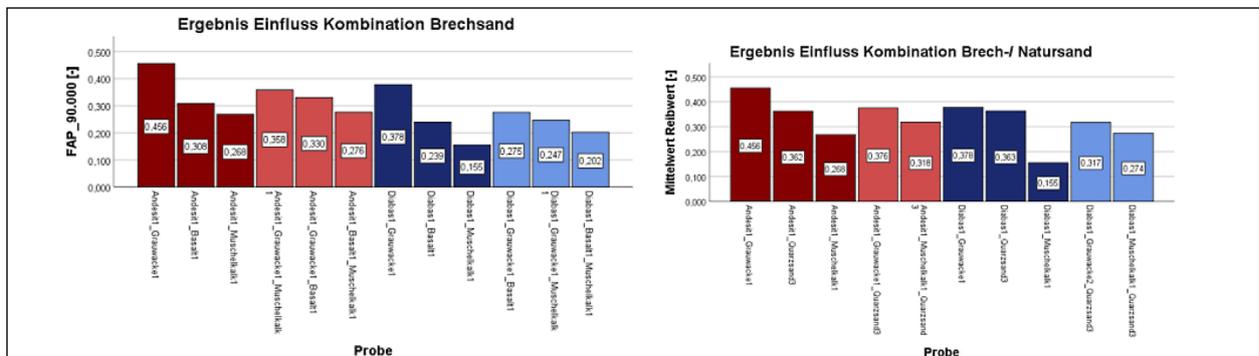


Fig. 3-4: Correlation of the combination tests crushed/natural sand (right) and crushed sand (left) with those of the fine aggregate (AC)

3.3 Evaluation

All results determined in chapter 3.2 are subjected to a comprehensive statistical evaluation (correlation and regression analysis) using the SPSS statistical program. This evaluation is used to determine the influence of the various parameters on the skid resistance potential of the different asphalt mix variants. On the basis of the statistical evaluation, recommendations for practical requirements for the polishing resistance of fine aggregates are worked out.

3.3.1 Statistical evaluation

Quantitative influence of mineralogy (total hardness) and polishing resistance:

The correlation between the mineralogical composition of an aggregate and its polishing resistance shows a very high statistical correlation based on the indicator „Total Hardness“ ($R = 0.933$; $R^2 = 0.871$).

Quantitative influence polishing resistance and skid resistance depending on asphalt types:

For the asphalt concrete mix type, a significantly higher statistical correlation (2.4-fold) is observed between the polishing resistance of the fine

aggregate and the skid resistance potential than between the polishing resistance of the coarse aggregate and the skid resistance potential. The influence of the polishing resistance of the fine aggregate is greater (1.4 times) for a maximum aggregate diameter of 8 mm than for a maximum aggregate diameter of 11 mm.

For the stone mastic asphalt mix type, a significantly higher statistical correlation (7.3-fold) between the polishing resistance of the coarse aggregate and the skid resistance potential is observed compared to the polishing resistance of the fine aggregate. Based on the variation of the largest aggregate, no statistical correlation between the polishing resistance of the fine aggregate and the skid resistance potential can be determined for the stone mastic asphalt mix type.

Quantitative influence of polishing resistance and skid resistance depending on the combination of fine aggregates:

The analysis of the test series on the combination of different fine aggregates shows that the skid resistance potential of a specimen produced with the combination of the two fine aggregates can be calculated on the basis of the skid resistance potential of two specimens produced with different fine aggregates. The relationship is explained in detail in the final report.

Quantitative influence of polishing resistance and skid resistance depending on the variation of the polishing resistance of the coarse aggregate:

The influence of the polishing resistance of the fine aggregate gains weight with decreasing polishing

resistance of the coarse aggregate. The statistical evidence is significant.

4 Derivation of requirement values

For the formulation of a proposal for practical requirements for the polishing resistance of fine aggregates, a model has been developed on the basis of statistical analysis. In the first step, the polishing resistance of the fine and coarse aggregates is determined using the WEHNER/SCHULZE method, as well as the proportion of fine and coarse aggregates in relation to the aggregate mixture. In the second step, a regression calculation is used to establish the relationship between the model input variables (polishing resistance of the fine and coarse aggregates and their proportions in the aggregate mixture) and the skid resistance potential measured on laboratory specimens. This model can be used to estimate the skid resistance potential (FAP-Value) of an asphalt mix (asphalt concrete or stone mastic asphalt) based on the mix composition.

The next step is to work out requirements for the skid resistance potential (FAP-Value). For this purpose, the requirements for the PSV value formulated in TL Asphalt-StB are used. The polishing resistance of the aggregate mixture according to TL Asphalt-StB is calculated for the asphalt variants analysed in this project. The skid resistance potential of the individual asphalt variants is plotted in a scatter diagram as a function of the polishing resistance of the aggregate mixture. The

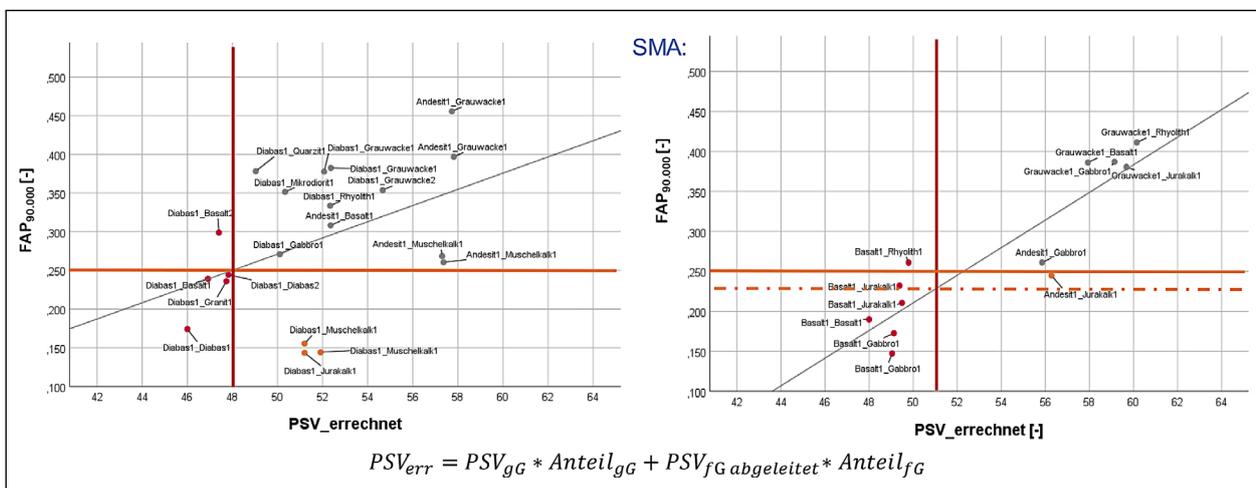


Fig. 4-1: Determination of the requirement value FAP

requirements of TL Asphalt-StB (PSV-Value) are plotted and the corresponding FAP-Value is read off. This is 0.250 for asphalt concrete and 0.230 for stone mastic asphalt.

Taking into account the data basis and the precision of the WEHNER/SCHULZE measurement method, a requirement value for the FAP value after 90,000 overrolling cycles of 0.280 is proposed (surcharge of 0.03).

In order not to exclude suitable aggregates from use in road construction, it is proposed not to formulate additional requirements for the polishing resistance of fine aggregates but to determine the skid resistance potential with the WEHNER/SCHULZE test method. On the basis of the laboratory tests carried out, a FAP value of 0.280 after 90,000 overruns should not be undercut for asphalt concrete wearing courses and stone mastic asphalt. In further investigations, this value is to be compared with the real traffic load in the course of field tests.

Abbreviations

AC	asphalt concrete
SMA	split mastic asphalt
PA	open-pore asphalt
TS	Heavy duty base course
BS	Heavy duty binder course
DS	Heavy duty surface course
N	Rollover
PWS	Polishing resistance measured with WEHNER/SCHULZE method
PSV	Polishing Stone Value (polishing resistance PSV method)
FAP	Friction After Polishing (grip value)
ETD	estimated tread depth
MPD	mean tread depth
μ	Friction value
WSV	rolling sector compactor
MPK	Marshall specimen
R/r	correlation coefficient
R ²	Measure of Determination
VIF	Variance Inflation Factor
p	p value (significance value)
α	Probability of error

Inhalt

Abkürzungen	15	6.1.1	Probekörperherstellung und Prüfungen zur Charakterisierung der Gesteine	44
1 Motivation und Zielsetzung	17	6.1.2	Ergebnisse der Polierresistenz der feinen und groben Gesteinskörnung (Charakterisierung)	45
1.1 Motivation.....	17	6.1.3	Schlussfolgerung der Charakterisierung.....	47
1.2 Zielsetzung.....	18	6.2	Einfluss der Kornverteilung und der Mineralogie (AP320)	51
2 Stand der Wissenschaft und Technik	18	6.2.1	Ergebnisse der mineralogischen Untersuchungen der Gesteine	51
2.1 Grundlagen	18	6.2.2	Herstellung und Vorbereitung der Asphaltprobekörper.....	54
2.2 Rauheit, Oberflächentextur	19	6.2.3	Prüfprogramm der Textur und der Griffigkeitsmessung.....	57
2.3 Griffigkeit.....	21	6.2.4	Ergebnisse der Texturmessung	57
2.4 Polierresistenz/-widerstand.....	23	6.2.5	Ergebnisse der Griffigkeitsmessung	58
2.4.1 Einfluss der Mineralogie auf den Polierwiderstand	24	6.3	Einfluss der feinen Gesteinskörnung auf das Griffigkeitsverhalten von Asphaltoberflächen (AP 330)	60
2.4.2 Einfluss der mineralogischen Zusammensetzung von Gesteinen auf den Polierwiderstand	30	6.3.1	Ergebnisse der Texturmessung	60
2.4.3 Mineralogischer Einfluss auf das Griffigkeitsverhalten	32	6.3.2	Ergebnisse der Griffigkeitsentwicklung	61
2.4.4 Einfluss der Asphaltkonzeption auf das Griffigkeitsniveau einer Asphaltoberfläche	33	6.3.3	Ergebnisse der Griffigkeitsentwicklung der Asphaltbetonversuche	61
2.5 Messverfahren zur Bestimmung der Textur, der Griffigkeit, Polierwiderstand und Mineralogie	34	6.3.4	Ergebnisse der Griffigkeitsentwicklung der Splittmastix und der offenenporigen Asphaltversuche	65
2.5.1 Mineralogische Untersuchungsmethoden.....	34	7 Auswertung und Ausarbeitung von Anforderungen an den Einfluss feiner Gesteinskörnungen	68	
2.5.2 Messung des Polierwiderstandes	36	7.1	Grundlagen der Statistik	69
2.5.3 Messung der Griffigkeit	37	7.1.1	Korrelationsanalyse	69
2.5.4 Texturmessverfahren	38	7.1.2	Regressionsanalyse.....	69
3 Resümee	40	7.2	Statistische Auswertung	74
4 Untersuchungsmethodik	40	8 Zusammenfassung der statistischen Auswertung	90	
5 Auswahl und Beschaffung der Gesteine (AP 200)	42			
6 Physikalisch- technische Prüfungen (AP 300)	43			
6.1 Charakterisierung der Gesteine (AP 310).....	43			

9	Ausarbeitung von Anforderungen an den Einfluss von feiner Gesteinskörnung auf das Griffigkeitsniveau von Asphaltoberflächen.....	91
10	Zusammenfassung und Ausblick	94
	Literatur.....	97
	Bilder	101
	Tabellen.....	103

Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter:

<https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

Abkürzungen

AC	Asphaltbeton
SMA	Splitmastixasphalt
PA	offenporiger Asphalt
TS	Tragschicht mit schwerer Beanspruchung
BS	Binderschicht mit schwerer Beanspruchung
DS	Deckschicht mit schwerer Beanspruchung
N	Überrollungen
PWS	Polierwiderstand gemessen mit dem WEHNER/SCHULZE Verfahren
PSV	Polishing Stone Value (Polierwiderstand PSV-Verfahren)
FAP	Friction After Polishing (Griffigkeitswert)
ETD	geschätzte Profiltiefe
MPD	mittlere Profiltiefe
μ	Reibwert
WSV	Walzsektorverdichter
MPK	Marshallprobekörper
R/r	Korrelationskoeffizient
R ²	Bestimmtheitsmaß
VIF	Variance Inflation Factor
p	p-Wert (Signifikanzwert)
α	Irrtumswahrscheinlichkeit

1 Motivation und Zielsetzung

1.1 Motivation

Eine ausreichende Griffigkeit der Straßenoberfläche ist ein unverzichtbarer Bestandteil zur Gewährleistung der Sicherheit der Verkehrsteilnehmer [KIRCHMAIER et al. 2010]. Bei hoher Verkehrsbelastung kann die Griffigkeit auf ein Niveau absinken, dass maßgeblich durch den Polierwiderstand der Gesteinskörnungen bestimmt wird [WEHNER et al. 1979]. Bei Straßen mit geringer Verkehrsbelastung kann dagegen die aufrauende Wirkung der Witterung größer als die polierende Wirkung durch den Verkehr sein [ZIPKES 1984]. Entsprechend sehen die TL Asphalt-StB 07/13 [TL Asphalt-StB 2013] für die verschiedenen Asphaltarten, deren zweckmäßiger Einsatz im Zusammenhang mit der Verkehrsbelastung steht, unterschiedliche Anforderungen an den Polierwiderstand vor.

Gemäß der aktuellen Fassung der TL Asphalt-StB 07/13 dürfen nur feine, gebrochene und grobe Gesteinskörnungen eingesetzt werden, die u. a. den jeweiligen mischgutspezifischen Anforderungen hinsichtlich des Polierwiderstandes genügen (vgl. [TL Asphalt-StB 2013], Tabellen 7 bis 10). Gesteinskörnungen, die diese Anforderungen nicht erfüllen, dürfen ausschließlich verwendet werden, wenn das resultierende Gesteinskörnungsgemisch den rechnerischen Wert der geforderten Kategorie des Polierwiderstandes erfüllt. Die Berechnung des Polierwiderstandes eines Gesteinskörnungsgemisches erfolgt aus der Kategorie des Polierwiderstandes der jeweiligen Gesteinskörnung im Verhältnis zu ihrem Massenanteil im Gemisch. Einschränkend ist zu beachten, dass nur Gesteinskörnungen der Kategorie $PSV_{\text{angegeben}(42)}$ verwendet werden dürfen. Weiter ist in den TL Asphalt-StB 07/13 festgelegt, dass der Polierwiderstand der groben Gesteinskörnung nach [DIN EN 1097-8 2009] (PSV-Verfahren) zu bestimmen ist. Der Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnung ist aus dem Polierwiderstand der stellvertretenden groben Gesteinskörnung abzuleiten [TL Asphalt-StB 2013].

Der Einfluss unterschiedlicher grober Gesteinskörnungen auf die Griffigkeit von Asphaltdeckschichten ist in verschiedenen Forschungsvorhaben beleuchtet worden [DAMES 1987, DAMES 1989, DAMES 1990, DAMES et al. 1997]. Der qualitative Zusammenhang zwischen dem Polierwiderstand der Gesteinskörnung sowie der Gesteinsart und der Korngröße sind in [DAMES 1987, DAMES et al.

1988, DAMES et al. 1985, M BgA 2004, KIRCHMAIER et al. 2010] beschrieben. Ein quantitativer Zusammenhang konnte bisher nicht abgeleitet werden.

Der Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnung kann technisch durch zwei Verfahren bestimmt werden. Zum einen kann der Polierwiderstand basierend auf dem PSV-Verfahren nach TP Gestein-StB, Teil 5.4.3 [TP Gestein-StB 2018] an der Prüfkornklasse 0,71/1 ermittelt werden (PSV_{fGK}). Dies ist jedoch aufgrund des nicht mehr verfügbaren Kontrollgesteins zzt. technisch nicht möglich. Zum anderen steht das Verfahren nach WEHNER/SCHULZE gemäß TP Gestein-StB, Teil 5.4.2 [TP Gestein-StB 2018] zur Verfügung, bei dem der Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnung an der Prüfkornklasse 0,2/0,4 mm ($PWS_{0,2/0,4}$) gemessen wird. In Österreich hat sich das Verfahren nach WEHNER/SCHULZE durchgesetzt. Die Bestimmung des Polierwiderstandes mit dem Verfahren nach WEHNER/SCHULZE wird als geeignet angesehen [KIRCHMAIER 2011]. Das Verfahren ist erprobt und gewinnt in Europa zunehmend an Bedeutung [KIRCHMAIER 2011]. Weiterhin konnte in der Forschungsarbeit von [KIRCHMAIER et al. 2010] nachgewiesen werden, dass der Polierwiderstand einer feinen Gesteinskörnung an der repräsentativen Prüfkörnung 0,2/0,4 mm zielsicher abgebildet werden kann. Das Verfahren nach WEHNER/SCHULZE ($PWS_{0,2/0,4}$) ist in Deutschland seit den 60er Jahren bekannt, ist Bestandteil der TP Gestein-StB und ist in verschiedenen Merkblättern der Forschungsgesellschaft FGSV zur Charakterisierung des Polierwiderstandes von feinen Gesteinskörnungen verankert [M OB 2009, M VV 2013].

In den Arbeiten von [KIRCHMAIER et al. 2010] und [DUDENHÖFER et al. 2016] wird deutlich, dass die Übertragung des Polierwiderstandes von der groben Gesteinskörnung auf die Feine aus mineralogischer und technischer Sicht nicht haltbar ist. Aus mineralogischer Sicht ist eine aufbereitungsbedingte Veränderung der mineralogischen Komponente zu berücksichtigen. Beispielsweise kann bei der Herstellung von Granitsanden eine Anreicherung von Glimmer auftreten, welche signifikante Auswirkungen auf den Polierwiderstand besitzt. Technisch gesehen treten bei feinen Gesteinskörnungen hinsichtlich des Polierwiderstandes andere Wirkmechanismen auf. Von der Kantenschärfe eines Sandkorns geht ein größerer Einfluss auf den Polierwiderstand als von seiner Flächenschärfe [M BgA 2004, SCHULZE 2011] aus. Des Weiteren wurde

bisher primär der Zusammenhang zwischen dem Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnung und der Griffigkeit der Asphaltdeckschicht betrachtet. Der Einfluss der Korngrößenverteilung der feinen Gesteinskörnungen (Fein-, Mittel- und Grobsand) wurde nicht abschließend analysiert.

1.2 Zielsetzung

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, anhand von Laborversuchen praxismgerechte Anforderungen an den Polierwiderstand von feinen Gesteinskörnungen auszuarbeiten.

Die aktuellen Regelungen der TL Asphalt-StB 07/13 sehen beispielsweise die Übertragung des an der groben Gesteinskörnung ermittelten Polierwiderstandes auf die feine Gesteinskörnung vor, welches oftmals zu nicht zutreffenden Ergebnissen führt. Weiterhin dürfen nur Gesteinskörnungen eingesetzt werden, die der Kategorie PSV_{angegeben(42)} entsprechen. Dies kann zum Ausschluss langjährig bewährter Gesteinskörnungen führen.

Die umfassende Analyse der vollständigen Bandbreite der relevanten feinen Gesteinskörnungen, hinsichtlich des Einflusses der Polierresistenz auf das Griffigkeitspotenzial von Asphaltmischgut, ist ein wesentlicher Bestandteil dieses Forschungsvorhabens. Weiterhin sind Aspekte wie Dauerhaftigkeit, Nachhaltigkeit, Ressourcenschonung und Verfügbarkeit von Rohstoffen von Bedeutung. Unter Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte sind praxismgerechte Anforderung an den Polierwiderstand von feinen Gesteinskörnungen auszuarbeiten.

Die wirtschaftliche Bedeutung des Projektes liegt primär in der Schonung der natürlichen Ressourcen und der Sicherstellung einer langfristig hohen Griffigkeit der Straßen. Durch gezielte Anforderungen an die Eigenschaften von feinen Gesteinskörnungen können diese feinen Gesteinskörnungen, die aufgrund der bisherigen Regelung ausgeschlossen waren, wirtschaftlich und nachhaltig eingesetzt werden. Durch die gewonnene Erkenntnis des Zusammenhanges zwischen den verschiedenen Eigenschaften der feinen Gesteinskörnung kann die Griffigkeitsentwicklung der Straße besser abgeschätzt werden. Zudem werden ungeplante Erhaltungsmaßnahmen reduziert und gleichzeitig ein Beitrag zur Verkehrssicherheit geleistet.

Die wissenschaftliche Bedeutung ist in einem Erkenntnisgewinn hinsichtlich der Wechselwirkung zwischen den mineralogischen und physikalisch-technischen Eigenschaften der feinen Gesteinskörnung und des Griffigkeitspotenzials des Asphaltmischgutes zu sehen. Es wird ein besseres Verständnis des Polierprozesses und des Zusammenhanges zwischen Polierresistenz der Gesteinskörnung sowie des Griffigkeitspotenzials des Asphaltmischgutes erreicht.

Die technische Aussage besteht in der weiteren Festigung des Verfahrens nach WEHNER/SCHULZE hinsichtlich der Bestimmung des Widerstandes gegen Polieren sowie der Bestimmung des Griffigkeitspotenzials von Asphaltmischgut.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Erkenntnisse über den Stand der Wissenschaft und Technik dargestellt. Der Fokus liegt dabei auf dem Einfluss des Polierwiderstandes feiner Gesteinskörnung auf das Griffigkeitspotenzial des Asphaltes.

2.1 Grundlagen

Eine Asphaltbefestigung lässt sich nach [RStO 2012] in mehrere Schichten unterteilen, eine Asphalttragschicht, gegebenenfalls eine Asphaltbinderschicht und eine Asphaltdeckschicht. Die Asphaltdeckschicht leitet als oberste Schicht einer Asphaltbefestigung die durch den Verkehr eingebrachten Belastungen in die darunterliegenden Asphalt-schichten ab.

Die Qualität der Oberfläche der Asphaltdeckschicht, welche durch die Eigenschaften des Baustoffgemisches und die Qualität des Einbaus beeinflusst wird, übt zusätzlich durch die Textur (Rauheit), die Ebenheit, die lichttechnischen und seine physikalischen Eigenschaften einen entscheidenden Einfluss auf die Verkehrssicherheit aus (s. Bild 2-1 [M OOA 2010]). Diese physikalischen Eigenschaften beeinflussen wiederum die für den Straßennutzer relevanten Gebrauchseigenschaften (funktionalen Eigenschaften): Griffigkeit, Helligkeit/Reflexion, Reifen/Fahrbahngeräusch und Wasserabfluss. Durch die äußeren Einflüsse Witterung und Verkehr können sich während der Nutzungsdauer die funktionalen Eigenschaften in ihren Charakteristiken verändern [PATZAK 2018].

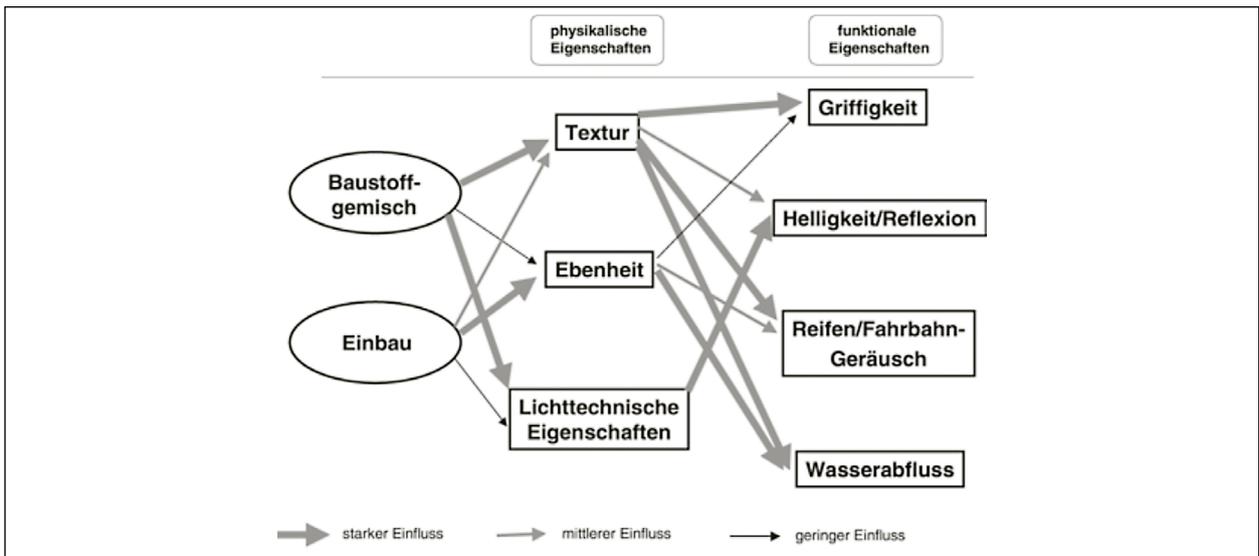


Bild 2-1: Einflüsse der physikalischen Eigenschaften auf die funktionalen Eigenschaften [M OOA 2010]

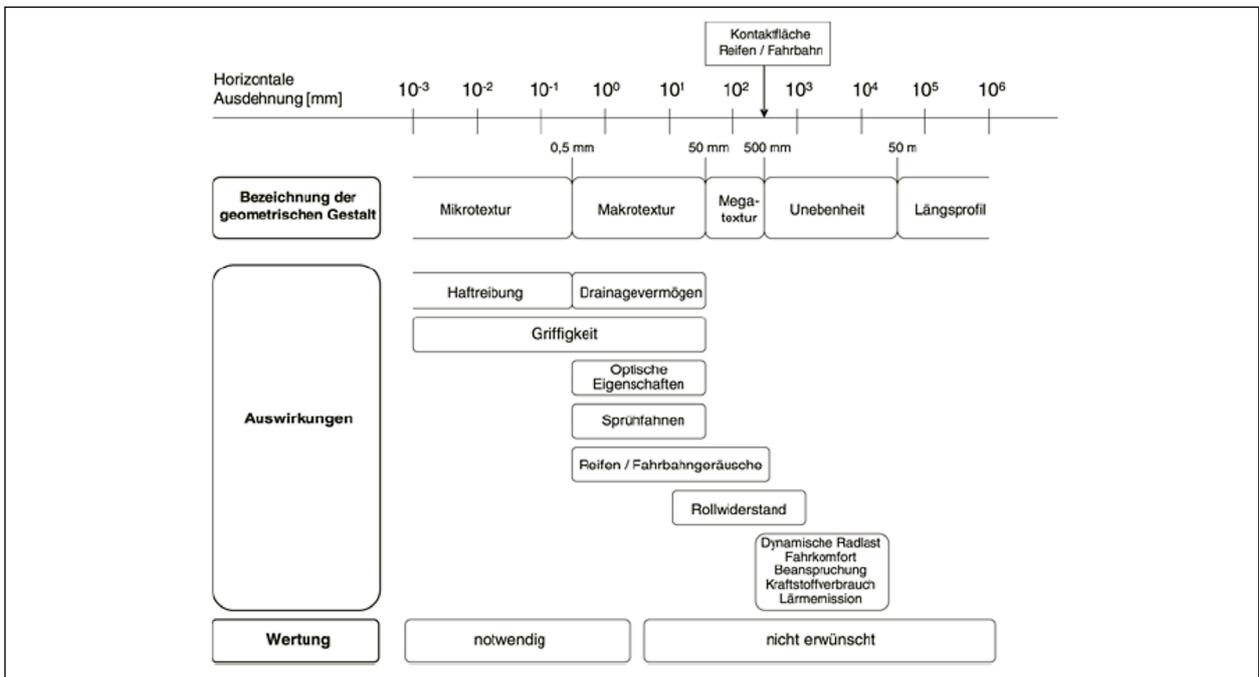


Bild 2-2: Wellenspektrum der Fahrbahnoberfläche und Auswirkungen auf die Gebrauchseigenschaften [M BgA]

2.2 Rauheit, Oberflächentextur

Nach der europäischen Norm [DIN EN ISO 13473-1] wird die Textur eines Fahrbahnbelages als Abweichung einer Fahrbahnoberfläche von einer ebenen Fläche mit einer Texturwellenlänge kleiner als 0,5 m definiert. Der Begriff Oberflächentextur ist im Asphaltstraßenbau gleichbedeutend mit der Rauheit [TP Griff-StB 2004]. Nach [PFEILER 2004] hat die Textur einer Asphaltoberfläche einen signifikanten Einfluss auf die Griffigkeit, Rollgeräusche sowie Sprünfahnenbildung und wird nach ihren Wellenlängenbereichen in Mikro-, Makro-, Megatextur und Unebenheiten unterteilt (s. Bild 2-2).

Unebenheit:

Die Rauheitselemente mit einer Textur > 500 mm können als Längsunebenheiten bezeichnet werden. Die primäre Einflussnahme dieser Unebenheiten wirkt sich auf den Fahrkomfort sowie die dynamischen Radlasten aus (s. Bild 2-2).

Megatextur:

Die Megatextur lässt sich nach Bild 2-2 durch Rauheitselemente mit einer horizontalen Ausdehnung von 50 mm bis 500 mm beschreiben. Sie beeinflusst das Reifenrollgeräusch und den Rollwiderstand [PFEILER 2004]. Bei Bodenwellen oder auch in Spurrinnen kann die Megatextur einen Einfluss

auf die Bildung von Wasseransammlungen auf der Fahrbahn besitzen. Desweiteren kommt es durch Unebenheiten im Megatexturbereich zu einem reduzierten Fahrkomfort [KIRCHMAIER 2011].

Makrotextur:

Die Makrotextur ist durch Rauheitselemente mit einer horizontalen Ausdehnung von 0,5 mm bis 50 mm definiert (s. Bild 2-2) und ist für das Drainagevermögen der Straßenoberfläche verantwortlich [Do M-T 2015; CAFISO 2007] Eine eher grobstrukturierte Oberfläche kennzeichnet eine ausgeprägte Makrotextur, die die Aufgabe hat, vor allem bei höheren Geschwindigkeiten das Reifenprofil beim Abführen des Wassers aus der Kontaktfläche Reifen/ Straßenoberfläche zu unterstützen. Die Makrotextur ist primär von der Korngrößenverteilung, dem Größtkorn bzw. der gewählten Deckenart sowie der Einbautechnik abhängig [PFEILER 2004; KIRCHMAIER 2011]. Eine ausgeprägte Makrotextur ist für höhere Geschwindigkeiten zur Verringerung der Aquaplaninggefahr notwendig [MÜLLER et al. 2002]. Sie wirkt im Gegensatz zu der Mikrorauheit direkt nach dem Einbau und kann durch größere Größtkorndurchmesser und gleichzeitig sinkenden Anteil an feinen Gesteinskörnungen erzielt werden [PATZAK 2018].

Mikrotextur:

Die Mikrotextur ist durch Rauheitselemente mit einer horizontalen Ausdehnung < 0,5 mm definiert (s. Bild 2-2). Sie wird maßgeblich von der Wahl der Gesteinsart und der Kanten- und Flächenschärfe bestimmt [LUCE, MAHMOUD, MASAD, CHOWDHURY 2007]. Zugleich ermöglicht die Mikrotextur ein Durchbrechen eines eventuell vorhandenem Wasserfilm in der Reifenaufstandsfläche und stellt folglich einen trockenen Kontakt zu den Profilstollen des Reifens her [PFEILER 2004; KIRCHMAIER 2007]. Bei frisch gebrochenem Gestein ist die Mikrotextur in ausreichendem Maß vorhanden, wird jedoch durch die polierende Wirkung der Fahrzeugreifen vermindert. Nur polierresistente Gesteine weisen eine dauerhafte Mikrotextur auf [MÜLLER et al. 2002]. Die Gesteinskörnungen sind nach der Asphaltmischgutproduktion und dem Einbau mit Bitumen umhüllt. Erst durch die einwirkende Witterung und Verkehrsbeanspruchung erfolgt ein Abtrag des Bindemittelfilms und die vollständige Ausbildung der Mikrotextur [PATZAK 2018]. Rauheiten bis zu einer Größenordnung von 1/100 mm zeigen einen signifikanten Einfluss auf die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn bei Nässe [KIRCHMAI-

ER 2011]. Die Mikrorauheit bestimmt infolgedessen wesentlich das Niveau der Griffigkeit. Bei dichteren Asphalten wie z. B. bei Asphaltbeton gewinnen hier vor allem die Eigenschaften der verwendeten Sande an Bedeutung [KIRCHMAIER 2011].

Die Mikro- und Makrotexturen verändern sich im Laufe der Nutzung. Durch Verkehr, welcher mit einer Polierbeanspruchung einhergeht, kommt es zu einem Abbau der Mikrotextur (Kanten- und Flächenschärfe). Die Makrotextur kann durch die Verkehrsbeanspruchung, in Abhängigkeit von der Einbautechnik und der Asphaltmischgutkonzeption, vor allem im Bereich der Rollspuren abnehmen (z. B. Nachverdichtung). Gleichzeitig bewirken Witterungs- und Umgebungseinflüsse durch chemische und physikalische Angriffe ein Aufräuen der Mikrotextur. Eine Zunahme der Makrotextur tritt durch die Verringerung des Mörtelanteils bzw. durch Kornausbrüche auf [PATZAK 2018]. BÜHLMANN hat nachgewiesen, dass diese Prozesse für die jahreszeitlichen Griffigkeitsschwankungen mitverantwortlich sind [BÜHLMANN 1985].

Die qualitative Auswirkung der Mikro- und Makro- rautextur der Fahrbahnoberfläche auf den Reibungskoeffizienten μ in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v und des Straßenzustands nass bzw. trocken stellt ZIPKES in Bild 2-3 dar [ZIPKES 1983].

Ausgehend von der Höhe der größten Profilspitze R_p , welche als eine Kenngröße für die Makrotextur angesehen wird, unterteilt ZIPKES diese in offene ($R_p \geq 0,4$ mm) und geschlossene ($R_p < 0,4$ mm) Profilspitzen. Eine Profilspitze $R_p > 0,4$ mm ermöglicht das Abführen des Wassers zwischen den Ge-

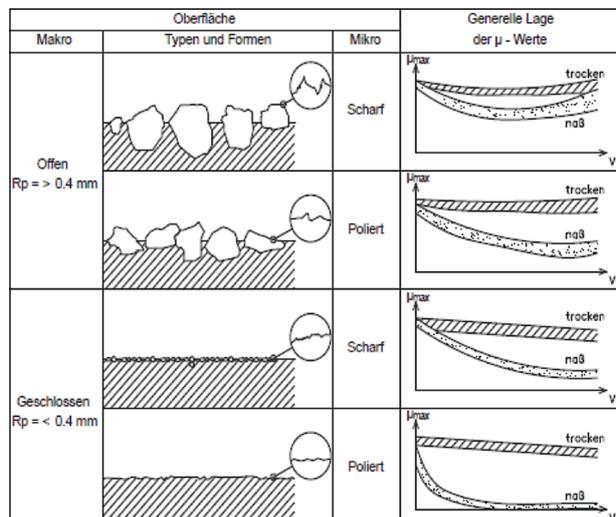


Bild 2-3: Auswirkungen der Oberflächenstruktur auf die Höhe des Reibungskoeffizienten nach ZIPKES [ZIPKES 1984]

steinskörnungen in der Kontaktfläche Reifen/Fahrbahnoberfläche. Dabei liegt der Reibungskoeffizient dieser offenen Fahrbahnoberfläche bei der nassen Fahrbahnoberfläche auf einem höheren Niveau als bei einer geschlossenen Oberfläche mit $R_p < 0,4$ mm. Selbst bei geringen Geschwindigkeiten ist im polierten Zustand eine deutliche Abnahme des Reibungskoeffizienten erkennbar. Bei einer geschlossenen und offenen Fahrbahn zeigt sich im trockenen Zustand, dass der Unterschied zwischen der scharfen und polierten Mikrotextur gering ist [ZIPKES 1984].

Zusammenfassend unterscheidet man zwischen zwei wesentlichen Oberflächeneigenschaften, die die Griffigkeit maßgeblich beeinflussen: dem Drainagevermögen (Makrotextur) und dem Grad der Schärfe der Gesteinskörnung (Mikrotextur) [SCHULZE 1970; PFEILER 2004]. Das Drainagevermögen in Abhängigkeit von der Makrotextur bezeichnet die Fähigkeit der Fahrbahn, Wasser aus der Kontaktfläche von Reifen und Straßenoberfläche (dem Reibenlatsch) abzuführen. Der Grad der Schärfe ist durch die Mikrotextur bestimmt. Die Mikrotextur der Einzelkörner ist als Ergänzung zur Makrotextur eine wichtige Voraussetzung für die ausreichende Griffigkeit einer Straßenoberfläche [MÜLLER et al. 2002].

Diese beiden maßgebenden Eigenschaften (Drainvermögen und Schärfe der Gesteinskörnung), welche den Zusammenhang zwischen Textur und Griffigkeit aufzeigen, konkretisiert SCHULZE. SCHULZE stellt ein Modell auf, indem er die Interaktion der Gummireifen mit der Straßenoberfläche in zwei Bereiche abgegrenzte. Dies wird in Bild 2-4 gezeigt.

Die Trennfläche dieser beiden Bereiche bildet die Eindringtiefe des Reifengummis. Da im unteren Bereich (Drainbereich) kein Kontakt von Reifen und Oberfläche festzustellen ist, findet keine Polierbeanspruchung und somit auch kein Abbau der Mikrotextur statt. Der Einfluss dieses Bereiches auf die Griffigkeit der Oberfläche ist primär auf das Drainvermögen des Bereiches zurückzuführen. Der obere

re Bereich wird als Kontaktbereich bezeichnet, indem der Kontakt zwischen Gummi und Straßenoberfläche stattfindet. Hier wird durch Reibung und der dadurch erzeugten Polierbeanspruchung der Abbau der Mikrotextur verursacht. Maßgebend für die Griffigkeit sind hier die Kanten- und Flächenschärfen der Oberfläche [SCHULZE. 2011].

2.3 Griffigkeit

Die Griffigkeit wird im Forschungsbericht von GRÄTZ als „Einfluss der stofflichen Beschaffenheit und geometrischen Feingestalt der Fahrbahnoberfläche auf die Größe der maximal vom Reifen auf die Straße abstützbaren Antriebs-, Brems- und Seitenkräfte“ definiert [GRÄTZ 1998]. Sie ist für die Entwicklung von Reibungskräften zwischen Fahrbahn und Fahrzeugreifen, den sogenannten Kraftschluss, verantwortlich. Dieser Quotient aus übertragbarer Horizontalkraft und vertikaler Radlast ist von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig [BERMEL et al. 2004]. Der Kraftschluss wird wiederum durch die Makro- und Mikrostruktur der Straßenoberfläche geprägt [M BGriff 2012].

Zusätzlich zu den Einflussfaktoren in Tabelle 2-1 unterliegen bei der Betrachtung der Fahrbahnoberfläche über ihre Lebensdauer die Griffigkeitsentwicklungen langfristigen und kurzfristigen Veränderungen.

Kurzzeitige Veränderungen wie zum Beispiel Niederschlag können zu Aquaplaning führen. Bei Aquaplaning entsteht zwischen Fahrzeugreifen und Fahrbahn ein dünner Wasserfilm, welcher die Reibung herabsetzt bzw. ganz aufhebt und somit zu einer Erhöhung des Unfallrisikos führen kann. Bei nassen, feuchten Oberflächen wird die Griffigkeit maßgeblich durch die Textur der Straßenoberfläche beeinflusst. Bei trockener Fahrbahndecke ist die Griffigkeit ausreichend hoch und führt im Normalfall zu keinem erhöhten Unfallrisiko. Der Zusammenhang zwischen trockener oder nasser Fahrbahn-

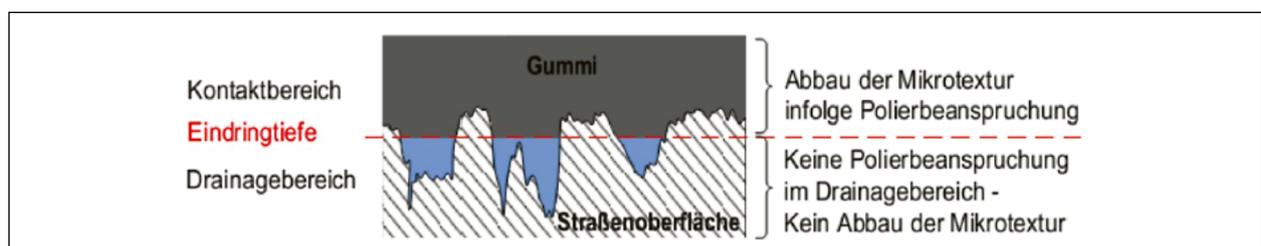


Bild 2-4: Einteilung der Textur in zwei Bereiche [SCHULZE, 2011]

	Fahrbahn	Nutzung der Fahrbahn
Fixe Einflüsse	Griffigkeit <ul style="list-style-type: none"> • Rauheit • Stoffliche Beschaffenheit (nach ZTV Asphalt- StB 01, ZTV Beton- StB 01, ZTV BEA- StB 98/03, ZTV BEB- StB 02) 	Fahrzeugmerkmale <ul style="list-style-type: none"> • Fahrzeugeigenschaften nach STVZO (Gesamtmasse, Federung, Brems- und Stabilisierungssysteme) • Reifeneigenschaften (Profil, Gummiart, Reifenbreite)
Temporäre Einflüsse	Griffigkeitsänderung <ul style="list-style-type: none"> • vorhersehbar aus geplanter Verkehrsmenge und -art und jahreszeitlichem Witterungsverlauf • nicht vorhersehbar aus zufälligen Witterungs-, Verkehrs- und Umwelteinflüssen 	Fahrzeugzustand <ul style="list-style-type: none"> • z. B. Reifen, Bremsen (temperatur- und alterungsabhängiges Haftvermögen, Profiltiefe) • z. B. Fahrweise Geschwindigkeit, Wasserverdrängung, Schub-, Seiten-, Brems-, Beschleunigungskräfte

Tab. 2-1: Einflüsse auf die Griffigkeit [BERMEL et al. 2004]

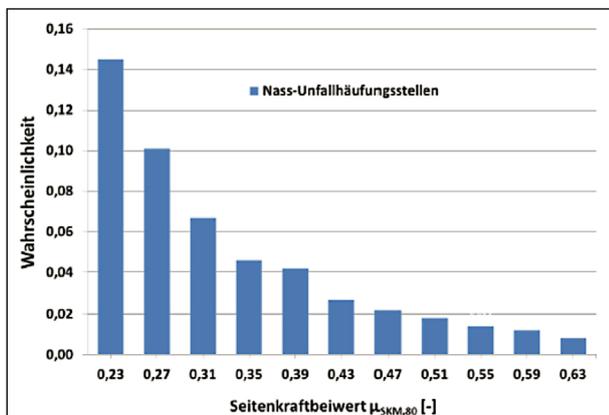


Bild 2-5: Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein einer Nass-Unfallhäufungsstelle in Abhängigkeit von der Griffigkeit des rechten Fahrstreifens [STEINAUER et al. 2002]

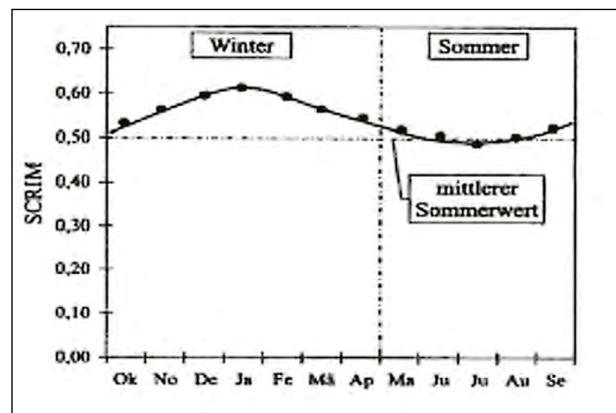


Bild 2-6: Jahreszeitliche Schwankung der Griffigkeit [Huschek 1995]

oberfläche und dem Unfallrisiko wird in den Werken von [STEINAUER et al. 2002] Beckmann, K.-H. SCHULZE, J. DAMES und H. Lange] umfangreich untersucht [Beckmann 1964; STEINAUER et al. 2002; SCHULZE et al. 1975]. Dabei wird festgestellt, dass die Wahrscheinlichkeit des Auftreten von Nass-Unfallhäufungsstellen mit der Griffigkeit eindeutig verknüpft ist. Weitere Werke von POTSCHKA untermauern den Zusammenhang zwischen der Unfallhäufigkeit und der Griffigkeit bei Nässe (s. Bild 2-5) [POTSCHKA 1988; SCHNIERING 1983].

Bei der Betrachtung der langzeitigen Griffigkeitsentwicklung ist festzustellen, dass die Griffigkeit keine konstante oder stetig abnehmende Größe ist, sondern, dass diese neben den genannten Einflüssen auch jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt [STEINAUER et al. 2002; RAUSCHENBACH und BOREK 2010] (s. Bild 2-6).

Dies ist darin begründet, dass im Winter die tieferen Temperaturen (Verwitterung durch Frosttauwechsel) und größeren Regenmengen (saurer Regen

und Auswaschen von Staub- und Schmutzpartikeln aus Mikrostruktur) eine aufrauende Wirkung auf die Gesteinskörnung ausüben. Die hohen Temperaturen und sommerliche Trockenheit wirkt sich negativ auf die Griffigkeit aus, da unter diesen Bedingungen das kontinuierliche Polieren der Fahrzeugreifen einen größeren Einfluss auf die Griffigkeit hat als die Verwitterung [DAMES et al. 1994; KUGLER 2015; O'BRIAN 2009].

Physikalisch quantifiziert wird die Griffigkeit mittels eines Reibungskoeffizienten, auch Reibungsbeiwert μ genannt. Der Reibungsbeiwert (μ) basiert auf dem Coloumb'schen Reibungsgesetz für trockene Reibung von festen Körpern (Haftreibung) und ermittelt sich vereinfacht aus dem Quotienten der zwischen Reifen und Fahrbahn mithilfe der Oberflächenrauheit aktivierten Horizontalkraft (F_x) und der einwirkenden Normalkraft (F_z). Die theoretische Obergrenze für (μ) liegt bei 1 [-] bei der ein ursprünglich unbewegliches System weiterhin unbeweglich bleibt.

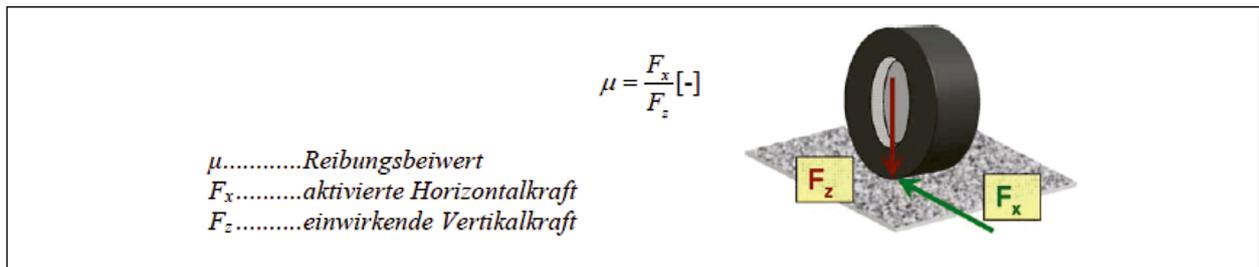


Bild 2-7: wirkende Kräfte des Coulomb'schen Reibungsbeiwerts [ANGST und BÜRGISSER 2014]

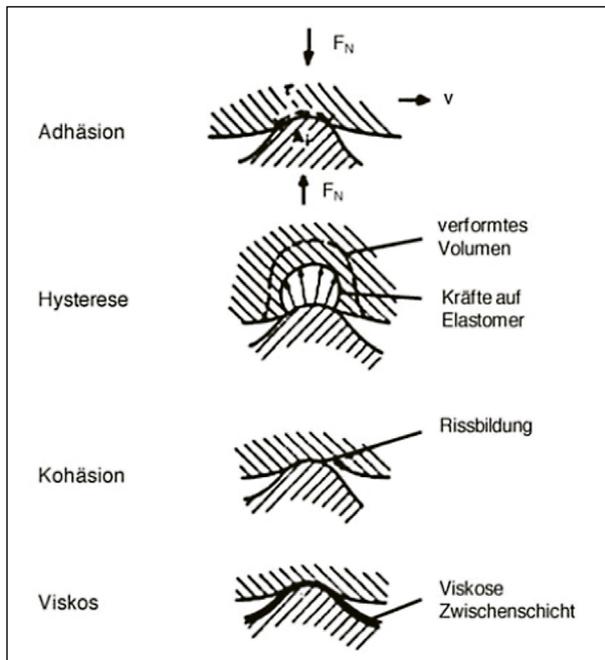


Bild 2-8: Einzelkomponenten der Reibung [GEIER 1972]

Da bei der Reibung von gummielastischen Stoffen auf rauher Oberfläche die Verzahnung eine Rolle spielt, gilt das Coulomb'sche Reibungsgesetz nicht für Elastomerreibung. Bei Autoreifen hat neben der Normalkraft und der Oberflächenrauheit auch die Reifenaufstandsfläche einen Einfluss auf die Reibungskraft. Je nach Gummimischung und Fahrbahnbelag treten auch effektive Haftreibungszahlen auf, die deutlich größer sind als 1 [KIRCHMAIER 2011].

Um die Elastomerreibung oder auch Gummireibung beschreiben zu können, ist es notwendig, genauer die Kraftübertragung zwischen Gummi und Fahrbahn zu betrachten. Kummer beschreibt vier Einzelkomponenten, welche mit einer durch Reibung erzeugten Energiedissipation gleichzusetzen sind.

- Adhäsionskomponente:
Beschreibt die molekularen Anziehungskräfte zwischen Gummi und Festkörper.
- Hysteresekomponente:
Beschreibt die Dämpfungsverluste des Reifens

durch die Deformation auf rauhen Straßenoberflächen.

- Kohäsionskomponente:
Stellt den Energieaufwand zur Rissbildung und zum Herauslösen einzelner Elemente im Gummikörper dar.
- Viskosekomponente:
Beschreibt das Scherverhalten eines viskosen Querschnitts, wie z. B. der Abfall des Reibwertes bei Aquaplaning.

Diese vier beschriebenen Einzelkomponenten bilden in Summe den Gesamtreibwert μ_{ges} , wobei sie jedoch nicht unbedingt während eines Reibungsprozesses gleichzeitig auftreten müssen.

$$\mu_{ges} = \mu_{Adhäsion} + \mu_{Hysterese} + \mu_{Kohäsion} + \mu_{Viskose} \quad (1)$$

Nach [GROSCH 1963; GEYER 1971; PERSON und VOLOKITIN 2006 und DUNFORD 2013] besteht zwischen diesen Komponenten zum Teil eine ausgeprägte Wechselwirkung und ihr Auftreten ist von bestimmten Randbedingungen, wie z. B. der Rauheit und Ebenheit der Straßenoberfläche oder der Existenz eines Wasserfilms zwischen Reifen und Oberfläche abhängig.

2.4 Polierresistenz/-widerstand

Durch die Zusammensetzung des Asphaltmischgutes und der Einbautechnik lässt sich die Griffigkeit einer Asphaltoberfläche maßgeblich beeinflussen. So lässt sich z. B. durch die Reduzierung der feinen Gesteinskörnung im Mischgut eine ausgeprägte, offene Makrostruktur bilden. Zudem können durch den unsachgemäßen Fertigerinsatz, wie z. B. Bohlenverbreitung ohne Schnecke, Entmischungen entstehen, die sich negativ auf die Griffigkeit auswirken können [M BgA 2004].

Zur Sicherstellung einer ausreichenden Anfangsgriffigkeit des Walzasphalts müssen nach [ZTV Asphalt-StB 07/13 FGSV-799] alle Asphaltoberflä-

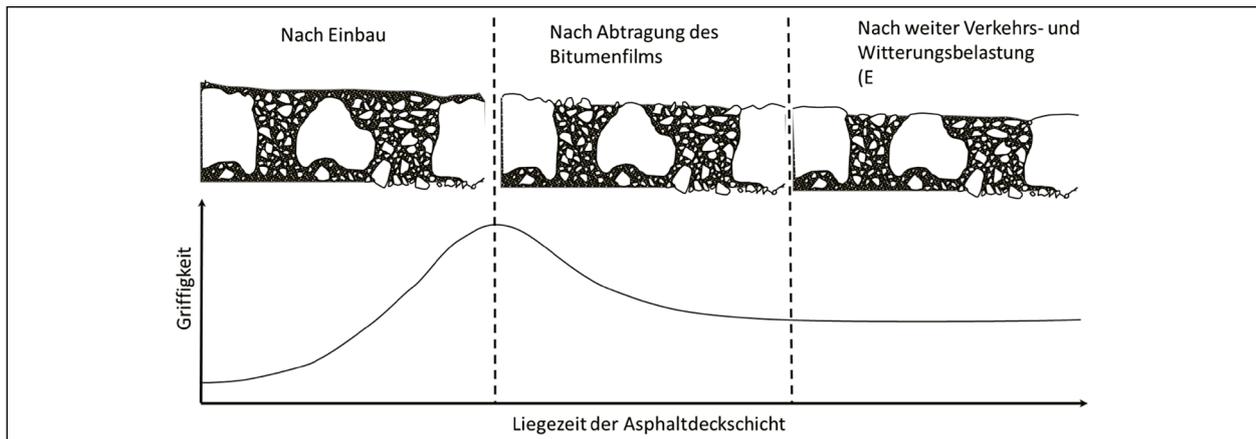


Bild 2-9: Griffigkeitsentwicklung einer Asphaltdeckschicht

chen, ausgenommen die offenporige Asphaltdeckschicht, abgestumpft werden, da das Gestein an der Oberfläche der Deckschicht nach dem Einbau noch von einem Bitumenfilm umgeben ist. Erst durch den Verkehr und die Verwitterung wird dieser abgetragen (s. Bild 2-9).

Nach dem Abtragen des Bitumenfilms ist das Griffigkeitsniveau von dem Polierwiderstand der Gesteine, welcher von der Flächen- und Kantenschärfe des Mineralaggregats beeinflusst wird, abhängig. Die Gesteinskomponenten besitzen folglich erst nach einigen Monaten einen Einfluss auf die Griffigkeit von Asphaltdeckschichten. Die nach dem Abtragen des Bitumenfilms polierende Wirkung auf das Gestein entsteht dadurch, dass alle angetriebenen bzw. verzögerten Fahrzeugreifen unter Schlupf auf der Oberfläche der Gesteinskörner abrollen. Dabei werden die Mineralstoffe an der Oberfläche poliert, was mit einer Glättung oder auch Einebnung der Kornoberflächen einhergeht.

Die Flächen- sowie Kantenschärfe des Gesteins wird durch dieses Phänomen verringert [PATZAK 2018; RAUSCHENBACH und BOREK 2010; PFEILER 2004; STEINAUER et al. 2002, 2002]. So werden Gesteinskörnungen mit einer sehr niedrigen Polierresistenz schneller und in höherem Maße durch die mechanische Beanspruchung poliert als die eines polierresistenten Gesteins [KIRCHMAIER 2011]. Hervorzuheben sind Gesteine, deren Minerale sich innerhalb des Gesteins in Härte und Spaltbarkeit unterscheiden. Sie sind in der Lage, ihre Mikrotexur durch Herausbilden eines sekundären Reliefs unter den Einwirkungen von Verkehr und Witterung selbstständig zu regenerieren [M BgA 2004].

Gemäß den TL Asphalt-StB 07/13 dürfen nur feine gebrochene und grobe Gesteinskörnungen einge-

setzt werden, die den jeweiligen mischgutspezifischen Anforderungen an den Polierwiderstand genügen (vgl. [TL Asphalt-StB 2013], Tabellen 7 bis 10). Gesteinskörnungen, die diese Anforderungen nicht erfüllen, dürfen ausschließlich verwendet werden, wenn das resultierende Gesteinskörnungsgemisch den rechnerischen Wert der geforderten Kategorie des Polierwiderstandes erfüllt. Die Berechnung des Polierwiderstandes eines Gesteinskörnungsgemisches erfolgt aus der Kategorie des Polierwiderstandes der jeweiligen Gesteinskörnung im Verhältnis zu ihrem Massenanteil im Gemisch. Einschränkung ist zu beachten, dass nur Gesteinskörnungen der Kategorie $PSV_{\text{angegeben}(42)}$ verwendet werden dürfen. Weiter ist in den TL Asphalt-StB 07/13 festgelegt, dass der Polierwiderstand der groben Gesteinskörnung nach [DIN EN 1097-8] (PSV-Verfahren) zu bestimmen ist. Der Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnung ist aus dem Polierwiderstand der stellvertretenden groben Gesteinskörnung abzuleiten [TL Asphalt-StB 2013].

2.4.1 Einfluss der Mineralogie auf den Polierwiderstand

Dass die Eigenschaften der Gesteinskörnung wie die Petrografie, Mineralogie und die Morphologie der Fahrbahnoberfläche einen Einfluss auf die Griffigkeit der Deckschicht ausüben, zeigen die Werke von PESTALOZZI und ROHLEDER [PESTALOZZI et al. 2004; ROHLEDER 2010]. Um die genauen Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften der Gesteine und der Polierresistenz zu verstehen, ist es von Bedeutung, die Entstehung sowie die Zusammensetzung der verschiedenen Gesteinsarten zu kennen.

Ein Gestein ist ein Aggregat aus Mineralen. Nach NEUMANN sind Minerale „im physikalischen und

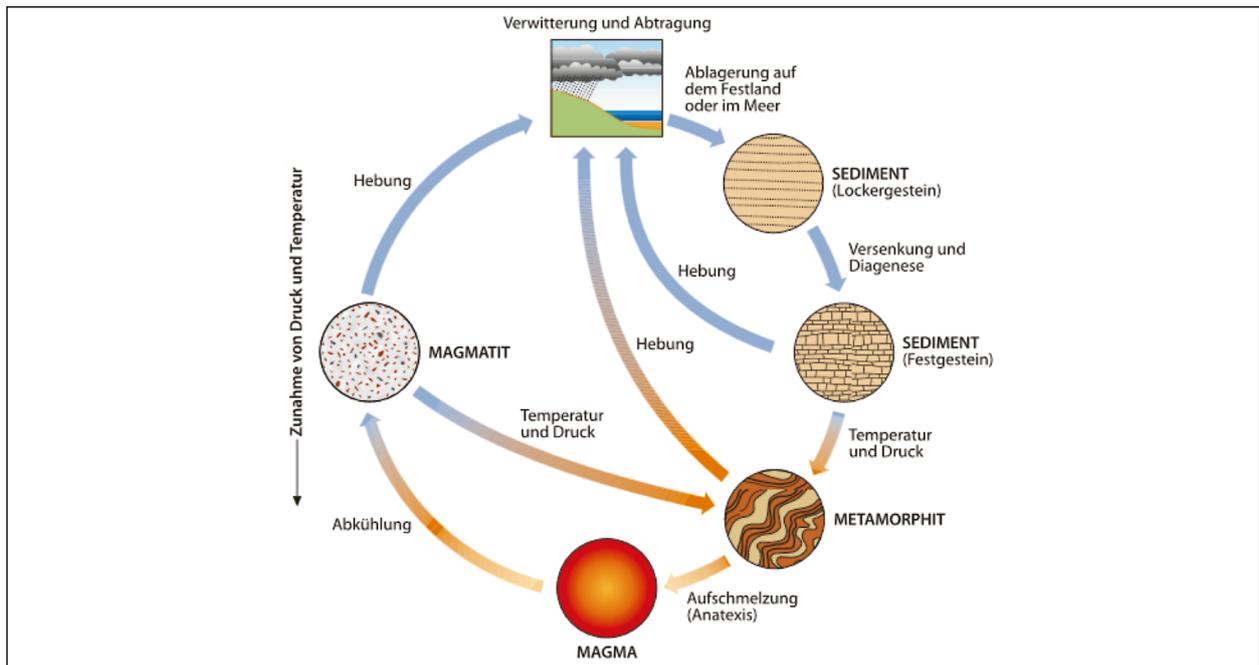


Bild 2-10: Kreislauf des Gesteins [OKRUSCH und MATTHES 2014]

chemischen Sinne bis zur atomaren Größenordnung homogene, feste Naturkörper, die fast ausschließlich in Form von Kristallen vorliegen und in Gemengen alle unsere Gesteinsarten zusammensetzen“. Die Mineralbildung vollzieht sich im Rahmen geologischer Prozesse und erfolgt vorwiegend aus übersättigten Schmelzen oder aus wässrigen Lösungen verschieden hoher Temperaturen. Als Bestandteile der Erde werden die Minerale nach ihrer Bildungsart der magmatischen, der sedimentären oder der metamorphen Abfolge zugeordnet [NEUMANN 1964].

Die feste Gesteinsbildung beginnt mit dem Magma, wie es heute unter der festen Erdkruste vorliegt (s. Bild 2-10). Magma besteht aus Gesteinsschmelzen mit unterschiedlichem Chemismus, insbesondere sehr unterschiedlichen Kieselsäuregehalten. Die meisten Schmelzen sind silikatisch, d. h. sie bestehen überwiegend aus SiO_2 . Daneben gibt es in der Natur aber auch karbonatische, sulfidische, oxidische und phosphatische Schmelzen. Durch den Aufstieg dieser Schmelzen in Richtung Erdoberfläche kommt es zur langsamen Abkühlung, zum Auskristallisieren von Mineralien und letztendlich zu deren Zusammenwachsen zu festen Gesteinen, den sogenannten Magmatiten. Aufgrund der langsamen Abkühlung besteht für die Minerale ausreichend Zeit auszukristallisieren. Dadurch können die kristallinen Minerale Korngrößen erreichen, die mit bloßem Auge zu erkennen sind. Die so entstandenen Gesteine sind sehr kompakt und zeichnen sich durch eine Richtungslosigkeit der Mineralkörner so-

wie ein geringes Porenvolumen aus. Da sich diese Vorgänge in der Tiefe der Erdkruste abspielen, werden die dabei entstehenden Gesteine auch als Tiefengesteine oder Plutonite bezeichnet [EPPENSTEINER 1999; MARKL 2015]. Gelangt das Magma durch vulkanische Vorgänge zur Erdoberfläche, so kühlt es rasch ab. Dadurch bleibt den Mineralien wenig Zeit zum Auskristallisieren und es können nur sehr kleine Mineralkörner entstehen. Diese Magmatite, die durch das Zutagetreten von Lava an der Erdoberfläche entstanden sind, werden auch als Ergussgesteine oder Vulkanite bezeichnet [EPPENSTEINER 1999]. Der Chemismus und damit der Mineralbestand der Ergussgesteine ist mit dem der Tiefengesteine vergleichbar, da beide Gesteinsgruppen demselben Magma entstammen. Der wesentliche Unterschied liegt allerdings im Gesteinsgefüge. Da die Vulkanite sehr viel schneller erkalten als die Plutonite, sind die Kristalle der Vulkanite in der Regel nahezu mikroskopisch klein und mit bloßem Auge nicht zu erkennen. Sie weisen also eine dichte Struktur auf, in der sich nur kleine Kristalle entwickeln können (s. Bild 2-11) [KRZEMIEN 2002].

Die Ganggesteine, d. h. Gesteine, die in den Aufstiegswegen des Magmas zur Erdoberfläche erstarrt sind, bilden gemeinsam mit den Tiefengesteinen und den Ergussgesteinen die gesamte Gruppe der Magmatite oder Erstarrungsgesteine [PFEILER 2004]. Die am häufigsten vorkommenden Magmatite in Deutschland sind Granit, Gabbro als Plutonit, Diabas (Mikrogabbro), Mikrodiorit als Ganggestein

und Basalt und Rhyolith als Vulkanit. Eine Auswahl von Magmatiten mit deren Hauptbestandteilen ist im Bild 2-12 dargestellt.

Anhand des Bilds 2-12 lassen sich die verschiedenen temperaturabhängigen Kristallentwicklungen erkennen. Bei dem Granit haben sich der Feldspat (rosa und weiß), Quarz (grau) und der Glimmer (schwarz) zu einer dichten Struktur mit großen Mineralkristallen gebildet. Beim Rhyolith sind noch vereinzelt große Mineralkristalle (Feldspat) zu erkennen, die bei dem Basalt in der Regel nicht mehr vorkommen.

Unter dem Einfluss der Atmosphäre (Sauerstoff, Kohlensäure, Wasser u. a.) und verschiedener klimatologischer und mechanischer Faktoren erfahren die Gesteine an der Erdoberfläche eine Veränderung, die als Verwitterung bezeichnet wird [NEUMANN 1964]. Verwitterungsvorgänge zermahlen und zerkleinern die Gesteine und ermöglichen damit einen Transport (Erosion durch Wasser, Gletschereis oder Wind). Man unterscheidet dabei drei Arten der Verwitterung: die mechanische oder physikalische Verwitterung (klastische), die chemische und die biologische Verwitterung. Vorwiegend me-

chanisch zerkleinertes Gestein wird in Abhängigkeit von der Korngröße als Ton, Schluff, Sand, Kies oder Stein bezeichnet. Sie bilden die Gruppe der mechanischen Sedimente [EPPENSTEINER 1999]. Bei der chemischen Verwitterung werden unter bestimmten Bedingungen im Wasser lösliche Minerale ausgefällt und bilden die Gruppe der chemischen Sedimente [EPPENSTEINER 1999]. Ein anderer Teil der im Wasser gelösten Stoffe wird von pflanzlichen oder tierischen Organismen genutzt. Die zurückbleibenden anorganischen Materialien bilden meist mit eingeschwemmtem oder chemisch gefälltem Material die Gruppe der biogenen Sedimente. Die mechanischen, chemischen und biogenen Sedimente bilden zusammen die Gruppe der Ablagerungsgesteine [PFEILER 2005]. Erst durch Prozesse wie Entwässerung, Drucklösung und Zementation, die unter dem Begriff der Diagenese zusammengefasst werden, entstehen aus diesen drei Sedimenten Sedimentgesteine [ULRICH 2018]. Die in Deutschland am häufigsten vorkommenden Sedimente sind Grauwacke, Sandstein, Moräne als klastische Sedimente, Muschelkalkstein als biogenes Sediment sowie Kalkstein (z. B. Jurakalk) und Dolomit als chemische Sedimente (s. Bild 2-13).

Bei dem Prozess der metamorphen Gesteinsbildung kommt es zur Rekristallisation und Reaktion von Mineralen in festen Gesteinen bei hohen bis sehr hohen Temperaturen und meist bei erhöhtem bis sehr hohem Druck, wobei die Gesteine noch nicht schmelzen. Dabei bilden sich aus älteren magmatischen oder Sedimentgesteinen metamorphe Gesteine (Metamorphite). Es zeigt sich die Wirkungsweise der Metamorphose durch Strukturänderung, Umkristallisation oder durch Zu- und Abfuhr von Stoffen. Bei einseitiger Druckwirkung entsteht

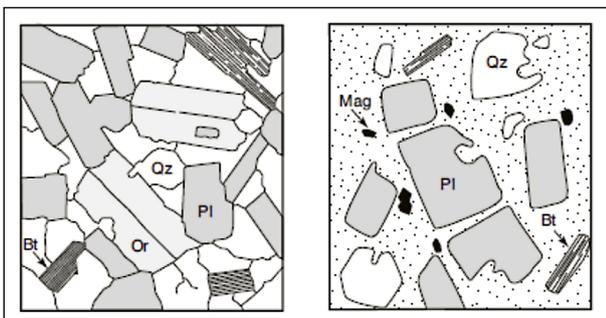


Bild 2-11: Textur eines plutonischen (links) und vulkanischen (rechts) Gesteins [MARKL 2015]

Plutonit		Ganggestein	Vulkanit
Granit	Gabbro	Diabas	Basalt
			
Hauptbestandteile			
Feldspat	Feldspat (Anteil 50%-90%)	Feldspat	Glas oder feinkörnige Matrix
Quarz	Augit	Chlorite	Feldspat
Glimmer	Glimmer	Serpentin	Augit
	Quarz (vereinzelt)		

Bild 2-12: Eine Auswahl an Magmatiten [MARKL 2015; ULRICH 2018]

Klastisches Sediment	Chemische Sediment	Biologisch Sediment
Grauwacke	Jurakalkstein	Muschelkalkgestein
		
Hauptbestandteile		
Quarz	Calcit entstanden durch Überschreiten des Löslichkeitsproduktes eines Minerals im Wasser.	Calcit bestehend aus z.B. Gehäuse-schalen oder Körpergewebe die in großen Mengen abgelagert und danach diagenetisch verfestigt sind.
Feldspat (geringer Anteil)		
Glimmer (geringer Anteil)		

Bild 2-13: Eine Auswahl an Sedimenten [MARKL 2015; ULRICH 2018]

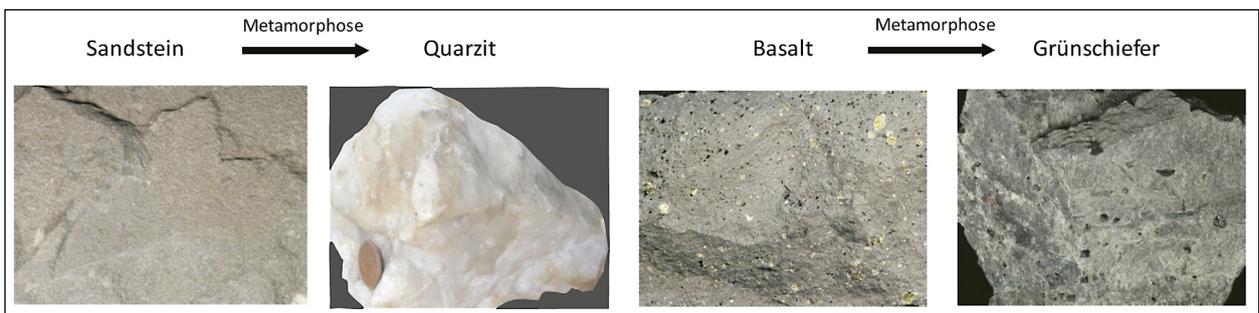


Bild 2-14: Eine Auswahl an Metamorphosen [MARKL 2015; ULRICH 2018]

die für viele metamorphe Gesteine typische Schieferung, wobei der Mineralbestand der Gesteine erhalten bleibt. Bei der Schieferung entstehen senkrecht zu der Druckrichtung blättrig ausgebildete Minerale und diese verleihen dem Gestein eine Richtung im Gesteinsgefüge [KRZEMIEN 2002]. Im Gegensatz zu dieser Strukturänderung führt eine Umkristallisation zu kompakten Gesteinen mit grobkörnigem Gefüge. Hierbei entstehen allerdings vielfach neue Minerale. Da es zu jedem Magmatit und Sedimentgestein mindestens ein metamorphes Gestein gibt, ist die Zahl der verschiedenen Metamorphite sehr groß. Je nach Ausgangsgestein unterscheidet man die aus Magmatiten hervorgegangenen Orthogneise und die aus Sedimenten entstandenen Paragneise [KRZEMIEN 2002; PFEILER 2005]. So entstehen in Abhängigkeit von der Zusammensetzung und den Druck-Temperatur-Bedingungen der Metamorphose z. B. aus Graniten Grandioriten, aus Rhyolithen Orthogneise oder helle Granulite, aus Gabbros und Basalten Grünschiefer, Blauschiefer, Amphibolite, dunkle Granulite oder Eklogite, aus Tonsteinen und Grauwacken Phyllite, Glimmerschiefer, Paragneise oder helle Granulite, aus Kalksteinen und Dolomiten Marmore, aus Quarzsandsteinen Quarzite (s. Bild 2-14). Metamorphite sind zu etwa einem Viertel am Bau der Erdkruste beteiligt [OKRUSCH und MATTHES 2014].

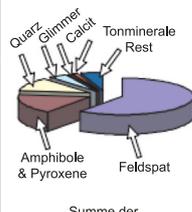
Mineralgruppe	Anteil an der Erdkruste	Diagnose	weitere Unterteilung
Feldspat	60 %	 weiß, rosa, fleischrot gut dreidimensional spaltbar	Kalifeldspat eher rötlich fleischfarben 
			Plagioklas eher weiß 
Pyroxene & Amphibole	17 %	 schwarz, dunkelbraun, dunkelgrün prismatisch	Pyroxen Spaltwinkel ca. 90° 
			Amphibol Spaltwinkel ca. 125° 
Quarz	13 %	 glasartig farblos, milchig, gefärbt muschliger Bruch, Härte 7 (ritz Glas)	z. B. Bergkristall farblos, klar 
			Milchquarz weiß 
			Amethyst violett 
Glimmer	4 %	 schuppig, blättrig spaltend	Biotit schwarz 
			Hellglimmer farblos, silbrig 
Tonminerale	1 %	 < 0,002 mm plastisch	
Calcit	1 %	 braust mit Salzsäure gut dreidimensional spaltbar Härte 3 (mit Messer ritzbar)	Summe der aufgeführten Minerale: 96 %

Bild 2-15: Wichtigste gesteinsbildende Minerale [SEBASTIAN 2018]

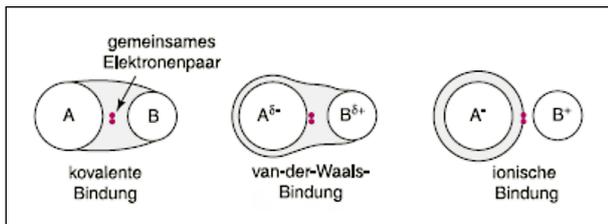


Bild 2-16: Bindungsarten bei Mineralien [MARKL 2015]

Die Eigenschaften der Magmatite, Sedimente oder Metamorphite werden von ihrer Kristallstruktur, die abhängig von ihrer mineralogischen Zusammensetzung ist, bestimmt. In Bild 2-15 sind die am häufigsten vorkommenden gesteinsbildenden Minerale aufgeführt.

Um die verschiedenen Eigenschaften eines Gesteins, beispielsweise des Feldspats, Quarzes, Glimmers oder der Kalzite zu verstehen, ist es notwendig, die Kristallstruktur von den Mineralen in atomarer Größe zu analysieren. Die Kristallstruktur der Minerale besteht aus Atomen bzw. Ionen, diese können in unterschiedlicher Weise miteinander verbunden sein. Die in den gesteinsbildenden Mineralien am häufigsten vorkommenden Bindungsarten sind die kovalente, ionische und van-der-Waals-Bindung (s. Bild 2-16). In der ionischen Bindung sind die Elektronen sehr deutlich den positiv geladenen Kationen und den negativ geladenen Anionen zugeordnet, deren elektrostatische Anziehungskräfte den Kristall zusammenhalten. In der kovalenten Bindung werden Atome durch gemeinsame Elektronenpaare zusammengehalten (s. Bild 2-16), während die sehr schwache van-der-Waals-Bindung lediglich auf kleinen Fluktuationen (Veränderungen) in der Ladungsverteilung benachbarter Atome beruht [MARKL 2015]. Somit lassen sich die Bindungen nach ihrer Bindungsstärke wie folgt einteilen:

- Die schwächste Bindung ist die van-der-Waals-Bindung.
- Die kovalente und ionische Bindung sind starke Bindungen, wobei die kovalente der ionischen Bindung überlegen ist.

Zusätzlich sind die Begriffe des Endglieds und des Mischkristalls in der Kristallchemie wichtig. Ein Endglied ist eine chemisch reine, meist in der Natur nicht vorkommende Verbindung, während Mischkristalle Mischungen verschiedener Endglieder sind. Mineralreaktionen werden meist mit Endgliedern formuliert, da das Rechnen mit realen, komplex zusammengesetzten Mineralen nur schwer zu brauchbaren Formulierungen für Reaktionsprozesse führt [Chemie Lexikon; MARKL 2015].

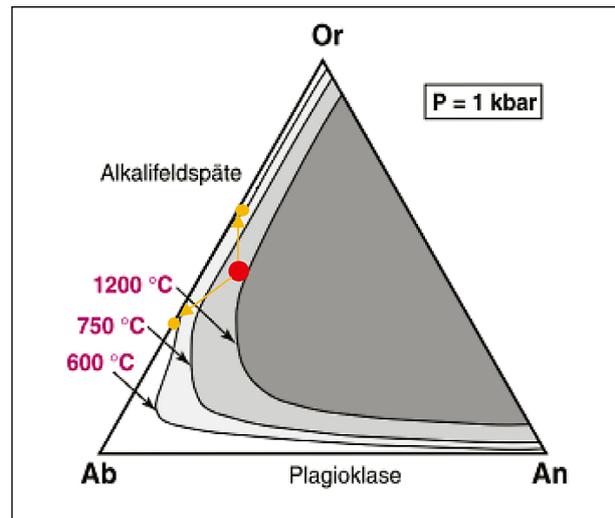


Bild 2-17: Ternäres Phasendiagramm von Feldspäten [MARKL 2015]

Feldspat:

Das am häufigsten vorkommende Mineral in der Erdkruste ist der Feldspat. Er besteht aus drei wichtigen Endgliedern: Anorthit (An), $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, Albit (Ab), $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ und K-Feldspat bzw. Orthoklas (Or), KAlSi_3O_8 . Die Kristallstrukturen der drei Bestandteile ähneln der des Quarzes. Dieser besteht aus Schichtenpaketen, die aus Tetraedern und Oktaedern gebildet wurden. (s. Bild 2-18). Diese Pakete haben eine kovalente Bindung, d. h. sie bilden eine stark zusammenhaltende Struktur, die sehr hart und robust gegenüber der Spaltung ist. Der Feldspat besteht, wie oben beschrieben, aus Mischkristallen aus An, Ab und Or und kann bei hohen Temperaturen nur außerhalb der sogenannten Mischungslücken entstehen. Die Mischungslücke beschreibt den von der Temperatur abhängigen Bereich, in dem keine Entstehung von Mischkristallen stattfinden kann. In Bild 2-17 ist dies durch die verschiedenen grauen Flächen gekennzeichnet. Die Mischungslücke wird bei sinkender Temperatur größer, wodurch z. B. ein Feldspat, der bei 1200 °C jeweils noch aus 50 % Or und Ab besteht (roter Punkt), sich entmischt und in seine zwei Komponenten Ab und Or getrennt wird (gelbe Punkte). Dieser Prozess wird auch Entmischung genannt [Chemie Lexikon; OKRUSCH et al. 2014].

Dadurch, dass die Endglieder des Feldspates eine starke Kristallstruktur (kovalente Bindung) vorweisen, besitzt dieser eine hohe Härte (Mohshärte 6). Die Mohshärte beschreibt in einer Ordinalskala einen relativen Härtewert eines Minerals von 1 bis 10, wobei 1 die Härte von Talk und 10 die Härte von Diamanten beschreibt (s. Tabelle 2-2). Das heißt, dass ein Mineral mit der Mohshärte von 2 nicht dop-

Mohs-Härte	Mineral	Mikrohärte (in kbar*)
1	Talk	1,4 ± 0,3
2	Gips	6,1 ± 1,5
3	Calcit	14,9 ± 1,1
4	Fluorit	20,0 ± 1,0
5	Apatit	54,3 ± 3,3
6	Orthoklas	68,7 ± 6,6
7	Quarz	122 ± 6
8	Topas	176 ± 10
9	Korund	196 ± 5
10	Diamant	1150

* 1 kbar = 0,1 GPa.

Tab. 2-2: Mikrohärte der Standardminerale der Mohs'schen Härteskala [OKRUSCH et al. 2014]

pelt so hart ist wie eines mit der Härte 1 [OKRUSCH et al. 2014].

Dadurch, dass der Feldspat aus verschiedenen Mineralien (Bestandteilen) besteht, die sich teilweise sogar entmischen, ist er vollkommen plattig spaltbar. Er ist meist weiß oder durch Mineraleinlagerungen braun oder schwarz gefärbt und besitzt eine Dichte von 2,6–2,7 g/cm³ [MARKL 2015, SEBASTIAN 2018].

Quarz:

Quarz (SiO₂) ist nicht wie der Glimmer oder der Feldspat ein Silikat, sondern ein Oxid, welches sich aber sehr gut mit der Silikatbauweise beschreiben lässt. Reines SiO₂ gibt es in der Natur in acht verschiedenen Mineralarten, die sich zwar durch gleiche Zusammensetzung, aber unterschiedliche Struktur auszeichnen und die auch in unterschiedlichen Kristallsystemen kristallisieren. Die verschiedenen Phasen (Mineralarten) heißen Modifikationen. Alle Modifikationen bestehen aus dreidimensional im Raum liegenden, spiralförmig angeordneten SiO₄-Tetraederketten (s. Bild 2-18) [MARKL 2015].

In Bild 2-18 sind drei der acht Modifikationen dargestellt, wobei der Tiefquarz die Modifikation ist, die in der Erdkruste primär vorhanden ist. Der Tiefquarz hat eine Kristallstruktur mit sehr starker kovalenter Bindung, die seine Härte (Mohshärte 7) bedingt. Tiefquarz ist nicht spaltbar. Quarz ist meist farblos, weiß oder grau und besitzt eine Dichte von 2,65 g/cm³ [OKRUSCH et al. 2014].

Glimmer:

Der Glimmer gehört zu der großen Abteilung der Schichtsilikate genauso wie Chlorit, Serpentin, Talk

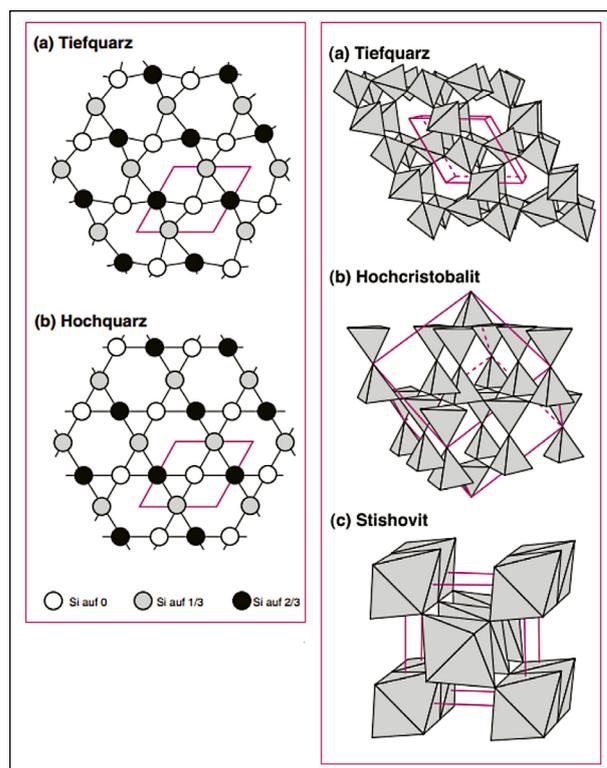


Bild 2-18: Kristallstruktur von Quarz [MARKL 2015]

und Pyrophyllit. Er kann aus verschiedenen Mineralienkombinationen bestehen, sodass es nicht eine für alle Glimmer gleiche Stoffgleichung gibt. Die allgemeine Gleichung ist: XY₃(Si,Al)₄O₁₀(OH,Cl,F)₂, wobei X für Kalium, Natrium oder Calcium und Y für Eisen, Magnesium, Aluminium, Lithium usw. steht. Eines der in den Klammern vorkommenden chemischen Elemente bilden je nach X-oder Y-Element die Stoffgleichung für den Glimmer. Trotz der unterschiedlichen chemischen Glimmersorten besteht jeder Glimmer aus einem Tetraeder und Oktaeder Schichtpaket (Ebene a und b) mit schwachen van-der-Waals'schen Wechselwirkungen zwischen den beiden Schichtpaketen (s. Bild 2-19 a). Dies ist der Grund dafür, dass meist schon mit dem Fingernagel Schichtsilikate in Blättchen zerlegt werden können. Ionen- oder kovalente Bindungen lassen sich mit dem Fingernagel im Normalfall nicht spalten. Entsprechend kann man die Blättchen zwar aus dem Verband lösen, aber nicht mit dem Fingernagel ritzen; in der a-b-Ebene wirken die weit stärkeren kovalenten Bindungen [MARKL 2015, OKRUSCH et al. 2014].

Dadurch, dass die verschiedenen Schichtpakete eine schwache Bindung besitzen, lässt sich der Glimmer gut blättrig spalten und besitzt eine Mohshärte von 2 bis 3, d. h. er ist weich bis mittel hart. Dadurch, dass Glimmer aus verschiedenen Ele-

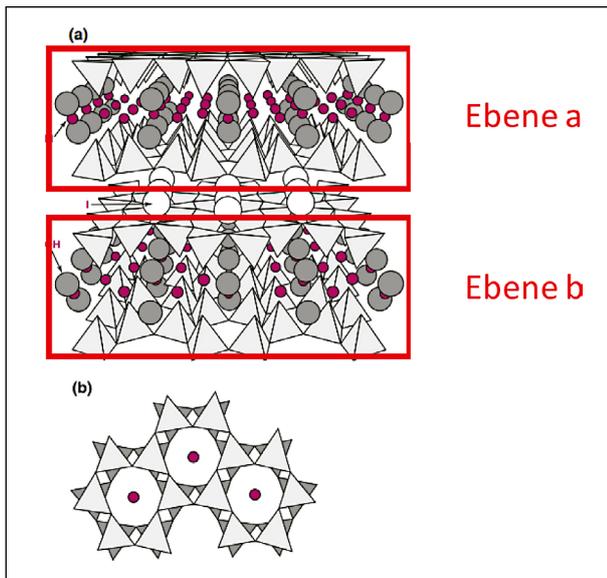


Bild 2-19: Kristallstruktur von Glimmer [MARKL 2015]

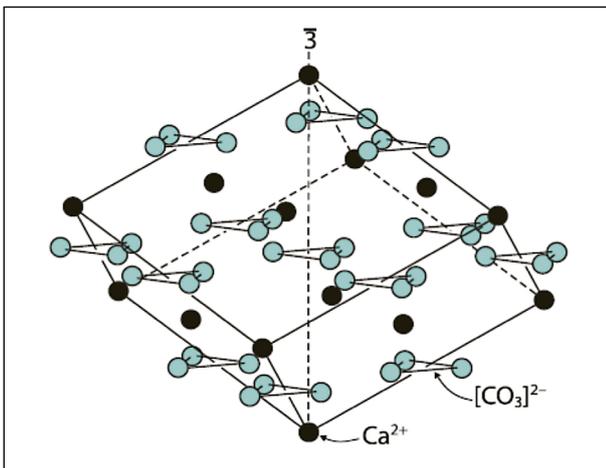


Bild 2-20: Kristallstruktur von Kalzit [OKRUSCH et al. 2014]

menten besteht, variiert seine Farbe von farblos-silbrig, weiß, gelblich, grün, rot, rotbraun, braun bis schwarz. Er lässt sich aber eindeutig an seinem Perlmuttglanz identifizieren [SEBASTIAN 2018].

Calcit:

Die vierte Mineralart, die primär im Kalkstein vorhanden ist, ist das Karbonat Calcit (CaCO_3). Die Kalzit-Struktur lässt sich nicht mit der silikatischen Kristallstruktur beschreiben, sondern ist als CaO-Struktur zu beschreiben (s. Bild 2-20).

Entsprechend der CaO-Struktur wird jedes Kalzium (Ca) oktaedrisch von 6 Sauerstoffatomen (O) umgeben. Die CO_3 -Komplexe sind planar ausgerichtet, wobei jeder Kohlenstoff (C) von 3 O in der Art eines gleichseitigen Dreiecks umschlossen wird. Die Bindungskraft zwischen Ca^{2+} und $(\text{CO}_3)^{2-}$ ist heteropolar, d. h. zwischen Ca^{2+} und $(\text{CO}_3)^{2-}$ findet

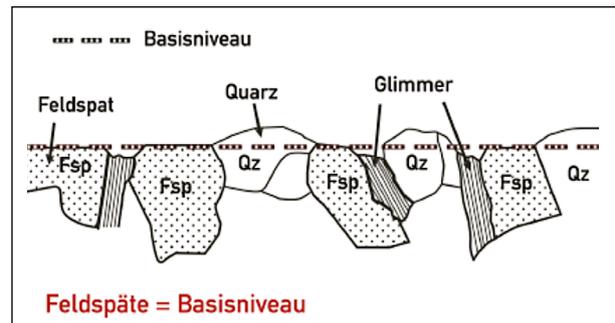


Bild 2-21: Schematische Darstellung der Versuchsoberfläche eines Granits [TOURENQ und FOURMAINTRAUX 1971]

eine ionische Bindung statt. Diese sind leichter aufzubrechen als die kovalenten Bindungen zwischen C und O. Es resultiert eine vorkommende Spaltbarkeit des Calcits sowie eine geringe Mohshärte von 3. Calcite verfügen über einen Perlmuttglanz und haben eine Dichte von $2,7 \text{ g/cm}^3$. Sie sind farblos, durch Verunreinigungen können sie auch in dem Farbtönen gelb, braun, schwarz, rosa, grün oder blau vorkommen [OKRUSCH et al. 2014, SEBASTIAN 2018].

2.4.2 Einfluss der mineralogischen Zusammensetzung von Gesteinen auf den Polierwiderstand

Den Zusammenhang zwischen der Mineralogie und dem Polierwiderstand zeigt RÖTHLISBERGER (2018) in seiner Forschung. Er überträgt das Konzept des Härtekontrastes auf den PSV-Wert, indem er den differentiellen Polierwiderstandskoeffizienten definiert. Der differentielle Polierwiderstandskoeffizient entspricht dem Unterschied zwischen dem Basisniveau und den Differenzen der mohrschen Ritzhärten der übrigen Mineralien. Dabei wird das Basisniveau als das Niveau, welches sich aus den häufigsten Mineralien gleicher Ritzhärte zusammensetzt, definiert. Somit kann dargelegt werden, dass ohne Härtekontrast nur geringfügige Unterschiede beim PSV-Wert auftreten und mit zunehmendem Härtekontrast der PSV-Wert ansteigt [RÖTHLISBERGER 2018].

Die Theorie des Härtekontrastes beruht auf der Forschung von [TOURENQ und FOURMAINTRAUX 1971], bei der die unterschiedlichen Gesteinsproben mit variierenden Poliermitteln auf einer Steinmetz-Drehbank und mit einer Schnellpoliermaschine poliert wurden. Danach wurde die Mikrotextur der polierten Flächen mit einem Rasterelektronenmikroskopie untersucht. Eine schematische Darstellung einer polierten Granitoberfläche ist in Bild 2-21 dargestellt [RÖTHLISBERGER 2018].

Mineralen-Paar	Höhe des Schleifunterschiedes [μm]	Härtekontrast (Cd)
Quarz - Glimmer	18 bis 26	1190
Quarz - Kalzit	16 bis 20	1170
Quarz - Feldspat	3 bis 6	560
Kalzit - Dolomit	1 bis 2	110

Tab. 2-3: Ausgewählte Beispiele von Härtekontrasten [TOURENQ und FOURMAINTRAUX 1971]

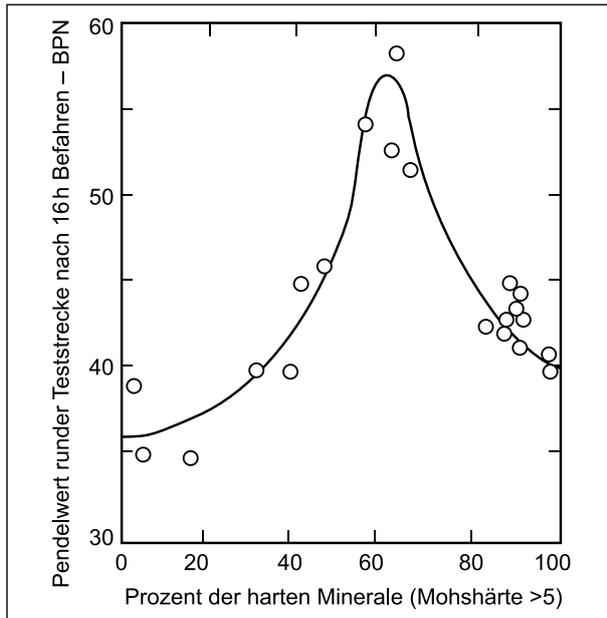


Bild 2-22: Anteil der härteren Minerale im Zusammenhang mit der Griffigkeit [MULLEN et al. 1974]

Die Feldspäte mit vergleichbarer Härte stellen eine Art Basisfläche oder Basisniveau bei der schematischen Darstellung des Granits dar. Die weicheren Glimmer sind stärker abgenutzt, die härteren Quarzkörner ragen heraus. Dieses Phänomen ist auch in der Forschung von DAMES und LINDNER (1989) in Anhang C niedergeschrieben, wo der Zusammenhang zwischen Rauheit und Reibung vor und nach dem Polieren ermittelt wurde [DAMES 1989]. Dieser Unterschied zwischen der Härte des häufigsten Minerals und der Härte der übrigen Mineralien beinhaltet das Konzept des Härtekontrastes.

Anhand des Härtekontrastes lassen sich Rückschlüsse auf die Mikrostruktur der Gesteine ziehen. Wie aus der Tabelle 2-3 zu entnehmen ist, entsteht bei einem Mineralenpaar mit einem deutlich höheren Härtekontrast auch eine tiefere Mikrostruktur.

[MULLEN et al. (1974)] untersuchte die Mineralogie der Gesteine unter Einbeziehung des Polierwiderstandes. Er fand heraus, dass für polierresistente Gesteinskörnungen ein optimaler Anteil an harten Mineralen existiert (vgl. Bild 2-22).

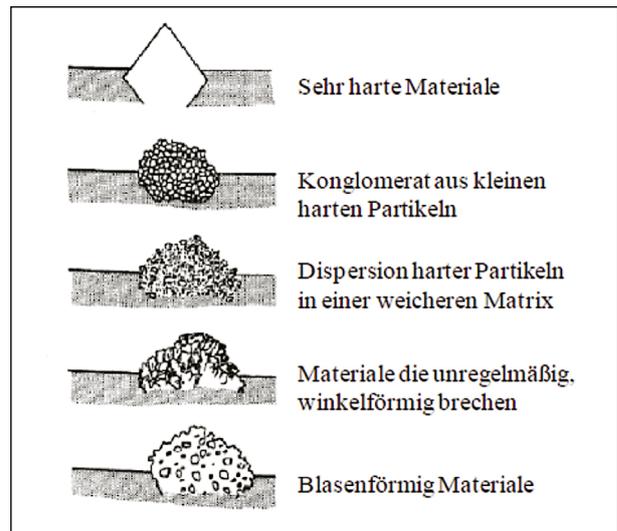


Bild 2-23: Konstruktion der Fahrbahntextur in Ebene der Mineralaggregate [DAHIR 1979]

Dass eine Gesteinsstruktur mit hohem Anteil harter Minerale eingebettet in weicher und poröser Matrix eine hohe Polierresistenz und Griffigkeit liefert, bestätigt auch DAHIR (1979). Er zeigt, dass ein Gesteinskorn aus kristallinen und kantigen Mineralen eines aus nicht-kristallinen und runden Mineralen bezüglich der Polierresistenz übertrifft. Er beweist zusätzlich, dass die Struktur mit harten Mineralen in einer weicheren Matrix ein Optimum für die Polierresistenz darstellt und charakterisiert die Mikrostruktur von Einzelkörnern eines Mineralstoffs gemäß Bild 2-23 [DAHIR 1979; YIN 2016].

Den Zusammenhang zwischen dem Härtegrad und der Polierresistenz der Mineralien untersucht KUGLER, indem er das Polierverhalten von Granit hinsichtlich seiner Mineralogie analysierte. Zudem ist er der Auffassung, dass die Nachbarschaft im Gesteinsverband einen großen Einfluss auf das Polierverhalten eines Minerals ausübt. Als Beispiel führt er auf, dass ein Quarz, der in seiner unmittelbaren Nachbarschaft Glimmer hat, ein anderes Polierverhalten aufweist als ein Quarz ohne Glimmer in seiner unmittelbaren Nachbarschaft. Deshalb ist eine Betrachtung von Mineralaggregaten, welche er als Gesamtverhalten der Mikrostruktur und dem Verhalten zwischen den einzelnen Mineralien definiert, wichtiger als die Betrachtung eines einzelnen Minerals. Des Weiteren folgert er, dass die polierresistenten Minerale langsamer erodiert werden als die weniger polierresistenten Minerale. Deswegen kann eine Oberfläche, welche polierresistente und weniger polierresistente Minerale besitzt, bei längerer Polierbeanspruchung wieder aufgeraut werden [KUGLER 2012].

Dass der Polierwiderstand von magmatischen Gesteinen durch die Variation der Härte und dem Anteil der weichen Minerale beeinflusst wird, untersuchte auch KNILL (1960). Aus seiner Arbeit geht hervor, dass die Kiesel sandsteine (inkl. Grauwacke und Sandstein) immer die höchste Polierresistenz (0,60 – 0,80) innehaben, gefolgt von Basalten (inkl. Diabas), Graniten und Quarziten mit mittelhohen (0,65) bis niedrigen (0,45 – 0,50) und schließlich den Kalksteinen und Feuersteinen mit den niedrigsten Polierresistenzen [KNILL 1960]. Der Unterschied zwischen der Polierresistenz von Kiesel sandsteinen (Sedimentgesteine) und magmatischer Gesteine lässt sich dadurch erklären, dass die unterschiedlich harten und weichen Mineralien im magmatischen Gestein fest verbunden sind.

Auch in dem Abschlussbericht der Hochschule Dresden stellt sich die Reihung hinsichtlich des Polierwiderstandes der Gesteinsarten Grauwacke, Rhyolith, Diabas ein und spiegelt den unterschiedlich stark auftretenden Selbstschärfungseffekt der Gesteine wider. Dabei werden beim Abrieb der Grauwacke stets neue Quarzsplinter freigelegt. Der scharfkantige Quarz im Gesteinsgerüst sorgt nicht nur für eine hohe Anfangsgriffigkeit, sondern auch für eine hohe Gebrauchsgriffigkeit. Ein ähnliches Verhalten weist auch der Rhyolith auf [RAUSCHENBACH und BOREK 2010].

Zusätzlich zu den in diesem Kapitel genannten Eigenschaften werden im Merkblatt für den Bau griffiger Asphaltdeckschichten (M BgA) für die Auswahl polierresistenter Gesteinskörnungen folgende Hinweise hinsichtlich der petrografischen Eigenschaften gegeben [M BgA 2004]:

- Kristalle mit richtungslos sperriger Textur führen zu hoher Polierresistenz im Vergleich zu Gesteinen mit flächenhaft paralleler Textur.
- Ein hoher Anteil an kristalliner (Kristallgröße 0,01–01 mm) Struktur im mikrokristallinen Bereich ist förderlich für die Polierresistenz.
- Gesteine mit harten und geringfügig spaltbaren Mineralen besitzen einen wirksamen Widerstand gegen die Einebnung der ursprünglichen Bruchfläche.
- Bei feiner Gesteinskörnung nimmt die Kantenschärfe von Sanden mit quarzitischem Ursprung über silikatischem bis zu karbonatischem Ursprung ab. Dabei ist es nachrangig, ob es Brech- oder Natursand ist.

2.4.3 Mineralogischer Einfluss auf das Griffigkeitsverhalten

Eine Straßenoberfläche besteht meistens nicht nur aus einer Gesteinsart und gleicher Gesteinsgröße, sondern aus einem Splitt- und Sandanteil, welcher sich jeweils mineralogisch unterscheiden kann. Der unterschiedliche Einfluss des Polierwiderstandes der Splitte und Sande in einer Deckschicht auf die Griffigkeit stellte WIEHLER (1995) in seiner Forschungsarbeit dar. Als Resümee dieser Forschungsarbeit lässt sich zusammenfassen, dass Gesteine wie Quarzporphyr, Diorit, Diabas und Grauwacke (mit einem hohen Polierwiderstand) bevorzugt im Splittbereich zu verwenden sind. Basalte und Kalksteine sind als grobes Splittkorn wegen ihrer geringen Polierresistenz, weniger geeignet [WIEHLER 1995]. Nach DAMES et al. (1989) kann aber der Basalt als Brechsand mit hoher Kantenschärfe und hohem Polierwiderstand sehr wohl für eine griffige Deckschicht geeignet sein, da mit abnehmender Korngröße der Anteil der flächenhaften Schärfe ab- und der Anteil der Kantenschärfe zunimmt [DAMES 1989].

Auch HUSCHEK und DAMES untersuchten das Griffigkeitsverhalten von 6 verschiedenen Gesteinsarten (Grauwacke, Kiessplitt, Diabas, Basalt und Dolomit), sowohl im Bereich Sand als auch im Bereich Splitt, in Asphaltbeton- und Splittmastixdeckschichten. Als Ergebnis zeigte sich, dass sich polierresistente Mineralstoffe (wie z. B. Grauwacke) positiv auf das Griffigkeitsverhalten der Deckschicht auswirken. Zudem beeinflussen feine Gesteinskörnungen die Griffigkeitsentwicklung bei einem Asphaltbeton stärker als der Splitt mit einer Korngröße größer 8 mm. Wie auch schon bei der Versuchsstrecke Rottweiler konnte ein signifikant negativerer Einfluss von polierarmem Sand auf das Griffigkeitsverhalten festgestellt werden [DAMES et al. 1997].

Auch WÖRNER (2006) kam zur Erkenntnis, dass unabhängig von dem PSV-Wert der Splitte, durch geeignete Wahl der Sande, die Griffigkeit auf einer sandreichen Asphalt oberfläche (AB) verändert werden kann. Außerdem zeigte sich, dass der Calcit- und Quarz-Gehalt der Sande deutlicher die Griffigkeit prägen als der Calcit- und Quarz-Gehalt der Splitte. Ein Anstieg des Polierwiderstandes konnte bei Gesteinen festgestellt werden, bei denen weniger Calcit und mehr Quarz enthalten ist [WÖRNER et al. 2006].

LITZKA und PFEILER bauten auch auf der Arbeit von HUSCHEK und DARMES auf und bestimmten von 30 Sandarten den PWS-Wert und wählten für die Herstellung von Asphaltbeton- und SMA-Mischgut polierarme und polierresistente Sande aus. Damit stützten sie die Ergebnisse von HUSCHEK und DAMES und konnten zudem feststellen, dass Hartgesteine wie Diabas, Granit oder Basalt vergleichsweise hohe und karbonatische Gesteine wie Kalkstein und Dolomit geringe Polierwerte erzeugen [LITZKA et al. 2003].

Durch das Ersetzen eines polierfreudigen Sandes durch einen polierresistenten Sand kann die Langzeitentwicklung der Griffigkeit von Asphaltbetondeckschichten wesentlich verändert werden. Durch den Ersatz von 34 % Kalksand durch einen Sand aus LD-Schlacke mit einem um ca. 60 % höheren Polierwert lässt sich die Langzeitentwicklung des Griffigkeitsniveaus um 23 % steigern. Damit unterstreicht KIRCHMEIER die Untersuchung von HUSCHEK und DAMES hinsichtlich des Einflusses des Sandes auf die Griffigkeit bei Asphaltbetonen [KIRCHMAIER 2011].

2.4.4 Einfluss der Asphaltkonzeption auf das Griffigkeitsniveau einer Asphaltoberfläche

In den 80er-Jahren war DAMES einer der Ersten, der den Einfluss der Polierresistenz der Gesteine auf die Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche in Feldversuchen untersuchte. Anhand von Griffigkeitsmessungen eines Asphaltbetons auf der Versuchsstrecke Rottweiler und im Labor kann festgestellt werden, dass die Anfangsgriffigkeit von dem im Asphaltmörtel befindlichen Sand maßgeblich bestimmt wird. Nach weiterer Belastung durch den Verkehr gewinnt der Splitt zunehmend an Bedeutung für die Griffigkeitsentwicklung auf der Straße. Somit müssen sowohl der Sand als auch der Splitt stark polierresistent sein, um eine ausreichende Griffigkeit zu erzeugen. Nach [DAMES et al. 1986] führt zudem ein hoher Brechsandanteil (50 bis 80 %) zu einer höheren Anfangs- und Dauergriffigkeit als ein hoher Natursandanteil. Außerdem zeigt sich, dass bei den Untersuchungen hinsichtlich der Polierresistenz der Sande die Griffigkeitsprüfung in situ und im Labor korrelieren und somit vergleichbar sind. Zusätzlich stellt DAMES fest, dass Sand mit niedrigem Polierwert das Griffigkeitsniveau eines Asphaltbetons deutlich ungünstiger beeinflusst. Ausgehend von den Ergebnissen der Versuchsstrecke Rottweiler

empfiehlt DAMES für eine ausreichende Anfangsgriffigkeit eine Makrorauheit von mindestens 0,5 mm und einen minimalen Holraumgehalt von 2 Vol.-% [DAMES et al. 1986; DAMES 1987].

PFEILER geht in seiner Arbeit weiter und betrachtet die Kornfraktionen 0/2 mm und 2/4 mm separat. Er untersucht so den Einfluss der Polierresistenz dieser Klassen auf die Griffigkeit von Asphaltbetonen und SMA. Dabei stellt er fest, dass der größte Einfluss zur Erhöhung der Griffigkeit bei Verwendung eines polierresistenten Sandes in der Kornklasse 0/2 mm erreicht wird und dass der Einfluss der Kornklasse 2/4 mm auf das Griffigkeitsverhalten vergleichsweise gering, jedoch vorhanden ist [PFEILER 2004].

Zusätzlich zum Einfluss der feinen Gesteinskörnung auf die Griffigkeit von Asphaltdeckschichten erforscht DAMES den Einfluss des Größtkorns. Diese Forschungsarbeit weist aus, dass bei Deckschichten mit kleinem Größtkorn höhere Griffigkeiten auf der Straßenoberfläche zu beobachten sind als auf Deckschichten mit größeren Größtkorn. Dies ist in der größeren Anzahl an Kontaktpunkten bei kleinerem Größtkorn begründet. Zudem verschiebt sich mit kleiner werdendem Korn der Anteil von Flächenschärfe zur Kantenschärfe, womit sich auch die Reibungsverhältnisse ändern: Während bei grobkörnigen Oberflächen die Rauheit der Bruchflächen an einzelnen Körnern die Reibungsverhältnisse maßgebend beeinflusst, ist bei feinkörnigen Oberflächen die Kantenschärfe des Einzelkorns bestimmend [SCHULZE 1970]. Somit sind je nach Deckschichtart besondere Anforderungen an die Polierresistenz (Polierwiderstand) von Sanden und/oder Splitten zu stellen.

Zum selben Schluss kommt HUSCHEK bei seinen Untersuchungen an der Teststrecke bei Bamberg. HUSCHEK erklärt die Abhängigkeit von Griffigkeit und Größtkorn, indem er die Abnutzung der Gesteinskörner von einem Splittmastix- (SMA) und einer Asphaltbetondeckschicht (AB) miteinander vergleicht. Aus dem geringeren Sandanteile des SMA resultiert eine geringere Kontaktfläche zwischen tiefen und Fahrbahnoberfläche. Dies bedeutet wiederum, dass eine höhere Belastung durch den Verkehr auf das Gestein wirkt und dieses somit schneller abgenutzt wird. Durch den geringeren Anteil an Sand hat beim SMA der Splitt einen bedeutenderen Einfluss auf die Griffigkeit der Straßenoberfläche als der Sand. In dieser Untersuchung kann außerdem eine Korrelation zwischen den Laborversu-

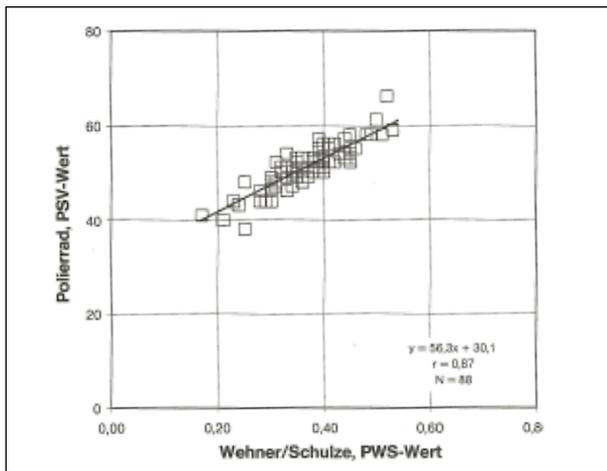


Bild 2-24: Vergleich Prüfergebnisse an Splitt 8/11 mm der beiden Verfahren PSV und PWS [HUSCHEK 2004]

chen PWS und PSV nachgewiesen werden [HUSCHEK 2004; HUSCHEK 2002].

Dass bei den Asphaltbelägen eine deutliche Abhängigkeit der Griffigkeit von der Textur festzustellen ist, zeigt ROHLEDER 2010, indem er das Griffigkeitsverhalten von offenporigem Asphalt (OPA) mit dem von SMA und Asphaltbetonen vergleicht. Er legt dar, dass die Asphaltbeläge mit einem hohen Mörtelanteil wie Gussasphalt oder dichter Asphaltbeton, die dem Reifen eine größere Berührungsfläche bieten, im Gegensatz zu den offenporigen Belägen wie OPA, bei denen der Reifen vornehmlich über die Flächen des Größtkorns abrollt und somit die Berührungsflächen geringer sind, einen um ca. 10 % höheren Reibungskoeffizienten aufweisen. Er unterstreicht zudem, dass eine Prognose der Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen mit dem Prüfverfahren nach WEHNER/SCHULZE grundsätzlich möglich ist und das Griffigkeitspotenzial aufgezeigt werden kann. Die Griffigkeitsentwicklung ist jedoch nur bedingt vergleichbar mit dem Verhalten in situ [ROHLEDER 2010].

Das schweizerische Forschungsprojekt „Zusammenhang Textur und Griffigkeit von Fahrbahnen und Einflüsse auf die Lärmemission“ untermauert mit seiner Forschung die Erkenntnisse von ROHLEDER. Durch den Vergleich der Entwicklung der Texturtiefe und der Griffigkeit der Asphaltbeläge zeigt sich, dass die dichteren Beläge (MA, AC, SMA) mit zunehmender Texturprofilltiefe (durch z. B. Kornausbrüche) an Griffigkeit zunehmen. Im Gegensatz dazu nimmt beim OPA bei zunehmender Texturprofilltiefe die Griffigkeit ab [LINDENMANN 2014].

Die Griffigkeitseigenschaften von Gussasphalt in Abhängigkeit der Gesteinskörnung untersucht

BÖHM in seiner Arbeit. Er legte dar, dass für die Nutzungszeit (bei Autobahnen ca. 19 Jahre) das Abstreumaterial, welches nach der Fertigung der Gussasphaltschicht aufgetragen wird, zum größten Teil noch in der Asphaltoberfläche vorhanden ist. Somit sind die Eigenschaften des Abstreumaterials primär für die Griffigkeit bei Gussasphaltdeckschichten verantwortlich. Da Gussasphalt eine hohe Dauerhaftigkeit aufweist, können die Liegezeiten der Schicht weit länger als 19 Jahre betragen. Nach BÖHM verbleibt bei Strecken mit sehr langen Nutzungsdauern (> 20 Jahre) das Abstreumaterial nicht über die gesamte Nutzungsdauer an der Oberfläche der Deckschicht, sodass die Gesteinskörnungen im Gussasphaltnischgut nach einer längeren Nutzungsdauer für die Oberflächeneigenschaften mitverantwortlich für die Griffigkeit sind. Dies bedeutet, dass zur Sicherstellung einer sehr langen Nutzungsdauer (> 20 Jahre) auch im Gussasphaltnischgut hochwertige Gesteinskörnungen mit hohem Polierwiderstand und helle Gesteinskörnungen verwendet werden müssen [BÖHM 2018].

Als weiteren Einflussfaktor auf die Griffigkeit von Deckschichten untersucht WÖRNER den Einfluss der Kornform und der Kornfestigkeit auf den Polierwiderstand. Ein Zusammenhang zwischen Kornfestigkeit und Polierwiderstand kann nicht festgestellt werden. Als Parameter für die Kornform wird der Fließkoeffizient herangezogen. Es zeigt sich, dass bei höheren Fließkoeffizienten auch ein Anstieg des PSV_{Sand} zu verzeichnen ist. Dies ist bei Gestein mit reinem Mineralbestand aus Quarzit und Kalzit nicht zu erkennen, obwohl vergleichbare Oberflächenausprägungen zu erkennen sind [WÖRNER et al. 2006].

2.5 Messverfahren zur Bestimmung der Textur, der Griffigkeit, Polierwiderstand und Mineralogie

In diesem Kapitel werden die aktuellen Messtechniken für die mineralogische/petrografische Bestimmung der Gesteine, Textur- und Griffigkeitsmessungen näher beschrieben. Im Fokus stehen dabei die Messtechniken, die für die Bearbeitung dieser Arbeit benötigt werden.

2.5.1 Mineralogische Untersuchungsmethoden

Rasterelektronenmikroskop (REM):

Mithilfe des Rasterelektronenmikroskops (REM) werden die chemische Zusammensetzung, Topo-

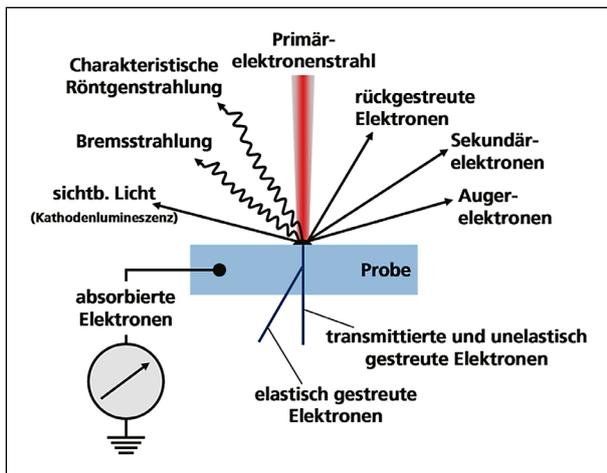


Bild 2-25: Wechselwirkung des Elektronenstrahls mit der Probe [BLECK, 1993]

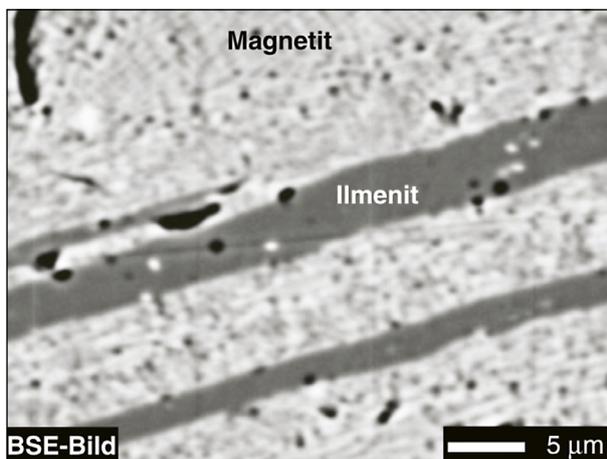


Bild 2-26: Der Unterschied von SE- und BSE-Abbildungen am Beispiel von Entmischungslamellen von Magnetit und Ilmenit in einem Fe-Ti-Oxidkorn [MARKL 2015]

grafie und Mikrostruktur eines Gesteins bestimmt. Dabei wird ein Probekörper im Vakuum mit einem Primärelektronenstrahl beschossen (vgl. Bild 2-25). Im Vergleich zu einem herkömmlichen Auflichtmikroskop ist der Vorteil des Rasterelektronenmikroskops das hohe Auflösungsvermögen bis zu 200.000-facher Vergrößerung und seine hohe Tiefenschärfe [BLECK 1993].

Es werden zum einen die von der Probe zurückgestreuten Elektronen (BSE: back-scattered electrons) und zum anderen die von der Probe selbst ausgesandten Sekundärelektronen (SE) mit einem Siliziumdetektor aufgefangen. Die entstehende Röntgenstrahlung wird nicht registriert [BLECK 1993]. Die ausgesandten niederenergetischen Sekundärelektronen (SE) des Probekörpers, welche durch den Primärelektronenstrahl angeregt wurden, ergeben sich aus den obersten Nanometern. Mithilfe dieser wird die Topografie der Oberfläche des Probekörpers abgebildet. Der Materialkontrast

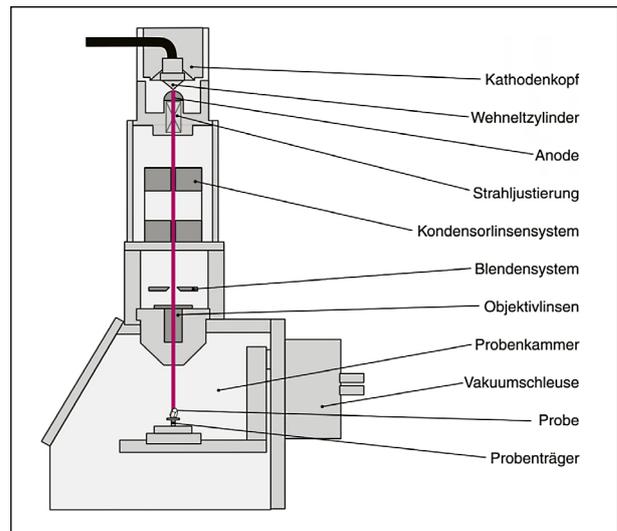


Bild 2-27: Schemazeichnung eines Rasterelektronenmikroskops [MARKL 2015]

(BSE-Kontrast) entsteht durch die zurückgestreuten, hochenergetischen Elektronen (vgl. Bild 2-26).

Bild 2-26 zeigt das BSE-Bild mit seinen verschiedenen hellen und dunklen Bereichen innerhalb eines Gesteins. So ist zu erkennen, dass Elemente mit einer hohen Ordnungszahl zu einer starken Rückstreuung führen und diese Bereiche folglich heller erscheinen (Magnetit). Im Falle des Ilmenit, mit einer kleinen Ordnungszahl, ist die Rückstreuungsinintensität geringer, weswegen diese Bereiche im BSE-Bild deutlich dunkler dargestellt werden. Somit ist es möglich, Rückschlüsse über die chemische Zusammensetzung der Oberfläche des Probekörpers zu erhalten und die Verteilung verschiedener Elemente zu erkennen [MARKL 2015].

In der Skizze (Bild 2-27) ist der schematische Aufbau eines Rasterelektronenmikroskops dargestellt. Durch Anlegen einer Heizspannung emittiert die Kathode thermische Elektronen, welche durch eine Spannung von 1 bis 50 kV zur Anode beschleunigt werden. Mithilfe des Wehnelt-Zylinders werden die Elektronen gebündelt.

Mittels Blenden und elektromagnetischen Linsen wird der Strahl auf wenige Nanometer verringert und anschließend auf die Probekörperoberfläche gerichtet. Zwischen den einfallenden Elektronen und der Probe entstehen Wechselwirkungen, dies bedingt, dass Signale unterschiedlicher Intensitäten emittiert werden. Der Elektronenstrahl tastet den Probekörper in einem festgelegtem Raster ab, so dass als Resultat ein vergrößertes Bild der Oberfläche auf einem Bildschirm erstellt werden kann [BLECK 1993]

Röntgenfeinstrukturanalyse (XRD):

XRD steht für den englischen Ausdruck „X-ray diffraction“ und bezeichnet die Röntgendiffraktometeranalyse, welche auf dem Prinzip der Reflexion und Beugung von Röntgenstrahlung an Kristallgittern beruht. Mithilfe der Röntgenstrahlen ist es möglich, die Gitterstruktur eines Gesteins zu analysieren. In den Netzebenen der Kristalle werden die Röntgenstrahlen gebeugt (Reflexion) und zurückgeworfen (Reflexion). Der Einfallswinkel ist hier, wie bei sichtbarem Licht, gleich dem Ausfallswinkel. Hingegen ist die Reflexion, im Gegensatz zu sichtbarem Licht, bei Röntgenstrahlen nur bei bestimmten Winkeln vorhanden. Bild 2-28 stellt dar, wie der Winkel θ vom Abstand d der Netzebenen und von der Wellenlänge λ abhängt. Die in der Bild 2-28 gezeigte Bragg'sche Gleichung (n ist eine ganze Zahl) beschreibt diesen Zusammenhang.

Es ist somit möglich, die Reflexionen eines beliebigen Kristalls im Röntgenstrahl zu messen und damit auf die Netzebenen zu schließen. Mithilfe von Zählrohren oder Filmen erfolgt der Nachweis der reflektierten Röntgenstrahlen. Untersucht man einen Kristall in allen Raumrichtungen, so wird dieser durch die zufällige Anordnung der vielen Körnchen alle Bragg-Bedingungen nach statistischer Wahr-

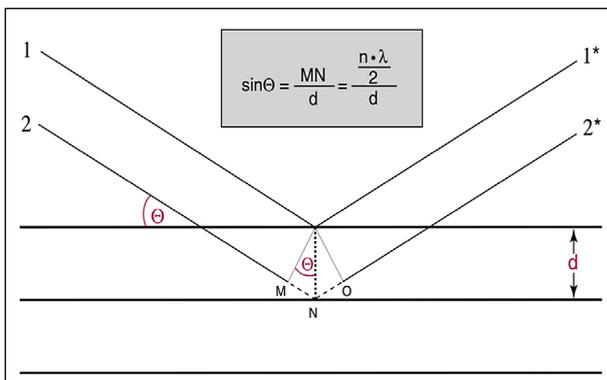


Bild 2-28: Die Braggbedingung für die Reflexion von Röntgenstrahlen an Netzebenen eines Kristalls [MARKL 2015]

scheinlichkeit erfüllen (s. Bild 2-29). Damit lassen sich alle Netzebenenabstände messen und folglich die Kristallstruktur bestimmen.

Die Netzebenenabstände aller Minerale sind absolut charakteristisch und von der International Mineralogical Association (IMA) anerkannt und dokumentiert. Die Röntgendiffraktometrie ist ein häufig angewandtes Verfahren, um Minerale in einem Gestein zu bestimmen [MARKL 2015].

2.5.2 Messung des Polierwiderstandes

Die Polierresistenz der groben bzw. feinen Gesteinskörnungen kann im Labor mit dem kombinierten Verfahren der Schnellpoliermaschine und dem SRT-Pendel oder mit Prüfverfahren nach WEHNER/SCHULZE (PWS) ermittelt werden.

Kombinierte Verfahren zur Bestimmung des PSV-Wertes:

Das seit vielen Jahren erprobte und etablierte Verfahren zur Bewertung der Polierresistenz von Gesteinskörnungen ist das Verfahren zur Bestimmung des PSV-Wertes (PSV = Polished Stone Value) nach EN 1097-8. Der PSV ist ein Maß für die Widerstandsfähigkeit eines Mineralstoffes gegen die polierende Wirkung von Gummireifen unter im Labor simulierten Bedingungen, wie sie auf der Straße vorherrschen [ZIEGER 1990]. Zur Bestimmung der Polierresistenz von Gesteinskörnungen werden zwei separate Prüfschritte mit zwei unterschiedlichen Prüfgeräten, Schnellpoliermaschine und SRT-Pendel, durchgeführt (s. Bild 2-30).

Für die Simulation der Polierwirkung von Fahrzeugreifen mit der Schnellpoliermaschine werden Probekörper aus der Prüfkornklasse 7,2/10 mm hergestellt, welche aus einer Splittprobe der Korngruppe 8/11 mm mittels Analysen- und Schlitzsieb ausge- siewt und gewaschen wurden. Von der aufbereite-

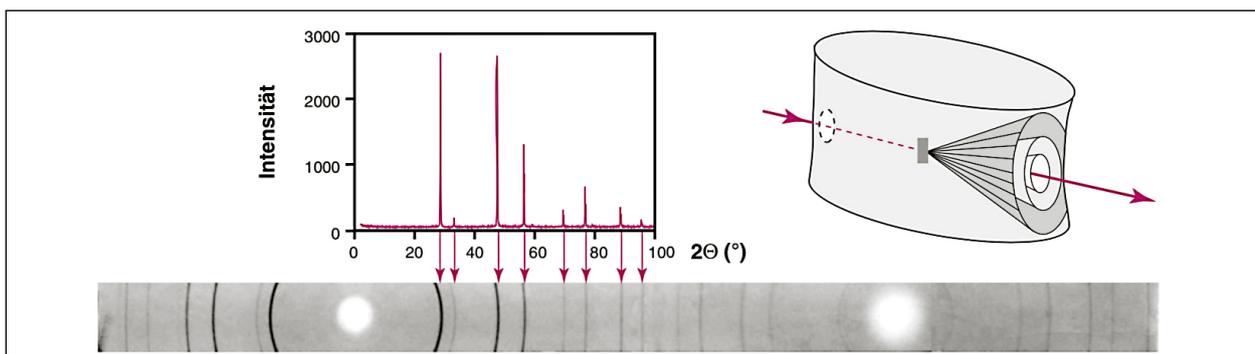


Bild 2-29: Vergleich eines digital aufgenommenen Pulver-Diffraktogramms mit einer Debye-Scherrer-Filmaufnahme [MARKL 2015]

ten und getrockneten Splittprobe 7,2/10 mm werden dann jeweils zwischen 36 und 46 Gesteinskörner mit ihrer ebenen Oberfläche so dicht wie möglich in eine Form gelegt. Die Form wird, nachdem die Hohlräume mit feinem Sand (0,2/0,4 mm) ausgefüllt wurden, mit einem 2-Komponenten-Epoxidharz gefüllt. Um eine ebene Oberfläche zu generieren, wird eine Metallabdeckung auf die Form aufgesetzt. Der ausgehärtete Probekörper wird mit einer Bürste vom Sand befreit und darf anschließend keine Klebstoffrückstände auf den Gesteinsoberflächen aufweisen. Gemäß Norm werden je Laborprobe vier Probekörper hergestellt.

Auf das sogenannte Prüfrad werden je zu untersuchender Probe zwei Probekörper sowie zwei Probekörper eines Kontrollgesteins angeordnet. Unter Zugabe eines Poliermittels (Grob- und Feinkorund) erfolgt eine polierende Beanspruchung der Probekörper. Dabei dreht sich das Prüfrad während der Versuchsdurchführung mit einer Umdrehungsgeschwindigkeit von 320 U/min während ein Vollgummireifen während der Poliersimulation mit einer Anpresskraft von (725 ± 10) N gegen die Prüfkörper gepresst wird. Der dabei entstehende Kontaktdruck beträgt ca. $1,2 \text{ N/mm}^2$.

Die Bestimmung des PSV-Wertes einer Gesteinskörnung erfolgt im Anschluss an das Polieren mittels des SRT-Pendelgeräts. Die mit ihrer konvexen Oberfläche nach oben gerichteten Probekörper werden während der Pendelprüfung von einem an einem Pendel montierten Gleitkörper überstrichen. Das Messprinzip des SRT-Pendels wird im Kapitel „Messung der Textur“ näher beschrieben. Für die Berechnung des PSV-Wertes wird der Mittelwert der letzten drei Pendelwerte der Einzelmessproben einer Gesteinskörnung sowie der Mittelwert der Ein-

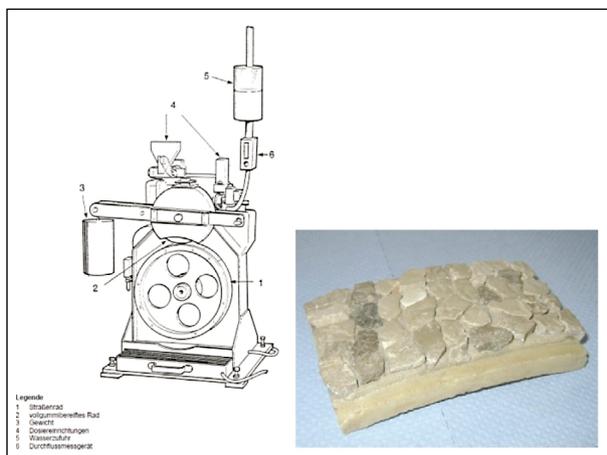


Bild 2-30: Schnellpoliermaschine (links, EN 1097-8), Probekörper (rechts)

zelmessproben des Kontrollgesteins aus jedem Prüfdurchlauf berechnet.

Das kombinierte Prüfverfahren ist zweifach durchzuführen, um eine statistische Sicherheit zu gewährleisten. Somit errechnet sich der PSV-Wert ganzzahlig gerundet wie folgt [TP Gestein-StB: Teil 5.4.1 2015]:

$$\text{PSV} = S + 56 - C \quad (2)$$

S = Mittelwert aus den vier Einzelmessproben einer Gesteinskörnung

C = Mittelwert aus den vier PSV-Kontrollgesteinsprobekörpern

2.5.3 Messung der Griffigkeit

Die Griffigkeitsmessung an Asphaltoberflächen kann im Labor mit Prüfverfahren nach WEHNER/SCHULZE (PWS) ermittelt werden.

WEHNER/SCHULZE Verfahren:

Die Prüfanlage nach WEHNER/SCHULZE dient der Bestimmung und Prognose der Griffigkeitseigenschaften von Straßenoberflächen und des Polierwiderstandes von Gesteinskörnungen. Sie besteht im Wesentlichen aus zwei Bauteilen: Der Poliereinheit und der Griffigkeitsmessstation, welche in [DIN EN 12697-49] und [TP Asphalt-StB: Teil 49 2019] genauer beschrieben sind (s. Bild 2-31). Zusätzlich sind ein Behälter für das Quarzmehl-Wasser-Gemisch inklusive einer Förderpumpe sowie ein Druckluftkompressor notwendig [KIRCHMEIER 2011].

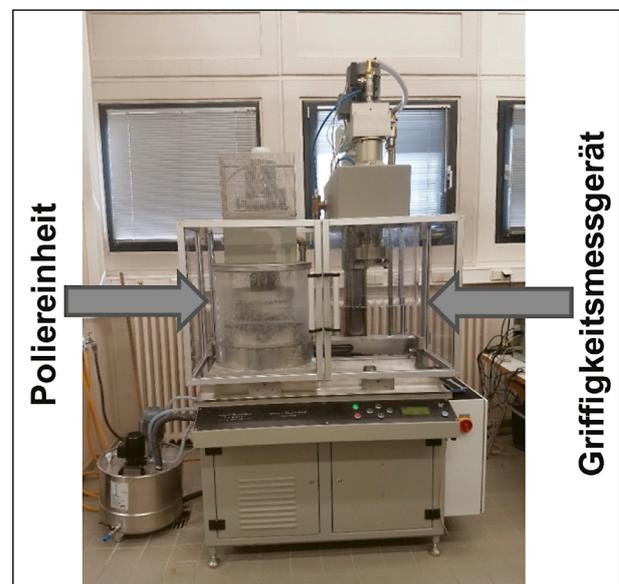


Bild 2-31: WEHNER/SCHULZE Prüfgerät

Die Poliereinheit besteht aus einem maschinenbetriebenen Polierkopf mit drei Polierrollen (s. Bild 2-32), der auf die Probenfläche abgesenkt werden kann. Die Auflast des Polierkopfes auf die Prüfkörperoberfläche beträgt ca. 392 N. Der Spitzenkontaktdruck liegt zwischen 0,6 und 0,7 N/mm² und entspricht somit dem mittleren Spitzenkontaktdruck von einem Lkw-Reifen [KIRCHMAIER 2007]. Die Drehzahl des Polierkopfes lässt sich stufenlos zwischen 0 und 1000 U/min einstellen. Gemäß TP Asphalt StB: Teil 49 ist eine Drehzahl von 500 U/min zu wählen. Die Polierbeanspruchung der Probenoberflächen erfolgt unter Zugabe eines Wasser-Quarzmehl-Gemisches.

Als Poliermittel ist ein Quarzmehl zu verwenden. Es ist eine Wasser-Quarzmehl-Suspension mit einem Mischungsverhältnis von 40:2,4 herzustellen; d. h. 1 Liter Wasser sind 60 g Quarzmehl zuzugeben. Die Zufuhrate des Wasser-Quarzmehl-Gemisches beträgt gemäß TP Asphalt-StB (5 ± 0,5) Liter pro Minute. Eine konstante Zufuhr des Wasser-Quarzmehl-Gemisches wird durch eine regelbare Pumpe gewährleistet [KIRCHMEIER 2011].

Das Griffigkeitsmessgerät besteht aus einem kupelbaren, maschinenbetriebenen Messkopf, der mit drei Prüfummis bestückt ist (s. Bild 2-33).



Bild 2-32: Poliereinheit PWS



Bild 2-33: Griffigkeitsmessgerät PWS

Die mittlere Aufstandslänge eines Prüfummis misst 30 mm und der mittlere Kontaktdruck der Prüfummis auf die Probenoberfläche beträgt ca. 0,2 N/mm². Bei der auf der Prüfstation durchgeführten Griffigkeitsmessung handelt es sich um einen dynamischen Prozess. Dabei werden die Messummis gemäß TP Asphalt-StB auf eine Geschwindigkeit von 100 km/h beschleunigt und auf die Oberfläche der Probe abgesenkt. Während des Abbremsverfahrens wird die Oberfläche mit einer Zufuhrate von 20 Liter pro Minute benässt.

Während des Abbremsvorganges wird der Reibungsbeiwert (PWS-Wert) mithilfe des Drehmomentaufnehmers, welcher im Probenstisch angeordnet ist, kontinuierlich aufgezeichnet. Als Ergebnis der Griffigkeitsmessung gilt jeweils der Reibungsbeiwert der ersten Messkurve bei 60 km/h [TP Gestein-StB: Teil 5.4.2 2008].

2.5.4 Texturmessverfahren

Die Textur einer Asphaltdeckschicht lässt sich sowohl im Labor als auch in situ nach verschiedenen Verfahren bestimmen. Die gängigsten Messverfahren sind in Tabelle 2-4 aufgelistet.

Die „Technische Prüfvorschrift für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau, Teil: Messverfahren SRT“ (TP Griff-StB (SRT)) beschreibt die Messung der Mikrotextur mit dem Skid Resistance Tester (SRT) und verweist zur Messung der Makrotextur auf die DIN EN 13036-3: Die Messung der Makrostruktur wird nach der Ausflussmessung nach Moore (AM) durchgeführt. Die beiden Messungen sind stets gemeinsam durchzuführen und die Messergebnisse werden kombiniert bewertet [DIN EN 13036-3; TP Griff-StB 2004].

Beim SRT-Messverfahren reibt die Kante des am Pendelarm befindlichen Gleitkörpers mit einer Reibgeschwindigkeit von ca. 10 km/h über die angegaste Prüfoberfläche. Durch das Gleiten der Gummikante über die zuvor mit Wasser benetzte Prüfoberfläche erfährt das Pendel einen Energieverlust. Dieser Energieverlust wird von der Mikrorauheit der

	Labor und in situ
Griffigkeitsverfahren	SRT
	AM
Texturverfahren	Sandfleck-Verfahren
	ELAtextur

Tab. 2-4: Messverfahren zur Texturmessung

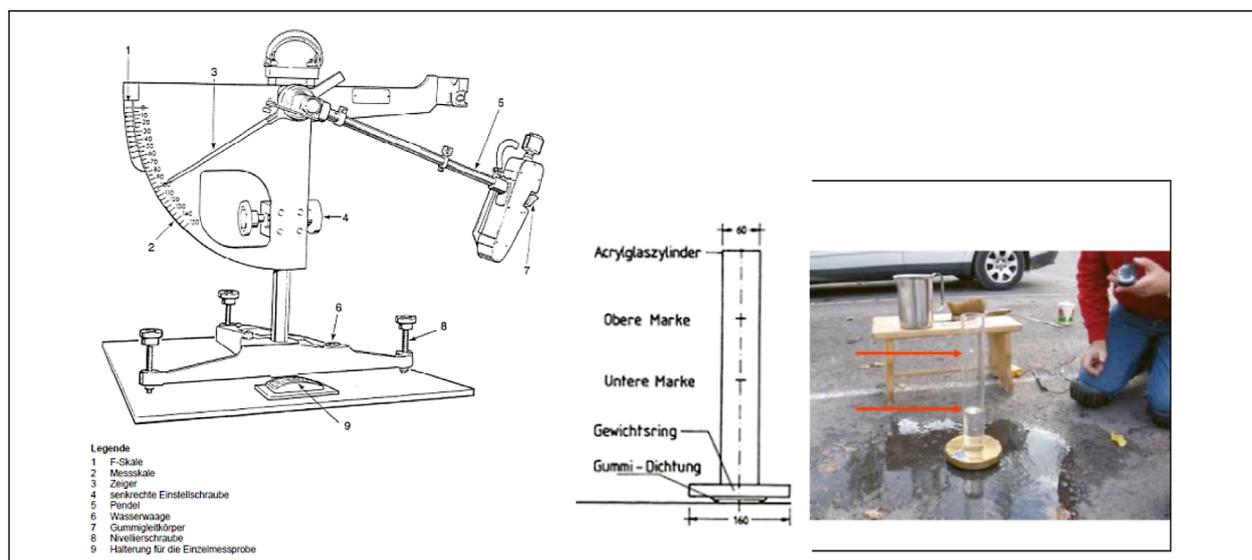


Bild 2-34: Pendelgerät (links), Ausflussmessung nach MOORE (rechts) [DIN EN 13036-3; RAUSCHENBACH und BOREK 2010]

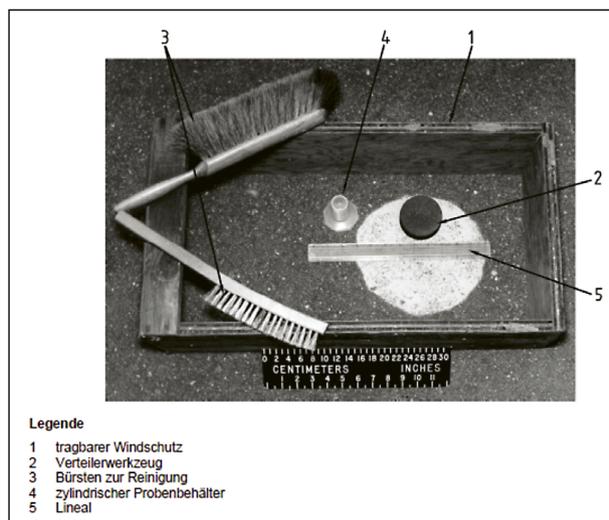


Bild 2-35: Sandfleckverfahren [DIN EN ISO 13473-1]

Fahrbahnoberfläche hervorgerufen und gilt als Maß für die Griffigkeit. Der ermittelte Messwert wird mittels des Schleppeizers am Skalenschild in SRT-Einheiten abgelesen.

Die Makrorauheit wird nach DIN EN 13036-3 mit der Ausflussmessung nach MOORE (AM) ermittelt. Der Ausflussmesser nach MOORE wird bei der Versuchsdurchführung auf die angenähte Prüfoberfläche aufgesetzt und der Messzylinder mit Wasser befüllt. In Abhängigkeit der Grob- rauheit der Prüfoberfläche sinkt der Wasserspiegel ab und die Zeit des Absinkens des Wasserspiegels von der oberen zur unteren Kalibriermarke an der Zylinderwand wird gemessen. Diese Zeit ist als Ausflusszeit definiert und ist ein Kennwert für die Makrorauheit.

Alternativ kann die Makrotextur von Fahrbahnoberflächen manuell mit dem Sandfleck-Verfahren ge-

mäß der DIN EN 13036-1 bestimmt werden [DIN EN 13036-1].

Beim Sandfleck-Verfahren wird ein definiertes Sand- oder Glasperlenvolumen mit einer vorgegebenen Korngrößenverteilung auf die Fahrbahnoberfläche aufgebracht und mit einem Verteilenwerkzeug kreisförmig verteilt. Die Vertiefungen zwischen der Textur der Fahrbahnoberfläche werden somit durch das Prüfmedium (Sand) ausgefüllt.

Aus dem Verhältnis von verwendetem Volumen des Sandes und der sich ergebenden Kreisfläche wird die Sandeinfülltiefe berechnet, welche der mittleren Oberflächentexturtiefe MTD entspricht. Durch das Sandfleckverfahren können Fahrbahnoberflächen mit wenig Grob- rauheit von jenen mit viel Grob- rauheit mit homogener, gleichartiger Struktur unterschieden werden [PATZAK 2018].

Die Verfahren AM und das Sandfleck-Verfahren haben den Nachteil, dass sie in ihrer Durchführung vergleichsweise aufwendig sind und durch die manuelle Versuchsdurchführung von Einflüssen des Prüfers beeinflusst werden können. Außerdem haben beide Verfahren einen hohen Bedarf an Verbrauchsmaterial (Wasser bzw. Sand). Bei der Bestimmung der Makrorauheit ist die Größe der Rauheitselemente und der Ausprägung der Zwischenräumen hinsichtlich ihrer Breite und Tiefe sowie der Verteilung der Rauheitselemente über die Fahrbahnoberfläche [PATZAK 2018]. Die ist mit diesen Messverfahren nur sehr eingeschränkt möglich.

Mittels des Prinzips der Triangulationsmessung (Laser) kann die geometrische Gestalt der Fahrbahn-

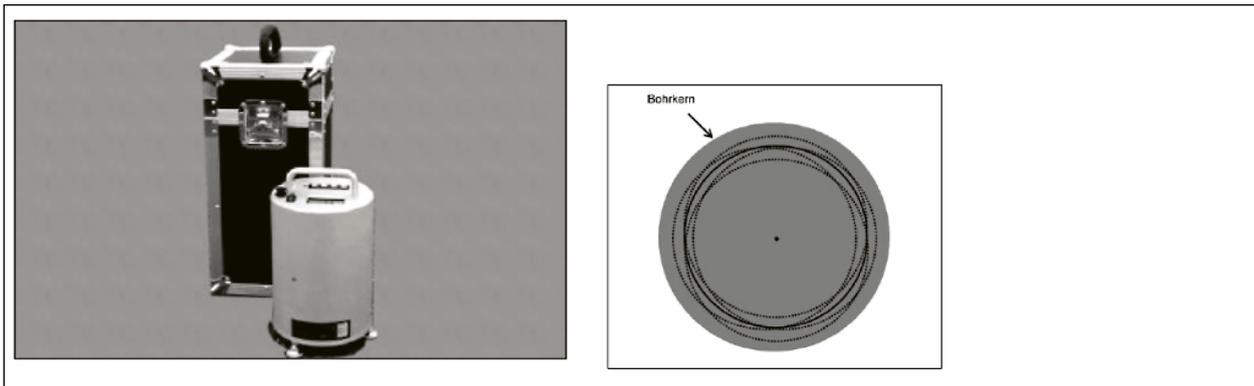


Bild 2-36: Messgerät ELAtextur® [BÜRCKERT et al. 2012]

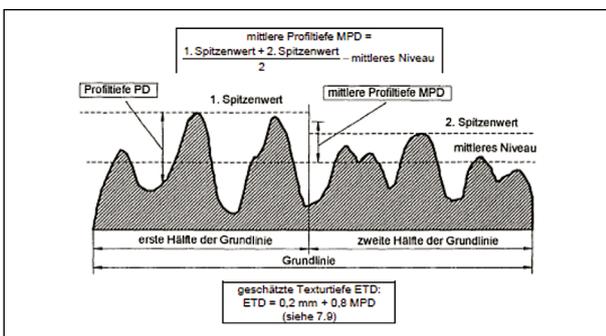


Bild 2-37: Zusammenhang ETD und MPD [DIN EN ISO 13473-1]

oberfläche schnell ermittelt werden (DIN EN ISO 13473-1). Das Messgerät ELAtextur® basiert auf einem Lasermesssystem und nimmt die Textur mittels eines rotierenden Lasers auf.

Auf der Grundlage des Kreissegmentes der Textur wird die durch den Messvorgang ermittelte Oberflächenkurve in den sogenannten MPD-Wert (Mean Profile Depth; Mittlere Profiltiefe) umgerechnet. Die mittlere Profiltiefe ist in Millimetern angegeben und gibt den Mittelwert der Profiltiefe über eine bestimmte Strecke (Grundlinie) an. Der MPD-Wert kann durch die Anwendung einer Transformationsgleichung (s. Bild 2-37) in die geschätzte Texturtiefe ETD (Estimated Texture Depth, vergleichbar mit MTD des Sandfleckverfahrens) adaptiert werden.

Der Vorteil des Messgerätes ELAtextur® ist es, weitestgehend frei von Bedienerinflüssen zu sein und einen geringeren Zeitaufwand bei der Messung der Makrotextur zu generieren. Nachteilig ist jedoch, dass stets nur die Fahrbohrbohrfläche als Profilschnitt und nicht eine flächenhafte Beschreibung der Textur möglich ist [BÜRCKERT et al. 2012].

3 Resümee

Als Resümee der Literaturstudie lässt sich festhalten, dass die Einflüsse nur qualitativ bekannt sind. Entsprechend sind im technischen Regelwerk keine Anforderungen an den Polierwiderstand an die feine Gesteinskörnung definiert. Aufgrund dessen wird in dieser Arbeit der Einfluss der feinen Gesteinskörnung quantifiziert und Anforderungen vorgeschlagen.

4 Untersuchungsmethodik

Die Arbeitsschwerpunkte des Projektes unterteilen sich in vier Arbeitspakete. Diese gliedern sich nach einer internationalen Literaturstudie hinsichtlich der Identifikation von praxisgerechten Anforderungen an den Polierwiderstand von feinen Gesteinskörnungen, die Auswahl und die Beschaffung der Gesteinskörnungen, physikalisch-technische Prüfungen und Auswertung und Ausarbeitung von Anforderungswerten (s. Bild 4-1).

AP 100: Literaturstudie

In diesem Arbeitspaket wird eine internationale Literaturstudie hinsichtlich der Identifikation von praxisgerechten Anforderungen an den Polierwiderstand von feinen Gesteinskörnungen durchgeführt. Neben den einschlägigen nationalen Datenbanken wie beispielsweise die der FGSV werden internationale Recherchen betrieben. Dieses Arbeitspaket ist bereits in Kapitel 2 behandelt worden.

AP 200: Auswahl und Beschaffung der Gesteinskörnung

Aufbauend auf den Ergebnissen des Kapitels 2, wird eine repräsentative Auswahl der Gesteinskörnungen erarbeitet (AP 210). Anschließend werden die entsprechenden Gesteinskörnungen beschafft (AP 220).

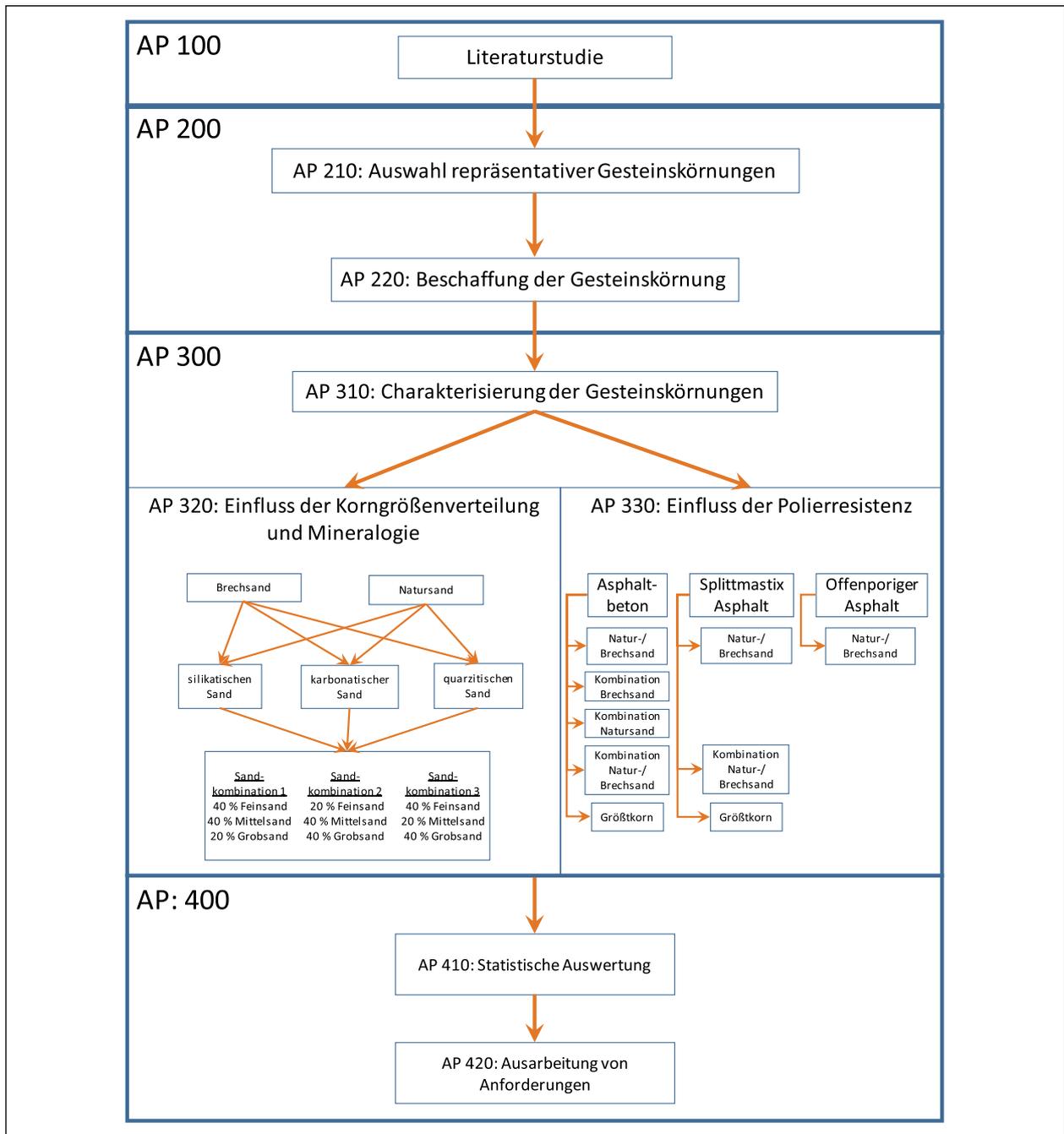


Bild 4-1: Untersuchungsmethodik

AP 300: Physikalisch-technische Prüfung

In diesem Arbeitspaket erfolgen sämtliche physikalisch-technische Prüfungen. Alle in AP 200 ausgewählten Gesteinskörnung werden einer grundlegenden Charakterisierung unterzogen (AP 310). Anschließend wird auf Grundlage der Charakterisierung und der in der Literaturstudie erarbeiteten Erkenntnissen über die maßgebenden Faktoren auf den Einfluss des Griffigkeitspotenzials der Asphaltdeckschichten ein Prüfplan erstellt. Der Prüfplan berücksichtigt den Einfluss der Korngrößenverteilung, der Mineralogie und der Polierresistenz auf

das Griffigkeitspotenzial des Asphaltmischgutes und die mittlere Profiltiefe der Asphaltdeckschichten. Um den Einfluss der Mineralogie aufzuzeigen, werden sowohl silikatische, karbonatische und quarzitisches Brech- und Natursande anhand ihrer Polierwerte ausgewählt. Um gleichzeitig auch den Einfluss der feinen Gesteinskörnung auf die Korngrößenverteilung zu untersuchen, werden diese Sande in die Fraktionen Fein-, Mittel-, Grobsand unterteilt und den in Bild 4-1 dargestellten 3 Sandkombination wieder zusammengeführt (AP 320). Der Einfluss der Polierresistenz der feinen Gesteinskörnung wird

in Abhängigkeit der am häufigsten verwendeten Asphaltdecksichtenart (Asphalteston, Splittmastix und offenporigen Asphalt), des Natur- und Brechsandes, der Kombination von Brechsanden, der Kombination von Natursanden, der Kombination von Brech- und Natursanden und des Größtkorns untersucht (AP 330).

Aus der Literaturstudie ist bekannt, dass mit abnehmenden Sandanteil der Einfluss des Sandes auf das Griffigkeitspotenzial eines Mischgutes ebenfalls abnimmt. Somit verringert sich der Einfluss von feiner Gesteinskörnung von der Asphaltart AB über den SMA bis zum OPA signifikant. Anhand dieser Erkenntnis werden alle oben genannten Einflussfaktoren am Asphaltbeton untersucht (s. Bild 4-1). Aufbauend auf den Erkenntnissen der Asphaltbetonversuche, wird der Einfluss ausgewählter Natur- und Brechsande, derer Kombination und der Einfluss des Größtkorns auf das Griffigkeitspotenzial von Splittmastixasphalt untersucht.

Die Versuchsreihe des offenporigen Asphaltes beinhaltet zum einen den quantitativen Nachweis, dass die Polierresistenz der Sandkomponente keinen signifikanten Einfluss auf das Griffigkeitspotenzial des Mischgutes besitzt. Zum anderen wird eine wichtige Größe für die statistische Auswertung geliefert.

Im AP 320 und AP 330 wird zusätzlich zu den oben genannten Einflussfaktoren noch der Einfluss der Makrotextur mittels des Messgeräts ELAtextur[®] ermittelt. Für die Ermittlung des Polierwertes wird das WEHNER/SCHULZE Verfahren verwendet.

AP 400: Auswertung und Ausarbeitung von Anforderungen

Alle im AP 300 ermittelten Ergebnisse werden einer umfassenden statistischen Auswertung unterzogen. Anhand dieser Auswertung wird der Einfluss der verschiedenen Kenngrößen auf das Griffigkeitspotenzial von Asphaltmischgut ermittelt (AP 410). Auf Basis der statistischen Auswertung werden Empfehlungen für praxisgerechte Anforderungen an den Polierwiderstand von feinen Gesteinskörnungen ausgearbeitet (AP 420). Dabei ist der erforderlichen Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit einer Asphaltdeckschicht Rechnung zu tragen. Es werden die Eigenschaften zum Widerstand gegen mechanische Beanspruchung und Widerstand gegen Verwitterung der feinen Gesteinskörnung auf Grundlage der Prüfzeugnisse der freiwilligen Güteüberwachung der Hersteller einbezogen. Weitere

Aspekte sind die Schonung der natürlichen Ressourcen und die Verfügbarkeit der Gesteinskörnungen.

5 Auswahl und Beschaffung der Gesteine (AP 200)

Bei der Auswahl der Gesteine ist vorgesehen, Proben von verschiedenen feinen Gesteinskörnungen zu verwenden, bestehend aus Brechsanden und Natursanden. Die Auswahl der Natur- und Brechsande berücksichtigt eine unterschiedliche mineralogische Zusammensetzung. Es werden Plutonite, Vulkanite und Sedimente einbezogen, sodass feine Gesteinskörnungen quarzitischer, silikatischer und karbonatischer Ursprungs vertreten sind. Gleichzeitig gilt es den gesamten relevanten Bereich hinsichtlich des Polierwiderstandes abzudecken, wobei bereits eine Verteilung durch das Einbeziehen von feinen Gesteinskörnungen karbonatischer, silikatischer und quarzitischer Ursprungs gegeben ist. Die Korngrößenverteilung der feinen Gesteinskörnung, die als Einflussfaktor auf das Griffigkeitspotenzial des Asphaltmischgutes identifiziert wurde, kann bei der Auswahl nur bedingt berücksichtigt werden [RÜCKERT 2016] [ROSAUER 2008].

Feine Gesteinskörnungen werden seitens der Hersteller im Fein-, Mittel- und Grobsandbereich nicht gesondert klassiert. Zur Untersuchung des Einflusses der Korngrößenverteilung ist diese zu bestimmen und als Eingangsgröße bei der Auswertung zu berücksichtigen oder durch gesonderte Versuchsreihen zu untersuchen. Beispielsweise können die feinen Gesteinskörnungen in die Komponenten Fein-, Mittel- und Grobsand geteilt und anschließend mit Vorgaben für den Fein-, Mittel- und Grobsandanteil wieder gezielt zusammengesetzt werden. Durch die Berücksichtigung von Natur- und Brechsanden sowie des unterschiedlichen geologischen Ursprungs ist der Einfluss der Kantenschärfe/Flächenschärfe inkludiert. Anhand dieser Kriterien wurden die in Tabelle 5-1 gelisteten 20 verschiedenen feinen Gesteinskörnungen ausgewählt und beschafft.

Die Bestimmung des Griffigkeitspotenzials erfordert die Herstellung von Asphaltprobekörpern. Dies bedingt wiederum die Probenahme von groben Gesteinskörnungen. Der Fokus bei der Auswahl der groben Gesteine liegt einerseits darin, die

Gesteinsart	Region	Mineralogischer Ursprung		
Natarsand	Paläozoische Sediment 1	Harz	quarzitische /silikatisch	Sediment
	Kalk/Rhyolith 1	Unstrut	silikatisch/karbonatisch	Sediment
	Quarz 1	Rheinland	quarzitisch	Sediment
	Quarz 2	Rheinland	quarzitisch	Sediment
	Quarz 3	Rheinland	quarzitisch	Sediment
Brechsand	Diabas 1	Rothaargebirge/Westerwald	silikatisch	Vulkanit
	Basalt 1	Westerwald	silikatisch	Vulkanit
	Basalt 2	Siebengebirge	silikatisch	Vulkanit
	Granit 1	Odenwald	silikatisch	Plutonit
	Grauwacke 1	Sauerland	silikatisch	Sediment
	Gabbro 1	Harz	silikatisch	Plutonit
	Rhyolith 1	Hunsrück/Norpfälzer Bergland	silikatisch	Vulkanit
	Grauwacke 2	Bergischen Land	silikatisch	Sediment
	Quarzit 1	Hunsrück	quarzitisch	Metamorphite
	Mikrodiorit 1	Pfälzer Bergland	silikatisch	Ganggestein
	Moränebrechsand 1	Filder	-	Sediment
	Moränebrechsand 2	Filder	-	Sediment
	Diabas 2	Harz	silikatisch	Vulkanit
	Muschelkalk 1	Main-Rohen	karbonatisch	Sediment
Jurakalk 1	Altmühltal	karbonatisch	Sediment	

Tab. 5-1: Auswahl feine Gesteinskörnung

Gesteinsart	Region	Mineralogische Ursprung		PSV-Wert nach Auskunft
Diabas 1	Rothaargebirge/Westerwald	silikatisch	Vulkanit	39
Basalt 1	Westerwald	silikatisch	Vulkanit	46
Basalt 2	Siebengebirge	silikatisch	Vulkanit	50
Granit 1	Odenwald	silikatisch	Plutonit	54
Andesit	Hunsrück	silikatisch	Vulkanit	56
Grauwacke 1	Sauerland	silikatisch	Sediment	58

Tab. 5-2: Auswahl grobe Gesteinskörnung

Anforderungen hinsichtlich der Polierresistenz nach [TL Asphalt-StB 2013] für Asphaltbetone, Splittmastix und offeneporige Asphalte zu erfüllen, andererseits auch eine möglichst große Spreizung des Polierwiderstandes zwischen den einzelnen groben Gesteinskörnungen zu erzielen, um den Einfluss der feinen Gesteinskörnung deutlicher darstellen zu können. Somit ist das Ziel, sechs verschiedene grobe Gesteinskörnungen mit einem PSV-Wert zwischen 42 und 59 zu beschaffen. Auf Basis der freiwilligen Güteüberwachung der Steinbrüche wurden die in Tabelle 5-2 aufgelisteten groben Gesteinskörner beschafft.

Die Kennwerte des Widerstandes gegen mechanische Beanspruchung und des Widerstandes gegen Verwitterung von der groben und feinen Gesteinskörnung sind im Anhang vermerkt.

6 Physikalisch- technische Prüfungen (AP 300)

6.1 Charakterisierung der Gesteine (AP 310)

Für die spätere Aufstellung des Prüfschemas und die Vorbereitung der Hauptversuche werden die ausgewählten Gesteine einer Charakterisierung unterzogen. Für die Charakterisierung der Gesteine wurden sowohl für die feinen als auch die groben Gesteinskörnungen der Polierwiderstand gemäß EN 1097-8/TP Gestein-StB, Teil 5.4.1 (PSV-Verfahren), TP Gestein-StB, Teil 5.4.2 Abs. 6.2 (PWS-Eingussverfahren) und [PWS fgk Entwurf 2019] (PWS-Aufklebverfahren), die Korngrößenverteilung gemäß EN 933-1/TP Gestein-StB, Teil 4.1.1 und Teil 4.1.2, und die Rohdichten gemäß EN 1097-6/TP

Gestein-StB, Teil 3.2.2 bestimmt. Für die spätere Erstellung der Prüfmatrix wird primär der Polierwiderstand der Gesteine in Betracht gezogen. Die Rohdichte und die Korngrößenverteilung dienen zur späteren Konzeption der verschiedenen Asphaltmischgutzusammensetzung. Somit wird im weiteren Verlauf auf die Herstellung und Prüfung von Probekörpern zur Ermittlung der Polierresistenz von Gesteinskörnungen näher eingegangen.

6.1.1 Probekörperherstellung und Prüfungen zur Charakterisierung der Gesteine

Für die Prüfung der Polierresistenz der feinen Gesteinskörnung werden die Probekörper mit dem Aufklebeverfahren hergestellt. Aus dem zu beprobenden 0/2 mm Sand wird die Prüfkörnung 0,2/0,4 mm ausgesiebt. Mit einem 0,5 mm Sieb wird die Prüfkörnung auf eine mit Kleber bestrichene Trägerplatte aus Sperrholz gestreut (s. Bild 6-1).

Nachdem der Kleber ausgehärtet ist, wird der Probekörper vom übrigen Sand befreit und in der Einspannvorrichtung fixiert. Danach wird die Probe in der Poliereinheit mit 90.000 Überrollungen unter Zuführung des Wasser-Quarz-Gemisches belastet. Anschließend erfolgt die Griffigkeitsmessung und die Bestimmung des Reibwertes bei 60 km/h. Die Prüfung ist zweifach zu belegen, wobei die Diffe-

renz der beiden Reibungsbeiwerte nicht mehr als 0,035 Einheiten voneinander abweichen darf. Ist dies eingehalten, kann der Reibwert oder auch $PWS_{0,2/0,4}$ -Wert anhand des Mittelwertes der Einzelmesswerte der beiden Proben errechnet werden [PWS fgk Entwurf 2019].

Die Polierresistenz der groben Gesteinskörnung lässt sich nicht nur mit dem PSV-Verfahren ermitteln, sondern auch gemäß TP Gestein-Stb., Teil 5.4.2, Abs. 6.2 mit der WEHNER/SCHULZE bestimmen. In dieser Arbeit wurde das Mastix-Eingussverfahren für die Prüfkornklasse 8/11 verwendet. Bei diesem Verfahren wird auf Grundlage des Stoffmodells von Gussasphalt (hohlraumfreies Zweistoffsystem) ein Asphaltprobekörper, bestehend aus der 8/11 Prüfkörnung und einer Asphaltmastix, bestehend aus 70 M.-% Kalksandsteinfüller und 30 M.-% 20/30 Straßenbaubitumen, hergestellt. Das Verhältnis von der Masse der Prüfkörnung und des Asphaltmastix liegt bei 2,1 zu 1. Zur Gewährleistung der Erstellung eines hohlraumfreien Asphaltprobekörpers wird bei der Mischung des Asphaltprobekörpers die Asphaltmastix in die Prüfkörnung eingerüttelt (s. Bild 6-2).

Aus dem fertigen Asphaltprobekörper werden durch Sägen und Schleifen zwei Probekörper hergestellt. Anschließend wird durch schonendes Sandstrahlen

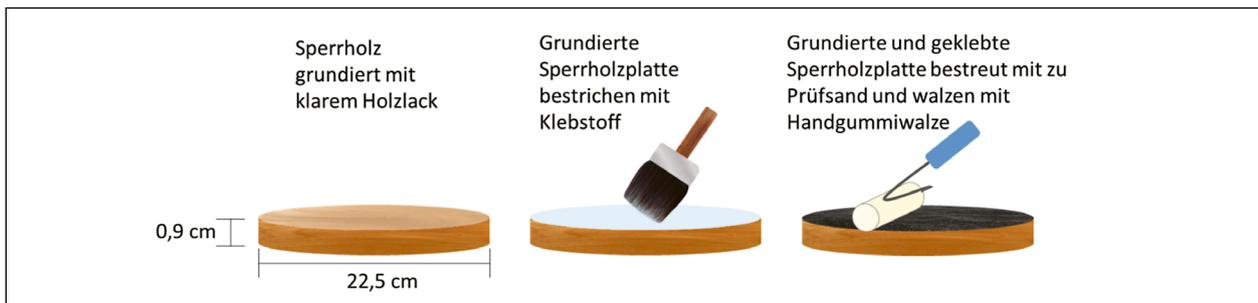


Bild 6-1: Herstellung Sandplatten

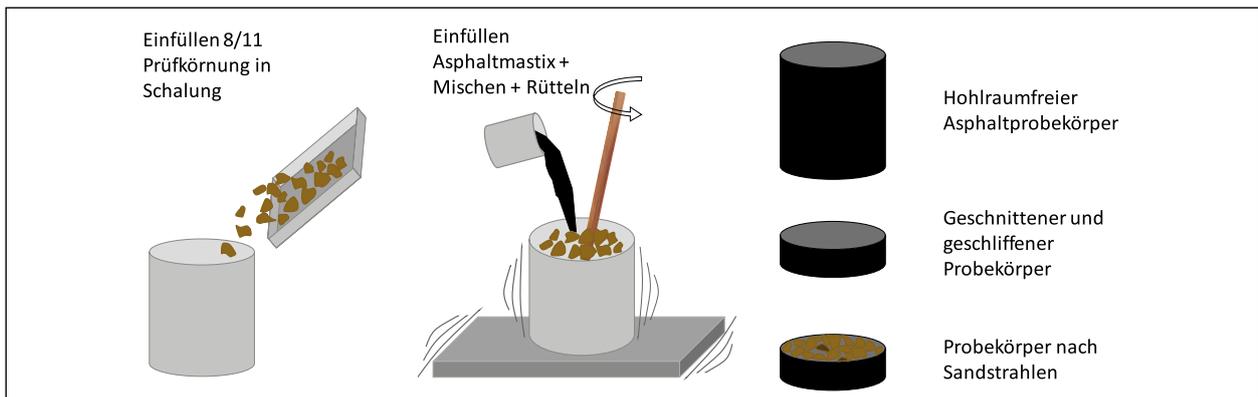


Bild 6-2: Probekörperherstellung Mastix-Einbettverfahren

die Gesteinskörnung freigelegt. Genauso wie bei den Aufklebverfahren werden die Proben in der WEHNER/SCHULZE mit 90.000 Überrollungen und dem Wasser-Quarz-Gemisch beansprucht und daraufhin der Reibungsbeiwert bestimmt.

6.1.2 Ergebnisse der Polierresistenz der feinen und groben Gesteinskörnung (Charakterisierung)

Die Ergebnisse der Bestimmung der Korngrößenverteilung und der Rohdichte der groben und feinen Gesteinskörnung sind im Anhang vermerkt. Die Polierwiderstände nach dem PSV- und PWS-Verfahren der groben Gesteinskörnung sind in Bild 6-3 und Bild 6-4 dargestellt. Bei beiden Versuchsverfahren lässt sich dieselbe Reihung der Polierwiderstände der Gesteinsarten feststellen. Die größte Polierresistenz hat die Grauwacke1 gefolgt von dem Andesit1, Granit1, Basalt2, Basalt1 und Diabas1. Des Weiteren ist festzustellen, dass der Gra-

nit1, Basalt1, Basalt2 und Diabas1 einen nahezu gleichen Polierwiderstand besitzen. Zudem liegt die Polierresistenz nahezu aller vier Gesteine in den Toleranzbereichen der beiden Verfahren (PSV-Verfahren: +3; PWS-Verfahren: 0,035).

Zum Vergleich der beiden verwendeten Verfahren zur Bestimmung des Polierwiderstandes der groben Gesteinskörnung werden die PSV- und PWS-Werte in einem Punktdiagramm gegenübergestellt. Es lässt sich eine lineare Verteilung der Punkte feststellen, welche die Trendlinie der Punkte unterstreicht. Die Trendlinie besitzt ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,971$ (s. Bild 6-5).

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Reibwerte der feinen Gesteinskörnung ist festzustellen, dass der Bereich der Polierresistenz der Sande von 0,539 bis 0,209 reicht (s. Bild 6-6). Dabei besitzt die Grauwacke2 den höchsten und der Muschelkalk1 den niedrigsten Polierwiderstand. Beim Vergleich

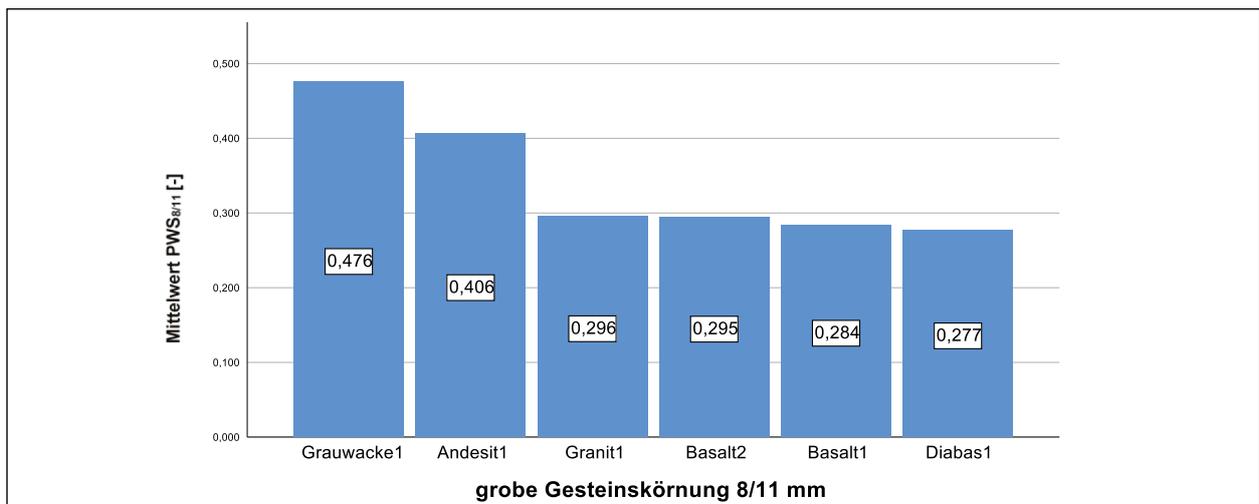


Bild 6-3: Polierwiderstand grobe Gesteinskörnung WEHNER/SCHULZE

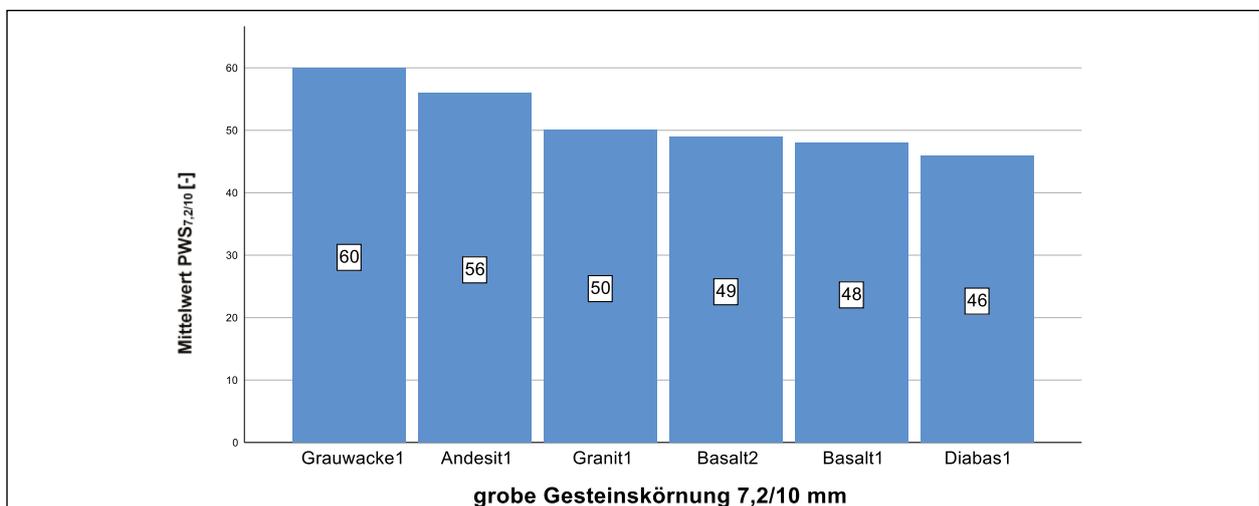


Bild 6-4: Polierwiderstand grobe Gesteinskörnung PSV

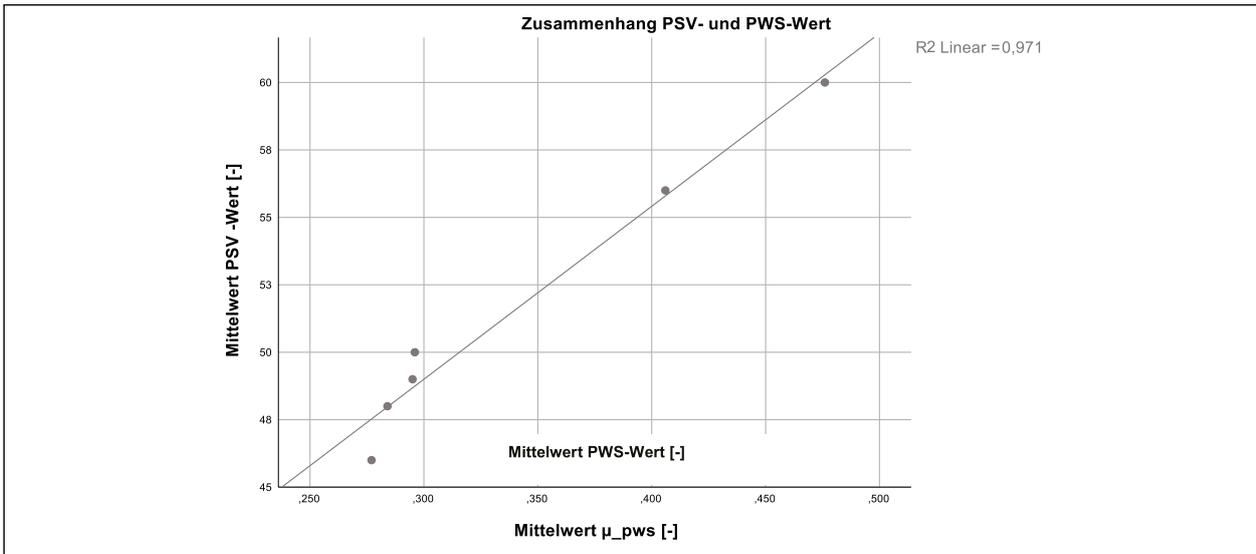


Bild 6-5: Vergleich der Verfahren PSV und PWS

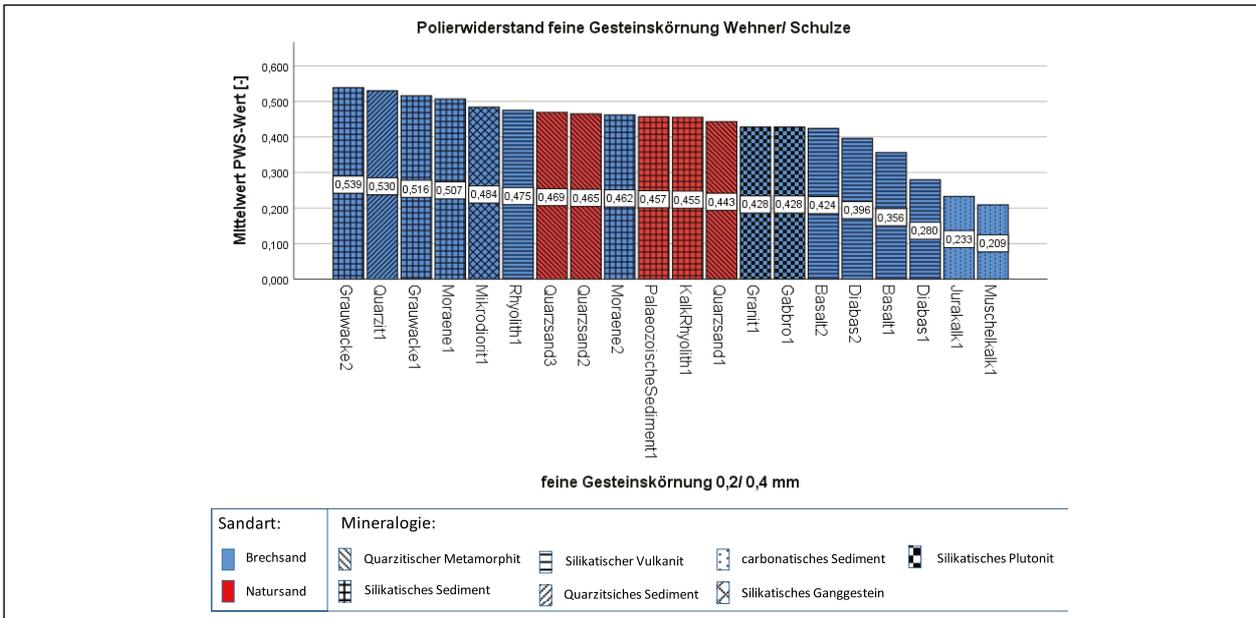


Bild 6-6: Polierwiderstand der feine Gesteinskörnung

von Brech- zu Natursanden hinsichtlich ihres Polierwiderstandes ist festzustellen, dass bei annähernd gleicher mineralogischer Zusammensetzung (Quarzit1 und Quarz1) der Reibwert des Brechsandes (0,530) höher als der des Natursandes (0,443) ist.

Insgesamt liegen die hier untersuchten Natursande im oberen Drittel des Polierresistenzbereiches. Die Präzision des Prüfverfahrens liegt bei 0,035. Anhand der Beurteilung der Differenz der minimalen und maximalen Polierresistenz der Natursande (Differenz = 0,026) lässt sich somit kein signifikanter Unterschied im Polierwiderstand dieser Natursande feststellen. Bei der Unterscheidung der Polierwiderstände der Brechsande lassen sich folgende Auffälligkeiten hinsichtlich der Mineralogie identifizieren.

Die Brechsande aus karbonatischem Sediment (Jurakalk u. Muschelkalk) weisen deutlich den geringsten Reibwert auf, gefolgt von den Brechsanden aus silikatischem Vulkanit (Diabas u. Vulkanit) mit der Ausnahme des Rhyoliths und der silikatischen Plutonite (Granit u. Gabbro). Im oberen Bereich der Polierresistenzen der Brechsande sind die Sande aus silikatischem Ganggestein (Mikrodiorit), gefolgt von quarzitischem Metamorphit (Quarzit) und silikatischen Sedimenten (Grauwacke u. Moräne) zu finden.

Weiterführend wird der Polierwiderstand der feinen und groben Gesteinskörnung betrachtet. Aus Bild 6-7 lässt sich entnehmen, dass sich beim Vergleich der der Polierwerte der feinen und groben Gesteins-

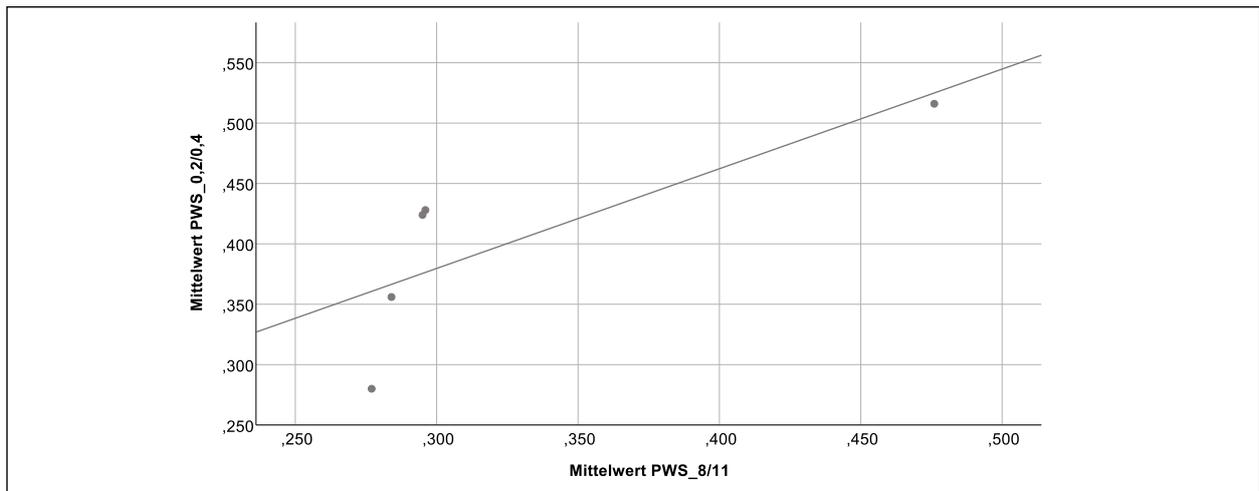


Bild 6-7: Vergleich des Polierwiderstandes feine und grobe Gesteinskörnung

werte keine signifikante Abhängigkeit feststellen lässt. Somit lässt sich die Erkenntnis aus der Literatur, dass die Übertragung von der groben zu der feinen Gesteinskörnung nicht immer zutreffend ist, bestätigen.

6.1.3 Schlussfolgerung der Charakterisierung

Als Schlussfolgerung der Vorversuche/Charakterisierung der groben Gesteinskörnung lässt sich festhalten, dass das PSV- und WEHNER/SCHULZE-Verfahren einen starken linearen Zusammenhang aufweisen. Dies lässt sich anhand des hohen Bestimmtheitsmaßes ($R^2 = 0,971$) der Trendlinie in Bild 6-7 schließen. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Ergebnissen der Arbeit von [HUSCHEK 2004]. Unter Berücksichtigung der Präzision des Prüfverfahrens, einer möglichst großen Spreizung des Polierwiderstandes der groben Gesteinskörnung und der in der TL-Asphalt festgelegten Anforderungen an die Polierresistenz von Asphaltdeckschichten werden folgende grobe Gesteinskörnung für die Griffigkeitsversuche ausgewählt. Der Diabas1 (PSV-Wert = 46) und Andesit1 (PSV-Wert = 56) für die Asphaltbetone, der Basalt1 (PSV-Wert = 48) und Grauwacke1 (PSV-Wert = 60) für den Splittmastixasphalt und der Grauwacke1 (PSV-Wert = 60) für die offenporigen Asphaltversuche.

Durch den Vergleich der Polierresistenz der groben und feinen Gesteinskörnungen werden die Ergebnisse aus der Arbeit von [KIRCHMAIER 2011] unterstrichen. Wie auch er in seiner Arbeit feststellt, sind die Polierwerte der feinen und groben Gesteinskörnung in dieser Arbeit nicht gleichzusetzen/übertragbar. Dies kann einerseits durch die aufbereitungsbedingte Veränderung der mineralogischen



Bild 6-8: Kornform Quarzsand und Quarzit

Komponente als auch durch den veränderten Anteil der Kanten- und Flächenschärfe erklärt werden. Somit entspricht die in der TP Asphalt-StB verankerte Übertragung des Polierwerts der groben Gesteinskörnung auf den der feinen Gesteinskörnung nicht dem Stand der Forschung.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Charakterisierung der feinen Gesteinskörnung ist festzustellen, dass der Unterschied des Polierwiderstandes zwischen einem mineralogisch äquivalentem Brech- und Natursand dadurch zustande kommt, dass der Natursand (Quarzsand1) eine deutlich kubischere Kornform aufweist als der Brechsand (Quarzit1) (s. Bild 6-8). Somit stützt diese Erkenntnis die Ergebnisse der Arbeit von [WÖRNER et al. 2006].

Zusätzlich lassen sich die Erkenntnisse aus den Arbeiten von WÖRNER, DAMES, LITZKAR, KIRCHMAIER und KNILL über den Einfluss der Mineralogie auf den Polierwiderstand belegen. Wie in diesen Arbeiten beschrieben, weisen die Brechsande mit ausschließlich karbonatischem Ursprung geringere

Polierwerte auf als die mit silikatischem oder quarzitischem Ursprung. Der Unterschied in der Polierresistenz der hier untersuchten silikatischen und quarzitischen Brechsande lässt sich anhand der mineralogischen Zusammensetzung und Entstehungsart der Gesteine zum größten Teil erklären. Der Unterschied in der Polierresistenz der polierstarken silikatischen/quarzitischen Brechsande wie Grauwacke oder Quarzit und der polierarmen Sande wie Granit und Basalt entsteht dadurch, dass in der Grauwacke und Quarzit ein weit größerer Anteil an Quarz, welcher als sehr polierstark bekannt ist, enthalten ist als im Granit oder Basalt. Zusätzlich kann die Entstehung des Gesteins/Sandes einen Einfluss auf die Kristallstruktur und somit auch auf den Polierwiderstand des Gesteins haben. Durch das schnelle Abkühlen des Magmas beim Vulkanit (Basalt u. Diabas) entsteht eine kleinere und nicht so kompakte Kristallstruktur wie bei den Plutoniten (Granit u. Gabbro). Dies erklärt den geringeren Polierwert bei dem Basalt und Diabas im Vergleich zum Granit und Gabbro. Ein weiterer Grund für die Spreizung der Polierwiderstände kann der Härtekontrast der Gesteinskörnungen sein. Durch unterschiedliche Anordnung von harten und weichen Mineralen wie z. B. Quarz oder Glimmer entstehen durch Beanspruchung der Gesteine unterschiedlich ausgeprägte Mikrostrukturen (Polierwiderstände).

Als Ergebnis der Vorversuche der Natursande ist zu identifizieren, dass aufgrund der nahezu gleichen mineralogischen Zusammensetzung dieser Sande die Polierwerte nahezu gleiche Werte aufzeigen. Aus diesem Grund und dem mangelhaften Angebot an mineralogisch variierenden Natursanden wird die Variante Kombination Natursand zurückgestellt und die Kombination Brech-/Natursand hervorgehoben. Für die nachfolgende Aufstellung des Prüfplanes ist es weiterhin notwendig, bei der Auswahl der Sande darauf zu achten, dass sowohl eine ausreichende Auswahl der unterschiedlichen mineralogischen Herkunft der Sande in einer Variante aufzufinden ist als auch ein deutlicher Unterschied im Polierwert der verwendeten Sande festzustellen ist. Bei den Kombinationen Brechsand und Brech-/Natursand werden jeweils die ausgesuchten Sande zu je 50 V.-% bezogen auf den Gesamtsandanteil des Asphaltmischgutes kombiniert.

Auf Grundlage der Ergebnisse der Charakterisierung der groben und feinen Gesteinskörnung ist das Prüfschema für die Detektierung des Einflusses der feinen Gesteinskörnung auf das Griffigkeitsni-

veau von Asphaltoberflächen wie folgt zusammengestellt worden (s. Bild 6-9).

Versuchsreihe Asphaltbeton:

Zur Ausarbeitung des Einflusses der Polierresistenz der feinen Gesteinskörnung (Natur- und Brechsand) wird, ausgehend von einem Asphaltbeton mit einem Größtkorn von 11 mm und einer Polierresistenz der groben Gesteinskörnung von PSV 46, die Sandkomponente 20-fach (15 Brechsande, 5 Natursande) variiert. Zusätzlich werden für die Folgeuntersuchungen (s. Versuchsreihe Einfluss der Kombination von unterschiedlichen Brech- und Natursanden) 3 Brechsande mit einem möglichst großen Unterschied in der Polierresistenz (Grauwacke1 $PWS_{0,2/0,4} = 0,516$, Basalt2 $PWS_{0,2/0,4} = 0,356$, Muschelkalk $PWS_{0,2/0,4} = 0,209$) und 2 Natursande (Quarz3 $PWS_{0,2/0,4} = 0,469$ und Kalk/Rhyolith $PWS_{0,2/0,4} = 0,455$) mit einer groben Gesteinskörnung (PSV 56) analysiert.

Zur Ausarbeitung des Einflusses der Kombination von unterschiedlichen Brechsanden werden ausgehend von einem Asphaltbeton mit einem Größtkorn von 11 mm, die Polierresistenz der groben Gesteinskörnung 2-fach (PSV 46, PSV 56) und die Sandkomponente 3-fach (50 V.-% Grauwacke1 $PWS_{0,2/0,4} = 0,516 + 50 \text{ V.-% Basalt2 } PWS_{0,2/0,4} = 0,356, 50 \text{ V.-% Muschelkalk } PWS_{0,2/0,4} = 0,209 + 50 \text{ V.-% Basalt2 } PWS_{0,2/0,4} = 0,356, 50 \text{ V.-% Grauwacke1 } PWS_{0,2/0,4} = 0,516 + 50 \text{ V.-% Muschelkalk } PWS_{0,2/0,4}$) variiert. Eine maximale Spreizung des Polierwiderstandes der Brechsande wurde hiermit berücksichtigt.

Zur Ausarbeitung des Einflusses der Kombination von Natur- und Brechsand werden ausgehend von einem Asphaltbeton mit einem Größtkorn von 11 mm die Polierresistenz der groben Gesteinskörnung 2-fach (PSV 46, PSV 56) und die Sandkomponente 2-fach (50 V.-% Quarz3 $PWS_{0,2/0,4} = 0,469 + 50 \text{ V.-% Basalt2 } PWS_{0,2/0,4} = 0,356, 50 \text{ V.-% Quarz3 } PWS_{0,2/0,4} = 0,469 + 50 \text{ V.-% Muschelkalk } PWS_{0,2/0,4} = 0,209$) variiert.

Zur Ausarbeitung des Einflusses des Größtkorns werden ausgehend von einem Asphaltbeton mit einem Größtkorn von 8 mm, die Polierresistenz der groben Gesteinskörnung 2-fach (PSV 46, PSV 56) und die Sandkomponente 3-fach (2 Brechsande: Muschelkalk $PWS_{0,2/0,4} = 0,209$ und Muschelkalk $PWS_{0,2/0,4} = 0,209$, Natursand: Quarz 3 $PWS_{0,2/0,4} = 0,469$) variiert. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe werden in Kombination mit den Ergebnissen

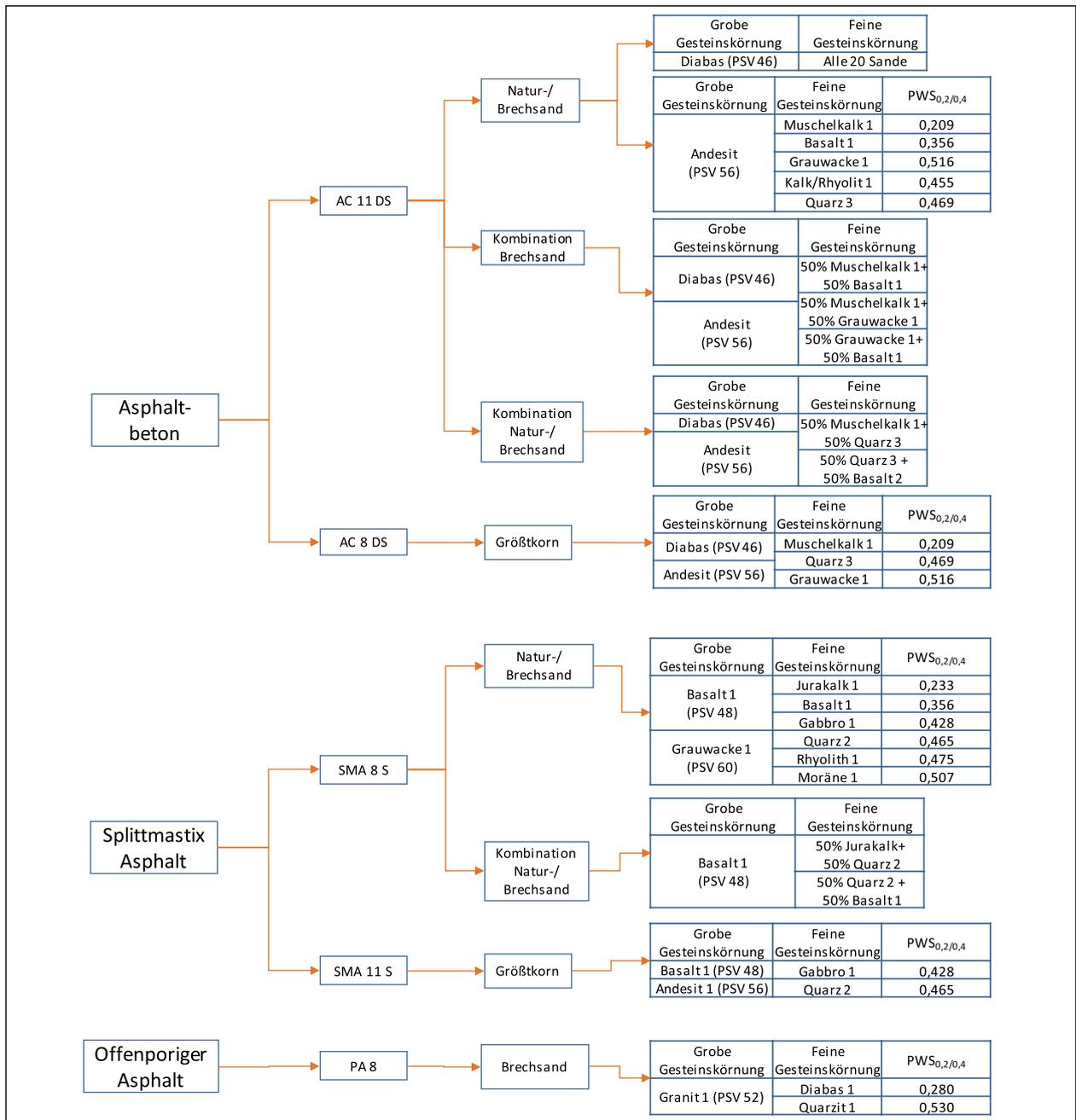


Bild 6-9: Prüfplan feine Gesteinskörnung

der Versuchsreihe mit einem Größtkorn von 11 mm ausgewertet.

Um eine Signifikanz der Einflussgrößen, der Natur- und Brechsande, der Kombination von unterschiedlichen Brechsanden, des Einflusses der Kombination von Natur- und Brechsande sowie des Größtkorns anzusprechen, werden zum Teil die selben Sande verwendet.

Versuchsreihe Splittmastixasphalt:

Zur Ausarbeitung des Einflusses der Polierresistenz der feinen Gesteinskörnung (Natur- und Brechsand) werden ausgehend von einem Splittmastix-

asphalt mit einem Größtkorn von 8 mm, die Polierresistenz der groben Gesteinskörnung 2-fach (PSV 48, PSV 60) und die Sandkomponente 6-fach (5 Brechsande: Jurakalk $PWS_{0,2/0,4} = 0,233$, Basalt1 $PWS_{0,2/0,4} = 0,356$, Gabbro1 $PWS_{0,2/0,4} = 0,428$, Rhyolith $PWS_{0,2/0,4} = 0,478$ und Moräne $PWS_{0,2/0,4} = 0,507$ und 1 Natursand: Quarz2 $PWS_{0,2/0,4} = 0,443$) variiert.

Zur Ausarbeitung des Einflusses der Kombination von Natur- und Brechsand werden ausgehend von einem Splittmastixasphalt mit einem Größtkorn von 8 mm die Polierresistenz der groben Gesteinskörnung 1-fach (PSV 48) und die Sandkomponente

2-fach (50 V.-% Quarz2 $PWS_{0,2/0,4} = 0,443 + 50$ V.-% Basalt1 $PWS_{0,2/0,4} = 0,356$, 50 V.-% Quarz2 $PWS_{0,2/0,4} = 0,443 + 50$ V.-% Jurakalk $PWS_{0,2/0,4} = 0,233$) variiert.

Zur Ausarbeitung des Einflusses des Größtkorns werden, ausgehend von einem Splittmastixasphalt mit einem Größtkorn von 11 mm, die Polierresistenz der groben Gesteinskörnung 2-fach (PSV 42, PSV 48) und die Sandkomponente 2-fach (Gabbro1 $PWS_{0,2/0,4} = 0,428$, Quarz2 $PWS_{0,2/0,4} = 0,443$) variiert.

Wie auch beim Asphaltbeton werden zur Vergleichbarkeit aller Splittmastixaspalte teilweise dieselben Sande verwendet wie die in den Versuchen des Einflusses der Polierresistenz der feinen Gesteinskörnung und den Versuchen des Einflusses der Kombination von Natur- und Brechsand und des Einflusses des Größtkorns.

Versuchsreihe offenporiger Asphalt:

Zur Ausarbeitung des Einflusses der Polierresistenz der feinen Gesteinskörnung (Natur- und Brechsand) bei offenporigen Asphalten wird, ausgehend von einem offenporigen Asphalt mit einem Größt-

korn von 8 mm und einer Polierresistenz der groben Gesteinskörnung von PSV 60, die Sandkomponente 2-fach (2 Brechsande: Diabas1 $PWS_{0,2/0,4} = 0,280$ und Quarzit $PWS_{0,2/0,4} = 0,530$) variiert. Da der Einfluss der Polierresistenz der feinen Gesteinskörnung auf das Griffigkeitsverhalten von offenporigen Asphaltbelägen schon bekannt ist, werden diese Versuche für die ganzheitliche Betrachtung (statistische Auswertung) durchgeführt.

Auf Grundlage der Charakterisierung der groben und feinen Gesteinskörnung werden die Prüfungen des AP 320 (Einfluss der Korngrößenverteilung und Mineralogie) wie folgt durchgeführt (s. Bild 6-10).

Zur Ausarbeitung des Einflusses der Mineralogie und der Korngrößenverteilung der feinen Gesteinskörnung werden, ausgehend von einem Asphaltbeton mit einem Größtkorn von 8 mm, die Polierresistenz der groben Gesteinskörnung 2-fach (PSV 46, PSV 60) und die Sandkomponente 4-fach variiert. Bezüglich der Sandkomponente kommen ein Natursand und zwei Brechsande mit jeweils unterschiedlichen mineralogischen Ursprung zum Einsatz. Die Sande werden so gewählt, dass der Natursand (Quarz1 $PWS_{0,2/0,4} = 0,443$) und der Brech-

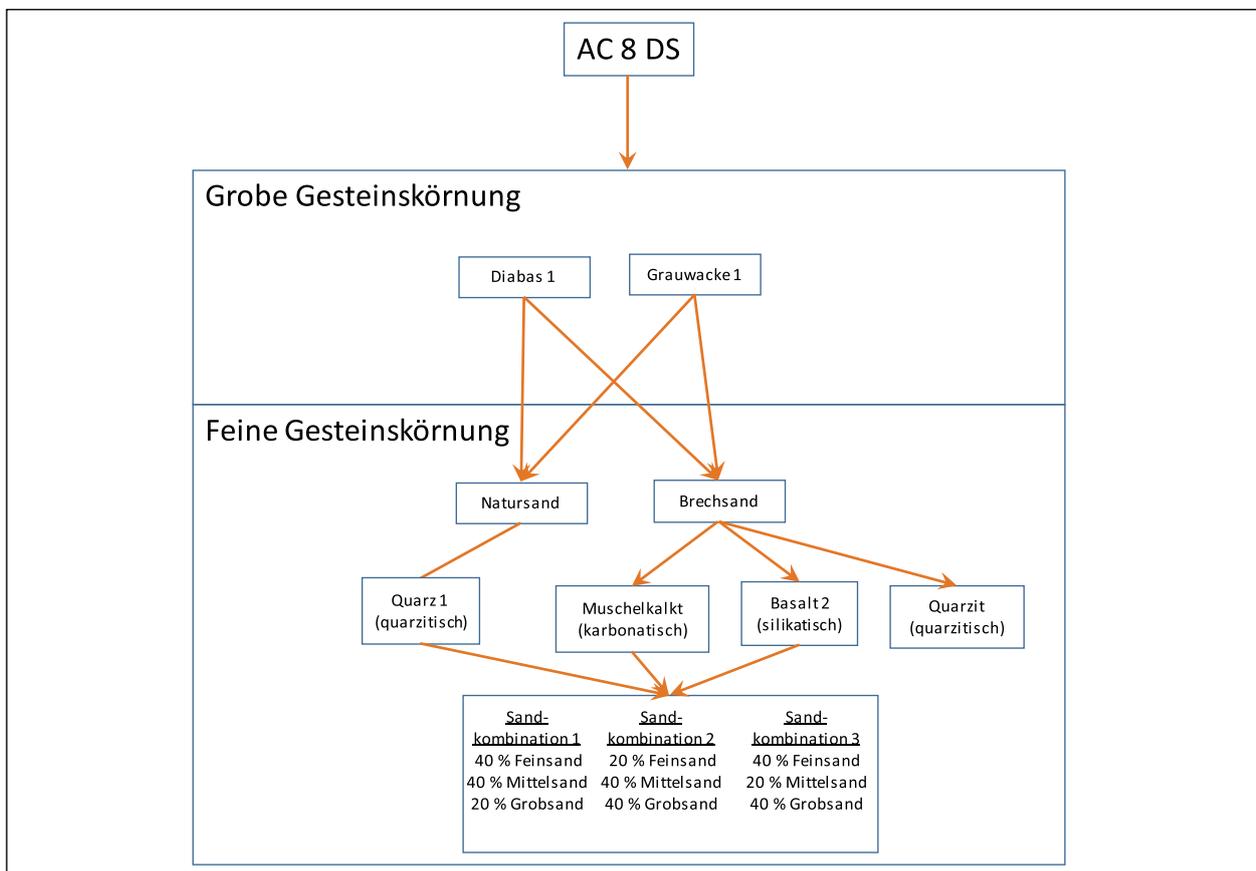


Bild 6-10: Prüfplan Korngrößenverteilung Mineralogie

sand1 (Basalt2 $PWS_{0,2/0,4} = 0,424$) eine vergleichbare Polierresistenz aufweisen. Der Brechsand2 (Muschelkalk1 $PWS_{0,2/0,4} = 0,209$) soll eine gegenüber dem Natursand bzw. Brechsand1 niedrigere Polierresistenz aufweisen. Neben der Analyse des Einflusses der Korngrößenverteilung der feineren Gesteinskörnung mit unterschiedlicher Polierresistenz und Mineralogie bei gleichzeitiger Variation der Polierresistenz der groben Gesteinskörnung auf das Griffigkeitspotenzial des Asphaltmischgutes, wird durch den Einsatz eines Natur- (Quarzsand1) und Brechsandes (Quarzit1) mit vergleichbarer petrografischer Ansprache der Einfluss der Kantenschärfe deutlich herausgestellt werden. Um den Einfluss der Mineralogie der feinen Gesteinskörnung zu untersuchen, wird eine mineralogisch/petrografische Ansprache gemäß EN 932-3/TP Gestein-StB, Teil 3.1.2 an der groben und feinen Gesteinskörnung durchgeführt.

6.2 Einfluss der Kornverteilung und der Mineralogie (AP320)

Im folgenden Kapitel werden zunächst die Ergebnisse der mineralogisch/petrografische Ansprache vorgestellt und die für die spätere Auswertung benötigten Härtegrade bestimmt. Im Anschluss wird die Herstellung der Asphaltprobekörper erläutert und das Prüfprogramm für die Bestimmung der Griffigkeit und der Textur vorgestellt. Abschließend werden die Ergebnisse der Untersuchungen des Einflusses der Mineralogie und Korngrößenverteilung der feinen Gesteinskörnung auf die Griffigkeit dargestellt.

6.2.1 Ergebnisse der mineralogischen Untersuchungen der Gesteine

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden Gesteine verschiedener Herkunft und mineralogischer Zusammensetzungen zur Herstellung der Walzsektorverdichtungsplatten verwendet. In Tabelle 6-1 sind

Bezeichnung	Hauptbestandteile
Grauwacke	Quarz, Muskovit, Albit
Diabas	Diopsid, Forsterite, Biotite, Clinochlore
Muschelkalk	Calcite, Quarz
Quarzsand	Quarz
Basalt	Augite, Anorthite, Forsterite
Quarzit	Quarz

Tab. 6-1: Gesteine mit ihrer Herkunft und deren Bestandteile

die verwendeten Gesteine mit ihren mineralischen Hauptbestandteilen aufgelistet.

An repräsentativen Teilproben der Splitte und Sande wurden im Labor tuchpolierte Anschliffe erstellt. An diesen Proben wurde mithilfe des Rasterelektronenmikroskops (REM) die Korngrößenverteilung und die Mineralverteilung ermittelt, auf die in den weiteren Unterkapiteln je Gestein genauer eingegangen wird. Im Anschluss wurde die mineralogische Zusammensetzung mittels Röntgenfeinstrukturanalyse (XRD) ermittelt (vgl. Bild 6-11). Es zeigt die genaue prozentuale mineralogische Zusammensetzung der verwendeten Gesteine, wobei die Zahlenwerte erst bei einem Massenanteil $\geq 5\%$ dargestellt sind. Auf der y-Achse sind die jeweiligen Anteile in Massenprozent aufgetragen, wohingegen auf der x-Achse die verwendeten Gesteine aufgeführt sind.

Anhand dieses Diagramms lässt sich erkennen, dass die mineralogischen Bestandteile der ausgewählten Gesteine in ihrer Massenverteilung stark variieren. Eindeutig zu erkennen ist, dass Quarznatursand und Quarzitbrechsand in ihrer Zusammensetzung sehr ähnlich sind. Wie der Quarznatursand und der Quarzitbrechsand weist auch die Grauwacke einen sehr großen Anteil von über 60 % Quarz auf. Die übrigen Minerale der Grauwacke verteilen sich relativ gleichmäßig auf die Minerale Muskovit, Feldspat, Albit und Chlorit. Darüber hinaus ist der hohe Anteil des Calcits im Muschelkalk signifikant.

In den weiteren Unterkapiteln wird jedes Gestein mit seinen mineralogischen Zusammensetzungen im Hinblick auf die Schleif- und Poliereigenschaften genauer erläutert. Mit der folgenden Formel wird die Mohs-Härte in die Rosiwal-Härte umgerechnet:

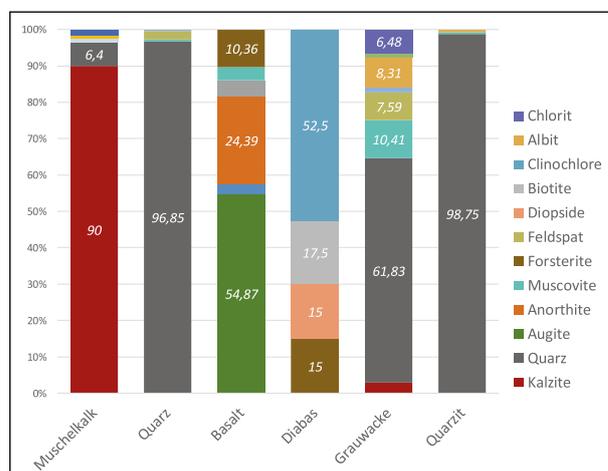


Bild 6-11: Mineralogische Zusammensetzung der verwendeten Gesteine

$$RH = e^{\frac{MH-2,12}{1,05}} \quad (3)$$

RH: Rosiwal-Härte

MH: Mohs-Härte

Ist in der Literatur zu verschiedenen Mineralen lediglich ein Wertebereich der Mohs-Härte wie z. B. 6 bis 6,5 zu finden, so wird aus diesen beiden Werten ein Mittelwert gebildet und daraufhin mit genannter Formel die mittlere Rosiwal-Härte jedes Minerals bestimmt.

Diabas:

Bild 6-12 zeigt eigene Aufnahmen des Diabas-Gesteins in den Korngrößen 2/5 und 5/8.

Wie in der Tabelle 6-2 ersichtlich, ergibt die mineralogische Untersuchung einen Anteil von 52,5 % Klinochlore im Gestein mit einer Rosiwal-Härte von 0,89 bis 1,43. Biotit ist zu 17,5 % vertreten und hat eine Rosiwal-Härte von 0,89 bis 2,31. Die übrigen 30 % teilen sich auf Diopside und Forsterite auf: Diopside mit einer Rosiwal-Härte von 26-65 und Forsterit mit einer sehr hohen Rosiwal-Härte von 100.

Insgesamt wird aus den anteiligen Rosiwal-Härten die Gesamt-Rosiwal-Härte des Gesteins zu 21,87 bestimmt.

Grauwacke:

Die mineralogische Zusammensetzung der verwendeten Grauwacke (s. Bild 6-13) ist in der Tabelle

6-3) aufgeführt. Die Grauwacke setzt sich im Wesentlichen aus acht Mineralen zusammen. Dabei sind 61,83 % des Quarzes für dieses Gestein ausschlaggebend. Die hohe Rosiwal-Härte (100) des Quarzes ergibt trotz der anderen aufgeführten, teils auch weichen Mineralen eine hohe mittlere Gesamt-Rosiwal-Härte des Gesteins von 70,94.

Muschelkalk:

Der Muschelkalk setzt sich im Wesentlichen aus dem Mineral Calcits (90 %) und im Nebengemenge aus Quarz (6,4 %) zusammen (vgl. Tabelle 6-4). Die geringe Rosiwalhärte des Calcits von 4,5 bedingt die geringe Gesamt-Rosiwal-Härte des Muschelkalk von 11,16.

Bild 6-14 zeigt die REM-Untersuchung einer Muschelkalk-Probe. Die Korngröße der makroskopisch erkennbaren eingebetteten Körner ist kleiner als 30 µm und ist daher als feinstkörnig zu bezeichnen.

Quarzsand:

Der Quarzsand besteht hauptsächlich aus dem Mineral Quarz (96,7 %). Akzessorisch befindet sich Feldspat (hier Mikroclin) und Muskovit im Gestein. Wie in Bild 6-15 zu sehen, sind vereinzelt Mineraleinschlüsse wie Zirkon, Rutil und Spinelle anzutreffen. Die eingebetteten Körner weisen eine durchschnittliche Korngröße zwischen 500 µm und 800 µm bei abgerundeter Kornform auf. Aufgrund des hohen Quarzanteils von 96,7 % ergibt sich eine hohe Gesamt-Rosiwal-Härte von 97,04.

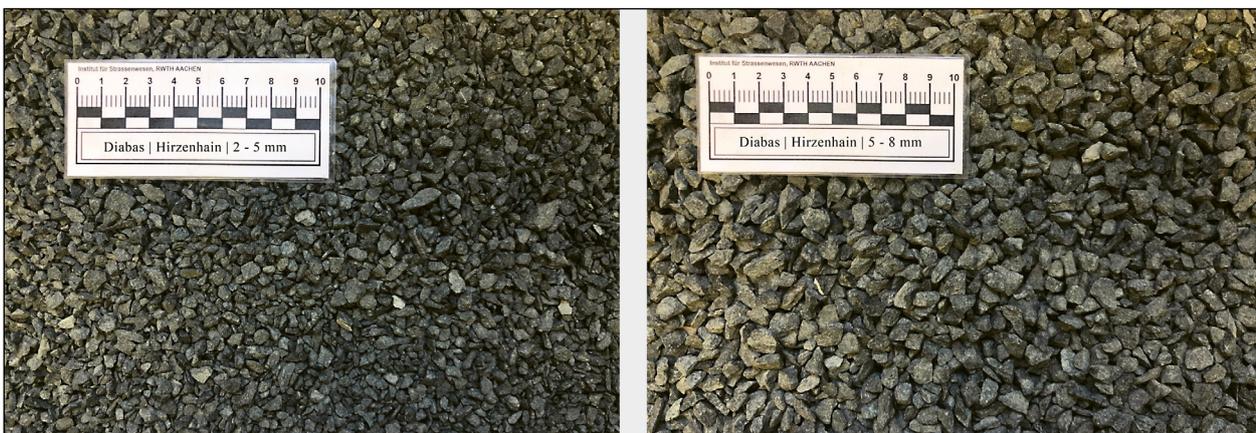


Bild 6-12: Aufnahme des verwendeten Diabas in den Korngrößen 2/5 und 5/8

Mineral	Anteil [%]	Mohshärte	Rosiwalhärte	Spaltbarkeit
Klinochlore	52,5	2 - 2,5	0,89 - 1,43	vollkommen
Biotite	17,5	2 - 3	0,89 - 2,31	vollkommen
Diopside	15	5,5 - 6,5	25 - 65	deutlich
Forsterite	15	7	100	gut - deutlich

Tab. 6-2: Mineralogische Eigenschaften des Diabas

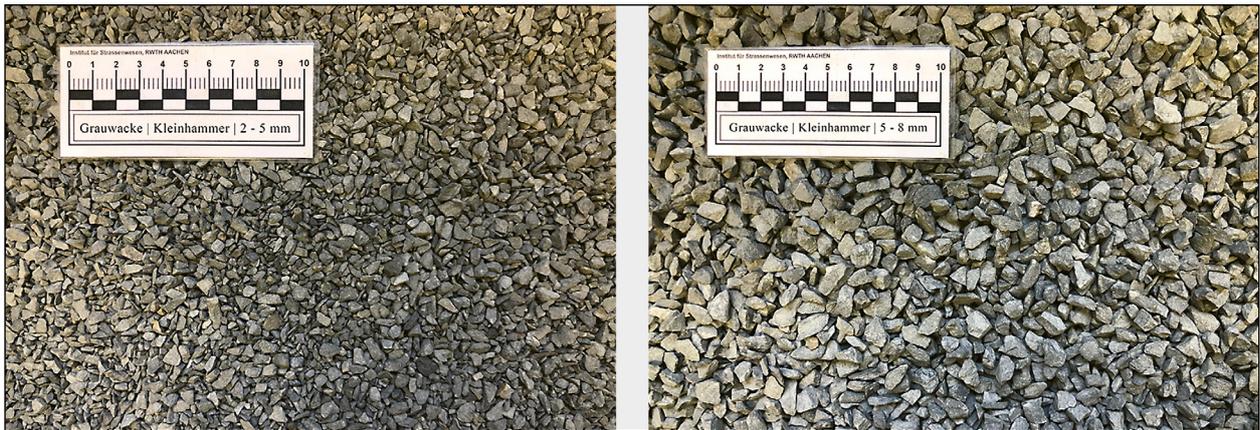


Bild 6-13: Aufnahme der verwendeten Grauwacke in den Korngrößen 2/5 und 5/8

Mineral	Anteil [%]	Mohshärte	Rosiwalhärte	Spaltbarkeit
Quarz	61	7	100	keine
Muscovite	10,41	2,5	1,43	sehr vollkommen
Albit	8,31	6 – 6,5	40 – 65	unvollkommen - vollkommen
Feldspat	7,59	6 – 6,5	1,43	vollkommen
Chlorit	6,48	2 – 2,5	0,89 – 1,43	höchst vollkommen
Calcite	2,82	3	4,5	vollkommen - sehr vollkommen
Rutil	1,33	6 – 6,5	40 – 65	gut - vollkommen
Dolomit	1,22	3,5 - 4	3,75 - 6	vollkommen

Tab. 6-3: Mineralogische Eigenschaften der Grauwacke

Mineral	Anteil [%]	Mohshärte	Rosiwalhärte	Spaltbarkeit
Calcite	90	3	4,5	vollkommen - sehr vollkommen
Quarz	6,4	7	100	keine
Illite	1,6	1 – 2	0,34	vollkommen
Pyrite	1,2	6 – 6,5	40	undeutlich
Kaolinite	0,8	2 – 2,5	0,9	vollkommen

Tab. 6-4: Mineralogische Eigenschaften des Muschelkalks

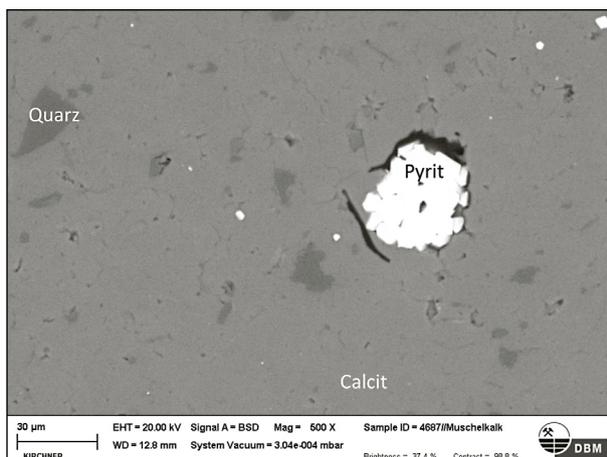


Bild 6-14: REM-Untersuchung einer Muschelkalk Probe

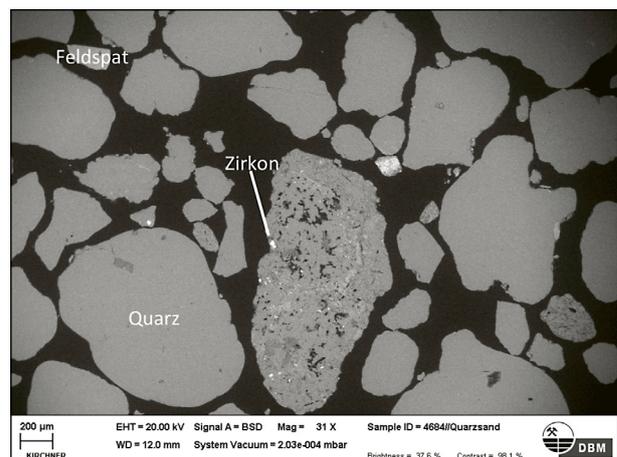


Bild 6-15: REM-Untersuchung einer Quarz Probe

Basalt:

Der Basalt ist aus sechs verschiedenen Mineralen zusammengesetzt (vgl. Tabelle 6-6). Dabei besteht er im Wesentlichen aus den Mineralen Augit (54,9 %, Härte: 5 - 65), Anorthit (24,4 %, Härte: 40

- 65) und Forsterit (10,3 %, Härte: 100). Des Weiteren ist das verwitterungsanfällige Mineral Analcim in der Matrix vorhanden. Die Massenanteile mit ihren jeweiligen Härten ergeben eine Gesamt-Rosiwalhärte des Gesteins von 46,82.

Mineral	Anteil [%]	Mohshärte	Rosiwalhärte	Spaltbarkeit
Quarz	96	7	100	keine
Feldspat	2,5	6 – 6,5	40 - 65	vollkommen
Muscovit	0,5	2,5	1,43	sehr vollkommen
Rutil	0,3	6 – 6,5	40 - 65	gut - vollkommen

Tab. 6-5: Mineralogische Eigenschaften des Quarzes

Mineral	Anteil [%]	Mohshärte	Rosiwalhärte	Spaltbarkeit
Augit	54,9	5 – 6	5 -65	deutlich - gut
Anorthite	24,4	6 – 6,5	40 – 65	unvollkommen - vollkommen
Forsterite	10,3	7	100	gut – deutlich
Analcime	4,3	5 – 5,5	12 -25	sehr undeutlich
Muscovite	3,7	2,5	1,43	sehr vollkommen
Magnetite	2,4	5 – 5,5	25 - 65	undeutlich

Tab. 6-6: Mineralogische Eigenschaften des Basalts

Mineral	Anteil [%]	Mohshärte	Rosiwalhärte	Spaltbarkeit
Quarz	98,7	7	100	keine
Albit	0,8	6,25	51,1	unvollkommen - vollkommen
Muscovit	0,5	2,5	1,4	sehr vollkommen

Tab. 6-7: Mineralogische Eigenschaften des Quarzits

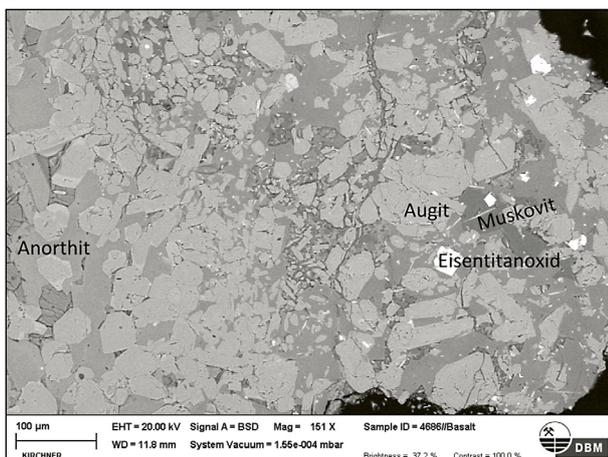


Bild 6-16: REM-Untersuchung einer Basalt Probe

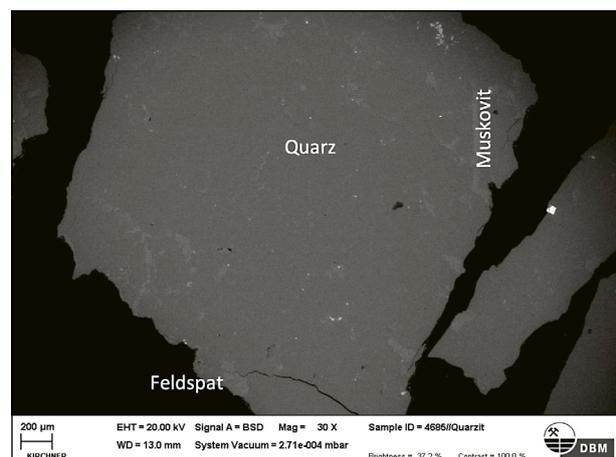


Bild 6-17: REM-Untersuchung einer Quarzit Probe

Die Korngröße der makroskopisch erkennbaren eingebetteten Körner liegt zwischen 20 µm und 100 µm und ist als feinkörnig zu bezeichnen (vgl. Bild 6-16).

Quarzit:

Der Quarzit zeigt eine ähnliche mineralogische Zusammensetzung wie der Quarzsand (vgl. Tabelle 6-7) Aufgrund der mineralogischen Zusammensetzung ergibt sich die Gesamt-Rosiwal-Härte des Gesteins Quarzit zu 99,13, was der Höchstwert aller in der Arbeit verwendeten Gesteine ist.

Vereinzelte Mineraleinschlüsse wie Rutil anzutreffen (siehe Bild 6-17). Die Korngröße der makroskopisch erkennbaren, eingebetteten Körner liegt durchschnittlich zwischen 200 µm und 800 µm und

ist bei runder Kornform als fein- bis mittelkörnig anzusprechen. Aufgrund des nachgewiesenen Muskovits ist davon auszugehen, dass im Ausgangsgestein geringe Mengen von tonigem Material vorhanden waren.

6.2.2 Herstellung und Vorbereitung der Asphaltprobekörper

Um den Einfluss der feinen Gesteinskörnung auf die Griffigkeitsentwicklung von Asphaltoberflächen untersuchen zu können, werden im Labor Asphalt-Probekörper mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV) hergestellt [TP Asphalt StB: Teil 33 2008]. Die Probekörperdicke der Walzsektorplatten werden mit 4 cm Dicke hergestellt (Bild 6-18). In Anlehn-

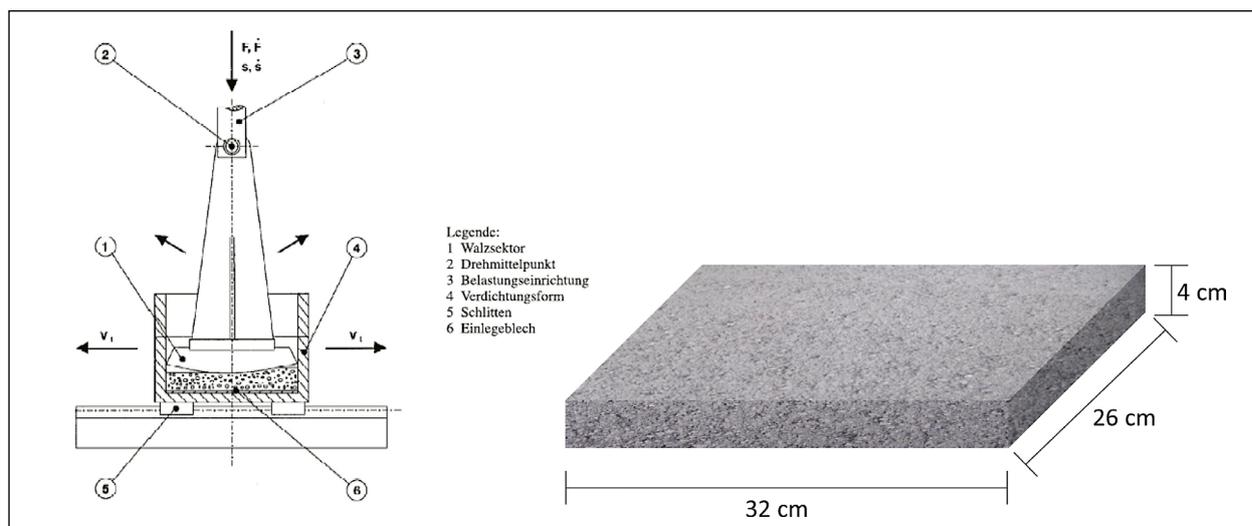


Bild 6-18: Herstellung Walzsektorasphaltplatten (links: TP Asphalt-StB, Teil 33)

Asphaltart	Größtkorn	Grobe Gesteinskörnung	Feine Gesteinskörnung
Asphaltbeton	11	Diabas1	Grauwacke1
	11	Andesit1	Grauwacke1
	8	Diabas1	Grauwacke1
	8	Andesit	Grauwacke1
Splittmastix	11	Basalt1	Gabbro1
	11	Andesit1	Gabbro1
	8	Basalt1	Jurakalk1
	8	Grauwacke1	Jurakalk1
Offenporiger Asphalt	8	Granit1	Quarzit1

Tab. 6-8: Varianten Erstprüfung

nung an die TL-Asphalt StB werden die Asphaltbetonvarianten mit einem 50/70 Straßenbaubitumen und die Splittmastix- und offenporigen Asphaltvarianten mit einem polymermodifizierten Bitumen hergestellt. Zusätzlich wird beim Splittmastix (0,3 M. %) und offenporigen Asphalt (0,6 M.-%) ein Bindemittelträger, in Form von Zellulosefasern, in das Asphaltmischgut eingemischt.

Vor der Herstellung der Asphaltprobekörper muss zunächst eine Erstprüfung an ausgewählten Asphaltmischgutvarianten vollzogen werden. Je nach Asphaltart, Größtkorn und verwendeter grober Gesteinsart wird an den in Tabelle 6-8 aufgelisteten Varianten die Erstprüfung für die Untersuchung des Einflusses des Polierwiderstandes der feinen Gesteinskörnung durchgeführt.

Zur Untersuchung des Einflusses der feinen Gesteinskörnung auf das Griffigkeitspotenzial von Asphaltdeckschichten hinsichtlich der Mineralogie und Korngrößenverteilung der feinen Gesteinskörnung, werden zunächst acht Asphaltmischungen definiert, bei denen die Sieblinie der feinen Gesteinskörnung

im Ursprungszustand (Anlieferungszustand) bleibt. Die acht Asphaltmischungen werden folgend als Referenz-Mischungen betitelt, da bei ihnen keine Modifizierung der Korngrößenverteilung der feinen Gesteinskörnung vorgenommen wird. Die Varianten 1-8 (Zeile 1-8 in Tabelle 6-9) spiegeln also eine konventionelle Mischgutart einer Asphaltdeckschicht (AC 8 DS) wider.

In jeder weiteren Probekörpervariante (Zeile 9 bis 26 in Tabelle 6-9) werden daraufhin die Mengenteile des Feinsandes (0,063 - 0,2 mm), Mittelsandes (0,2 - 0,63 mm) und Grobsandes (0,63 - 2 mm) variiert. Die prozentualen Aufteilungen der feinen Gesteinskörnung werden in Bild 6-19 deutlich. Der angegebene Prozentsatz bezieht sich dabei auf den in dem Mischgut vorhandenen Anteil der feinen Gesteinskörnung des Asphaltbetons mit einem 8 mm Größtkorn. Es sei darauf hingewiesen, dass jede Probekörpervariante zweimal hergestellt wird.

Nach der Durchführung der Erstprüfungen werden die Asphaltprobekörper, in Abhängigkeit der resultierenden Sieblinie und der Raumdichte am MPK,

Bezeichnung	Splitt	Sand	Fein [%]	Mittel [%]	Grob [%]
1	Diabas	Muschelkalk	6	33	61
2	Diabas	Quarzsand	5	23	72
3	Diabas	Basalt	4	47	49
7	Diabas	Quarzit	11	12	77
4	Grauwacke	Muschelkalk	6	33	61
5	Grauwacke	Quarzsand	5	23	72
6	Grauwacke	Basalt	4	47	49
8	Grauwacke	Quarzit	11	12	77
1-442	Diabas	Muschelkalk	40	40	20
1-333	Diabas	Muschelkalk	33	33	33
1-244	Diabas	Muschelkalk	20	40	40
2-442	Diabas	Quarzsand	40	40	20
2-333	Diabas	Quarzsand	33	33	33
2-244	Diabas	Quarzsand	20	40	40
3-442	Diabas	Basalt	40	40	20
3-333	Diabas	Basalt	33	33	33
3-244	Diabas	Basalt	20	40	40
4-442	Grauwacke	Muschelkalk	40	40	20
4-333	Grauwacke	Muschelkalk	33	33	33
4-244	Grauwacke	Muschelkalk	20	40	40
5-442	Grauwacke	Quarzsand	40	40	20
5-333	Grauwacke	Quarzsand	33	33	33
5-244	Grauwacke	Quarzsand	20	40	40
6-442	Grauwacke	Basalt	40	40	20
6-333	Grauwacke	Basalt	33	33	33
6-244	Grauwacke	Basalt	20	40	40

Tab. 6-9: Probekörper Bezeichnungen und Inhalte

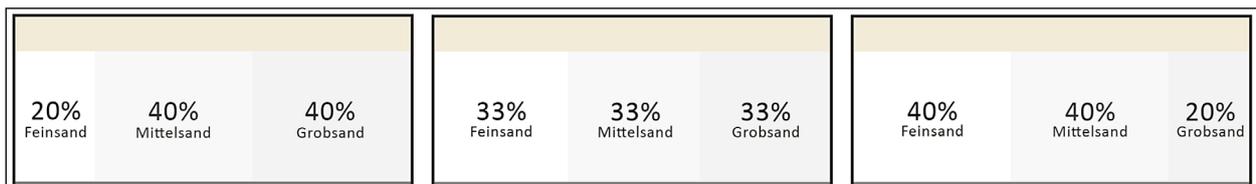


Bild 6-19: Prozentuale Aufteilung der feinen Gesteinskörnung (links: 244, mitte: 333, rechts 442)

mit dem Walz-Sektor-Verdichter hergestellt. Zur Kontrolle der Qualität der Probekörper wird die Raumdichte gemäß TP Asphalt StB: Teil 6 an den WSV-Platten ermittelt. Anhand der Raumdichte der WSV-Platten, der Raumdichte des MPK und der Rohdichte des Asphaltmischgutes wird der Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad der Probekörper bestimmt.

Die Herstellung der weiteren Varianten unterscheidet sich nur noch in der Art der feinen Gesteinskörnung. Aufgrund dessen geschieht die Asphaltzusammenstellung dieser Varianten volumetrisch, d. h. die Volumenanteile der einzelnen Gesteinsfraktion und des Bitumens bleiben äquivalent zu

den Gesteins- und Bitumenanteilen. Die volumetrische Umrechnung der Sieblinie erfolgt in Abhängigkeit der Rohdichte der einzelnen Fraktion von M.% in V.%. Die Volumenanteile der Erstprüfungen dienen nun als Referenz für die weiteren Varianten. Die noch herzustellenden Varianten werden genauso wie die der Erstprüfungen mit dem Walz-Sektor-Verdichter hergestellt. Danach erfolgt durch die Ermittlung des Hohlraumgehaltes und dem Verdichtungsgrad der Asphaltprobekörper eine Kontrolle der Plattenqualität.

Gemäß [DIN EN 12697-49] und [TP Asphalt-StB: Teil 49 2019] besteht die Probenvorbereitung darin, dass die Asphaltprobekörper vor dem Polivor-



Bild 6-20: Asphaltprobekörper nach Herstellung (a), nach Sandstrahlen (b), nach Polieren (c)

gang gesandstrahlt werden, um den Bitumenfilm von der Gesteinsoberfläche zu entfernen. Das Sandstrahlen bei einer Probentemperatur von 20 °C hat sich in der Praxis aber als sehr abrasiv erwiesen; beim Strahlen der Probekörper wurde eine große Menge Mörtel aus der Oberfläche herausgelöst. In der Forschungsarbeit von PATZAK (2018) wurde ein Verfahren aufgezeigt, welches sehr schonend und effektiv ist. Nach diesem Verfahren wird der Probekörper 24 h bei -20 °C gelagert und anschließend 2-mal für die Dauer von 110 s gesandstrahlt [PATZAK 2018]. Anhand dieses Verfahrens wird auch in dieser Arbeit die Probenvorbereitung durchgeführt. Das Ergebnis des Sandstrahlens ist exemplarisch dem Bild 6-20 zu entnehmen.

6.2.3 Prüfprogramm der Textur und der Griffigkeitsmessung

Das Prüfprogramm zur Ermittlung der Griffigkeitsentwicklung in Abhängigkeit der Polierbeanspruchung erfolgt, nachdem der Probekörper mit dem Sandstrahlen vom Bitumenfilm befreit und gründlich gereinigt wurde, in der Prüfanlage nach WEHNER/SCHULZE. Es erfolgt die Montage des Probekörpers in die Einspannvorrichtung auf dem Probentisch der WEHNER/SCHULZE Anlage. Um die Griffigkeitsentwicklung zu ermitteln, wird der Reibungsbeiwert des Asphaltprobekörpers jeweils nach dem Sandstrahlen (Nullmessung), nach 7,5 Tsd., 15 Tsd., 22 Tsd., 30 Tsd., 45 Tsd. und 90 Tsd. Überrollungen ermittelt.

Die Textur (ETD-Wert) der Asphaltprobekörper wird nach der Herstellung, nach dem Sandstrahlen und nach dem Polieren mit dem Messgerät ELA-textur® gemessen. Es werden insgesamt vier Messung auf dem Probekörper je Beanspruchungszustand durchgeführt. Dabei wird das Texturmessgerät mittig auf den Probekörper positioniert und nach jeder Messung um 90° gedreht (s. Bild 6-21).

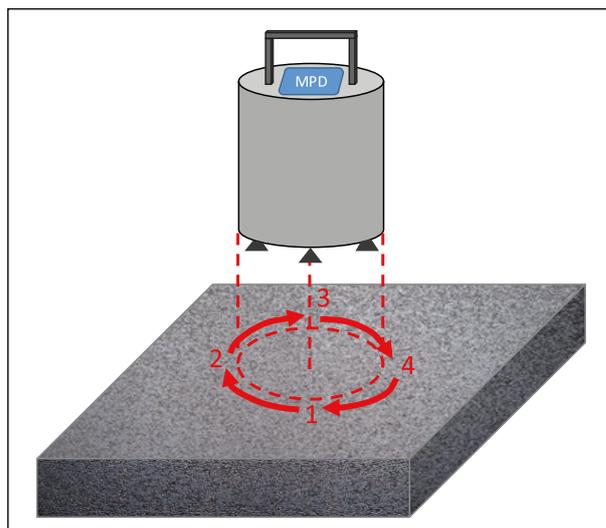


Bild 6-21: Texturmessprogramm

6.2.4 Ergebnisse der Texturmessung

Die Ergebnisse der Texturmessungen sind nachfolgend für die Werte $ETD_{\text{hergestellt}}$, $ETD_{\text{gesandstrahlt}}$ und $ETD_{\text{geprüft}}$ in Bild 6-22 zusammengefasst dargestellt. Im Anhang befinden sich alle gemessenen ETD und MPD-Werte je Variante und Probeplatte.

Im Allgemeinen zeigt sich, dass der gemessene ETD-Wert nach der Herstellung stets kleiner ist als der nach dem Sandstrahlprozess. Des Weiteren ist eine Abnahme des ETD-Wertes nach der Herstellung (rote Säulen) bei zunehmendem Feinsand-Anteil zu verzeichnen. Dies liegt darin begründet, dass die Probekörperoberfläche bei einem hohen Feinsand-Anteil dichter und hohlraumärmer aufgebaut ist. Als Beispiel dient die Variante Grauwacke-Muschelkalk. Der Probekörper mit einem Anteil von 20 % Feinsand zeigt einen durchschnittlichen ETD-Wert nach der Herstellung von circa 0,55 mm. Im Vergleich dazu weist die Probekörper-Variante mit dem hohen Feinsand-Anteil von 40 % einen durchschnittlichen ETD-Wert von ungefähr 0,40 mm auf. Dieser Trend ist bei allen Probekörper-Varianten festzustellen.

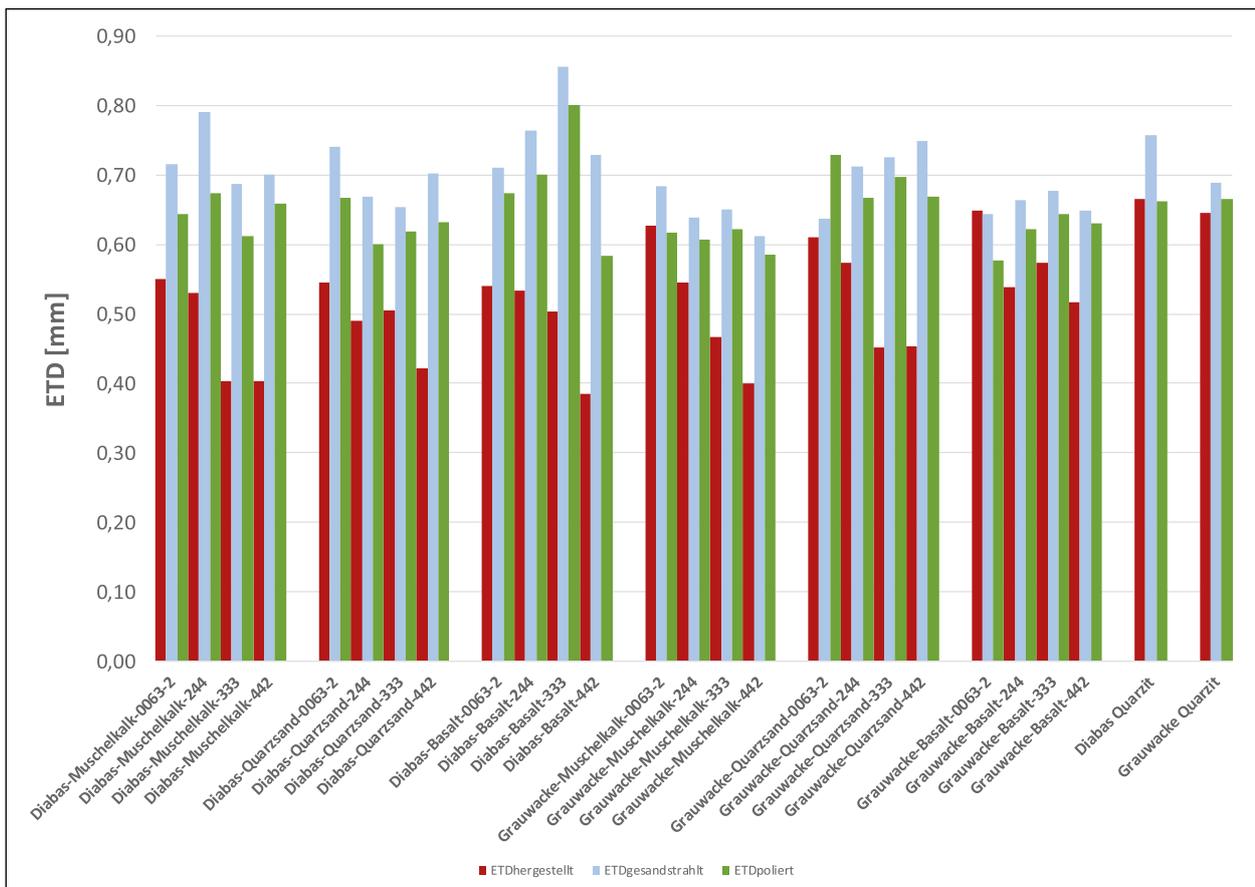


Bild 6-22: MPD-Werte nach Herstellung, Sandstrahlen und Prüfung aller Probekörpervarianten

Bei einer Betrachtung der blauen Säulen (gesandstrahlt) ist ein deutlicher Anstieg des ETD-Wertes im Vergleich zum Herstellungszustand zu erkennen. Das Sandstrahlen entfernt den Bitumenfilm auf den Gesteinskuppen und erhöht die Texturtiefe. Im Mittel steigt der ETD-Wert nach dem Sandstrahlprozess um 0,19 mm.

Die grünen Säulen spiegeln die ETD-Werte der polierten Probekörperoberflächen wider. Im Mittel ist eine Abnahme zwischen gesandstrahltem und poliertem Probekörper von lediglich 0,05 mm festzuhalten. Bild 6-22 macht deutlich, dass sich der ETD-Wert nach der Polierbeanspruchung bei circa 0,65 mm einstellt.

6.2.5 Ergebnisse der Griffigkeitsmessung

Im Anschluss an die Polierbeanspruchung inkl. Reibwertmessungen im Prüfstand nach WEHNER/SCHULZE werden die Platten visuell begutachtet. Nach der Trocknung und Säuberung der Prüffläche ist auf der Oberfläche die Rollbahn der Polierbeanspruchung deutlich zu erkennen (vgl. Bild 6-23).



Bild 6-23: Im Kreisring dargestellte Prüffläche eines Probekörpers

In Bild 6-24 sind die Reibwerte nach 90.000 Überrollungen ($PWS_{90.000}$) für jede Probekörpervariante in Form eines Säulendiagramms dargestellt. Auf der x-Achse ist die Asphaltvariante aufgetragen, wohingegen auf der y-Achse der $PWS_{90.000}$ der Asphaltoberfläche zu finden ist. Die roten Säulen zeigen die Griffigkeitswerte der Referenz-Mischungen, also der Mischungen, in denen die Sieblinie der fei-

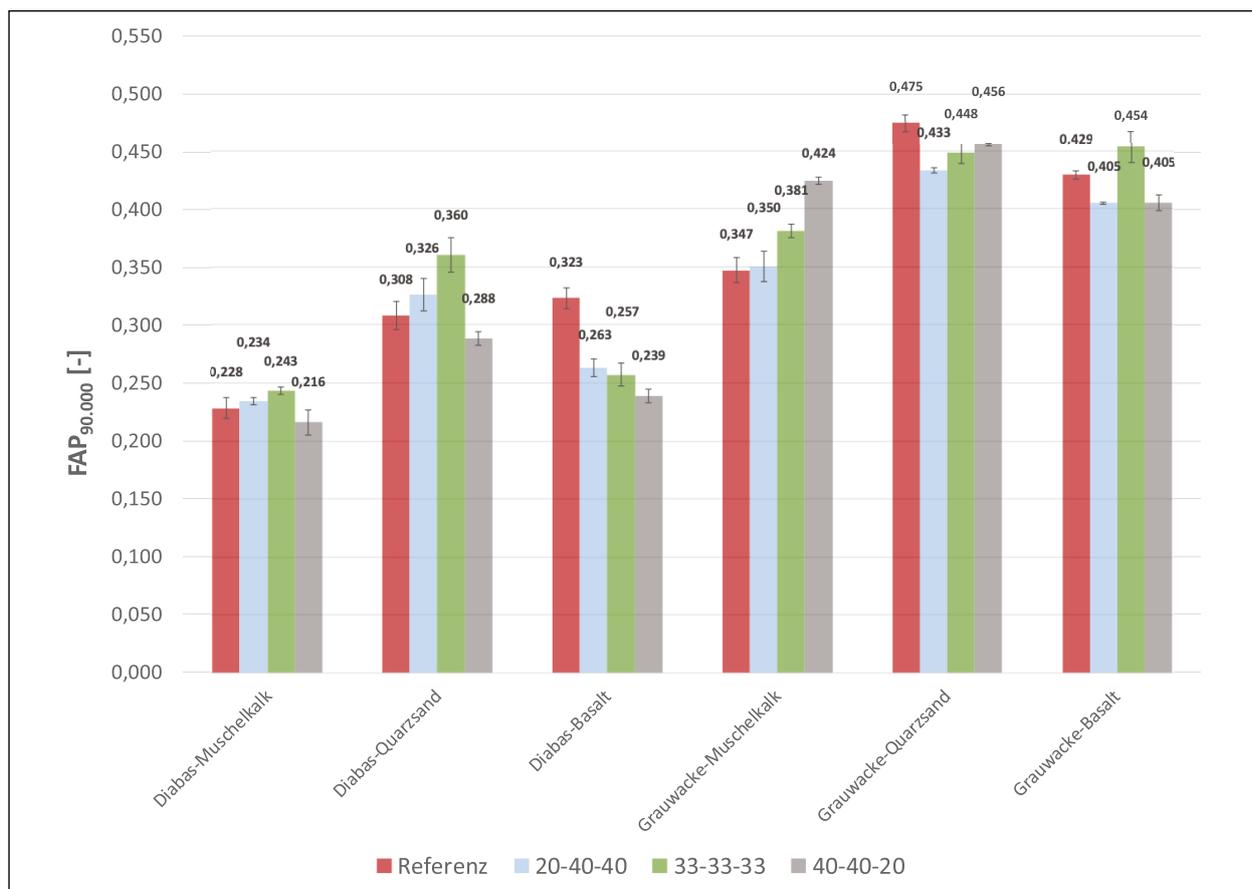


Bild 6-24: Darstellung der FAP-Werte nach 90.000 Überrollungen an allen Probekörpervarianten

nen Gesteinskörnung nicht verändert wurde. Die weiteren Säulen zeigen für jede Asphaltmischung die Korngrößenverteilung der Sieblinie der feinen Gesteinskörnung mit den Verhältnissen 20–40–40, 33–33–33 und 40–40–20. So steht die erste Zahl für den Anteil des Feinsandes (0,063 - 0,2 mm), die zweite Zahl für den Anteil des Mittelsandes (0,2 - 0,63 mm) und die dritte Zahl für den Anteil des Grobsandes (0,63 - 2 mm).

Oberhalb jeder Säule ist der Griffigkeitswert μ_{PWS} nach 90.000 Überrollungen abgebildet. Dieser Wert ist ein Mittelwert aus zwei Einzelwerten nach 90.000 Überrollungen (Zweifachbelegung). Die schwarzen Fühler der jeweiligen Säulen kennzeichnen die Einzelwerte. Nach DIN EN 12697-49 ist eine kritische Spannweite von 0,035 [-] zu berücksichtigen. Die kritische Spannweite wurde nicht überschritten.

Bild 6-24 macht deutlich, dass die gemessenen FAP-Werte nach 90.000 Überrollungen von den Diabas-Varianten im Vergleich zu den Grauwacke-Varianten insgesamt deutlich geringer sind. Dies ist in der mineralogischen Zusammensetzung der groben Gesteinskörnung begründet. Wie bereits beschrieben, hat Quarz (Rosiwal-Härte: 100) einen

hohen Einfluss auf die Polierresistenz von Gesteinen. Die verwendete grobe Gesteinskörnung Grauwacke hat einen Quarz-Anteil von 62 %, während Diabas kein Quarz enthält, sondern lediglich über geringe Anteile von Diopsiden und Forsteriten verfügt. Es zeigt sich, dass eine Asphaltvariante bestehend aus einer groben Gesteinskörnung von geringem Polierwiderstand (Diabas) in Kombination mit einer feinen Gesteinskörnung hohem Polierwiderstandes (Quarzsand) einen FAP_{90000} -Wert erreicht, der dem Niveau einer Grauwacke-Muschelkalk-Variante entspricht.

Ein Zusammenhang zwischen der Korngrößenverteilung der feinen Gesteinskörnung und den Griffigkeitswerten ist jedoch nicht festzustellen. In dem Merkblatt für den Bau griffiger Asphaltdeckschichten [M BgA 2004] ist festgehalten, dass sich der Grob- und Mittelsand stärker auf die Griffigkeit auswirkt als der Feinsand. Anhand der vorliegenden Ergebnisse dieser Arbeit ist diese Aussage nicht zu bestätigen. Bei Erhöhung des Anteiles des Mittel- und Grobsandes ist kein Trend hinsichtlich des Griffigkeitswertes zu verzeichnen. Während bei den Varianten Diabas-Muschelkalk und Diabas-Quarzsand mit 33 % Fein-, Mittel- und Grobsand die höchsten

Griffigkeitswerte zu finden sind, ist diese Beziehung beispielsweise bei den Probekörpern Grauwacke-Muschelkalk und Grauwacke-Quarzsand nicht zu dokumentieren.

6.3 Einfluss der feinen Gesteinskörnung auf das Griffigkeitsverhalten von Asphaltoberflächen (AP 330)

6.3.1 Ergebnisse der Texturmessung

Als Ergebnis der Texturmessungen werden 4 ETD-Messwerte pro Bearbeitungszustand (nach Herstellung, Sandstrahlen und Polieren) und pro Probekörper ermittelt. Aus den 4 ETD-Werten pro Probekörper und Bearbeitungszustand wird der Mittelwert gebildet. Die Ergebnisse der ermittelten Mittelwerte der Texturtiefe pro Probekörper und Bearbeitungszustand sind aus dem Anhang zu entnehmen.

Zur Beurteilung des Einflusses der verschiedenen Bearbeitungszustände auf die Texturtiefe wird der Mittelwert des ETD-Werts aller Probekörper pro Bearbeitungszustand errechnet und in einem Balkendiagramm abgebildet (s. Bild 6-25).

Durch das Sandstrahlen ist in der Texturtiefe ein Anstieg um 0,05 mm bei den hergestellten Probekörpern zu erkennen.

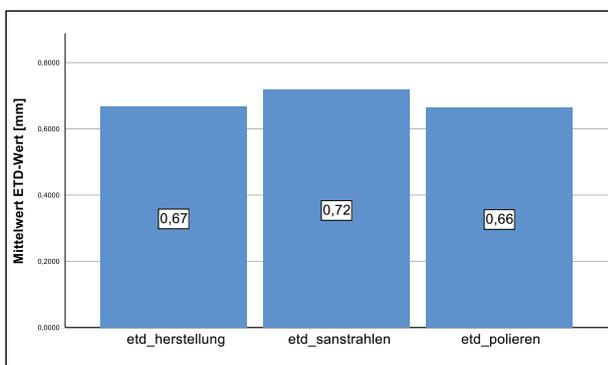


Bild 6-25: Texturtiefe nach den Bearbeitungszuständen

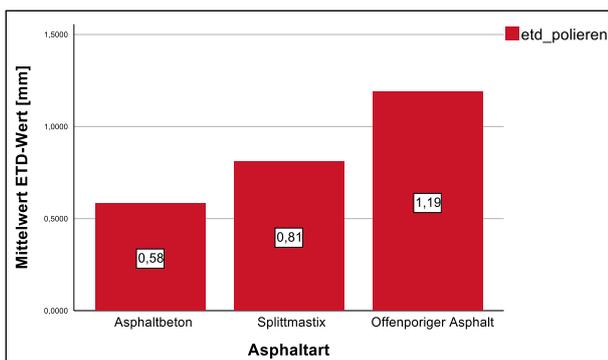


Bild 6-26: Einfluss der Asphaltart auf die Texturtiefe

zu erkennen. Dies bedeutet, dass zwar ein kleiner Teil der Mastix aus den Zwischenräumen der Gesteinskörnung entfernt wurde, aber der Anteil so gering ist, dass dieser keinen Einfluss auf die weiteren Ergebnisse der Griffigkeitsuntersuchung hat. Durch den Poliervorgang reduziert sich die Texturtiefe wiederum um 0,06 mm und ist somit auf demselben Niveau wie bei der Herstellung.

Im weiteren Verlauf sollen die maßgebenden Einflussfaktoren auf die Texturtiefe der Probekörper erarbeitet werden. Um diese Einflussfaktoren hervorzuheben, wird der mittlere ETD-Wert der polierten Probekörper in Balkendiagrammen dargestellt.

Bei der Betrachtung der Texturtiefen der Asphaltarten in Bild 6-26 lässt sich feststellen, dass der Asphaltbeton den geringsten ETD-Wert (0,58 mm) aufweist, gefolgt von dem Splittmastix mit 0,81 mm und dem offenenporigen Asphalt mit 1,1 mm. Es zeigt sich, dass mit abnehmendem Anteil der feinen Gesteinskörnung im Asphaltmischgut (Anteil: AC~40 M.-%, SMA~13% M.-% und PA~2 M.-%) die Texturtiefe der Probekörper deutlich größer wird. Beim Vergleich der Differenzen der Texturtiefen der Asphaltarten (AC-SMA = 0,23mm und SMA-PA = 0,38mm) ist deutlich zu erkennen, dass die Asphaltart und somit auch der Anteil der feinen Gesteinskörnung einen deutlichen

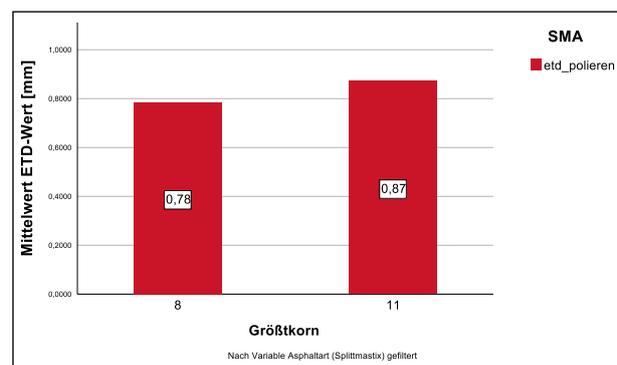


Bild 6-27: Einfluss Größtkorn auf die Texturtiefe

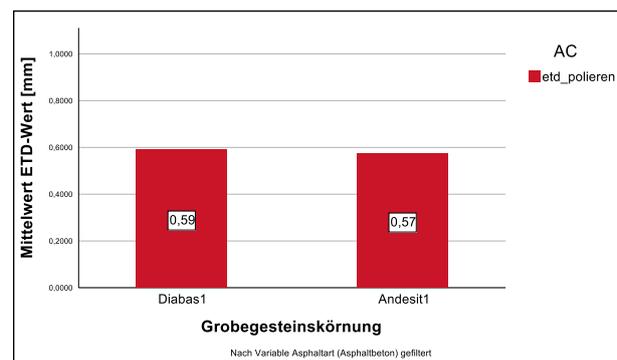


Bild 6-28: Einfluss der groben Gesteinskörnungsart auf die Textur

Einfluss auf die Textur der Asphaltprobekörper haben.

Aufbauend auf der Erkenntnis des Einflusses der Asphaltarten werden im Weiteren die Einflussfaktoren auf die Texturtiefe je Asphaltart untersucht. Die Untersuchung des Einflusses des Größtkorns von 8 mm und 11 mm lässt sich nur anhand der Asphaltbetone und des Splittmastixasphalts durchführen. Beim Splittmastixasphalt ist ein Anstieg der mittleren Texturtiefe von 0,09 mm von 0,78 mm auf 0,87 mm, zu erkennen (s. Bild 6-27).

In Bild 6-28 sind die Mittelwerte der ETD-Werte der Asphaltprobekörper bezogen auf deren grobe Gesteinskörnungsart dargestellt. Beim Asphaltbeton ist kein signifikanter Unterschied zwischen der groben Gesteinskörnungsart Diabas1 (0,59 mm) und Andesit1 (0,57 mm) zu erkennen.

6.3.2 Ergebnisse der Griffigkeitsentwicklung

Die Griffigkeitsprüfung wurde jeweils an zwei Walzsektorplatten pro Variante, welche in Kapitel 4.4 aufgelistet sind, durchgeführt. Als Ergebnis der Prüfungen wurden pro Variante die Reibwerte nach 0, 4,5 Tsd., 7,5 Tsd., 15 Tsd., 22 Tsd., 30 Tsd., 45 Tsd. und 90 Tsd. Überrollungen ermittelt. Für die Bewertung der Griffigkeitsentwicklung werden die Reibwerte der Anzahl an Überrollungen in einem Linien-Diagramm gegenübergestellt. Repräsentativ für den Asphaltbeton, Splittmastix und offenen Asphalt sind die Griffigkeitsentwicklungen der Variante

Andesit1 und Grauwacke1, Andesit1 und Gabbro1 und Granit1 und Quarzit1 in Bild 6-29 dargestellt.

Dabei steht die erste Gesteinsart für die grobe Gesteinskörnungsart und die zweite für die der feinen Gesteinskörnungsart. Alle anderen Griffigkeitsverläufe sind aus dem Anhang zu entnehmen.

Beim Vergleich der drei Griffigkeitsverläufe ist bei allen Varianten der größte Reibwert bei der Nullmessung (nach dem Sandstrahlen) und der geringste nach 90 Tsd. Überrollungen zu erkennen. Die Verläufe der Reibwerte der drei Varianten sind in ihrer Charakteristik vergleichbar, jeweils parallel zu der x-Achse verschoben. Im Bereich von der Nullmessung bis zu den 7,5 Tsd. Überrollungen ist eine deutlich größere Abnahme des Polierwertes zu erkennen als im weiteren Verlauf der Griffigkeitskurve. Mithilfe einer linearen Trendlinie kann der Bereich zwischen 4,5 und 90 Tsd. Überrollungen angenähert werden. Die gestrichelte Trendlinie, von 4,5 bis 90 Tsd. Überrollungen, weist eine Steigung von $1 \cdot 10^{-6}$ auf. Das heißt, der Reibwert verändert sich von 4,5 bis 100 Tsd. Überrollungen um 0,100.

6.3.3 Ergebnisse der Griffigkeitsentwicklung der Asphaltbetonversuche

Die Ergebnisse der Griffigkeitsuntersuchung der Asphaltbetone gliedert sich in den Einfluss der feinen Gesteinskörnung, der Kombination aus Brech- und Natursand, der Kombination aus Brechsand

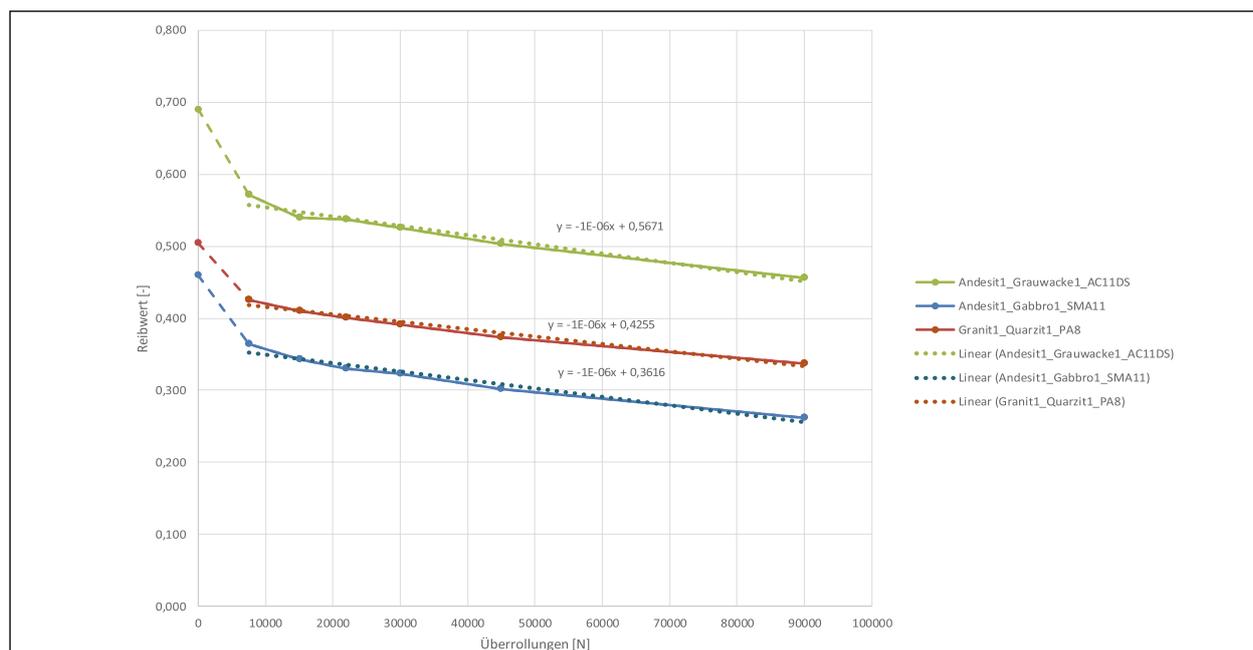


Bild 6-29: Repräsentative Darstellung des Griffigkeitsverlaufs von AC, SMA und PA

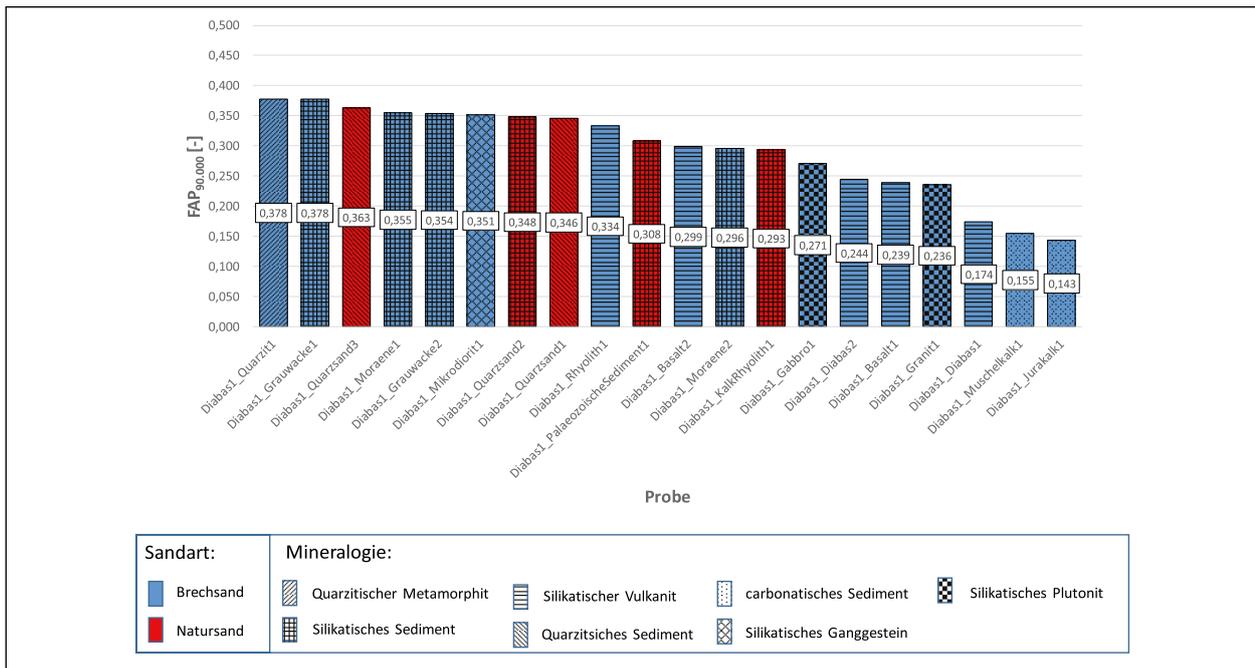


Bild 6-30: Einfluss der feinen Gesteinskörnung beim Asphaltbeton (gG: Diabas1)

und des Größtkorns. Der Einfluss auf die Griffigkeit nach 90 Tsd. Überrollungen der verschiedenen Asphaltprobekörpervarianten wird im weiteren Verlauf analysiert.

Einfluss der feinen Gesteinskörnung beim Asphaltbeton:

Um den Einfluss der feinen Gesteinskörnung beim Asphaltbeton zu erfassen, wird zwischen den groben Gesteinskörnungsarten (Diabas1 und Andesit1) differenziert, da diese unterschiedliche Polierwiderstände aufweisen. In Bild 6-30 sind die Reibwerte der 20 Varianten der Asphaltprobekörper mit der groben Gesteinskörnungsart Diabas1 dargestellt.

Der größte Reibwert mit 0,378 wird mit dem Probekörper bestehend aus den Sanden Quarzit1 und Grauwacke1 erzeugt. Die geringste Griffigkeit ist bei der Variante mit Jurakalk1 mit 0,148 zu erkennen. Das Balkendiagramm lässt sich in vier Reibwertbereiche einteilen. Die Reibwerte des obersten Bereichs liegen zwischen 0,378 und 0,334. Im darauffolgenden oberen mittleren Bereich liegt der Griffigkeitswert zwischen 0,308 bis 0,271 und im unteren mittleren Bereich zwischen 0,244 und 0,236. Der untere Bereich wird durch die Reibwerte zwischen 0,174 und 0,143 definiert. Anhand dieser Bereiche lassen sich die verschiedenen Diabas1 Asphaltbeton Varianten klassifizieren. Die Asphaltprobekörper mit Natursanden sind im oberen bis oberen mittleren Reibwertebereich anzusiedeln. Die

Walzsektorplatten mit quarzitischem Natursand (oberer Bereich) zeigen bessere Griffigkeitswerte auf als die mit silikatischen Natursand (unterer Bereich). Bei der Anordnung der verschiedenen Brechsandvarianten weisen die Proben mit karbonatischem Sediment die geringsten Griffigkeitswerte auf (unterster Bereich), gefolgt von den silikatischen Plutoniten und silikatischen Vulkaniten (unterer mittlerer Bereich). Ausgenommen davon sind die Probekörper der Sande aus silikatischen Vulkaniten, Rhyolith1 und Basalt2, die im oberen mittleren bis oberen Bereich aufzufinden sind. Die Brechsande aus silikatischem Ganggestein, silikatischem Sediment, ausgenommen die Moräne 2, die sich im oberen Mittel befindet, und quarzitischem Metamorphit sind dem oberen Bereich der Reibwerte zuzuordnen. Beim Vergleich der eben aufgestellten mineralogischen Reihung der Griffigkeit von Asphaltprobekörpern mit der mineralogischen Reihung der Polierwiderstände aus Kapitel 4.3 lässt sich eine relativ äquivalente mineralogische Abfolge der Sande feststellen. Der deutlichste Unterschied zwischen der Anordnung der Polierwerte und der Reibwerte lässt sich in der Einordnung der Natursande erfassen. Bei den Asphaltvarianten sind die Natursande teilweise im oberen Bereich der Griffigkeitsvarianten einzuordnen, wohingegen diese bei der Polierresistenz im mittleren Bereich des Polierwiderstandes anzusiedeln sind.

Bei der Betrachtung der Griffigkeitswerte der Probekörper mit der groben Gesteinskörnung Andesit1

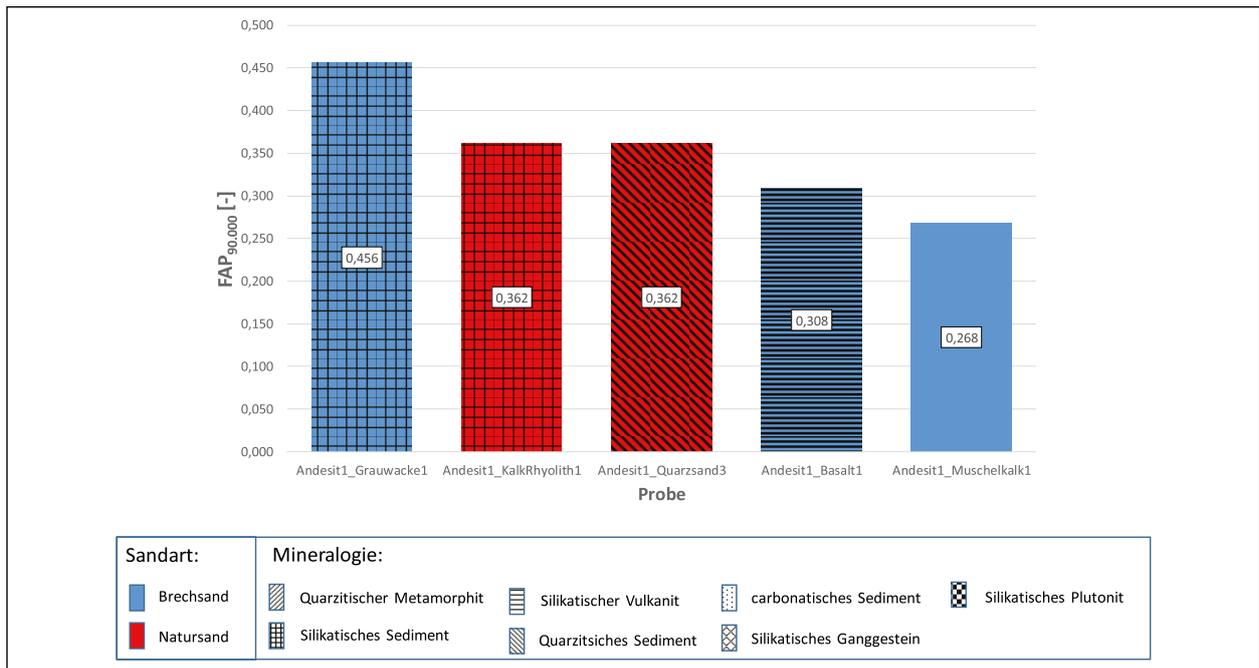


Bild 6-31: Einfluss der feinen Gesteinskörnung beim Asphaltbeton (gG: Andesit1)

erreichten die Variante Grauwacke1 mit 0,456 den höchsten und die Muschelkalkvarianten mit 0,268 den geringsten Reibwert (s. Bild 6-31).

Genauso wie die Asphaltbetonvarianten mit der groben Gesteinskörnung aus Diabas1 lässt sich das in Bild 6-31 dargestellte Diagramm in vier Reibwertbereiche einteilen. Im oberen Bereich ist der Asphaltprobekörper, bestehend aus dem Grauwacke Brechsand mit einem PWS-Wert von 0,456 anzutreffen. Die Natursande liegen mit einem Reibwert von 0,362 im oberen mittleren Bereich. Es ist aber nicht wie bei der Diabasvariante ein Unterschied zwischen dem silikatischen und quarzitischem Sediment bei den Natursandproben wahrzunehmen. Im unteren mittleren Reibwertebereich lassen sich die Asphaltprobekörper mit den Brechsanden aus silikatischen Vulkaniten, gefolgt von den Sanden aus karbonatischen Sedimenten, ausfindig machen. Bei der Gegenüberstellung von den Asphaltprobekörpern, bestehend aus der groben Gesteinskörnung Diabas1 und Andesit 1, kann die Gemeinsamkeit der mineralogischen Reihung der feinen Gesteinskörnungsvarianten identifiziert werden. Sowohl bei den Diabas1- als auch bei den Andesit1-Varianten befinden sich die Probekörper aus Natursand im oberen mittleren Reibwertbereich. Beim Vergleich der Varianten der groben Gesteinskörnung des Diabases und Andesits mit derselben feinen Gesteinskörnung ist ein durchschnittlich um 0,066 höherer Reibwert bei den Andesitvarianten zu verzeichnen als bei den Diabas Varianten. Diese

Differenz des Griffigkeitswertes ist auf den Einfluss der unterschiedlichen Polierwiderstände der groben Gesteinskörnung zurückzuführen. Die Differenz des größten Griffigkeitswertes mit der des kleinsten der jeweiligen groben Gesteinskörnungsvarianten (Durchschnitt: Diabas1 Varianten = 0,235 und Andesit1 Varianten = 0,188) spiegelt den Einfluss der feinen Gesteinskörnung wieder. Beim Gegenüberstellen der Differenz der feinen und groben Gesteinskörnung liegt es nahe, dass beim Asphaltbeton die feine Gesteinskörnung einen deutlich größeren Einfluss auf die Griffigkeit zu verzeichnen hat als die der groben Gesteinskörnung. Zusätzlich ist festzustellen, dass bei der Verwendung einer polierschwachen groben Gesteinskörnung der Einfluss der feinen Gesteinskörnung deutlicher größer ist als bei einer polierstärkeren groben Gesteinskörnungsart. Dies belegt die 20 % geringere Differenz vom größten zum geringsten Polierwert der feinen Gesteinskörnung der Andesit- und Diabas-Varianten.

Einfluss Kombination Brech-/Natursand:

Bei den Ergebnissen in der Kombination Brech-/Natursand in Bild 6-32 ist festzustellen, dass wie bei den Versuchen zur feinen Gesteinskörnung die Asphaltproben mit der groben Gesteinskörnung Andesit höhere Griffigkeitswerte erreichen als die des Diabases. Bei der differenzierten Beurteilung der Griffigkeit der groben Gesteinskörnung ist sowohl beim Diabas- als auch bei den Andesitprobekörpern die Griffigkeit der Varianten mit Grauwacke-Quarzsand um mehr als die 0,035 (kritische Spannweite) grö-

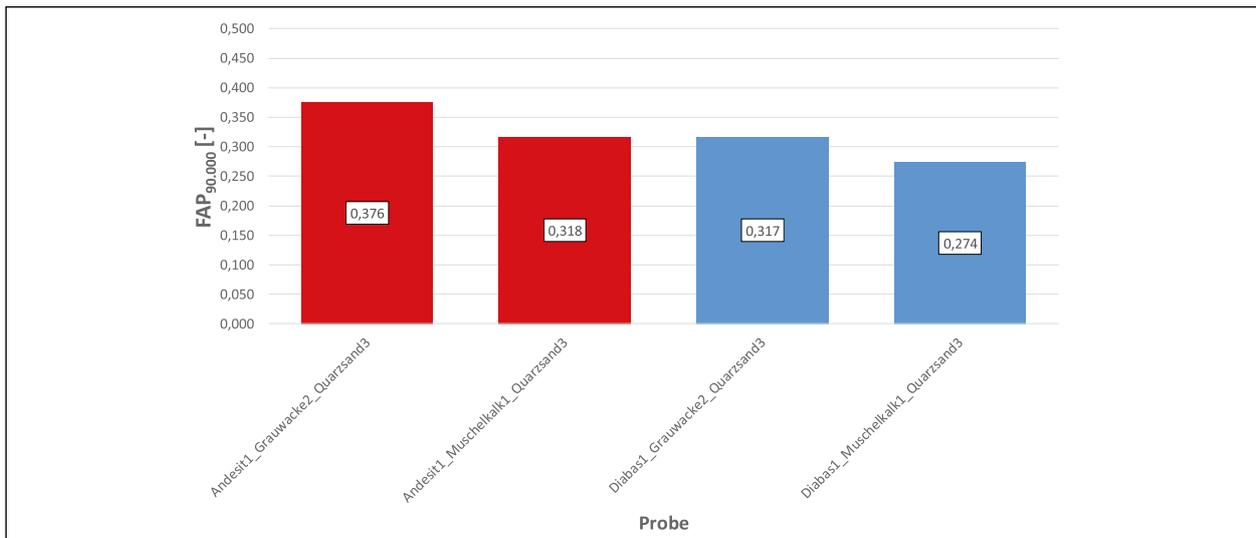


Bild 6-32: Einfluss Kombination Brech-/Natursand beim Asphaltbeton

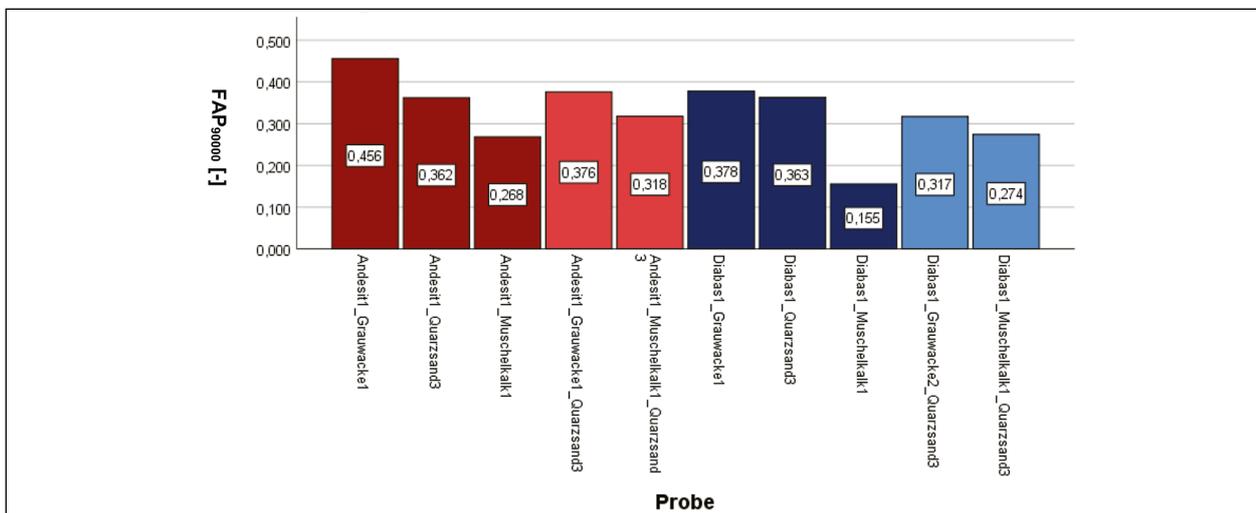


Bild 6-33: Vergleich Brech-/Natursandvarianten mit feinen Gesteinskörnungsvarianten

ßer als die der Variante mit Muschelkalk-Quarzsand. Somit lässt sich ein Unterschied in der Griffigkeit in diesen beiden Varianten aufzeichnen. Anhand der Probekörper Andesit-Muschelkalk-Quarzsand und Diabas-Grauwaacke-Quarzsand ist zu erkennen, dass durch den Einsatz einer polierstarken, feinen Gesteinskörnung das Defizit im Polierwiderstand der groben Gesteinskörnung ausgeglichen werden kann.

Werden die Brech-/Natursand Probekörpervarianten (hellrot/hellblau) den in diesen Proben verwendeten Sanden der feinen Gesteinskörnungsvarianten (dunkelrot/dunkelblau) gegenübergestellt, lässt sich feststellen, dass (ausgenommen die Asphaltprobe Diabas1-Grauwaacke1-Quarzsand3) alle Reibwerte der Brech-/Natursand-Varianten zwischen den Probevarianten der feinen Gesteinskörnung liegen (s. Bild 6-33). D. h. der FAP_{90,000} Wert der Varianten mit zusammengesetzten Sanden

(z. B. Andesit-Grauwaacke1-Quarzsand3) stellt sich entsprechend den Ergebnissen der Varianten der einzelnen Sande ein (z. B. Andesit-Grauwaacke1 und Andesit-Quarzsand3).

Einfluss Kombination Brechsande:

Wie auch bei den Versuchsergebnissen der Kombination der Natur-/Brechsande und der feinen Gesteinskörnung lassen sich bei den Kombinationen der Brechsande größere Reibwerte bei den Andesit-Probekörpern feststellen als bei den der Diabas-Probekörpern. (s. Bild 6-34).

Wie auch schon die Versuche der Kombination Brech-/Natursand zeigen, ist anhand der Walzsektorprobekörper Andesit-Basalt-Muschelkalk und Diabas-Grauwaacke-Basalt die Egalisierung des Defizites der groben Gesteinskörnung durch den Einsatz eines polierstärkeren Sandes zu erkennen.

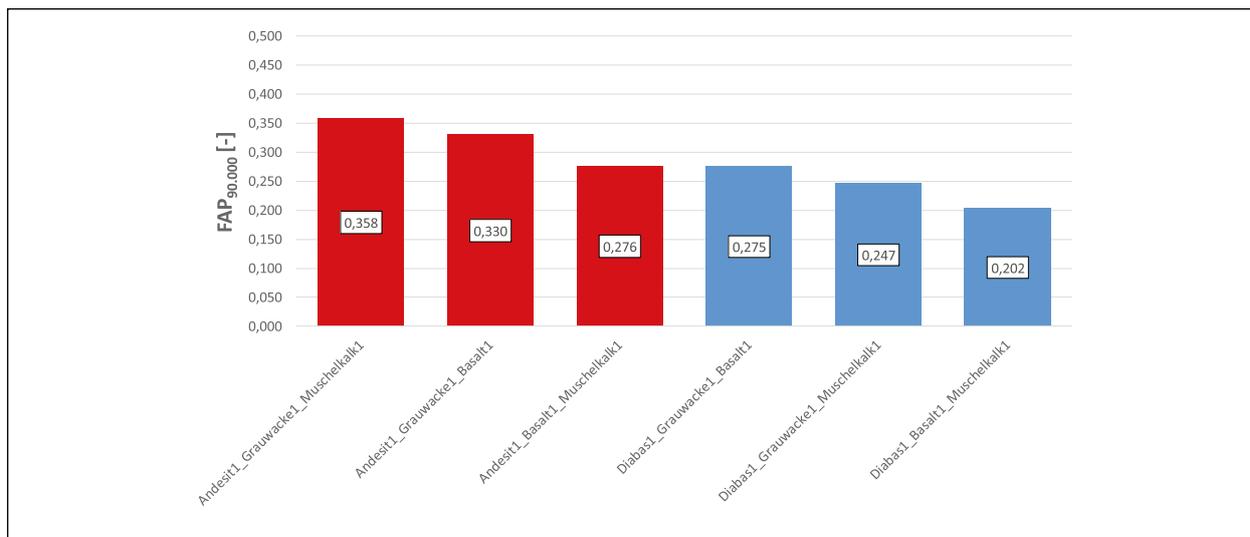


Bild 6-34: Einfluss Kombination Brech-/Natursand beim Asphaltbeton

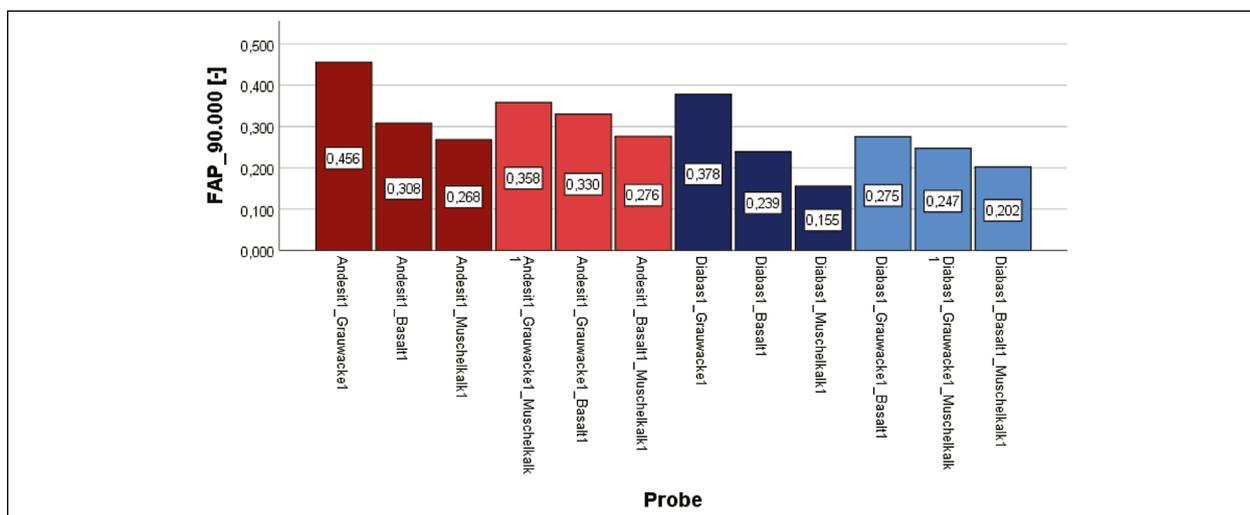


Bild 6-35: Vergleich Brechsandvarianten mit feinen Gesteinskörnungsvarianten

Die Gegenüberstellung der Kombination Brechsand (hellrot/hellblau) mit den feinen Gesteinskörnungsvarianten (dunkelrot/dunkelblau) zeigt, dass die Griffigkeit der Varianten mit einer Brechsandkombination - genauso wie bei den Kombinationsvarianten Brech-/Natursand - zwischen den feinen Gesteinskörnungsvarianten, bestehend aus den beiden Brechsanden der Brechsandvariante, zu liegen scheint (s. Bild 6-35). Daraus lässt sich schließen, dass die Sandkombinationsversuche (Brechsand und Brech-/Natursand) im Zusammenhang mit den Versuchen der feinen Gesteinskörnung (einfachen Sandvarianten) stehen.

Einfluss Größtkorn:

Beim Vergleich der Griffigkeitswerte der in Bild 6-36 dargestellten Asphaltprobekörper mit einem 8er Größtkorn und mit dem des 11er Größtkorns aus den Versuchen der feinen Gesteinskörnung, lässt sich schließen, dass bis auf die Variante Andesit-

Grauwacke keine Divergenz zwischen der Griffigkeit des 8er und 11er Größtkorns zu erkennen ist (s. Bild 6-36). Demnach scheint es, dass die Veränderung des Größtkorns keinen Einfluss auf die Griffigkeit von im Labor hergestellten Asphaltbetonoberflächen hat.

6.3.4 Ergebnisse der Griffigkeitsentwicklung der Splittmastix und der offenporigen Asphaltversuche

Die Ergebnisse der Griffigkeitsuntersuchung an Splittmastixasphalt und offenporigem Asphalt werden in diesem Kapitel gesondert dargestellt. Dabei gliedern sich die Ergebnisse der Splittmastixasphaltversuche in die des Einflusses der feinen Gesteinskörnung, der Kombination Brech- und Natursand und des Größtkorns. Die Ergebnisse des offenporigen Asphalts werden anhand des Einflusses der feinen Gesteinskörnung dargelegt. Wie auch

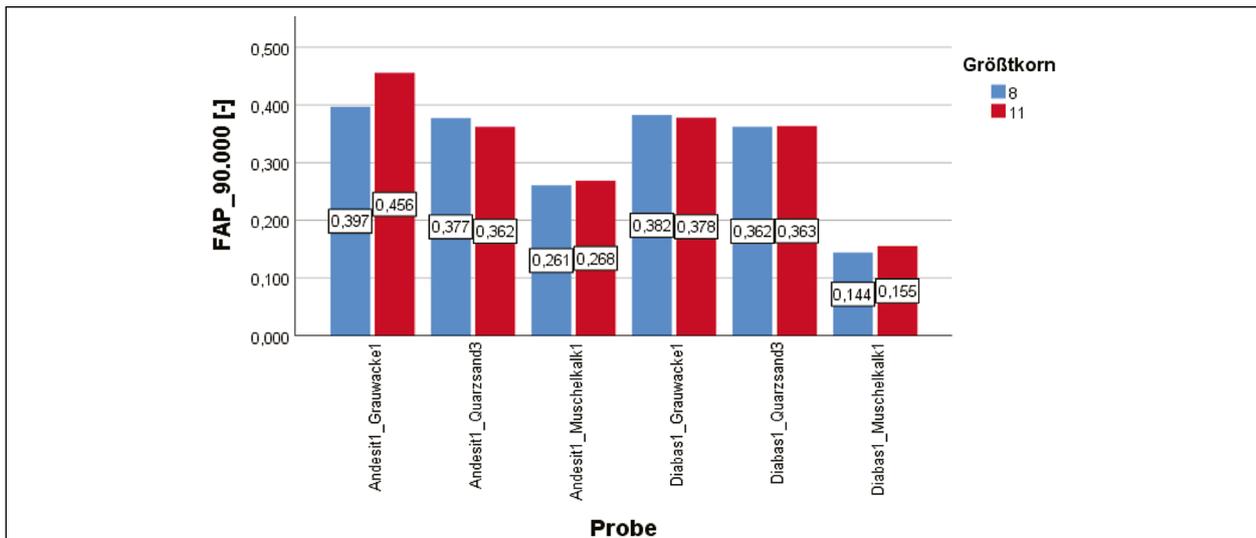


Bild 6-36: Vergleich Asphaltbeton mit 8er und 11er Größtkorn

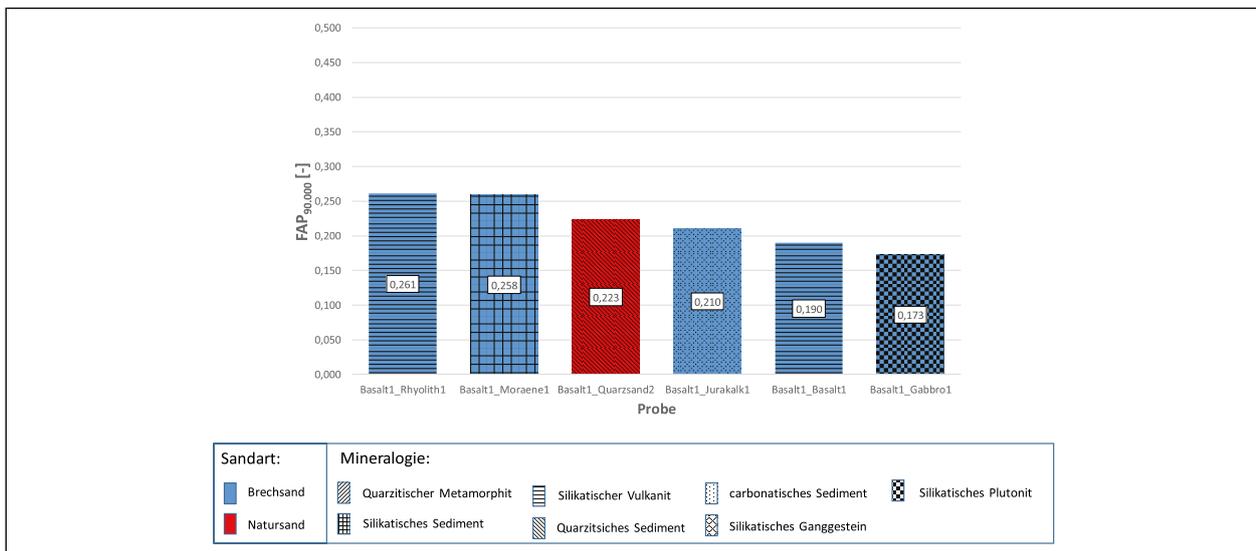


Bild 6-37: Einfluss feine Gesteinskörnung beim Splittmastixasphalt (Basalt)

schon bei den Asphaltbetonversuchen wird zur Analyse die Griffigkeit nach 90 Tsd. Überrollungen ausgewertet.

Einfluss feine Gesteinskörnung beim Splittmastixasphalt:

Wie schon bei den Asphaltbeton-Varianten werden bei den Untersuchungen des Einflusses der feinen Gesteinskörnung auf die Griffigkeit von Splittmastixasphalt die Ergebnisse der Griffigkeit nach 90 Tsd. Überrollungen gesondert von der groben Gesteinskörnung begutachtet.

In Bild 6-37 sind die Griffigkeitswerte der Probekörper der polierschwächeren groben Gesteinskörnung (Basalt1) dargestellt.

Die größte Griffigkeit erreicht der Walzsektorprobekörper mit der feinen Gesteinskörnung Rhyolith1

(0,261) und die schwächste mit Gabbro1 (0,173). Das Diagramm lässt sich in 3 Bereiche aufteilen. Der obere Bereich enthält die Splittmastixprobekörper aus Rhyolith1 und Moräne1 mit den Reibwerten von 0,261 und 0,258. Der mittlere Bereich schließt die Probekörper mit der feinen Gesteinskörnung Quarzsand2 und Jurakalk1 ein. Die Asphaltvarianten Basalt1-Basalt1 und Basalt1-Gabbro1 bilden den unteren Bereich mit Griffigkeitswerten von 0,190 und 0,173.

Bei der Gegenüberstellung der Griffigkeitswerte des Asphaltbetons und des Splittmastixasphalts werden nur die Varianten des Asphaltbetons berücksichtigt, die dieselben feinen Gesteinskörnungen im Asphaltmischgut beinhalten wie die des Splittmastixasphaltes. Somit lässt sich festhalten, dass bei den Reibwerten des Splittmastixasphaltes und des Asphalt-

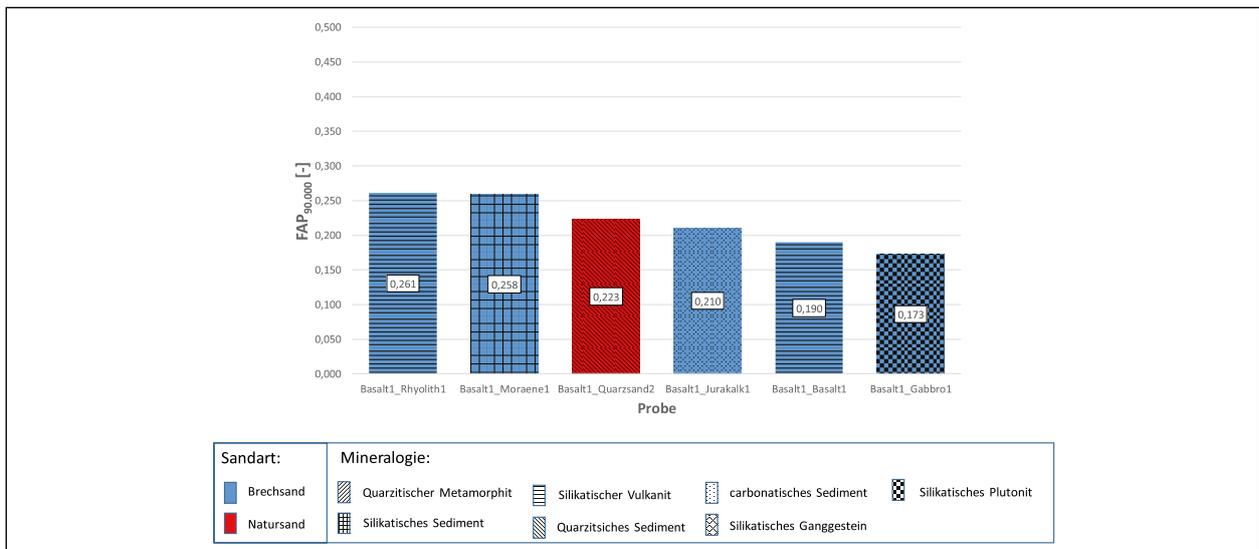


Bild 6-38: Einfluss feine Gesteinskörnung beim Splittmastixasphalt (Grauwacke)

betons die nahezu gleiche Reihung der Probekörper hinsichtlich des mineralogischen Ursprungs der Sande festzustellen ist. Ausgenommen sind dabei die Varianten mit den karbonatischen Sedimenten (Muschelkalk), welche bei den Asphaltbeton Varianten hinter den silikatischen Sedimenten und silikatischen Plutoniten einzuordnen sind. Der Unterschied zwischen den maximalen und minimalen Griffigkeitswerten der in Bild 6-37 dargestellten Varianten liegt bei 0,088. Im Vergleich zur Differenz der maximalen und minimalen Reibwerte der Diabas-Varianten beim Asphaltbeton (0,235) scheint der Einfluss der feinen Gesteinskörnung bei den polierärmeren, groben Gesteinskörnungsvarianten wesentlich geringer zu sein. Daraus lässt sich schließen, dass beim Splittmastixasphalt der Einfluss der feinen Gesteinskörnung wesentlich geringer ist als bei den Asphaltbetonen.

Die Reibwerte der polierstärkeren, groben Gesteinskörnung der Grauwacke liegen insgesamt auf einem sehr hohen Niveau. Den höchsten Reibwert in dieser Versuchsreihe weist die Variante Grauwacke1-Quarzsand3 auf, den niedrigsten die Varianten Grauwacke1- Jurakalk1 (s. Bild 6-38).

Zieht man eine Parallele von der Reihung der Sandvarianten der Grauwacke zu denen des Basaltes, zeigt sich kein signifikanter Einfluss der feinen Gesteinskörnung. Dies ist begründet in der sehr geringen Differenz der Reibwerte der Grauwackevarianten. Da nahezu alle Grauwackevarianten in der kritischen Spannweite von 0,035 liegen, kann nur ein sehr geringer bis gar kein Einfluss der feinen Gesteinskörnung festgestellt werden. Dies unterstreicht die Differenz der maximalen und minimalen

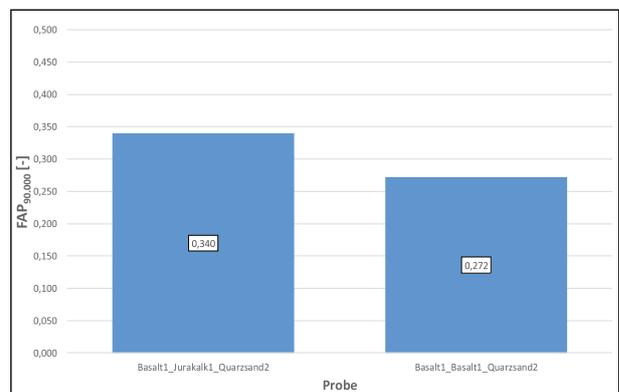


Bild 6-39: Einfluss Brech-/Natursand beim Splittmastixasphalt

Griffigkeitswerte der beiden groben Gesteinskörnungsvarianten (Basalt = 0,088 und Grauwacke = 0,062) der Splittmastixasphalte. Die durchschnittliche Abweichung der Reibwerte der groben Gesteinskörnung mit denselben Sandarten beträgt 0,180 und weist auf einen deutlich größeren Einfluss der groben Gesteinskörnung beim Splittmastixasphalte hin als die der feinen Gesteinskörnung (Differenz Reibwerte: Diabas = 0,088 und Grauwacke = 0,062).

Einfluss Kombination Brech-/Natursand beim Splittmastixasphalt:

Der Einfluss der Kombination unterschiedlicher Sande ist bei den untersuchten Splittmastixasphalten nicht signifikant. Die Variante Basalt1-Jurakalk1-Quarzsand2 weist höhere Reibwerte als die Variante Basalt1-Basalt1-Quarzsand2 auf (s. Bild 6-39). In den weiterführende Untersuchungen konnte der Einfluss der Kombination verschiedener Sande gegenüber den Varianten ohne Kombination verschiedener Sande nicht nachgewiesen werden.

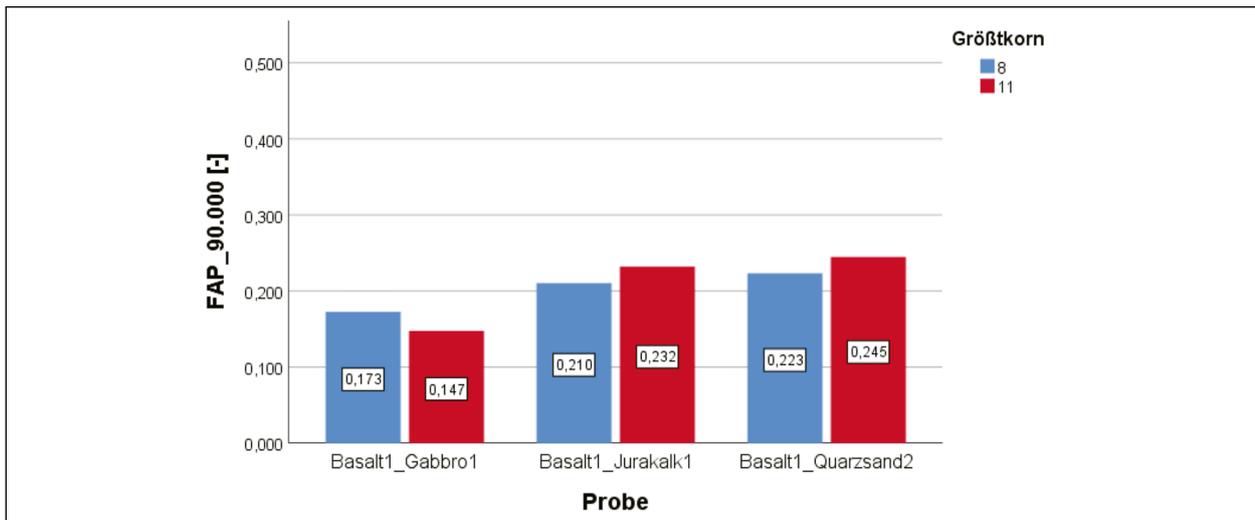


Bild 6-40: Vergleich 11er mit 8er Größtkorn beim Splittmastixasphalt

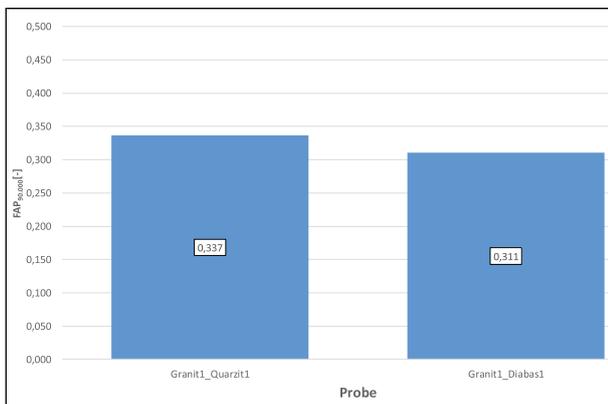


Bild 6-41: Einfluss feine Gesteinskörnung beim offenporigen Asphalt

Einfluss des Größtkorns beim Splittmastixasphalt:

Beim Gleichsetzen der Versuche der feinen Gesteinskörnung und des Größtkorns mit den identischen Sandarten lassen sich auch schon, wie bei den Versuchen des Asphaltbetons, keine Unterschiede in der Griffigkeit eines Splittmastixasphaltprobekörpers aus 8er oder 11er Größtkorn erkennen (s. Bild 6-40). Das Größtkorn hat im Rahmen der Laboruntersuchungen keinen signifikanten Einfluss.

Einfluss der feinen Gesteinskörnung beim offenporigen Asphalt:

In Bild 6-41 sind die Griffigkeitswerte nach 90 Tsd. Überrollungen der offenporigen Asphaltvarianten Granit1-Quarzit1 und Granit1-Diabas1 dargestellt. Anhand der kritischen Spannweite von 0,035 sind die Reibwerte dieser beiden Probekörper als äquivalent anzusehen.

Durch die Verwendung eines polierstarken (Quarzit1) und eines polierschwachen (Diabas1) Sandes in den Asphaltmischgütern des offenporigen Asphalts

kann anhand der Gegenüberstellung der Griffigkeitswerte dieser beiden Varianten gezeigt werden, dass die feine Gesteinskörnung keinen Einfluss auf die Griffigkeit von offenporigem Asphalt hat.

7 Auswertung und Ausarbeitung von Anforderungen an den Einfluss feiner Gesteinskörnungen

Die in Kapitel 6 ermittelten Einflüsse der feinen Gesteinskörnung auf das Griffigkeitsverhalten von Asphaltoberflächen werden in diesem Kapitel einer grundlegenden statischen Auswertung unterzogen. Dabei sollen folgende Zusammenhänge/Einflüsse der feinen Gesteinskörnung quantitativ mit der Korrelations- und Regressionsanalyse nachgewiesen werden:

- Zusammenhang zwischen dem Polierwiderstand der feinen/groben Gesteinskörnung und der Griffigkeit der Asphaltoberfläche
 - Einfluss der feinen Gesteinskörnung auf die Griffigkeit von Asphaltbeton, Splittmastix
 - Einfluss der feinen Gesteinskörnung auf die Griffigkeit von Asphaltbeton und Splittmastix durch die Variation des Größtkorns
 - Zusammenhang der Kombinationsversuche Brech-/Natursand und Brechsand mit denen der einfachen (nicht kombinierten) Sandvarianten

- Einfluss der feinen Gesteinskörnung auf die Griffigkeit von Asphaltoberflächen durch Variation des Polierwiderstands der groben Gesteinskörnung
- Zusammenhang der Mineralogie auf den Polierwiderstand der Gesteine

7.1 Grundlagen der Statistik

In der Auswertung dieser Arbeit sollen die Zusammenhänge der Einflussfaktoren auf das Griffigkeitsverhalten von Asphaltoberflächen hinsichtlich der feinen Gesteinskörnung und deren Wechselwirkungen quantifiziert werden. Für die Ausarbeitung dieser Wechselwirkungen und Zusammenhänge wird zuerst die Korrelations- und darauffolgend die Regressionsanalyse verwendet. Die vorgeschobene Korrelationsanalyse dient dazu, die Zusammenhänge, die im Kapitel 6 ermittelt wurden, statistisch zu untermauern. Aufbauend auf dieser Korrelationsanalyse werden anhand der Regressionsanalyse die Wechselwirkungen der ermittelten Einflussfaktoren der feinen Gesteinskörnung quantifiziert. Als Auswertungssoftware für die beiden Analysen wird das Programm SPSS Statistics 25 von IBM genutzt.

7.1.1 Korrelationsanalyse

Die Korrelationsanalyse gehört zu den Instrumenten, die einen Zusammenhang zwischen zwei oder mehreren Variablen ermitteln können. Dabei kann die Korrelation nicht gleich der Kausation gestellt werde. Das heißt, die Korrelationsanalyse bestimmt, ob und in welchem Ausmaß zwei Variablen zusammenhängen. Sie kann aber nicht ermitteln, in welcher Art und Weise eine Variable Einfluss auf die andere hat [PEDHAZUR und ELAZAR 1982; SCHENDERA 2008]. Die Korrelation in dieser Arbeit wird durch den Pearson-Korrelationskoeffizienten r ermittelt, welcher wie folgt berechnet wird.

$$r = \frac{s_{xy}}{\sqrt{s_x^2 * s_y^2}} \quad (4)$$

$$= \frac{n \sum x_i * y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{((n \sum x_i^2) - (\sum x_i)^2)((n \sum y_i^2) - (\sum y_i)^2)}}$$

Der Korrelationskoeffizient r wird durch den Quotienten aus der Kovarianz s_{xy} und der Quadratwurzel des Produktes der Varianz der Variablen x und y bestimmt. Die Voraussetzung zur Interpretation des Korrelationskoeffizienten setzt einen linearen Zu-

r	Interpretation
1,0	Perfekte Korrelation
<1,0	Sehr hohe Korrelation
<0,9	Hohe Korrelation
<0,7	Mittlere Korrelation
<0,5	Geringere Korrelation
<0,2	Sehr geringe Korrelation
0	Keine Korrelation

Tab. 7-1: Korrelationskoeffizient

sammenhang der beiden metrischen Variablen voraus. Dies kann mithilfe des Auftragens der x Variable auf der x - und der y Variable auf die y -Achse eines Streudiagramms untersucht werden. Bilden die beiden Variablen einen perfekten linearen Zusammenhang, d. h. bilden die Datenpunkte im Streudiagramm eine perfekte Linie, wird der maximale Wert von $r = 1,0$ erreicht. Der minimale r -Wert ist 0. In diesem Fall kann von keiner Korrelation der beiden Variablen ausgegangen werden. Für die Interpretation der Korrelationskoeffizienten zwischen 0 und 1 wird Tabelle 7-1 zu Hilfe genommen.

7.1.2 Regressionsanalyse

Die Regressionsanalyse untersucht ähnlich wie die Korrelationsanalyse die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Variablen. Dabei unterscheiden sich die beiden Methoden darin, dass die Regression ein Kausalmodell aufstellt. Das Kausalmodell beschreibt nicht nur, ob und in welchem Maße die Variablen zusammenhängen, sondern auch, inwieweit eine oder mehrere unabhängige metrische Variablen (X_i) die abhängige Variable (Y) beeinflusst. Somit kann mit der Regressionsanalyse sowohl der quantitative Zusammenhang der Variablen erklärt werden als auch der Wert der abhängigen Variablen prognostiziert werden [SCHENDERA 2008; BACKHAUS 2016]. Um die Zusammenhänge der Variablen (unabhängige und abhängige) beschreiben zu können, werden in den Kausalmodellen die Regressionsfunktionen verwendet. Da es je nach Art von Regressionsfunktion verschiedene Bedingungen und Zusammenhänge gibt, wird im weiteren Verlauf primär auf die für diese Arbeit notwendigen Funktionen (einfach und multiple lineare Regression) eingegangen.

Lineare Regression:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X \quad (5)$$

Multiple lineare Regression:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_i X_i \quad (6)$$

mit

\hat{Y} = geschätzte abhängige Variable

b_0 = konstante Parameter

b_i = Regressionskoeffizient

$X_i = X$ = unabhängige metrische Variable

Der Unterschied zwischen der linearen und multiplen linearen Regression ist, dass bei der multiplen linearen Regression die abhängige Variable nicht durch eine unabhängige metrische Variable, sondern durch i-Viele geschätzt wird. Die Bestimmung der beiden Funktion (5) und (6) wird mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt. Die Methode der kleinsten Quadrate wird anhand der einfachen linearen Regression veranschaulicht. Die grafische Form der linearen Regressionsfunktion ist eine gerade Linie, auch Regressionsgerade genannt. Die Bestimmung dieser Geraden wird mit der Methode der kleinsten Quadrate ermittelt. Diese minimiert dabei die Abstände der Beobachteten zu den Werten auf der Regressionsgerade in Richtung der Variablen Y und zwar so, dass die Summe der Quadrate der Abstände aller Punkte von der gesuchten Geraden minimal werden (s. Bild 7-1).

Wie in Bild 7-1 zu erkennen ist, werden die abhängigen und unabhängigen Variablen in einem Streudiagramm einander gegenübergestellt. Zudem ist der geschätzte Mittelwert von y (\bar{y}) und die lineare Schätzfunktion (Regressionsfunktion) eingezeichnet. Das Ziel der Methode des kleinsten Quadrates ist es, dass die Summe der Abstandsquadrate der Punkte von der Geraden kleiner ist als bei jeder anderen Geraden. Das heißt, dass die Summe der Quadrate der nicht erklärten Varianzen (Abstand y_i zu \hat{y}) minimal sein soll. Die Varianz vom geschätz-

ten Parameter \hat{y} zum tatsächlichen y_i wird auch als Residuum e_k bezeichnet.

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (e_k)^2 \tag{7}$$

Mittels der Differenzialrechnung und des Einsetzens der Formel (7) in die Formel (5) können die Regressionsparameter wie folgt berechnet werden [SCHENDERA 2008].

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y}))}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{8}$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1 * \bar{x} \tag{9}$$

Nach dem Bestimmen der Parameter der Regressionsfunktion ist die Güte dieser Funktion festzulegen. Die Güte der Regressionsfunktion wird anhand der globalen Gütemaße zur Prüfung der Regressionsfunktion und der Maße zur Prüfung der Regressionskoeffizienten bestimmt. Die Berechnung der folgenden Gütemaße kann aus dem Werk von BACKHAUS entnommen werden [BACKHAUS 2016].

- Globale Gütemaße zur Prüfung der Regressionsfunktion sind:
 - der Standardfehler
 - das Bestimmtheitsmaß
 - F-Statistik (Test mittels p-Wert)
- Maße zur Prüfung der Regressionskoeffizienten sind:
 - der t-Wert
 - der Beta Wert

Bei der Prüfung des globalen Gütemaßes gibt bei der Verwendung der Regressionsgeraden der Standardfehler der Schätzung an, welcher mittlere Feh-

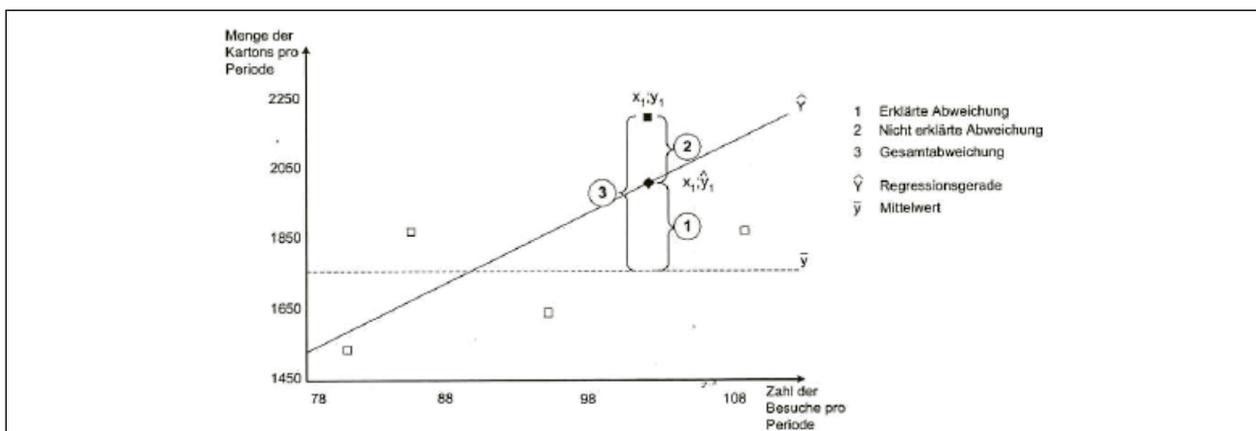


Bild 7-1: Zerlegung der Gesamtabweichung [BACKHAUS 2016]

ler bei der Schätzung der abhängigen Variable Y gemacht wird.

Das Bestimmtheitsmaß R^2 drückt aus, wie die Variationen in den abhängigen Variablen durch das Modell erklärt werden können. Das Bestimmtheitsmaß kann die Werte zwischen 1 und 0 annehmen, dabei drückt $R^2=1$ einen perfekten und $R^2=0$ einen nicht vorhandenen Zusammenhang zwischen Modell und abhängiger Variable aus. Im Fall der multiplen Regression ist das korrigierte Bestimmtheitsmaß zu verwenden, weil dieses den Einfluss der Anzahl der Regressoren und die Größe der Datenmenge, welche das Modell beeinflussen, mitberücksichtigt.

Dadurch, dass das Bestimmtheitsmaß nur die vorliegenden Daten (meist eine Stichprobe) und nicht über diese Daten hinaus die Grundgesamtheit auf Gültigkeit untersucht, wird die Signifikanz des Modells mithilfe der F-Statistik berechnet. In der F-Statistik wird im F-Test eine Nullhypothese aufgestellt, die besagt, dass kein Zusammenhang zwischen der Regressionsfunktion und der Grundgesamtheit besteht. Dies bedeutete, dass kein Zusammenhang der abhängigen Variablen zu den unabhängigen metrischen Variablen besteht und somit auch die Regressionskoeffizienten b_i gleich Null sind. Um diese Hypothese zu prüfen, wird im F-Test der empirische F-Wert mit dem theoretischen F-Wert der F-Verteilung verglichen. Ist der theoretische F-Wert kleiner als der empirische, wird die Hypothese verworfen. Der Zusammenhang zwischen der Grundgesamtheit und der Regressionsfunktion ist dann signifikant. Wird die Nullhypothese angenommen, kann keine Aussage getroffen werden. Eine Vereinfachung des F-Testes ist die Verwendung des p-Wertes der F-Statistik. Der p-Wert der F-Statistik ist definiert als die Wahrscheinlichkeit, dass eine F-verteilte Zufallsvariable größer ist als der empirisch ermittelte F-Wert [BACKHAUS 2016]. Somit lässt sich die Nullhypothese verwerfen, wenn der p-Wert kleiner als die Irrtumswahrscheinlichkeit α des F-Testes ist.

$$p < \alpha \text{ mit } \alpha = 0,05 \quad (10)$$

Die Irrtumswahrscheinlichkeit wird üblicherweise mit 5 % angegeben. Ist diese größer oder gleich des p-Wertes, kann die Nullhypothese nicht verworfen werden und keine Aussage über die Signifikanz der Grundgesamtheit getroffen werden [BACKHAUS 2016; SCHULZE 2011].

Das Gütemaß des Regressionskoeffizienten wird primär für die multiple Regression genutzt, um die Signifikanz der einzelnen Regressionskoeffizienten auf die Grundgesamtheit zu untersuchen. Im Unterschied zu der F-Statistik wird bei der t-Statistik die Nullhypothese aufgestellt, dass der einzelne Regressionskoeffizient b_i gleich Null ist. Äquivalent zum F-Test wird im t-Test die Nullhypothese mithilfe des Vergleichs des empirischen t-Werts und des theoretischen t-Wertes der t-Verteilung durchgeführt. Vereinfacht kann die Signifikanz der einzelnen Regressionskoeffizienten wie auch der F-Test mit dem p-Wert ermittelt werden.

Anhand der t-Statistik lassen sich keine Rückschlüsse auf die Bedeutung der einzelnen unabhängigen metrischen Variablen schließen, weil die t-Werte abhängig von den Einheiten der gemessenen Variablen sind. Durch die Standardisierung der Regressionskoeffizienten (Beta-Wert) kann eine Vergleichbarkeit hergestellt werden. Der Beta-Wert berechnet sich wie folgt [SCHULZE 2011]:

$$\widehat{b}_i = b_i \frac{s_{xi}}{s_Y} \quad (11)$$

mit

$$\widehat{b}_i = \text{Beta-Wert}$$

$$s_{xi} = \text{Standardabweichung der unabhängigen Variablen}$$

$$s_Y = \text{Standardabweichung der abhängigen Variable}$$

$$b_i = \text{Regressionskoeffizient}$$

Der Beta-Wert einer unabhängigen metrischen Variablen ist ein Absolutwert, der die Stärke der Wirkung auf die abhängige Variable beschreibt. Dabei ist die Höhe des Beta-Werts gleichbedeutend mit der Wirkungsstärke. Das Vorzeichen des Absolutwerts gibt die Wirkungsrichtung an, d. h. ein negatives Vorzeichen beschreibt eine negative Wirkung und ein positives eine positive Wirkung [SCHULZE 2011].

Die Modellaufstellung der linearen Regression, der Signifikanztests der Regressionsfunktion und der Regressionskoeffizienten setzen für die lineare Regression folgende Voraussetzung voraus:

- Linearität der Parameter
- Bereinigung von Ausreißern
- Homoskedastizität

- Autokorrelation (Unabhängigkeit der Residuen)
- Normalität der Residuen
- Multikollinearität (lineare Unabhängigkeit der unabhängigen Variablen)

Linearität der Parameter:

Die Linearität der Parameter wird in dieser Arbeit bei der Korrelationsanalyse berücksichtigt. Nach [SCHENDERA 2008] wird die Linearität zwischen zwei Parametern eingehalten, wenn die Parameter hoch korrelieren ($r > 0,7$). Liegt der Korrelationskoeffizient unter 0,7, kann die Linearität mittels einer grafischen Residuenanalyse erfolgen. Dazu wird die Abhängigkeit zwischen den geschätzten standardisierten Werten der abhängigen Variablen und den standardisierten Residuen in einem x-y Koordinatensystem untersucht. Kann z. B. eine Heteroskedastizität oder Nichtlinearität festgestellt werden, kann von einer Verletzung der Prämisse der Linearität der Parameter ausgegangen werden [SCHENDERA 2008; SCHULZE 2011].

Bereinigung von Ausreißern:

Nach [BALTES-GÖTZ 2019] können schon wenige Ausreißer einen großen Einfluss auf die Regressionsergebnisse ausüben. Zudem können Ausreißer dazu führen, dass die Prämissen der Homoskedastizität und die Normalität der Residuen zurückzuweisen sind. Um den Einfluss der Ausreißer zu untersuchen, führte [COHEN 2003] den Hebelwert und Diskrepanzwert ein. Hebelwerte messen den Einfluss eines Punktes in der x-Dimension auf die Anpassung der Regression, d. h. ein Ausreißer hat eine große Hebelwirkung, wenn er räumlich weit entfernt vom Mittelwert der restlichen Verteilung liegt. Hebelwerte können Werte von 0 bis $(N-1)/N$ annehmen, wobei N die Anzahl der Proben ist. Die Diskrepanzwerte sind gleichzusetzen mit den standardisierten Residuen. Ist ein Absolutwert der Residuen größer oder gleich drei gehört dieser eindeutig zu den Ausreißern. Die Wechselwirkung von Hebelwirkung und Diskrepanz zeigt den Einfluss des Ausreißers. Ist z. B. eine der beiden Größen eher gering, so ist auch der Einfluss gering. Sind beide Größen groß, so ist auch der Einfluss groß [COHEN 2003; BALTES-GÖTZ 2019]. Zur Quantifizierung des Einflusses eines Ausreißers wird die Cook-Distanz herangezogen. Bei der Cook-Distanz handelt es sich um die durchschnittliche quadratische Abweichung zwischen dem Schätzwert des vollen und dem des um die Beobachtung reduzierten Datensatzes im Verhältnis zum mittleren quadratischen

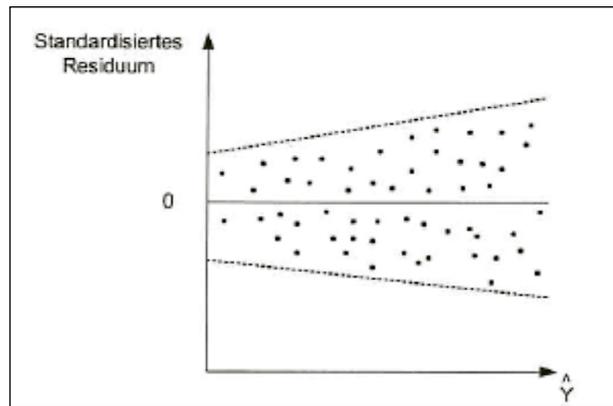


Bild 7-2: Tests auf Homoskedastizität [SCHULZE 2011]

Fehler im geschätzten Modell. Ist die Cook-Distanz über eins, ist davon auszugehen, dass der Ausreißer einen substantziellen Einfluss auf das Modell hat [SCHENDERA 2008].

Homoskedastizität:

Homoskedastizität beinhaltet die Annahme der Varianzgleichheit der Residuen. Ist eine Änderung der Varianz der Residuen in Abhängigkeit der prognostizierten Werte der abhängigen Variablen zu erkennen, liegt Heteroskedastizität vor. Für das Detektieren einer Heteroskedastizität oder Homoskedastizität werden analog zum Linearitätstest die standardisierten Residuen über die geschätzten standardisierten Werte der abhängigen Variablen in einem Streudiagramm dargestellt. Wird wie in Bild 7-2 zu sehen ist eine nicht zufällige, sondern z. B. trichterförmige Punktfäche dargestellt, kann von einer Heteroskedastizität ausgegangen werden.

Autokorrelation:

Man spricht von Unabhängigkeit der Residuen, wenn aufeinanderfolgende Residuen dicht beieinander liegen und eine Verbundenheit aufweisen. Ist dies erfüllt, spricht man von Autokorrelation. Zur Prüfung auf Autokorrelation wird die Durbin-Watson-Statistik herangezogen. Der Durbin-Watson-Test prüft die Nullhypothese, dass die Beobachtungswerte nicht autokorrelieren, wenn der empirische d-Wert (Berechnung s. [BACKHAUS 2016]) im folgenden Bereich liegt.

$$d_{0;\alpha}^+ \leq d \leq 4 - d_{0;\alpha}^+ \quad (12)$$

mit

d = empirischer d-Wert

$d_{0;\alpha}^+$ = oberer Grenzwert der Durbin-Watson-Statistik (Aus Durbin-Watson Tabelle mit $\alpha = 0,05$ [SACHS et al. 2009])

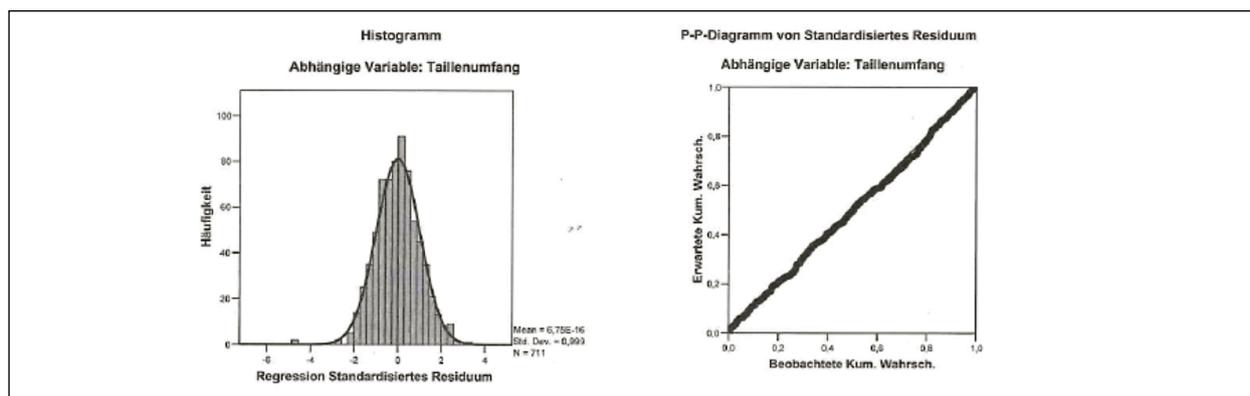


Bild 7-3: Test auf normalverteilte Residuen [SCHENDERA 2008]

Normalität der Residuen:

Die Normalverteilung der Residuen bildet eine Grundlage des Signifikanztests (F-Statistik u. t-Statistik) und führt bei Nicht-Normalverteilung der Residuen zu einer Einschränkung der Aussagekraft oder auch Ungültigkeit des Testverfahrens. Nach [BALTES-GÖTZ 2019] lässt sich die Normalverteilung der Residuen anhand des Shapiro-Wilk-Tests analytisch und am Histogramm der standardisierten Residuen und des P-P-Diagramms von standardisierten Residuen, welches die erwarteten kumulierten Wahrscheinlichkeiten mit den beobachteten kumulierten Wahrscheinlichkeiten vergleicht, grafisch auswerten. Liegen im P-P-Diagramm die standardisierten Residuen auf der Referenzlinie, welche den Ursprung im Nullpunkt und eine Steigung von Eins hat, kann von einer Normalverteilung ausgegangen werden. Sind deutliche Abweichungen von der Geraden zu verzeichnen, kann nicht von einer Normalverteilung ausgegangen werden (s. Bild 7-3).

Der Shapiro-Wilk-Test prüft die Nullhypothese auf die Normalverteilung. Ist der empirische W-Wert kleiner als der kritische W-Wert, kann die Nullhypothese angenommen werden. Die Berechnung des W-Wertes kann aus der Veröffentlichung von [HANUSZ und TARASIŃSKA 2015] und der kritische W-Wert aus den Tabellen der Arbeit von [SHAPIRO 1965] entnommen werden. Die Gültigkeit der Nullhypothese lässt sich außerdem anhand des p-Wertes bestimmen.

$$p > \alpha = 0,05 \quad (13)$$

Ist der p-Wert größer als die Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 Prozent, so kann die Nullhypothese nicht verworfen werden und es kann von einer Normalverteilung der Residuen ausgegangen werden.

Multikollinearität:

Die Multikollinearität ist ein spezielles Problem der multiplen Regression und besteht, wenn eine lineare Abhängigkeit der unabhängigen metrischen Variablen zu erkennen ist. Lassen sich zwei unabhängige metrische Variablen als lineare Funktion darstellen oder korrelieren sie untereinander, liegt eine Multikollinearität vor. Ist dies bei einer multiplen Regression vorhanden, beeinflussen die unabhängigen Variablen nicht nur die abhängige Variable, sondern auch sich untereinander. Dies hat zu Folge, dass die Regressionskoeffizienten, die Standardabweichung und die Signifikanztests nicht mehr interpretierbar sind. Ist dies der Fall, ist der Einfluss der unabhängigen metrischen Variablen auf die abhängige Variable nicht mehr ableitbar [SCHENDERA 2008; SCHULZE 2011]. Die Stärke der Multikollinearität lässt sich mithilfe des Variance Inflation Factor (VIF) bestimmen. Der Variance Inflation Factor basiert auf dem Bestimmtheitsmaß für die Regression einer unabhängigen Variablen auf die übrigen unabhängigen Variablen (s. (14)).

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R_i^2} \quad (14)$$

mit

$$VIF = \text{Variance Inflation Factor}$$

R_i^2 = Bestimmtheitsmaß für die Regression der unabhängigen Variablen auf die anderen unabhängigen Variablen der Regressionsfunktion

Mit steigendem Bestimmtheitsmaß der unabhängigen metrischen Variablen steigt auch VIF. Bei einem $VIF = 10$ kann von einer Multikollinearität ausgegangen werden und das Ergreifen von Maßnahmen ist erforderlich [SCHENDERA 2008].

7.2 Statistische Auswertung

Einfluss des Polierwiderstandes auf die Griffigkeit:
 Durch die Ergebnisse der Griffigkeitsuntersuchung aus Kapitel 6 ist ein Zusammenhang zwischen den Polierwiderständen der feinen/groben Gesteinskörnung und der Griffigkeit auf den Asphaltprobekörpern festgestellt worden. Dieser Zusammenhang soll anhand einer Korrelation und multiplen linearen Regression quantifiziert werden. Bei beiden Untersuchungen wird der Griffigkeitswert ($FAP_{90,000}$) als abhängige Variable und die Polierwiderstände der feinen (PWS_{fein}) und groben Gesteinskörnung (PWS_{grob}) als unabhängige Variable festgelegt. Somit ist für die statistisch Analyse folgendes Regressionsmodell festgelegt worden.

$$FAP_{90,000} = a + b * pws_{grob} + c * pws_{fein} \quad (15)$$

In der Modellzusammenfassung weist der R-Wert = 0,766 darauf hin, dass ein hoher Zusammenhang zwischen Modell und abhängiger Variable besteht (s. Tabelle 7-2). Das korrigierte R-Quadrat drückt aus, dass fast 6/10 der Variationen in der abhängigen Variablen durch das Modell erklärt werden können. Zusätzlich sind die erklärten Anteile (Quadrat-

Modellzusammenfassung ^b					
Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers	Durbin-Watson-Statistik
1	,766 ^a	,587	,569	,05483925	1,540

a. Einflussvariablen: (Konstante), pws_feine, pws_grobe
 b. Abhängige Variable: FAP_90.000

Tab. 7-2: Bestimmtheitsmaß und Autokorrelation der Regression der Griffigkeit und des Polierwiderstands

summe Regression = 0,197) größer als die nicht erklärten Anteile (Quadratsumme nicht standardisierte Residuen = 0,138) und der F-Test ist nicht signifikant. Somit kann die Nullhypothese „Zwischen den unabhängigen Variablen und der abhängigen Variable besteht kein linearer Zusammenhang“ verworfen werden und eine gute globale Güte der Regressionsfunktion identifiziert werden (s. Tabelle 7-3). Das bedeutet, dass das Modell zur Erklärung der abhängigen Variablen geeignet ist.

Das Gütemaß der Regressionskoeffizienten lässt sich anhand der Signifikanz des t-Tests bestimmen. In diesem Fall sind beide p-Werte der Koeffizienten kleiner als die Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %, sodass der t-Test zurückgewiesen werden muss. Dies bedeutet, dass die Koeffizienten signifikant sind und das Gütemaß der Regressionsfunktion als gut befunden wird.

Aus der Tabelle 7-4 der Koeffizienten lässt sich die Regressionsfunktion wie folgt ermitteln:

ANOVA ^a						
Modell		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
1	Regression	,197	2	,098	32,697	,000 ^b
	Nicht standardisierte Residuen	,138	46	,003		
	Gesamt	,335	48			

a. Abhängige Variable: FAP_90.000
 b. Einflussvariablen: (Konstante), pws_feine, pws_grobe

Tab. 7-3: F-Test Regression der Griffigkeit und des Polierwiderstands

Koeffizienten ^a												
Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Sig.	Korrelationen			Kollinearitätsstatistik		
		Regressionskoeffizient B	Std.-Fehler				Beta	Nullter Ordnung	Partiell	Teil	Toleranz	VIF
1	(Konstante)	-,085	,048		-1,750	,087						
	pws_grobe	,576	,105	,518	5,464	,000	,494	,627	,518	,998	1,002	
	pws_feine	,470	,076	,587	6,186	,000	,565	,674	,586	,998	1,002	

a. Abhängige Variable: FAP_90.00

Tab. 7-4: Koeffizienten Regression des Polierwiderstands und der Griffigkeit

$$FAP_{90,000} = -0,085 + 0,576 * pws_{grob} + 0,470 * pws_{fein} \quad (16)$$

Anhand der standardisierten Koeffizienten lässt sich der Einfluss der beiden Variablen, der Polierwiderstand der feinen (0,587) und groben Gesteinskörnung (0,518) auf die unabhängige Variable Griffigkeit vergleichen. Der standardisierte Koeffizient kann maximal 1 werden, somit weisen die beiden unabhängigen Variablen einen hohen und in positiver Richtung verlaufenden Einfluss auf. Dabei hat der Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnung einen 13 % größeren statistischen Einfluss als der der groben Gesteinskörnung.

Wie in Kapitel 6.1.2 beschrieben, müssen für die Aufstellung einer Regressionsanalyse bestimmte Voraussetzung gelten. Die Erste ist die Linearität,

Tests auf Normalverteilung						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Unstandardized Residual	,093	49	,200*	,962	49	,120
Standardized Residual	,093	49	,200*	,962	49	,120

* Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.
a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

Tab. 7-5: Normalität der Residuen Regression der Griffigkeit und des Polierwiderstands

welche schon bei der Korrelationsuntersuchung in Bild 7-4 bewiesen wurden. Anhand derselben Abbildung lässt sich die Homoskedastizität feststellen, welche in den Voraussetzungen erwünscht ist. Es besteht Homoskedastizität, da keine systematische Streuung der Residuen festzustellen ist. Durch die Signifikanz des Shapiro-Wilk-Tests ($p = 0,120 > 0,05$) kann auf eine Normalität der Residuen geschlossen werden (s. Tabelle 7-5).

Der Durbin-Watson-Wert beträgt laut Tabelle 7-2 1,540 und liegt zwischen dem oberen und dem unteren Grenzwert der Durbin-Watson-Statistik ($Lu = 1,462$ $Lo = 4 - 1,628 = 2,372$ mit $Alpha = 0,05$). Anhand dieser Erkenntnis ist keine Autokorrelation der Residuen festzustellen. Mittels des absolut größten Werts der maximalen und minimalen Cook-Distanz (0,152) und den standardisierten Residuen (2,567) lässt sich kein Ausreißer und auch kein substantieller Einfluss der Ausreißer identifizieren. Dies lässt sich daraus schließen, dass die ermittelte maximale Cook-Distanz kleiner eins und die maximalen standardisierten Residuen kleiner drei sind (s. Tabelle 7-6).

Die letzte Voraussetzung der multiplen Regression ist die der Multikollinearität der Regressionskoeffizienten. Nach Tabelle 7-4 liegt der VIF-Wert bei 1,002 und liegt damit deutlich unter dem Grenzwert von 10. Daraus lässt sich folgern, dass keine Multikollinearität zu verzeichnen ist. Somit sind alle Voraussetzungen der multiplen Regression erfüllt und das Modell ist zur Beschreibung der Griffigkeit auf den Asphaltprobekörper geeignet.

Residuenstatistik ^a					
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-Abweichung	N
Nicht standardisierter vorhergesagter Wert	,1730818	,4275731	,2979500	,06400872	49
Standardisierter vorhergesagter Wert	-1,951	2,025	,000	1,000	49
Standardfehler des Vorhersagewerts	,009	,021	,013	,003	49
Korrigierter Vorhersagewert	,1752601	,4324996	,2975621	,06403879	49
Nicht standardisierte Residuen	-,14075822	,09317796	,00000000	,05368461	49
Standardisierte Residuen	-2,567	1,699	,000	,979	49
Stud. nicht standardisierte Residuen	-2,630	1,750	,003	1,005	49
Gelöschtes Residuum	-,14782482	,09883551	,00038787	,05665023	49
Stud. gelöschtes Residuum	-2,823	1,791	-,004	1,031	49
Mahalanobis-Abstand	,444	6,171	1,959	1,493	49
Cook-Distanz	,000	,152	,018	,028	49
Zentrierter Hebelwert	,009	,129	,041	,031	49

a. Abhängige Variable: pws_60kmh

Tab. 7-6: Prüfung auf Ausreißer Regression der Griffigkeit und des Polierwiderstandes

Einfluss des Polierwiderstandes auf die Griffigkeit von Asphaltbeton:

Um den Einfluss der verschiedenen Asphaltarten und des Größtkorns zu quantifizieren, werden die Daten im ersten Schritt gefiltert nach der Asphaltart. Im zweiten Schritt werden die gefilterten Daten erneut nach dem Größtkorn gefiltert. Sowohl im ersten als auch im zweiten Filterungsschritt wird, wie auch bei der Analyse des Zusammenhangs der Polierwiderstände mit der Griffigkeit, eine Korrelation und multiple Regression durchgeführt. Bei beiden statistischen Analysen ist die abhängigen Variable die Griffigkeitswert und die unabhängigen Variablen der Polierwiderstand der groben und feinen Gesteinskörnung. Eine Analyse des offenporigen Asphalts wird nicht durchgeführt, weil anhand der Ergebnisse aus Kapitel 5.5 eindeutig gezeigt wurde, dass die feine Gesteinskörnung keinen statistischen Einfluss auf die Griffigkeit bei dieser Asphaltart besitzt.

Die Korrelationsanalyse des Asphaltbetons belegt, dass der Polierwiderstand der groben Gesteinskörnung eine geringe und der Polierwiderstand der feinen eine hohe Korrelation gegenüber der der Griffigkeit

der Asphaltprobekörper offenbart ($r_{\text{fein}}=0,852$; $r_{\text{grob}}=0,330$).

Dadurch, dass die Voraussetzung der Linearität bei der Korrelation und Regression gegeben ist (s. Anhang), kann ein höherer statistischer Zusammenhang zwischen der feinen Gesteinskörnung und der Griffigkeit identifiziert werden als bei der groben Gesteinskörnung und der Griffigkeit der Asphaltbetonprobekörper. Dieser statistische Zusammenhang wird anhand der folgenden multiplen Regression des Asphaltbetons quantifiziert. Die globale Güte der Regression zeigt auf, dass 9/10 der Variationen in der abhängigen Variable durch das Modell beschrieben werden kann und dass ein sehr hoher Zusammenhang zwischen Modell und abhängiger Variable besteht (korrigierte $R^2=0,871$; $R=0,938$).

Der F-Test belegt, dass keine Signifikanz zu ermitteln ist ($p=0,00 < 0,05$) und dass somit das Modell dieser Regression die abhängige Variable Griffigkeit erklären kann.

Nach der Bestätigung der Eignung des Modells lässt sich im zweiten Schritt die Regressionsfunktion des Asphaltbetons wie folgt ableiten (vgl. Tabelle 7-10):

$$FAP_{90,000} = -0,038 + 0,543 * pws_{grob} + 0,668 * pws_{fein} \quad (17)$$

Das Gütemaß der Regressionskoeffizienten wird für gut befunden, da die p-Werte der Koeffizienten unter der Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % liegen. Dies bedeutet, dass die Koeffizienten signifikant und für die Beschreibung der Regressionsgeraden geeignet sind.

Bei der Analyse der standardisierten Koeffizienten ist festzuhalten, dass der Koeffizient des Polierwiderstandes der feinen Gesteinskörnung (0,881) ei-

Korrelationen				
		FAP_90.000	pws_grobe	pws_feine
Korrelation nach Pearson	FAP_90.000	1,000	,330	,852
	pws_grobe	,330	1,000	-,072
	pws_feine	,852	-,072	1,000
Sig. (1-seitig)	FAP_90.000		,040	,000
	pws_grobe	,040		,355
	pws_feine	,000	,355	
N	FAP_90.000	29	29	29
	pws_grobe	29	29	29
	pws_feine	29	29	29

Tab. 7-7: Korrelation des Asphaltbetons

Modellzusammenfassung ^b				
Modell R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers	Durbin-Watson-Statistik
,938 ^a	,880	,871	0,02916273	2,190
a. Einflussvariablen: (Konstante), pws_feine, pws_grobe				
b. Abhängige Variable: FAP_90.000				

Tab. 7-8: Bestimmtheitsmaß und Autokorrelation Regression des Asphaltbetons

ANOVA ^a						
	Modell	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
1	Regression	,162	2	,081	95,180	,000 ^b
	Nicht standardisierte Residuen	,022	26	,001		
	Gesamt	,184	28			
a. Abhängige Variable: FAP_90.000						
b. Einflussvariablen: (Konstante), pws_feine, pws_grobe						

Tab. 7-9: F-Test Regression des Asphaltbetons

Koeffizienten ^a											
Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Sig.	Korrelationen			Kollinearitätsstatistik	
		Regressionskoeffizient B	Std.-Fehler	Beta			Nullter Ordnung	Partiell	Teil	Toleranz	VIF
1	(Konstante)	-,139	,038		-3,657	,001					
	pws_grobe	,543	,094	,393	5,768	,000	,330	,749	,392	,995	1,005
	pws_feine	,668	,052	,881	12,918	,000	,852	,930	,878	,995	1,005

a. Abhängige Variable: FAP_90.000

Tab. 7-10: Koeffizienten Regression des Asphaltbeton

Korrelationen					Korrelationen				
		FAP_90.000	pws_grobe	pws_feine			FAP_90.000	pws_grobe	pws_feine
Korrelation nach Pearson	FAP_90.000	1,000	,337	,841	Korrelation nach Pearson	FAP_90.000	1,000	,268	,925
	pws_grobe	,337	1,000	-,082		pws_grobe	,268	1,000	,000
	pws_feine	,841	-,082	1,000		pws_feine	,925	,000	1,000
Sig. (1-seitig)	FAP_90.000	-	,058	,000	Sig. (1-seitig)	FAP_90.000	-	,303	,004
	pws_grobe	,058	-	,355		pws_grobe	,303	-	,500
	pws_feine	,000	,355	-		pws_feine	,004	,500	-
N	FAP_90.000	23	23	23	N	FAP_90.000	6	6	6
	pws_grobe	23	23	23		pws_grobe	6	6	6
	pws_feine	23	23	23		pws_feine	6	6	6

Tab. 7-11: Korrelation Asphaltbeton mit 11er (links) und 8er (rechts) Größtkorn

nen mehr als doppelt so großen statistischen Einfluss auf die Griffigkeit aufweist wie der Koeffizient des Polierwiderstandes der groben Gesteinskörnung (0,393). Die Schlussfolgerung daraus ist, dass die feine Gesteinskörnung einen um 2,24fach größeren statistischen Einfluss auf die Griffigkeit bei Asphaltbetonoberflächen hat als die grobe Gesteinskörnung.

Die quantitative Einschätzung des Einflusses der feinen Gesteinskörnung auf die Griffigkeit von Asphaltbeton kann als plausibel angenommen werden, da die Voraussetzungen der Aufstellung der multiplen Regression, wie im Folgenden dargestellt, erfüllt sind. Der vorhandene VIF-Wert ist kleiner 10 und somit ist keine Multikollinearität festzustellen (s. Anhang). Außerdem liegt der Durbin-Watson-Wert (2,190) in den Grenzen des zugehörigen Tests ($1,255 < 2,190 < 4 - 1,560 = 2,440$). Die Autokorrelation der Residuen kann dadurch ausgeschlossen werden (s. Tabelle 7-8). Die Linearität, Homoskedastizität und Normalität der Residuen, welche durch die Signifikanz des Shapiro-Wilk-Tests belegt wird ($p = 0,178 > 0,05$) kann für dieses Modell bestätigt

werden (s. Anhang). Die absoluten maximalen und minimalen Werte der Cook-Distanz und der standardisierten Residuen sind 0,360 und 2,163 und liegen unter den Grenzen von 1,00 und 3,00 (s. Anhang). Somit kann von keinem signifikanten Einfluss der Ausreißer ausgegangen werden.

Einfluss der Polierwiderstände auf die Griffigkeit bei der Variation des Größtkorn bei Asphaltbeton:

Der quantitative Einfluss der feinen Gesteinskörnung durch die Variation des Größtkorns beim Asphaltbeton wird durch den Vergleich der Ergebnisse der Korrelations- und Regressionsanalyse des 11er und 8er Größtkorn des Asphaltbetons ermittelt.

Die Korrelationsanalyse der Asphaltvarianten mit 11er Größtkorn zeigt als Ergebnis eine hohe Korrelation bei den Polierwiderständen der feinen Gesteinskörnung ($r = 0,841$) und eine geringe Korrelation bei den Polierwiderständen der groben Gesteinskörnung ($r = 0,337$). Bei den Asphaltbetonvarianten des 8er Größtkorns sind sehr hohe Korrelationen bei der feinen Gesteinskörnung ($r = 0,925$) und geringe bei der groben Gesteinskörnung

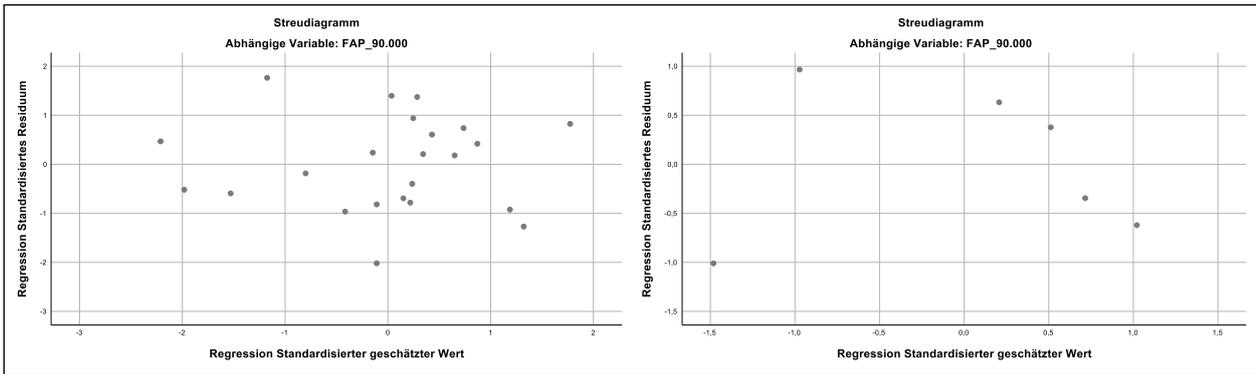


Bild 7-4: Linearitäts- und Homoskedastizitätstest von Asphaltbeton mit 11er (links) und 8er (rechts) Größtkorn

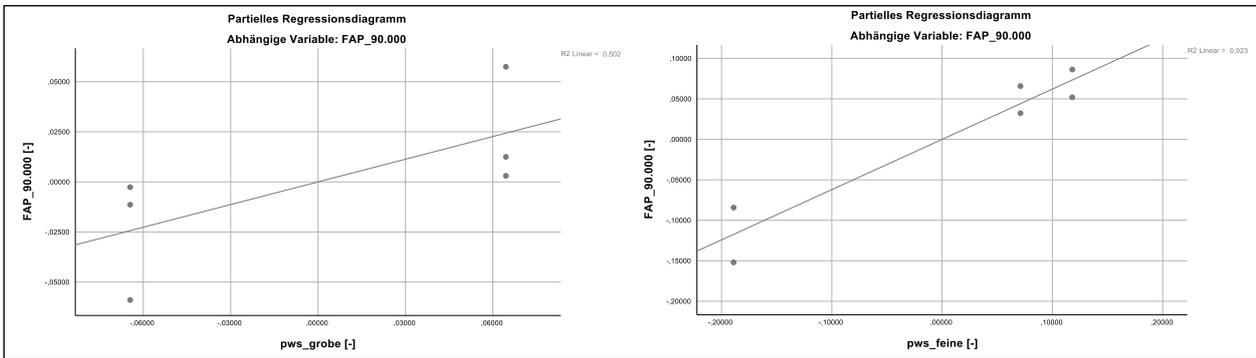


Bild 7-5: Linearitätstest des Polierwiderstands und der Griffigkeit von Asphaltbeton mit 8er Größtkorn

Modellzusammenfassung ^b					
Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers	Durbin-Watson-Statistik
8er	,964 ^a	,928	,881	,03429157	3,127
11er	,934 ^a	,873	,860	,02306420	2,021

a. Einflussvariablen : (Konstante), pws_feine, pws_grobe
 b. Abhängige Variable: FAP_90.000

Tab. 7-12: Bestimmtheitsmaß und Autokorrelation der Regression der Versuche mit dem Größtkorn

($r = 0,268$) zu verzeichnen. Jeweils bei den 8er und 11er Größtkornvarianten sind die groben Gesteinskörnungen signifikant (beim 11er: $0,058 > 0,05$ und beim 8er: $0,303 < 0,05$). Folgerichtig zeigt die grobe Gesteinskörnung keinen statistischen Zusammenhang mit der Griffigkeit auf.

Die Linearität des Asphaltbetons mit 11er Größtkorn ist nach Bild 7-4 gegeben. Die Linearität bei den Asphaltbetonvarianten mit 8er Größtkorn ist aufgrund mangelnder Daten nicht eindeutig bestimmbar.

Somit sind die Ergebnisse des Asphaltbetons mit dem 8er Größtkorn mit einer gewissen Unsicherheit zu betrachten. Auf Grundlage des Bildes 7-5 kann

ANOVA ^a						
		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
11er	Regression	,116	2	,058	68,852	,000 ^b
	Nicht standardisierte Residuen	,017	20	,001		
	Gesamt	,133	22			
8er	Regression	,046	2	,058	68,852	,000 ^b
	Nicht standardisierte Residuen	,004	3	,001		
	Gesamt	,049	5			

a. Abhängige Variable: FAP_90.000
 b. Einflussvariablen : (Konstante), pws_feine, pws_grobe

Tab. 7-13: F-Test der Regression der Versuche mit dem Größtkorn

bei einer größeren Datenmenge aber von einer Linearität ausgegangen werden.

Bei der Modellzusammenfassung lässt sich ein R-Wert größer 0,900 bei beiden Größtkorn Varianten feststellen. Dies zeigt, dass ein hoher Zusammenhang zwischen Modell und abhängiger Variable besteht. Das korrigierte R-Quadrat mit 0,881 und 0,860 drückt aus, dass fast 9/10 der Variationen des 8er und 11er Größtkorn in der abhängigen Variablen durch das Modell erklärt werden können (s. Tabelle 7-12).

Der F-Test belegt, dass keine Signifikanz zu ermitteln ist ($p < 0,05$) und dass das Modell dieser Regression somit die abhängige Variable Griffigkeit erklären kann. Die globale Güte des Modells ist somit bewiesen und die Regressionsfunktionen sind wie folgt zu definieren (s. Tabelle 7-14).

$$FAP_{90.000;11er} = -0,166 + 0,409 * pws_{grob;11er} + 0,875 * pws_{fein;11er} \quad (18)$$

$$FAP_{90.000;8er} = -0,055 + 0,925 * pws_{fein;8er} \quad (19)$$

Anhand der Regressionsanalyse lässt sich diese Erkenntnis aus der Korrelationsanalyse bestätigen. Die Nullhypothese des t-Tests des Koeffizienten des Polierwiderstandes der groben Gesteinskörnung der Varianten mit dem 8er Größtkorn ist als signifikant einzustufen ($p = 0,182 > 0,05$). Die Güte der Koeffizienten des Polierwiderstandes der feinen Gesteinskörnung ist somit nicht erfüllt, wohin die der feinen Gesteinskörnung erfüllt ist ($p = 0,009 < 0,05$). Daraus ergibt sich, dass die grobe Gesteinskörnung keinen statistischen Einfluss auf die Griffigkeit eines Asphaltbetons mit 8er Größtkorn hat und somit auch nicht in der Regressionsfunktion mitberücksichtigt wird. Dieses Ergebnis ist mit einer Unsicherheit behaftet, da die Messdaten nur in sehr geringer Menge vorhanden sind und die Tests auf Signifikanz darauf sehr empfindlich reagieren. Die Residuen der Polierwiderstände der feinen Gesteinskörnung (0,925) sind statistisch um das 3,5fache größer als die der Polierwiderstände der groben Gesteinskörnung (0,268) (s. Tabelle 7-14). Daraus lässt sich schließen, dass die feine Gesteinskörnung einen um fast 3,5fach größeren statistischen Einfluss auf die Griffigkeit von Straßenoberflächen bei einem Asphaltbeton mit 8er Größtkorn aufweist als die der groben Gesteinskörnung. Bei den Varianten des 11er Größtkorns sind sowohl die Polierwiderstände

de der groben und feinen Gesteinskörnung nicht signifikant ($p = 0,00 < 0,05$) und haben folglich einen statistischen Einfluss auf die Griffigkeit (s. Tabelle 7-14). Die standardisierten Residuen der Polierresistenz der feinen Gesteinskörnung betragen 0,875 und die der Polierresistenz der groben 0,409. Insofern ist ein um 2,1facher größerer statistischer Einfluss der feinen Gesteinskörnung auf die Griffigkeit eines Asphaltbetons mit 11er Größtkorn festzustellen als der der groben Gesteinskörnung. Beim Vergleich der Einflussfaktoren der Polierwiderstände der 8er (3,5fache) und 11er (2,1fache) Asphaltbetonvarianten kann festgehalten werden, dass der Einfluss der feinen Gesteinskörnung bei den Asphaltbetonvarianten mit 8er Größtkorn statistisch größer ist als bei den Probekörpern mit 11er Größtkorn.

Bei der Prüfung der Voraussetzung der multiplen Regression wird die Signifikanz des Shapiro-Wilk-Tests sowohl für die Varianten mit 8er als auch 11er Größtkorn belegt (8er: $p = 0,702 > 0,05$; 11er: $p = 0,904 > 0,05$). Folgerichtig ist die Normalverteilung der Residuen gegeben. Weiterhin ist keine Multikollinearität der beiden Asphaltbeton Varianten festzustellen, weil beide VIF-Werte (8er: 1,000; 11er: 1,007) kleiner 10 sind. Zudem kann davon ausgegangen werden, dass die Ausreißer keinen Einfluss auf das Regressionsmodell ausüben, da die absoluten minimalen und maximalen Werte der standardisierten Residuen (8er: 1,010; 11er: 2,237) unter der Grenze von 3,00 liegen (s. Anhang). Nach Bild 7-4 kann Homoskedastizität bei dem Modell des 11er Größtkorns eindeutig festgestellt werden, wohingegen bei dem Modell des 8er Größtkorns die Homoskedastizität nicht eindeutig feststellbar ist. Dasselbe gilt auch bei der Autokorrelation der Residuen. Der Durbin-Watson-Wert für das Modell des 8er Größtkorns liegt unterhalb der Grenzen des zugehörigen Tests, wohingegen der

Koeffizienten ^a											
Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Sig.	Korrelationen			Kollinearitätsstatistik	
		Regressionskoeffizient B	Std.-Fehler	Beta			Nullter Ordnung	Partiell	Teil	Toleranz	VIF
11er	(Konstante)	-,166	,046		-3,619	,002					
	pws_grobe	,585	,114	,409	5,115	,000	,337	,753	,407	,993	1,007
	pws_feine	,698	,064	,875	10,946	,000	,841	,926	,872	,993	1,007
8er	(Konstante)	-,055	,086		-,645	,565					
	pws_grobe	,377	,217	,268	1,738	,181	,268	,708	,268	1,000	1,000
	pws_feine	,621	,104	,925	5,990	,009	,925	,961	,925	1,000	1,000

a. Abhängige Variable: FAP_90.000

Tab. 7-14: Koeffizienten Regression des Asphaltbetons mit 8er und 11er Größtkorn

Durbin-Watson-Wert des Modells des 11er Größtkorns innerhalb der Grenzen liegt (8er: $0,467 < 3,127 < 4-1,896 = 2,104$; 11er: $1,147 < 2,021 < 4-1,541 = 2,459$). Die Autokorrelation der Residuen kann dadurch bei den Residuen des 8er Größtkorns nicht ausgeschlossen werden (s. Tabelle 7-14). Die Verletzung der Voraussetzung von Homoskedastizität und Autokorrelation im Modell des 8er Größtkorns kann dazu führen, dass die Bestimmung des Regressionskoeffizienten ungenau ist. Zur Absicherung des Modells mit einem 8er Größtkorn sind weitere Messdaten erforderlich.

Einfluss der Polierwiderstände auf die Griffigkeit bei Splittmastixasphalt:

Bei der Untersuchung der Korrelation des Splittmastixasphaltes ist festzustellen, dass der Polierwiderstand der groben Gesteinskörnung eine hohe und der Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnung eine sehr geringe Korrelation gegenüber der der Griffigkeit der Asphaltprobekörper aufweist. Der Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnung ist zudem nicht signifikant ($p = 0,281 > 0,05$). Daraus lässt sich schließen, dass kein statistischer Zusammenhang zwischen dem Polierwiderstand der fei-

nen Gesteinskörnung und der Griffigkeit der Splittmastixasphaltprobekörperoberflächen besteht (s. Tabelle 7-15).

Anhand der Regressionsanalyse lässt sich diese Erkenntnis bestätigen. Die Nullhypothese des t-Tests des Koeffizienten des Polierwiderstands der feinen Gesteinskörnung ist als signifikant einzustufen ($p = 0,349 > 0,05$). Die Güte der Koeffizienten des Polierwiderstands der feinen Gesteinskörnung ist somit nicht erfüllt, wohingegen die der groben Gesteinskörnung erfüllt ist ($p = 0,00 < 0,05$). Somit wird der Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnung bei der Bildung der Regressionsgleichung des Splittmastixasphaltes nicht mitberücksichtigt (s. Tabelle 7-16).

$$FAP_{90.000} = -0,085 + 0,882 * pws_{grob} \quad (20)$$

Bei der Analyse der standardisierten Residuen lässt sich die Feststellung aus der Regressionsanalyse bestätigen. Die feine Gesteinskörnung hat keinen bis nur einen sehr geringen statistischen Einfluss auf die Griffigkeit des Splittmastixasphalts. Das Verhältnis der Polierresistenz der feinen zu der der groben Gesteinskörnung ergibt 0,14. Demnach hat die feine Gesteinskörnung einen um 7,3fach geringeren statistischen Einfluss auf die Griffigkeit von Splittmastixasphalt als die grobe Gesteinskörnung.

Die globale Güte des Modells zeigt auf, dass ca. 3/4 der Variationen in der abhängigen Variablen durch das Modell beschrieben werden können und dass ein hoher Zusammenhang zwischen Modell und abhängiger Variable besteht ($R = 0,880$ und $R^2 = 0,744$). Der F-Test ist nicht signifikant. Dadurch kann die Nullhypothese „Dass zwischen den unabhängigen Variablen und der abhängigen Variable kein linearer Zusammenhang besteht“ verworfen werden und eine relativ gute globale Güte der Regressionsfunktion identifiziert werden (s. Tabelle 7-17 und Tabelle 7-18).

Korrelationen				
		FAP_90.000	pws_grobe	pws_feine
Korrelation nach Pearson	FAP_90.000	1,000	,872	,147
	pws_grobe	,872	1,000	,032
	pws_feine	,147	,032	1,000
Sig. (1-seitig)	FAP_90.000		,000	,281
	pws_grobe	,000		,449
	pws_feine	,281	,449	
N	FAP_90.000	18	18	18
	pws_grobe	18	18	18
	pws_feine	18	18	18

Tab. 7-15: Korrelation des Splittmastixasphalts

Koeffizienten ^a												
Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Sig.	Korrelationen			Kollinearitätsstatistik		
		Regressionskoeffizient B	Std.-Fehler	Beta			Nullter Ordnung	Partiell	Teil	Toleranz	VIF	
1	(Konstante)	-,087	,064		-1,352	,196						
	pws_grobe	,882	,125	,868	7,063	,000	,872	,877	,867	,999	1,001	
	pws feine	,109	,113	,119	,966	,349	,147	,242	,119	,999	1,001	

a. Abhängige Variable: FAP_90.000

Tab. 7-16: Koeffizienten Regression des Splittmastixasphalts

Bei der Prüfung der Voraussetzung der multiplen Regression ist der vorhandene VIF-Wert (1,001) kleiner als 10. Somit ist keine Multikollinearität festzustellen (s. Tabelle 7-16). Außerdem kann Normalität der Residuen, welche durch die Signifikanz des Shapiro-Wilk-Tests belegt wird ($p = 0,112 > 0,05$),

Modellzusammenfassung ^b					
Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers	Durbin-Watson-Statistik
1	,880 ^a	,774	,744	,04635908	,981

a. Einflussvariablen: (Konstante), pws_feine, pws_grobe
b. Abhängige Variable: FAP_90.000

Tab. 7-17: Bestimmtheitsmaß und Autokorrelation Regression des Splittmastixasphalts

ANOVA ^a						
Modell		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
1	Regression	,110	2	,055	25,657	,000b
	Nicht standardisierte Residuen	,032	15	,002		
	Gesamt	,143	17			

a. Abhängige Variable: FAP_90.000
b. Einflussvariablen: (Konstante), pws_feine, pws_grobe

Tab. 7-18: F-Test Regression des Splittmastixasphalts

bestätigt werden (s. Anhang). Dadurch, dass die absoluten minimalen und maximalen Werte der Cook-Distanz (0,164) und der standardisierten Residuen (2,155) unter den Grenzen der Ausreißer von 1,00 und 3,00 liegen (s. Anhang), ist kein signifikanter Einfluss der Ausreißer festzustellen. Der Durbin-Watson-Wert 0,981 liegt unterhalb der Grenzen des zugehörigen Tests ($1,015 < \text{Durbin-Watson-Wert} < 4 - 1,536 = 2,464$). Die Autokorrelation der Residuen kann dadurch nicht ausgeschlossen werden (s. Tabelle 7-17). Zudem lässt sich nach Bild 7-6 keine Homoskedastizität für das Modell feststellen.

Nach BACKHAUS führt eine Verletzung der Voraussetzung von Homoskedastizität und Autokorrelation dazu, dass die Bestimmung des Regressionskoeffizienten ungenau wird. Die Verwendung dieses Modells zur Abschätzung der Griffigkeit mit der Regressionsgleichung kann somit fehlerbehaftet sein und muss mit einer gewissen Unsicherheit betrachtet werden. Zusätzlich ist anhand der Bild 7-6 zu erkennen, dass keine Linearität für das Modell vorliegt. Dies kann vermutlich aber auf den nicht linearen Zusammenhang zwischen der feinen Gesteinskörnung und der Griffigkeit des Splittmastixasphalts zurückgeführt werden. Die Nichteinhaltung der Linearität und Autokorrelation der Residuen wird, wie nachfolgend bei der Analyse der Variation des Größtkorns beim Splittmastix gezeigt wird, von den Versuchsvarianten des Splittmastixasphalts mit 11er Größtkorn verursacht.

Einfluss der Polierwiderstände auf die Griffigkeit bei der Variation des Größtkorn bei Splittmastixasphalt:

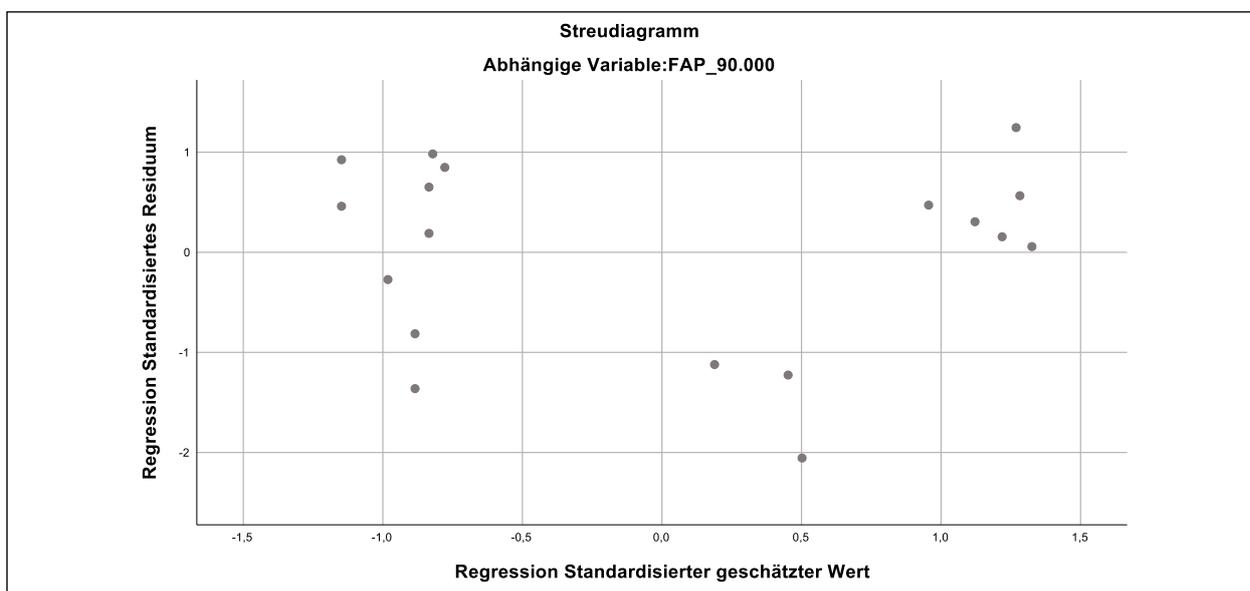


Bild 7-6: Linearitäts- und Homoskedastizitätstest des Splittmastixasphalts

Korrelationen						
		FAP_90.000	pws_grobe	pws_feine		
Korrelation nach Pearson	FAP_90.000	1,000	,492	-,182		
	pws_grobe	,492	1,000	,000		
	pws_feine	-,182	,000	1,000		
Sig. (1-seitig)	FAP_90.000	-	,161	,365		
	pws_grobe	,161	-	,500		
	pws_feine	,365	,500	-		
N	FAP_90.000	6	6	6		
	pws_grobe	6	6	6		
	pws feine	6	6	6		
ANOVA ^a						
Modell		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
1	Regression	,002	2	,001	,569	,617b
	Nicht standardisierte Residuen	,006	3	,002		
	Gesamt	,008	5			
a. .Abhängige Variable: F/1.P_90.000						
b. Einflussvariablen: (Konstante), pws_feine, pws_grobe						

Tab. 7-19: Korrelation und Regression des Splittmastixasphalts mit 11er Größtkorn

Der quantitative Einfluss der feinen Gesteinskörnung durch die Variation des Größtkorns beim Splittmastixasphalt wird durch die Gegenüberstellung der Ergebnisse der Korrelations- und Regressionsanalyse des 11er und 8er Größtkorns des Splittmastixasphaltes ermittelt.

Bei der Korrelationsanalyse und Regressionsanalyse des Splittmastixasphaltes mit 11er Größtkorn ist kein statistischer Zusammenhang des Polierwiderstandes mit der Griffigkeit festzustellen. Die Tabelle 7-19 zeigt, dass sowohl die Korrelationsanalyse (feine: $p = 0,365 > 0,05$; grobe: $0,161 > 0,05$) als auch das Modell der multiplen Regression (F-Test: $p = 0,617 > 0,05$) signifikant sind und somit den quantitativen linearen Zusammenhang zwischen feiner/grober Gesteinskörnung und der Griffigkeit des Splittmastixasphaltes mit 11er Größtkorn nicht widerspiegeln können. Dies kann einerseits an der geringen Datenmenge liegen.

Ein Vergleich des 11er und 8er Größtkorns hinsichtlich des quantitativen Einflusses der feinen Gesteinskörnung auf die Griffigkeit beim Splittmastixasphalt kann demnach nicht erfolgen.

Korrelationen						
		FAP_90.000	pws_grobe	pws_feine		
Korrelation nach Pearson	FAP_90.000	1,000	,956	,145		
	pws_grobe	,956	1,000	,000		
	pws_feine	,145	,000	1,000		
Sig. (1-seitig)	FAP_90.000	-	,000	,327		
	pws_grobe	,000	-	,500		
	pws_feine	,327	,500	-		
N	FAP_90.000	12	12	12		
	pws_grobe	12	12	12		
	pws_feine	12	12	12		

Tab. 7-20: Korrelation des Splittmastixasphalts mit 8er Größtkorn

Die Korrelationsanalyse der Splittmastixvarianten mit dem 8er Größtkorn zeigen eine sehr hohe Korrelation ($r = 0,956$) zwischen der Griffigkeit und den Polierwerten der groben Gesteinskörnung und eine sehr geringe Korrelation ($r = 0,145$) zwischen den Polierwerten der feinen Gesteinskörnung und der Griffigkeit (s. Tabelle 7-20). Dadurch, dass der Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnung als signifikant eingestuft ist ($p = 0,327 > 0,05$), ist kein statistischer Zusammenhang zwischen der feineren Gesteinskörnung und der Griffigkeit vom Splittmastixasphalt mit 8er Größtkorn festzustellen.

Dass die feine Gesteinskörnung einen geringen bis keinen statistischen Einfluss auf die Griffigkeit des Splittmastixasphalts hat, lässt sich, wie auch schon bei der Untersuchung der gesamten Splittmastixvarianten, anhand der Güte der Koeffizienten der multiplen Regression feststellen. Der Koeffizient der Polierresistenz der feinen Gesteinskörnung ist mit $p = 0,120$ größer als die Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % und somit signifikant. Daraus ergibt sich die Regressionsfunktion wie folgt:

$$FAP_{90.000} = -0,108 + 0,939 * pws_{grob} \quad (21)$$

Anhand des Vergleichs der standardisierten Residuen der groben und feinen Gesteinskörnung lässt sich belegen, dass die Polierwiderstände der groben Gesteinskörnung einen um 6,6fachen größeren statistischen Einfluss auf die Griffigkeit haben als die der feinen Gesteinskörnung. Dies bestätigt die Erkenntnis des kaum bis nicht vorhandenen statistischen Einflusses der feinen Gesteinskörnung auf die Griffigkeit des Splittmastixasphaltes mit 8er Größtkorn.

Koeffizienten ^a											
Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Sig.	Korrelationen			Kollinearitätsstatistik	
		Regressionskoeffizient B	Std.-Fehler	Beta			Nullter Ordnung	Partiell	Teil	Toleranz	VIF
1	(Konstante)	-,108	,048		-2,252	,051					
	pws_grobe	,939	,083	,956	11,332	,000	,956	,967	,956	1,000	1,000
	pws_feine	,148	,086	,145	1,716	,120	,145	,497	,145	1,000	1,000

a. Abhängige Variable: FAP_90.000

Tab. 7-21: Koeffizienten des Splittmastixasphalts mit 8er Größtkorn

Modellzusammenfassung ^b					
Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers	Durbin-Watson-Statistik
1	,967 ^a	0,936	0,922	0,02755776	2,132

a. Einflussvariablen: (Konstante), pws_feine, pws_grobe
b. Abhängige Variable: FAP_90.000

Tab. 7-22: Bestimmtheitsmaß und Autokorrelation Regression des Splittmastixasphalts mit 8er Größtkorn

ANOVA ^a						
Modell		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
1	Regression	,100	2	,050	65,678	,000 ^b
	Nicht standardisierte Residuen	,007	9	,001		
	Gesamt	,107	11			

a. Abhängige Variable: FAP_90.000
b. Einflussvariablen: (Konstante), pws_feine, pws_grobe

Tab. 7-23: F-Test Regression des Splittmastixasphalts mit 8er Größtkorn

Wie auch schon bei den statistischen Analysen der gesamt betrachteten Splittmastixasphaltvarianten festgestellt worden ist, ist die globale Güte des Modells der multiplen Regression als gut zu befinden, da sowohl der F-Test keine Signifikanz aufweist als auch mehr als 19/20 der Variationen in der abhängigen Variable durch das Modell beschrieben werden können und ein sehr hoher Zusammenhang zwischen Modell und abhängiger Variable festzustellen ist ($R = 0,967$ und korrigiertes $R^2 = 0,922$).

Die Voraussetzung, dass keine Multikollinearität bei der multiplen Regression des Splittmastixasphalts mit 8er Größtkorn vorliegt, ist gegeben ($VIF_{\text{fein und grob}} = 1,000 < 10$ s. Tabelle 7-21). Zu-

dem kann Normalität der Residuen, welche durch die Signifikanz des Shapiro-Wilk-Tests belegt wird ($p = 0,337 > 0,05$), bestätigt werden (s. Anhang). Dadurch, dass die absoluten minimalen und maximalen Werte der Cook-Distanz (0,261) und der standardisierten Residuen (1,958) unter den Grenzen zur Prüfung der Ausreißer von 1,00 und 3,00 liegen (s. Anhang), ist kein signifikanter Einfluss der Ausreißer festzustellen. Im Gegensatz zu der gesamten Analyse des Splittmastixasphalts ist keine Autokorrelation der Residuen festzustellen, da der Durbin-Watson-Wert von 0,981 in den Grenzen des zugehörigen Tests ($0,812 < 2,132 < 4-1579 = 2,421$) liegt. Zudem lässt sich nach Bild 7-7 durch den Mangel an Datengrundlage keine eindeutige Aussage über die Homoskedastizität für das Modell feststellen. Die Annahme der Linearität des Modells kann aber angenommen werden.

Bei einer größeren Datenmenge ist davon auszugehen, dass die Voraussetzungen erfüllt sind, dass Homoskedastizität vorherrscht und somit das Modell für die Schätzung der Griffigkeit eines Splittmastixasphalts mit 8er Größtkorn geeignet ist. Weiterhin kann die Regression des Splittmastixasphalts mit 8er Größtkorn als repräsentatives Modell für den Splittmastixasphalt angesehen werden, da die Splittmastixvarianten mit 11er Größtkorn mit dem Modell der multiplen Regression nicht abbildbar sind und somit vom Gesamtdatensatz des Splittmastixasphalts bereinigt werden sollten.

Zusammenhang der Kombinationsversuche von Brech-/Natursand und Brechsand mit den der feinen Gesteinskörnung:

Bei der statistischen Analyse des Zusammenhangs der Kombinationsversuche von Brech-/Natursand und Brechsand mit den der Versuche der feinen Gesteinskörnung werden nur die Daten der Asphaltbetonversuche herangezogen, da die des Splittmastix aufgrund von Herstellungs- und Messfehlern verworfen werden (s. Kapitel 6). Die statistische

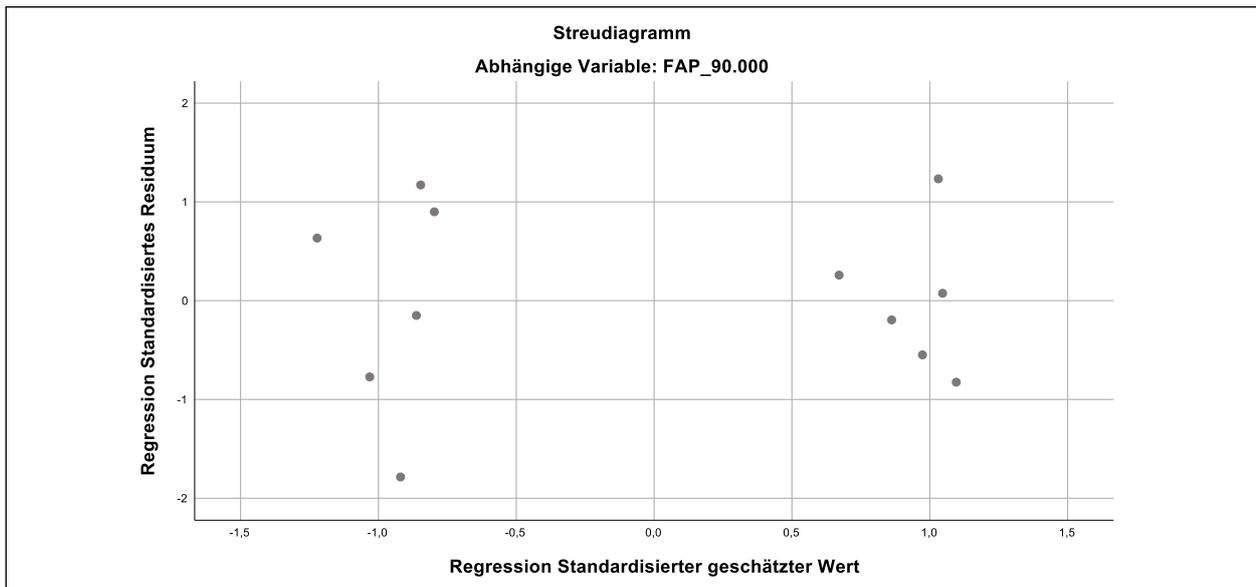


Bild 7-7: Homoskedastizitätstest des Splittmastixasphalts mit 8er Größtkorn

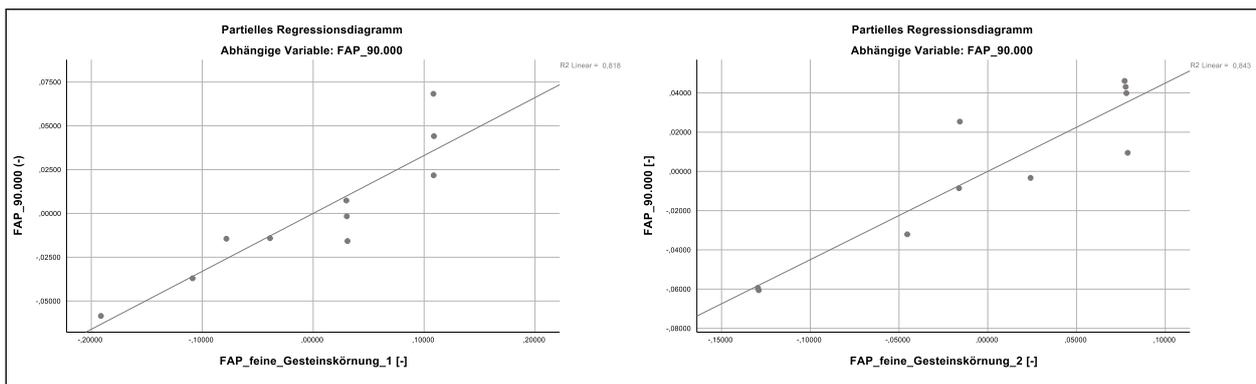


Bild 7-8: Linearitätstest der Kombinationsversuche

Analyse wird anhand der Korrelation und multiplen Regression durchgeführt. Die abhängige Variable bei der Regressionsanalyse ist der Griffigkeitswert des Sandkombinationsversuchs, wie z. B. Andesit1-Basalt1-Muschelkalk1. Die beiden unabhängigen Variablen sind die beiden Griffigkeitswerte der Versuche der feinen Gesteinskörnung, welche die identische Sandart in dem Asphaltmischgut beinhalten wie bei dem zugehörigen Sandkombinationsverfahren. In dem genannten Beispiel wäre die erste abhängige Variable ($FAP_feine_Gesteinskörnung_1$) der Griffigkeitswert der Asphaltprobe Andesit1-Basalt1 und die zweite ($FAP_feine_Gesteinskörnung_2$) der Griffigkeitswert der Probe Andesit1-Muschelkalk1 aus den Versuchen der feinen Gesteinskörnung.

Anhand der Korrelationsanalyse ist eine geringe bis mittlere Korrelation zwischen den Versuchen der feinen Gesteinskörnung ($r_{FAP_feine_Gesteinskörnung_1} = 0,641$ und $r_{FAP_feine_Gesteinskörnung_2} = 0,702$) und den Kombinationsversuchen Brech-/Naturesand und Brechsand zu erkennen (s. Tabelle 7-24).

Korrelationen				
		FAP 90.000	FAP_feine_Gesteinskörnung_1	FAP_feine_Gesteinskörnung_2
Korrelation nach Pearson	FAP_90.000	1,000	,641	,702
	FAP_feine_Gesteinskörnung_1	,641	1,000	-,004
	FAP_feine_Gesteinskörnung_2	,702	-,004	1,000
Sig. (1-seitig)	FAP_90.000		,023	,012
	FAP_feine_Gesteinskörnung_1	,023		,496
	FAP_feine_Gesteinskörnung_2	,012	,496	
N	FAP_90.000	10	10	10
	FAP_feine_Gesteinskörnung_1	10	10	10
	FAP_feine_Gesteinskörnung_2	10	10	10

Tab. 7-24: Korrelation der Kombinationsversuche

In Bild 7-8 ist zu erkennen, dass die Linearität des Modells der Korrelation und Regression gegeben ist. Dementsprechend lässt sich ein statistischer Zusammenhang zwischen den Griffigkeiten der Kombinationsversuche und der feinen Gesteinsversuche formulieren.

Aus der Modellzusammenfassung (s. Tabelle 7-25) ist zu entnehmen, dass 19/20 der Variationen in der abhängigen Variable durch das Modell beschrieben

Modellzusammenfassung ^b					
Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers	Durbin-Watson-Statistik
1	,953 ^a	,908	,881	,01809981	2,088
a. Einflussvariablen: (Konstante), FAP_feine_Gesteinskörnung_2, FAP_feine_Gesteinskörnung_1 b. Abhängige Variable: FAP_90.000					

Tab. 7-25: Bestimmtheitsmaß und Autokorrelation Regression der Kombinationsversuche

ANOVA ^a						
Modell		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
1	Regression	,023	2	,011	34,378	,000 ^b
	Nicht standardisierte Residuen	,002	7	,000		
	Gesamt	,025	9			
a. Abhängige Variable: FAP_90.000 b. Einflussvariablen: (Konstante), FAP_feine_Gesteinskörnung_2, FAP_feine_Gesteinskörnung_1						

Tab. 7-26: F-Test Regression der Kombinationsversuche

Koeffizienten ^a											
Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten			Korrelationen		Kollinearitätsstatistik		
		Regressionskoeffizient B	Std.-Fehler	Beta	T	Sig.	Nullter Ordnung	Partiell	Teil	Toleranz	VIF
1	(Konstante)	,055	,030		1,830	,110					
	FAP_feine_Gesteinskörnung_1	,331	,059	,644	5,607	,001	,641	,904	,644	1,000	1,000
	FAP_feine_Gesteinskörnung_2	,450	,073	,704	6,131	,000	,702	,918	,704	1,000	1,000
a. Abhängige Variable: FAP_90.000											

Tab. 7-27: Koeffizienten der Kombinationsversuche

werden können und ein sehr hoher Zusammenhang zwischen Modell und abhängiger Variable festzustellen ist ($R = 0,953$ und korrigiert $R^2 = 0,881$). Im Zuge dessen, dass der F-Test keine Signifikanz aufweist, ist die globale Güte des Modells als gut zu befinden. Das Modell kann als ausreichend gut befunden werden für die Abschätzung der abhängigen Variable (s. Tabelle 7-25).

Aufgrund dessen, dass die p-Werte (0,001 und 0,000) beim t-Test der Koeffizienten kleiner als die Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % sind, ist die Güte der beiden Koeffizienten erfüllt und die Regressionsgleichung lässt sich wie folgt formulieren (s. Tabelle 7-27):

$$\begin{aligned}
 FAP_{Sandkombi_Versuch} = & 0,166 + 0,331 \\
 & * FAP_{Versuch\ fg_1} + 0,450 \\
 & * FAP_{Versuch\ fg_2}
 \end{aligned} \quad (22)$$

Beim Vergleich der standardisierten Residuen der Griffigkeitswerte der feinen Gesteinskörnungsversuche (0,644 zu 0,704) ist ein ungefähr gleich großer statistischer Einfluss der beiden Varianten auf die der Brech-/Natursand und Brechsand Kombinationsvarianten festzustellen (s. Tabelle 7-27). Aus diesem Grund lässt sich folgende Erkenntnis formulieren. Die Griffigkeitswerte der beiden Versuche der feinen Gesteinskörnungen, welche die identische feine Gesteinskörnung im Mischgut beinhalten wie die in den Sandkombinationsversuchen, haben jeweils einen gleich großen Anteil am statistischen Einfluss auf die Griffigkeit der Kombinationsversuche. Somit lassen sich anhand der Griffigkeit von zwei Probekörpern, welche jeweils mit einer unterschiedlich feinen Gesteinskörnung hergestellt werden, die Griffigkeit eines Probekörpers, welche aus der Kombination aus der beiden unterschiedlichen feinen Gesteinskörnung hergestellt worden ist, abschätzen.

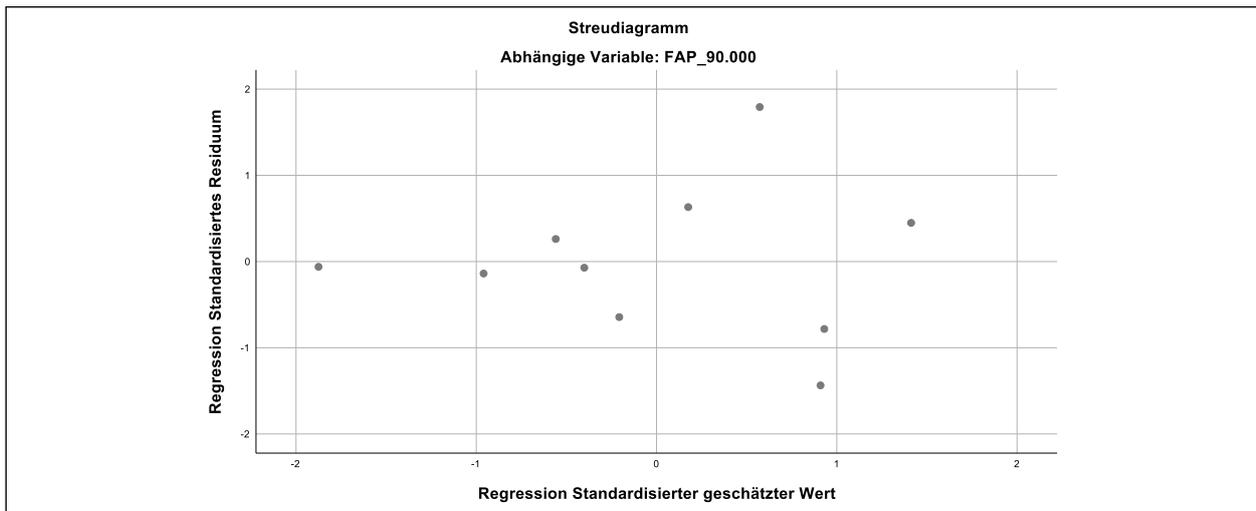


Bild 7-9: Homoskedastizitätstest der Kombinationsversuche

Korrelationen			
		FAP_90.000	pws_feine
Korrelation nach Pearson	FAP_90.000	1,000	0,952
	pws_feine	0,952	1,000
Sig. (1-seitig)	FAP_90.000		0,000
	pws_feine	0,000	
N	FAP_90.000	21	21
	pws_feine	21	21

Korrelationen			
		pws_60 kmh	pws_feine
Korrelation nach Pearson	pws_60 kmh	1,000	0,937
	pws_feine	0,937	1,000
Sig. (1-seitig)	pws_60 kmh		0,000
	pws_feine	0,000	
N	pws_60 kmh	8	8
	pws_feine	8	8

Tab. 7-28: Korrelation der Asphaltvarianten Diabas (links) und Andesit (rechts)

Um die Gültigkeit dieser Aussage zu belegen, müssen die Voraussetzung der Regressionsanalyse erfüllt sein. Bei der Überprüfung dieser Voraussetzungen sind keine maßgebenden Einwirkungen durch Ausreißer festzustellen (Abs. maximale Cook-Distanz = 0,413 < 1 und Abs. maximaler standardisierte Residue = 2,041 < 3 s. Anhang). Weiterhin ist keine Multikorrelation dadurch zu erkennen, dass die VIF-Werte der beiden Koeffizienten kleiner 10 ist (s. Tabelle 7-27). Der Durbin-Watson-Wert liegt bei 2,088 und erfüllt somit den zugehörigen Durbin-Watson-Test (0,697 < 2,132 < 4-1,641 = 2,359 s. Tabelle 7-25). Demnach ist keine Autokorrelation der Residuen zu erwarten. Bei der Betrachtung des Diagramms der Gegenüberstellung der standardisierten Residuen und der standardisierten geschätzten Werten besteht der Verdacht einer Heteroskedastizität (s. Bild 7-9). Eine mögliche Nichteinhaltung der Homoskedastizität kann aufgrund der geringen Datenmenge nicht belegt werden.

Die Normalität der Residuen wird anhand des Shapiro-Wilk-Tests bestätigt. Der p-Wert (0,860) ist deutlich größer als die Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (s. Anhang). Folgerichtig muss die Nullhypothese des Testes angenommen werden. Daraus

ergibt sich, dass die Voraussetzung der Regressionsanalyse weitestgehend eingehalten wird, sodass die getroffene Aussage mit hoher Wahrscheinlichkeit zutreffend ist.

Einfluss der feinen Gesteinskörnung auf die Griffigkeit von Asphaltoberflächen durch Variation des Polierwiderstandes der groben Gesteinskörnung:

Der quantitative Einfluss der feinen Gesteinskörnung auf die Griffigkeit von Asphaltbetonoberflächen durch Variation des Polierwiderstandes der groben Gesteinskörnung wird aufgrund des Nachweises, des sehr geringen bis gar keinen Einfluss der feinen Gesteinskörnung auf den Splittmastixasphalt, anhand der Daten der Griffigkeit von den Asphaltbetonversuchen ermittelt. Dabei werden die Daten der Asphaltbetonversuche unterteilt in zwei Datengruppen, bestehend aus den Versuchsdaten der groben Gesteinskörnung Diabas und Andesit. An diesen beiden Datengruppen werden jeweils eine Korrelation und eine einfache lineare Regression durchgeführt. Als abhängige Variable werden die Griffigkeitswerte der Asphaltprobekörper der beiden groben Gesteinskörnungen und als unabhängige Variable die Polierwiderstände der feinen Gesteinskörnung festgelegt.

Koeffizienten ^a								
Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Sig.	95,0 % Konfidenzintervalle für B	
		Regressionskoeffizient B	Std.-Fehler	Beta			Untergrenze	Obergrenze
Diabas	(Konstante)	-,031	,024		-1,278	,217	-,082	,020
	pws_feine	,770	,057	,952	13,610	,000	,652	,889
Andesit	(Konstante)	,155	,031		4,996	,002	,079	,230
	pws_feine	,486	,074	,937	6,545	,001	,304	,667

a. Abhängige Variable: FAP90.000

Tab. 7-29: Koeffizienten der Asphaltvarianten Diabas und Andesit

Modellzusammenfassung ^b					
Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers	Durbin-Watson-Statistik
Diabas	,952 ^a	,907	,902	,02554610	1,303
Andesit	,937 ^a	,877	,857	,02508525	2,941

a. Einflussvariablen : (Konstante), pws_feine
b. Abhängige Variable: FAP90.000

Tab. 7-30: Bestimmtheitsmaß und Autokorrelation Regression der Asphaltvarianten Diabas und Andesit

Beim Vergleich der Korrelationsanalyse der beiden groben Gesteinskörnungen Diabas ($r = 0,952$) und Andesit ($r = 0,937$) ist jeweils eine sehr hohe Korrelation zwischen dem Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnung und der Griffigkeit der Asphaltbetonprobekörper zu identifizieren.

Aufgrund dessen, dass die Linearität als erwiesen gilt (s. Anhang), ist ein sehr großer statistischer Zusammenhang zwischen dem Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnung der beiden groben Gesteinskörnungen und der Griffigkeit der Asphaltbetonoberflächen festzustellen.

Als Ergebnis der Regressionsanalyse lassen sich folgende Regressionsfunktionen für die Griffigkeit der groben Gesteinsarten Andesit und Diabas für den Asphaltbeton bestimmen (s. Tabelle 7-29):

$$FAP_{90.000; Diabas} = -0,031 + 0,770 * pws_{feine} \quad (23)$$

$$FAP_{90.000; Andesit} = 0,155 + 0,486 * pws_{feine} \quad (24)$$

Mittels der Gegenüberstellung der beiden Koeffizienten der Regressionsfunktion der Andesit- und Diabas-Varianten lässt sich ermitteln, dass der Koeffizient der polierschwachen groben Gesteinskörnung (Diabas) um ca. 1,6fach größer ist als die der polierstarken groben Gesteinskörnung (Andesit). Infolgedessen hat die feine Gesteinskörnung bei der Verwendung einer polierschwächeren groben Gesteinskörnung im Gegensatz zu einer polierstärkeren groben Gesteinskörnung im Mischgut einen

messbaren, um 60 % größeren statistischen Einfluss auf die Griffigkeit der Asphaltbetonoberfläche.

Der t-Test, welcher die Güte der Koeffizienten beschreibt, ist für beide Varianten nicht signifikant ($p < 0,05$) (s. Tabelle 7-29). Folgerichtig beschreibt der Koeffizient (der Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnung) die Griffigkeit der Asphaltprobekörper mit der groben Gesteinskörnung Diabas und Andesit im guten Maße.

Die globale Güte des linearen Regressionsmodells wird anhand der Tabelle 7-30 und Tabelle 7-31 beschrieben. Sowohl das Modell des Diabases als auch des Andesits weisen einen sehr hohen Zusammenhang zwischen Modell und abhängiger Variablen auf (Diabas: $R = 0,952$ und Andesit: $R = 0,937$). Außerdem können ca. 9/10 der Variationen in den abhängigen Variablen durch die beiden Modelle beschrieben werden (Diabas: $R^2 = 0,902$ und Andesit: $R^2 = 0,857$). Dadurch, dass die p-Werte kleiner der Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % sind, ist der F-Test zurückzuweisen. Demzufolge wird die globale Güte als gut befunden und die beiden linearen Regressionsmodelle sind für die Prognose der Griffigkeit geeignet.

Das letzte Kriterium für die Modelle der Regression sind deren Voraussetzungen. Anhand der Residuenstatistik der beiden groben Gesteinskörnungsvarianten ist kein Einfluss der Ausreißer festzustellen (Diabas: max. Abs. Cook-Distanz = $0,212 < 1$ und standardisierte Residuen = $2,516 < 3$; Andesit: max. Abs. Cook-Distanz = $0,852 < 1$ und standardisierte

ANOVA ^a						
Modell		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Andesit	Regression	,027	1	,027	42,839	,001 ^b
	Nicht standardisierte Residuen	,004	6	,001		
	Gesamt	,031	7			
Diabas	Regression	,121	1	,121	185,245	,000 ^b
	Nicht standardisierte Residuen	,012	19	,001		
	Gesamt	,133	20			

a. Abhängige Variable: FAP90.000
b. Einflussvariablen : (Konstante), pws_feine

Tab. 7-31: F-Test Regression der Asphaltvarianten Diabas und Andesit

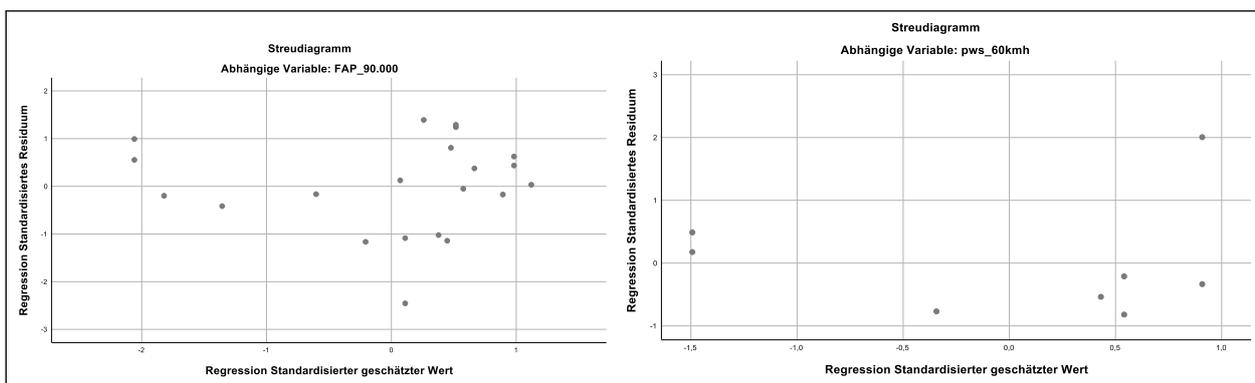


Bild 7-10: Homoskedastizitätstest der Asphaltvarianten Diabas und Andesit

Residuen = 2,305 < 3 s. Anhang). Die Normalität der Residuen ist nach dem Shapiro-Wilk-Test gegeben (Diabas: $p = 0,337 > 0,05$; Andesit: $p = 0,068 > 0,05$ s. Anhang). Außerdem ist keine Autokorrelation der Residuen bei beiden Varianten des Diabases festzustellen (Durbin-Watson-Test: $1,125 < 1,303 < 4 - 1,538 = 2,462$). Aufgrund dessen, dass der Durbin-Watson-Wert ($2,941$) der Andesitvarianten größer als die maximale Grenze des Durbin-Watson-Tests ($4 - 1,777 = 2,223$) ist, kann bei den Andesitvarianten von Autokorrelation der Residuen ausgegangen werden (s. Tabelle 7-30). Bei beiden Varianten besteht auf Grundlage der geringen Datenmenge der Verdacht auf Heteroskedastizität (s. Bild 7-10).

Insofern muss das Modell und somit auch das Ergebnis der Andesitvariante mit Vorsicht betrachtet werden. Die Aussage, dass die feine Gesteinskörnung eines Mischgutes, welches mit polierschwächerer grober Gesteinskörnung hergestellt wurde, einen größeren statistischen Einfluss auf die Griffigkeit von Asphaltbetonoberflächen hat als die eines Mischgutes mit polierstarker Gesteinskörnung, kann trotzdem getroffen werden, da die Autokorrelation und Heteroskedastizität auf die geringe Datenmenge zurückzuführen ist.

Zusammenhang zwischen der Mineralogie und Polierwiderstand des Gesteins:

Wie in Kapitel 2 beschrieben, definiert [TOURENQ und FOURMAINTRAUX 1971] zwei physikalische Größen aus petrographischen Untersuchungen, um den Polierwiderstand zu quantifizieren: die durchschnittliche Härte (dmp) und den Härtekontrast (Cd), wie folgt:

$$dmp = \sum_i dv_i * p_i \quad (25)$$

$$Cd = \sum_i p_i * |dv_i * dv_b| \quad (26)$$

Dabei ist dmp als die durchschnittliche Härte einer Gesteinskörnung definiert. dv_i ist die Vickers-Härte jedes Minerals, das die Gesteinskörnung bildet, und p_i der Massenanteil jedes Minerals, das die Gesteinskörnung bildet. Cd ist definiert als der Härtekontrast der Gesteinskörnung und dv_b ist die Vickers-Härte des am häufigsten vorkommenden Minerals, aus dem die Gesteinskörnung besteht.

Um die mineralogische Zusammensetzung der Aggregate und ihre Fähigkeit, ihre Reibungskapazität aufrechtzuerhalten, miteinander korrelieren zu lassen, werden die beiden Parameter Durchschnittshärte und Härtekontrast in der vorliegenden Arbeit neu definiert. Die Vicker'sche-Härte wird durch den

Rosival-Härtewert der Mineralien ersetzt. Zum besseren Verständnis wird der Wert dmp folgend als AH_R definiert. AH_R steht für Average Hardness. Der Härtekontrasts Cd wird nun als CH_R definiert und steht für Contrast of Hardness. Der in [KANE et al. 2013] definierte Wert der Gesamthärte AH_p ist fortan als TH_R betitelt (Total Hardness). Der Index R steht bei allen Variablen für den Bezug auf die Härteskala nach Rosiwal.

Der Parameter der Gesamthärte TH_R wird dann als Summe der beiden Werte Durchschnittshärte AH_R und Härtekontrast CH_R definiert, da der Wert des Härtekontrasts alleine nicht ausreicht, um eine Aussage über die Höhe des Polierwiderstandes eines Gesteins zu treffen. Deutlich wird dies beispielsweise am Gestein Quarz. Der vorliegende Quarzsand besteht zu 97 % aus Quarz und hat eine Rosiwal-Härte von 97,04. Der Härtekontrast ist jedoch, aufgrund der Monomineralität, lediglich 2,95. Diabas hat im Vergleich dazu einen Härtekontrast von 20,78 mit einer Rosiwal-Härte des Gesteins von lediglich 21,87. Folgend sind alle nötigen Gleichungen und neu definierten Variablen zusammenfassend dargestellt.

$$AH_R = \sum_i dR_i * p_i \quad (27)$$

$$AH_R = \sum_i p_i * |dR_i - dR_b| \quad (28)$$

$$TH_R = AH_R + CH_R \quad (29)$$

Mit:

AH_R : Average Hardness

dR_i : Rosiwal-Härte jedes Minerals im Gestein

p_i : Massenanteil jedes Minerals im Gestein

CH_R : Contrast of Hardness

dR_b : Rosiwal-Härte des am häufigsten vorkommenden Mineral im Gestein

TH_R : Total Hardness

In der Tabelle 7-32 sind alle verwendeten Gesteine der vorliegenden Arbeit mit den Werten der durchschnittlichen Rosiwalhärte AH_R , des Härtekontrasts CH_R , des TH_R -Wertes und ihrem Polierwiderstand (μ_{PWS}) aufgelistet.

Anhand einer Korrelations- und einfachen linearen Regressionsanalyse soll der Zusammenhang zwischen der Total Hardness TH_R und dem Polierwi-

Gestein	AH_R [-]	CH_R [-]	TH_R [-]	Polierwiderstand
Diabas	21,87	20,78	42,64	0,277
Grauwacke	70,94	29,05	100,00	0,476
Muschelkalk	11,16	6,76	17,92	0,209
Quarzsand	97,05	2,95	100,00	0,443
Basalt	46,82	11,13	57,95	0,424
Quarzit	99,13	0,87	100,00	0,530

Tab. 7-32: AH , CH , TH und Polierwiderstand der Gesteine

Korrelationen			
		pws_polier	TH_gestein
Korrelation nach Pearson	pws_polier	1,000	,933
	TH_gestein	,933	1,000
Sig. (1-seitig)	pws_polier		,003
	TH_gestein	,003	
N	pws_polier	6	6
	TH_gestein	6	6

Tab. 7-33: Korrelation Total Hardness und Polierwiderstand

Modellzusammenfassung ^b					
Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers	Durbin-Watson-Statistik
1	,933 ^a	,871	,838	,049733	1,617

a. Einflussvariablen: (Konstante), TH_gestein
b. Abhängige Variable: pws_polier

Tab. 7-34: Bestimmtheitsmaß und Autokorrelation Regression Total Hardness und Polierwiderstand

derstand der Gesteine ermittelt werden. Die Tabelle 7-33 zeigt auf, dass eine sehr hohe Korrelation zwischen der Total Hardness und den Polierwerten der Gesteine vorliegt.

Aufgrund dessen, dass die Voraussetzung der Linearität für die Korrelations- und Regressionsanalyse eingehalten ist (s. Anhang), lässt sich ein sehr guter Zusammenhang zwischen der Mineralogie der Gesteine (TH_R) und deren Polierwiderstand feststellen.

Der quantitative Einfluss der Total Hardness auf den Polierwiderstand der Gesteine wird anhand der linearen Regressionsuntersuchung ermittelt. Die globale Güte der Regression zeigt auf, dass ein sehr hoher statistischer Zusammenhang zwischen Modell und abhängiger Variable auf ($R = 0,933$) besteht (s. Tabelle 7-34). Außerdem können ca. 9/10 der Variationen in den abhängigen Variablen durch die beiden Modelle beschrieben werden ($R^2 = 0,871$).

Der F-Test zeigt keine Signifikanz auf und muss damit zurückgewiesen werden ($p = 0,007 < 0,05$), somit ist die globale Güte als gut befunden und das lineare Regressionsmodell ist für die Prognose des Polierwiderstandes geeignet (s. Tabelle 7-35).

Die Güte des Koeffizienten der Regression ist für gut zu befinden, da der t-Test des Koeffizienten ($p = 0,007 < 0,05$) als nicht signifikant eingestuft wird (s. Tabelle 7-35). Infolge dessen lässt sich anhand der Tab. 7-36 die Regressionsfunktion wie folgt ermitteln:

$$pws_{Gestein} = 0,167 + 0,003 * TH_R \quad (30)$$

Anhand des standardisierten Koeffizienten (0,933) ist eindeutig zu erkennen, dass die Total Hardness einen sehr großen positiven statistischen Einfluss auf den Polierwiderstand der Gesteine ausübt (s. Tabelle 7-36).

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die mineralogische Zusammensetzung der Gesteine einen sehr hohen linearen Zusammenhang mit dem Polierwiderstand der Gesteine hat. Um die Gültigkeit dieser Aussage zu bestätigen, müssen die Voraussetzung der Regressionsanalyse erfüllt sein. Die Residuenstatistik des Modells ermittelt eine absolut maximale oder minimalen Cook-Distanz von 0,312 und einen absolut maximale oder minimale standardisierte Residuen von 1,391 (s. Anhang). Daraus er-

gibt sich, dass die Grenzen der Ausreißerprüfung (Cook-Distanz < 1 und standardisierte Residuen < 3) eingehalten werden und somit kein Einfluss der Ausreißer festzustellen ist. Der Shapiro-Wilk Test ist signifikant ($p = 0,374 > 0,05$), folgerichtig ist die Normalität der Residuen gewährleistet (s. Anhang). Aufgrund des Mangels an Daten ist keine eindeutige Aussage über den Homoskedastizitätstest zu tätigen. Außerdem wird der Durbin-Watson Test bestätigt und es liegt keine Autokorrelation der Residuen vor (Durbin-Watson-Test: $0,610 < 1,617 < 4 - 1,400 = 2,60$). Dementsprechend werden fast alle Voraussetzungen eingehalten und die getroffene Schlussfolgerung kann als gültig bezeichnet werden.

8 Zusammenfassung der statistischen Auswertung

Anhand der nachfolgenden Auflistung sind im Kapitel 6 folgende quantitative Zusammenhänge ermittelt worden:

- Der Polierwiderstand der feinen und groben Gesteinskörnung zeigt einen statistischen signifikanten Zusammenhang zu den Griffigkeitswerten der Asphaltvarianten (AC, SMA und PA).
- Beim Asphaltbeton ist ein deutlich höherer statistischer Zusammenhang (2,4fach) zwischen dem Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnung und der Griffigkeit festzustellen, als bei dem Polierwiderstand der groben Gesteinskörnung.
- Beim Splittmastixasphalt ist ein deutlich höherer statistischer Zusammenhang (7,3fach) zwischen dem Polierwiderstand der groben Gesteinskörnung und der Griffigkeit festzustellen als bei dem Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnung.
- Die Variation des Größtkorns beim Asphaltbeton zeigt auf, dass ein leicht größerer statistischer Einfluss (1,4fach) des Polierwiderstandes der

ANOVA ^a						
Modell		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
1	Regression	,067	1	,067	26,902	,007 ^b
	Nicht standardisierte Residuen	,010	4	,002		
	Gesamt	,076	5			

a. Abhängige Variable: pws_polier
b. Einflussvariablen: (Konstante), TH_gestein

Tab. 7-35: F-Test Regression Total Hardness und Polierwiderstand

Koeffizienten ^a								
Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Sig.	95,0 % Konfidenzintervalle für B	
		Regressionskoeffizient B	Std.-Fehler	Beta			Untergrenze	Obergrenze
1	(Konstante)	,167	,048		3,458	,026	,033	,300
	TH_gestein	,003	,001	,933	5,187	,007	,002	,005

a. Abhängige Variable: pws_polier

Tab. 7-36: Koeffizienten der Regression Total Hardness und Polierwiderstand

feinen Gesteinskörnung auf die Griffigkeit bei einem geringeren Größtkorn (8 mm zu 11 mm) zu verzeichnen ist.

- Die Auswertung der Kombinationsversuche Brech-/Natursand und Brechsand zeigt auf, dass anhand der Griffigkeit von zwei Probekörpern, welche jeweils mit einer unterschiedlichen feinen Gesteinskörnung hergestellt wurden, die Griffigkeit eines Probekörpers, welche mit der Kombination der beiden feinen Gesteinskörnung hergestellt wurde, abgeschätzt werden kann.
- Anhand des Vergleiches der Auswertung einer polierschwachen groben Gesteinskörnung mit einer polierstarken groben Gesteinskörnung kann festgestellt werden, dass die feine Gesteinskörnung bei der Verwendung einer polierschwachen groben Gesteinskörnung einen statistisch leicht größeren Einfluss (1,6fach) auf die Griffigkeit hat als bei der Verwendung einer polierstarken groben Gesteinskörnung.
- Der Zusammenhang der Mineralogie infolge der Total Hardness eines Gesteins zeigt einen sehr hohen statistischen Zusammenhang zum Polierwiderstand der Gesteine auf.

9 Ausarbeitung von Anforderungen an den Einfluss von feiner Gesteinskörnung auf das Griffigkeitsniveau von Asphaltoberflächen

Anhand Kapitel 6 und 7 ist zu erkennen, dass die Griffigkeit einer Asphaltoberfläche primär vom Polierwiderstand des verwendeten Gesteins abhängig

ist. Nach TL Asphalt-StB werden die in Tabelle 9-1 dargestellten Anforderungen an den Polierwiderstand der im Asphaltmischgut verwendeten Gesteine festgelegt.

Nach TL Asphalt-StB wird der Polierwiderstand des Asphaltmischgutes anhand des PSV-Wertes der groben Gesteinskörnung für die Einhaltung der Anforderung herangezogen. Anhand Kapitel 6 und 7 geht eindeutig hervor, dass nicht nur der Polierwiderstand der groben, sondern auch der der feinen Gesteinskörnung einen signifikanten Einfluss auf die Griffigkeit der Asphaltoberflächen besitzt. Zudem kann nicht, wie in den TL Asphalt-StB vorgesehen, vom Polierwiderstand der groben auf den der feinen Gesteinskörnung geschlossen werden. Folgerichtig sollten die Anforderungen an den Polierwiderstand und die Griffigkeit von Asphaltoberflächen angepasst werden.

Anhand des in Bild 9-1 skizzierten Modells sollten die neuen Anforderungen angepasst werden.

Das Modell besteht darin, die Griffigkeit an Asphaltprobekörpern im Labor zu ermitteln (ermittelte Griffigkeit) und mit einem aus einer ausgiebigen Datenanalyse abgeleiteten Anforderungswert ($FAP_{90.000min}$) zu vergleichen. Dabei soll der ermittelte Griffigkeitswert größer oder gleich dem aus der Datenanalyse sein.

	Anforderungen an Polierwiderstand nach TL-Asphalt-StB
Minimaler Polierwiderstand	PSV > 42
AC11DS und AC8DS	PSV > 48
SMA11S und SMA8S	PSV > 51
PA8	PSV > 54

Tab. 9-1: Anforderung an den Polierwiderstand nach TL-Asphalt

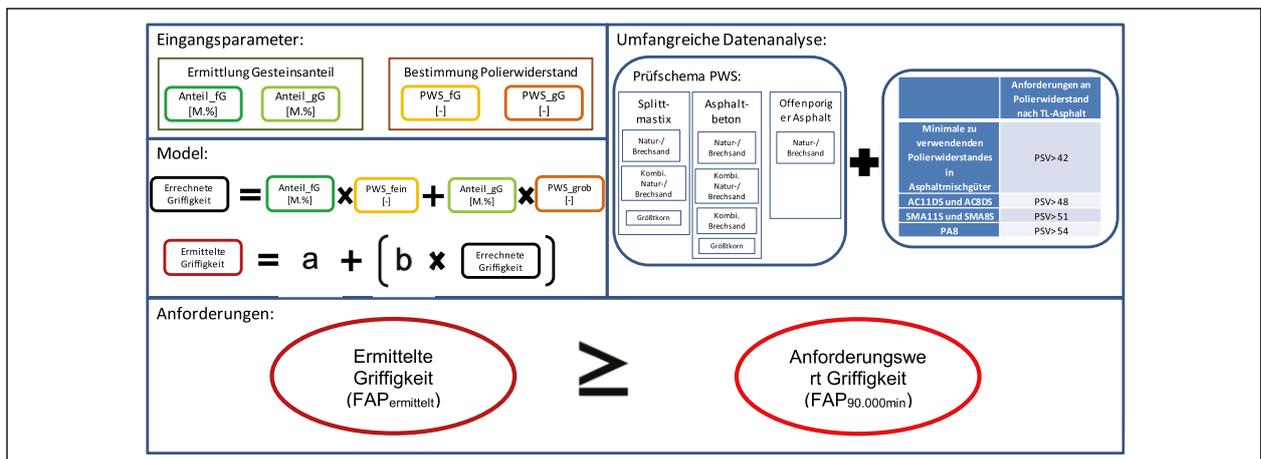


Bild 9-1: Modell zur Entwicklung von Anforderungen an die Griffigkeit von Asphaltoberflächen

Modellzusammenfassung ^b						
Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers	Durbin-Watson-Statistik	
AC	,897 ^a	,805	,800	,03257502	1,954	
SMA	,798 ^a	,637	,617	,05425803	1,259	
a. Einflussvariablen:(Konstante),pws_err b. Abhängige Variable: FAP_90.000						
ANOVA ^a						
Modell		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
AC	Regression	,170	1	,170	160,632	,000 ^b
	Nicht standardisierte Residuen	,041	39	,001		
	Gesamt	,212	40			
SMA	Regression	,093	1	,093	31,567	,000 ^b
	Nicht standardisierte Residuen	,053	18	,003		
	Gesamt	,146	19			
a. Abhängige Variable: FAP_90.000 b. Einflussvariablen : (Konstante), pws_err						

Tab. 9-2: Globale Güte des Regressionsmodells von errechneter und tatsächlicher Griffigkeit

In einem ersten Schritt wird das Griffigkeitpotenzial eines Asphaltmischguts auf Basis der Mischgutzusammensetzung (Anteil an feinen und groben Gesteinskörnungen, Polierwiderstand der feinen und groben Gesteinskörnung) berechnet. Zur Berechnung des ermittelten Griffigkeitswertes wird vor der Herstellung des Asphaltmischgutes der Polierwiderstand der feinen und groben Gesteinskörnung mit dem Prüfstand nach WEHNER/SCHULZE bestimmt. Anhand der resultierenden Sieblinie werden zudem die Anteile der feinen und groben Gesteinskörnung ermittelt. Diese vier Eingangsgrößen dienen als Parameter für das Modell zur Errechnung der Griffigkeit (FAP_{err}). Die errechnete Griffigkeit wird durch die Summierung der beiden Produkte aus dem Polierwiderstand und den Anteilen der feinen Gesteinskörnung und den Polierwiderstand und dem Anteil der groben Gesteinskörnung berechnet.

$$FAP_{err} = pws_{fein} * Anteil_{fein} + pws_{grob} * Anteil_{grob} \quad (31)$$

Dieser errechnete FAP-Wert wird für alle in Kapitel 4.4 aufgelisteten Varianten nach der Formel (30) berechnet (s. Anhang). Infolge einer einfachen linearen Regression der errechneten (FAP_{err}) und tatsächlichen Griffigkeit ($FAP_{90.000}$) der Asphaltprobekörper wird die Güte des Modells bestimmt. In Tabelle 9-2 ist die globale Güte der Regressionsanalyse der Asphaltbeton- und Splittmastixasphaltvarianten dargestellt.

Das Modell des Asphaltbetons weist einen sehr hohen Zusammenhang zwischen Modell und abhängiger Variable auf ($R = 0,897$). Außerdem können ca. 8/10 der Variationen in den abhängigen Variablen durch das Modell beschrieben werden ($R^2 = 0,805$).

Beim Modell des Splittmastixasphaltes ist ein hoher Zusammenhang zwischen Modell und abhängiger Variable festzustellen ($R = 0,798$). Außerdem können mehr als 6/10 der Variationen in den abhängigen Variablen durch das Modell beschrieben werden ($R^2 = 0,637$). Dadurch, dass die p-Werte kleiner der Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % sind, ist der F-Test für beide Modelle zurückzuweisen. Demzufolge wird die globale Güte als gut befunden und die beiden linearen Regressionsmodelle sind für die Prognose der tatsächlichen Griffigkeit geeignet. Die ausführliche Regressionsanalyse ist aus dem Anhang zu entnehmen. Diese zeigt, dass alle Voraussetzungen als auch die Güte der Koeffizienten für beide linearen Regressionsanalysen erfüllt sind. Folgerichtig lassen sich die tatsächlichen Griffigkeitswerte des Asphaltbetons pws_{AC} und des Splittmastixasphaltes pws_{SMA} wie folgt durch die Regressionsgleichungen beschreiben:

$$FAP_{AC} = 0,142 + 1,248 * FAP_{err} \quad (32)$$

$$FAP_{SMA} = -0,045 + 0,901 * FAP_{err} \quad (33)$$

Durch das Einsetzen der Formeln (31) in (32) und (33) lässt sich der ermittelte Griffigkeitswert errechnen, welcher größer oder gleich den $FAP_{90.000min}$ sein sollte.

$$FAP_{ermittelt} = \begin{cases} 0,142 + 1,248 * (pws_{fein} * Anteil_{fein} + pws_{grob} * Anteil_{grob}) & \text{für AC} \\ -0,045 + 0,901 * (pws_{fein} * Anteil_{fein} + pws_{grob} * Anteil_{grob}) & \text{für SMA} \end{cases} \quad (34)$$

Für die Ermittlung des Anforderungswertes des $FAP_{90000min}$ bei Asphaltprobekörpern wird zunächst der PSV-Wert der resultierenden Gesteinskörnung

aller in dieser Arbeit verwendeten Asphaltarten errechnet (s. Anhang). Dies erfolgt nach TL-Asphalt mittels der folgenden Formel:

$$PSV_{err} = PSV_{grob} * Anteil_{grob} + PSV_{fein\ abgeleitet} * Anteil_{fein} \quad (35)$$

Im zweiten Schritt wird den Wert $FAP_{90.000min}$ bestimmt. Dazu wird auf den PSV-Wert und die Anforderungswerte der TL Asphalt-StB zurückgegriffen. Der errechnete PSV-Wert ist die Summe der Produkte des PSV-Werts und des Massenanteils der groben und feinen Gesteinskörnung im Asphaltmischgut. Dabei ist der PSV-Wert der feinen Gesteinskörnung von dem der groben Gesteinskörnung abgeleitet. In Bild 9-2 sind die gemessenen Griffigkeitswerte der Asphaltoberfläche aus Kapitel 5 mit den errechneten PSV-Werten der Asphaltbetonvarianten in einem Streudiagramm dargestellt. Zusätzlich ist die Regressionsgerade (graue Gerade) der beiden Eingangsparameter mit eingezeichnet.

Die rote Gerade in dem Streudiagramm kennzeichnet den Anforderungswert nach TL Asphalt-StB für einen Asphaltbeton mit besonderer Belastung ($PSV \geq 48$). Alle Asphaltbetonvarianten, die links von dieser Geraden liegen (rote Punkte), unterschreiten die Anforderungen der TL Asphalt-StB. Der Schnittpunkt dieser Geraden mit der Regressionsgerade ergibt den $FAP_{90.000min}$ für die Asphaltbetonvarianten (0,250). Infolgedessen versinnbildlicht die orangene Gerade die Grenze der minimal zulässigen Griffigkeit der Asphaltoberflächen eines Asphaltbetons mit besonderer Belastung.

Für den Splittmastixasphalt wird analog vorgegangen. Der Schnittpunkt der Regressionsgeraden (graue Gerade) mit dem Anforderungswert nach TL Asphalt-StB ($PSV \geq 51$) (rote Gerade) liegt um ca. 0,02 unterhalb des Schnittpunktes des Asphaltbetons (orangene Gerade). Somit symbolisiert die orangene gestrichelte Gerade den für den Splittmastixasphalt mit besonderer Belastung $FAP_{90.000min}$ von 0,230 (s. Bild 9-3).

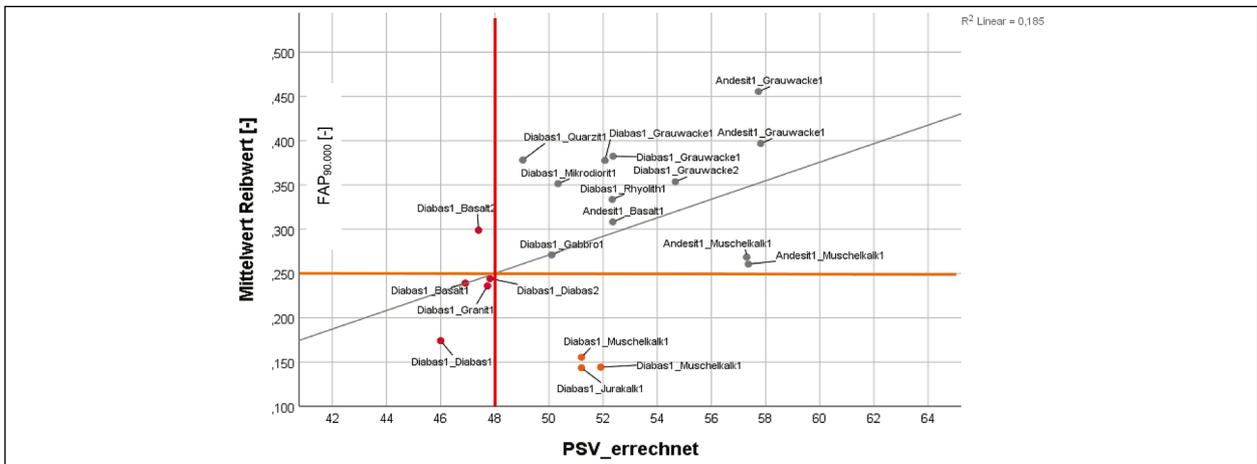


Bild 9-2: Anforderungswert der Griffigkeit Asphaltbeton

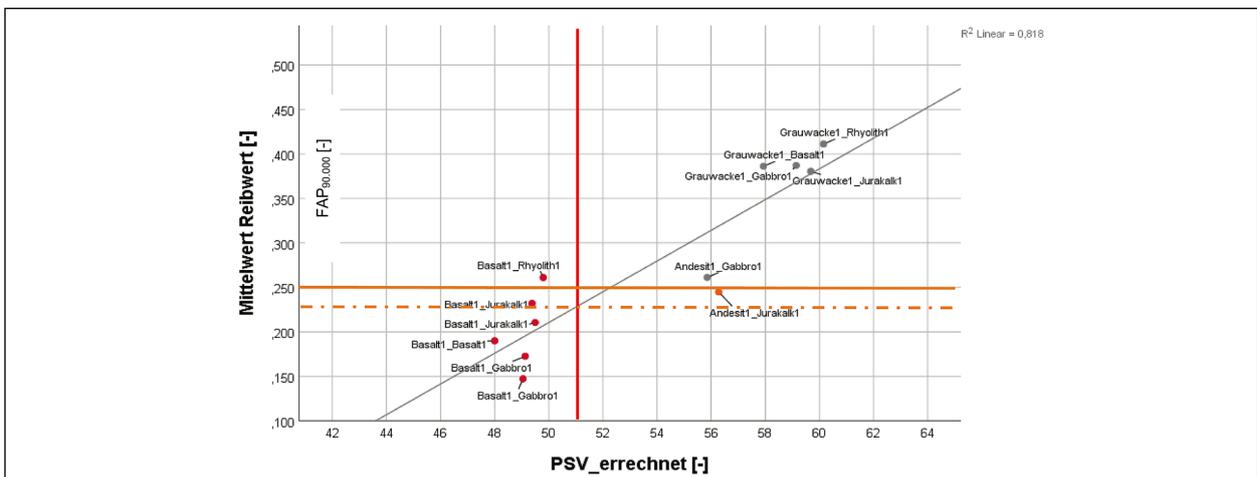


Bild 9-3: Anforderungswert der Griffigkeit Splittmastixasphalt

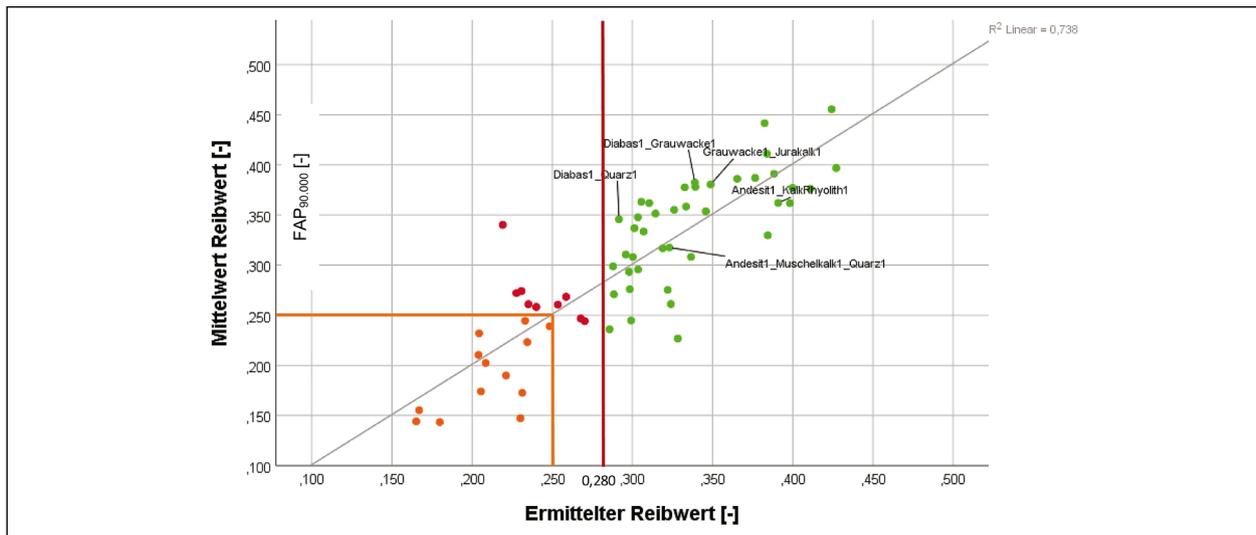


Bild 9-4: Gegenüberstellung ermittelter Griffigkeit und der tatsächlichen Griffigkeit (AC, SMA u. PA)

Aufgrund der zu geringen Datenmenge kann für den offenporigen Asphalt in dieser Arbeit keine Aussage getroffen werden.

Unter der Berücksichtigung der Präzisionsdaten und der kritischen Spannweite des Prüfverfahrens WEHNER/SCHULZE und der Datengrundlage wird vorgeschlagen den $FAP_{90.000min}$ mit einem Sicherheitswert von 0,035 zu belegen. Für die Asphaltarten Asphaltbeton und SMA wird ein $FAP_{90.000}$ von 0,280 vorgeschlagen (s. Bild 9-4).

Anforderungen an den Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnungen sind in Zukunft nicht erforderlich, wenn das Griffigkeitspotenzial des zu bewertenden Asphaltes mittels des Verfahrens nach WEHNER/SCHULZE bestimmt wird. Für weitere Forschungsarbeiten wird ein $FAP_{90000min}$ -Wert von 0,280 für Asphaltbetone und Splittmastixasphalt vorgeschlagen. In einer weiteren Arbeit ist dieser Wert mit der Praxis abzugleichen.

Dieses Vorgehen geht mit der Schonung der natürlichen Ressourcen einher. Durch die gezeigten Anforderungen an die Eigenschaften von feinen Gesteinskörnungen können diejenigen feinen und groben Gesteinskörnungen, die aufgrund der bisherigen Regelung ausgeschlossen waren, wirtschaftlich und nachhaltig eingesetzt werden. Beispiele für die bis dahin ausgeschlossenen Gesteinskörnungen sind in Bild 9-4 dargestellt. Die Asphaltvarianten, welche entweder durch den zu geringen PSV-Wert der groben Gesteinskörnung (Diabasvariante) und feinen Gesteinskörnung (Kalkstein) nicht verwendet werden konnten, können durch die in dieser Arbeit vorgeschlagenen Anforderungen mitberücksichtigt werden bzw. konnte gezeigt werden, dass

eine ausreichende Griffigkeit bei der Verwendung dieser Gesteine erreicht wird.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Forschungsarbeit besteht in der Identifizierung des Einflusses der feinen Gesteinskörnung auf die Griffigkeitsentwicklung von Asphaltoberflächen anhand von Laborversuchen und in der Ausarbeitung praxistgerechter Anforderungen an den Polierwiderstand von feinen Gesteinskörnungen.

Anhand der internationalen Literaturstudie kristallisiert sich heraus, dass die feine und grobe Gesteinskörnung in einem Asphaltmischgut das Griffigkeitsverhalten einer Fahrbahnoberfläche maßgeblich bestimmen. Sowohl die feinen als auch groben Gesteinskörnungen beeinflussen mit ihrer Mineralogie, Korngrößenverteilung, Kornform und ihrem Größtkorn die Makro- und Mikrostruktur der Straßenoberflächen. Hinsichtlich des Einflusses der feinen Gesteinskörnung auf die Griffigkeit von Asphaltbelägen ließen sich folgende Einflussfaktoren festzustellen:

- Asphaltart
- Größtkorn des Asphaltmischgutes
- Korngrößenverteilung
- Mineralogie
- Kornform

Somit lässt sich im Hinblick auf die Literatur feststellen, dass der qualitative Einfluss der feinen Gesteinskörnung, deren Mineralogie, Korngrößenverteilung und Polierwiderstand auf die Griffigkeit einer Straßenoberfläche weitestgehend erforscht ist (s. z. B. DAMES und SCHELLENBERG 1985; DAMES et al. 1988; DAMES 1987; KIRCHMAIER et al. 2010; M BgA 2004). Der quantitative Einfluss der feinen Gesteinskörnung ist jedoch nicht bekannt.

Der quantitative Einfluss der feinen Gesteinskörnung auf die Griffigkeit von Asphaltoberflächen und die praxisgerechten Anforderungen an den Polierwiderstand von den feinen Gesteinskörnungen sind anhand von Asphaltprobekörpern, die im Walzsektorverdichter hergestellt wurden, ermittelt worden. Abgeleitet aus der Literaturstudie wurden die Asphaltprobekörper aus den drei in der Praxis gängigsten Asphaltarten Asphaltbeton, Splittmastix und offenporigem Asphalt hergestellt. Dabei beinhalten die verwendeten Asphaltarten insgesamt fünf verschiedene grobe und zwanzig verschiedene feine Gesteinskörnungen. Zusätzlich wurde zur Untersuchung des quantitativen Einflusses der Mineralogie auf den Polierwiderstand und der Korngrößenverteilung der feinen Gesteinskörnungen auf die Griffigkeit zwei verschieden grobe und vier unterschiedliche feine Gesteinskörnungen in einem Asphaltbeton mit 8 mm Größtkorn verwendet. Um den quantitativen Einfluss der Korngrößenverteilung zu ermitteln, wurde die feine Gesteinskörnung in Fein-, Mittel- und Grobsand unterteilt und wieder in verschiedenen Mengenanteilen zum Mischgut hinzugefügt. Zur quantitativen Bestimmung des Einflusses der Mineralogie auf den Polierwiderstand wurde vor der Fertigung der Probekörper von den verwendeten Gesteinskörnungen eine mineralogische/petrografische Untersuchung durchgeführt.

Die Griffigkeit der Asphaltprobekörper wird anhand des WEHNER/SCHULZE Verfahren (DIN EN 12697-49) nach 90 Tsd. Überrollungen bestimmt. Der Polierwiderstand der Gesteine wird zusätzlich zu dem WEHNER/SCHULZE Verfahren mit dem PSV-Verfahren (DIN EN 1097-8) bestimmt. Zusätzlich zur Bestimmung der Mikrostruktur ist die Makrostruktur, in Form der mittleren Texturtiefe der Asphaltprobekörper, mit der ELATextur gemessen worden.

Als Schlussfolgerung der Ergebnisse der Bestimmungen der Polierwiderstände der groben Gesteinskörnung lässt sich festhalten, dass wie auch schon [HUSCHEK 2004] festgestellt hat, die PSV-

und WEHNER/SCHULZE-Verfahren einen starken linearen Zusammenhang aufweisen ($R^2 = 0,971$). Durch den Vergleich der Polierresistenz der groben und feinen Gesteinskörnungen werden die Ergebnisse aus der Arbeit von [KIRCHMAIER 2011] unterstrichen. Die Ableitung des Polierwiderstands der feinen Gesteinskörnung von dem der groben Gesteinskörnung ist nicht immer zutreffend. Die Regelungen der TL Asphalt-StB sind somit nicht zutreffend. Zusätzlich lassen sich die Erkenntnisse aus den Arbeiten von WÖRNER, DAMES, LITZKAR, KIRCHMAIER und KNILL über den Einfluss der Mineralogie auf den Polierwiderstand belegen. Wie in diesen Werken beschrieben, weisen die Brechsande mit ausschließlich karbonatischem Ursprung geringere Polierwerte auf als die mit silikatischen oder quarzitäen Ursprungs. Der Unterschied in der Polierresistenz der hier untersuchten silikatischen und quarzitäen Brechsande lässt sich anhand der mineralogischen Zusammensetzung und Entstehungsart der Gesteine zum größten Teil erklären. Außerdem ist festzustellen, dass der Unterschied des Polierwiderstandes zwischen einem mineralogisch äquivalenten Brech- und Natursand dadurch zustande kommt, dass der Natursand (Quarzsand¹) eine deutlich kubischere Kornform aufweist als Brechsand (Quarzit¹). Dies stützt die Erkenntnis der Arbeit von [WÖRNER et al. 2006].

Die Ergebnisse der Texturuntersuchung zeigen erwartungsgemäß, dass mit abnehmendem Anteil der feinen Gesteinskörnung im Asphaltmischgut (Anteil: AC~40 M.-%, SMA~13% M.-% und PA~2 M.-%) die Texturtiefe der Probekörper zunimmt.

Zur Bestimmung des quantitativen Einflusses der Mineralogie der Gesteinskörnungen auf den Polierwiderstand wurde ein Modell entwickelt, welches anhand der Anteile der Minerale in den verwendeten Gesteinen, welche aus der mineralogisch/petrografischen Ansprache entnommen wurden, auf die totale Härte (Total Hardness) des Gesteins schließen kann. Der quantitative Zusammenhang der Mineralogie infolge der Total Hardness eines Gesteins zeigt einen sehr hohen statistischen Zusammenhang zum Polierwiderstand der Gesteine auf ($R^2 = 0,871$).

Die Ergebnisse der Griffigkeitsuntersuchung zum quantitativen Einfluss der Korngrößenverteilung zeigten, dass die Veränderung der Korngrößenverteilung der feinen Gesteinskörnung keinen signifikanten Einfluss auf die Griffigkeit der Asphaltprobekörper hat.

Bei den Ergebnissen der Griffigkeitsuntersuchung zum quantitativen Einfluss der feinen Gesteinskörnung zeigt sich bei der mischgutabhängigen Auswertung des Asphaltbetons ein deutlich höherer statistischer Zusammenhang (2,4fach) zwischen dem Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnung und der Griffigkeit als beim Polierwiderstand der groben Gesteinskörnung.

Beim Splittmastixasphalt ist ein deutlich höherer statistischer Zusammenhang (7,3fach) zwischen dem Polierwiderstand der groben Gesteinskörnung und der Griffigkeit festzustellen als beim Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnung. Zudem besteht der Parameter des Polierwiderstandes der feinen Gesteinskörnung den Signifikanztest nicht, was die These unterstreicht, dass die feine Gesteinskörnung einen geringen Einfluss auf die Griffigkeit bei Splittmastixasphalt hat.

Kein Zusammenhang zwischen dem Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnung und der Griffigkeit ist auch beim offenporigen Asphalt festzustellen.

Die Untersuchung der Variation des Größtkorns beim Asphaltbeton zeigt auf, dass ein leicht größerer statistischer Einfluss (1,4fach) des Polierwiderstandes der feinen Gesteinskörnung auf die Griffigkeit bei einem geringeren Größtkorn (8 mm zu 11 mm) zu verzeichnen ist. Anhand der Variation des Größtkorns beim Splittmastixasphalt lässt sich statistisch kein Einfluss der Polierwiderstände zur Griffigkeit feststellen.

Die Auswertung der Kombinationsversuche Brech-/Natarsand und Brechsand zeigt auf, dass anhand der Griffigkeit von zwei Probekörpern, welche jeweils mit einer unterschiedlichen feinen Gesteinskörnung hergestellt wurden, die Griffigkeit eines Probekörpers, welcher mit der Kombination der beiden unterschiedlichen feinen Gesteinskörnungen hergestellt wurde, abgeleitet werden kann.

Als letzter Einflussfaktor der feinen Gesteinskörnung auf die Griffigkeit lässt sich anhand des Vergleichs einer polierschwachen groben Gesteinskörnung mit einer polierstarken groben Gesteinskörnung feststellen, dass die feine Gesteinskörnung bei der Verwendung einer polierschwachen groben Gesteinskörnung einen statistisch leicht größeren Einfluss (1,6fach) auf die Griffigkeit hat als bei der Verwendung einer polierstarken groben Gesteinskörnung.

Zur Formulierung eines Vorschlages für praxisgerechte Anforderungen an den Polierwiderstand von den feinen Gesteinskörnungen ist auf Grundlage des Polierwiderstandes der jeweiligen Gesteinskörnungen und der quantitativen Analyse der Griffigkeit ein Modell entwickelt worden. Das Modell besteht aus dem Vergleich des ermittelten Griffigkeitswertes ($FAP_{\text{ermittelt}}$) und der mindesterforderlichen Griffigkeit ($FAP_{90.000\text{min}}$). Hierbei muss der $FAP_{\text{ermittelt}}$ größer oder gleich dem $FAP_{90.000}$ sein. Der ermittelte Griffigkeitswert lässt sich anhand der Regressionsgleichungen der tatsächlich gemessenen Griffigkeit und dem errechneten Griffigkeitswert (FAP_{err}) ableiten. Die errechnete Griffigkeit besteht dabei aus der Summe des Produktes der Polierwiderstände und den Anteilen der feinen und groben Gesteinskörnung. Der Anforderungswert für die Griffigkeit auf den Asphaltprobekörpern ($FAP_{\text{Anforderung}}$) kann auf Grundlage von den Messergebnissen der Griffigkeitsuntersuchungen und den Anforderungen nach TL Asphalt-StB (PSV-Werten) an besonders belasteten Asphaltarten zu 0,280 bestimmt werden. Das Modell berücksichtigt somit nicht nur den Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnung, sondern betrachtet das Asphaltmischgut als Ganzes und kann somit eine genauere und sichere Abschätzung der Griffigkeit auf der Asphaltoberfläche darstellen. Daraus lässt sich schließen, dass nicht eine Anforderung an die feinen oder groben Gesteinskörnungen gestellt werden sollte, sondern dass eine Anforderung an die ermittelte Griffigkeit gestellt werden sollte von 0,280.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass durch die detaillierte Erkenntnis des quantitativen Einflusses der feinen Gesteinskörnung auf das Griffigkeitspotenzial eines Asphalttes und die Aufstellung des Modells performancebasierte Anforderungen der Form eines $FAP_{90.000\text{min}}$ -Wertes formuliert werden können. Zudem verbessert und erhöht das Modell die Schonung der natürlichen Ressourcen und die Sicherstellung einer langfristig hohen Griffigkeit der Straßen. Die gezeigten Anforderungen an das aufgestellte Modell ermöglichen den wirtschaftlichen und nachhaltigen Einsatz dieser feinen und groben Gesteinskörnungen, die aufgrund der bisherigen Regelung ausgeschlossen waren.

Ausblick:

Das aufgestellte Modell zur Bestimmung der Anforderung bietet bis hierhin sehr zuverlässige Vorhersagen für das Griffigkeitsverhalten bei Asphaltbetonoberflächen. Um diese sehr gute Vorhersagbar-

keit der Griffigkeitswerte auch für die anderen Asphaltarten zu generieren, sind zukünftig weitere Griffigkeitsuntersuchungen für die übrigen Asphaltarten erforderlich. Außerdem könnte durch eine größere Variation der groben Gesteinskörnung der Einfluss der groben Gesteinskörnung auf die Griffigkeit von Straßenoberflächen genauer ausgearbeitet werden.

Alle in dieser Arbeit gemessenen Griffigkeitswerte und Texturwerte sind an Probekörpern aus dem Labor gemessen worden. Einschlägig ist aber bekannt, dass sich die Probekörperoberflächen aus dem Labor nicht immer in derselben Qualität wie die Asphaltoberflächen in situ herstellen lassen. Zudem ist in Fachkreisen die Vorbehandlung durch das Sandstrahlen sehr umstritten. Somit würde eine Vergleichsstudie zu dieser Arbeit mit Probekörpern, die in situ hergestellt wurden und verschiedene Belastungsstufen aufweisen, zu einer allgemeingültigeren Aussage führen.

Literatur

- [ANGST C, BÜRGISSER P], Forschungspaket „POLIGRIP-Einfluss der Polierbarkeit von Gesteinskörnungen auf die Griffigkeit von Deckschichten“. Wien; 2014.
- [BACHMANN T], Literaturrecherche zum Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn; 1996.
- [BACKHAUS K.], BACKHAUS K. 2016 Multivariate Analysemethoden; 2016.
- [BALTES-GÖTZ B], Lineare Regressionsanalyse mit SPSS; 2019.
- [BECKMANN L], Zur Bewertung der Griffigkeit von nassen StraßenoberflächenII. Teil: Relative Unfallhäufigkeit bei Nässe; 1964.
- [BERMEL, ELS H., HABERMANN U., RAUSCHENBACH V., SCHELLENBERGER M.], Griffigkeitsanforderungen nach 3 Jahren; 2004.
- [BLECK W], Eigenschaften und Anwendungen von Stählen; 1993.
- [BÖHM S], Der Einfluss der Gesteinseigenschaften auf die Oberflächeneigenschaften von Gussasphalt; 2018.
- [BÜHLMANN F], Einfluss der Witterung auf die Griffigkeit von Fahrbahnen. Zürich; 1985.
- [BÜRCKERT M, GAUTERIN F, UNRAU H-J], Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Messverfahren. Hannover, Bremerhaven: Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; Wirtschaftsverlag N. W. Verlag für neue Wissenschaft; 2012.
- [CAFISO TS], Texture analysis of aggregates for wearing courses in asphalt pavements; 2007.
- [Chemie Lexikon]. Berlin.
- [COHEN J], Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Sciences; 2003.
- [DAHIR S. H.], A review of aggregate selection criteria for improved wear resistance and skid resistance of bituminous surfaces; 1979.
- [DAMES J], Einfluss der Polierbarkeit von Sand auf die Griffigkeit von Asphaltbetondeckschichten. Berlin; 1987.
- [DAMES J], Ermittlung der Endpolierwerte von im Straßenbau verwendeten Gesteinen; 1989.
- [DAMES J], Zusammenhang zwischen dem Polierwiderstand von Mineralstoffen und der Griffigkeit von Straßendecken; 1990.
- [DAMES J, HUSCHEK S, LINDNER J], Untersuchungen über den Einfluss unterschiedlicher Mineralstoffe auf das Gebrauchsverhalten von Asphaltdeckschichten hinsichtlich Griffigkeit, Querebenheit und Reifengeräusch; 1997.
- [DAMES J, HUSCHEK S, RITTERSHOFER M], Griffigkeitsschwankungen von Fahrbahndecken; 1994.
- [DAMES J, LINDNER J, REUß W], Untersuchungen über den Einfluss des Größtkorns in bituminösen Deckschichten auf die Griffigkeit. Berlin; 1988.
- [DAMES J, LINDNER J, SULTEN P], Langfristige Beobachtungen des Griffigkeitsverhaltens von Versuchsstrecken; 1986.
- [DAMES J, SCHELLENBERG K], Einfluss der Polierbarkeit von Sanden auf die Griffigkeit von Asphaltbetondeckschichten Anlage einer Ver-

- suchsstrecke mit Sanden zur Kontrolle des Ausgawertes von Laboratoriumsprüfung. Rottweil; 1985.
- [DIN EN 13036-3:], Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen Prüfverfahren Teil 3: Messung der horizontalen Entwässerung von Deckschichten; 2003, DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [DIN EN ISO 13473-1], Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen – Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe; 2004, DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [DIN EN 1097-8], Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen Teil 8: Bestimmung des Polierwertes; 2009, DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [DIN EN 13036-1], Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen – Prüfverfahren Teil 1: Messung der Makrotexturtiefe der Fahrbahnoberfläche mithilfe; 2010, DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [DIN EN 12697-49], Asphalt – Prüfverfahren für Heiasphalt Teil 49: Messung der Griffigkeit nach Polierung; 2014, DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [Do M-T CV], Road surface texture and skid resistance; 2015.
- [DUDENHÖFER, RÜCKERT P], Bewertungshintergrund für den Widerstand gegen Polieren von Gesteinskörnungen nach dem PWS-Verfahren. Bremen: Fachverlag NW; 2016.
- [DUNFORD A], Friction and the texture of aggregate particles used in the road surface course. PhD thesis, University of Nottingham; 2013.
- [EPPENSTEINER W], Vom Werden und Vergehen des Steins. Wien; 1999.
- [FGSV]:
- [ZTV Asphalt-StB 07/13], Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt. 2007th ed. Köln: FGSV-Verl.
- [TP Griff-StB], Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Teil: Messverfahren SRT. 2004th ed. Köln: FGSV-Verl; 2004.
- [TP Asphalt StB: Teil 33], Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (editor), Technische Prüfverfahren für Asphalt. 2008th ed. Köln: FGSV; 2007.
- [TP Gestein-StB: Teil 5.4.2], Technische Prüfverfahren für Gesteinskörnung im Straßenbau Bestimmung des Polierwertes mit dem Verfahren nach WEHNER/SCHULZE; 2008, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- [M OB], Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Merkblatt für die Herstellung von Oberflächentexturen auf Verkehrsflächen aus Beton. 2009th ed. Köln: FGSV-Verl; 2009.
- [M OOA], Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Merkblatt zur Optimierung der Oberflächeneigenschaften von Asphaltdeckschichten. 2010th ed. Köln: FGSV-Verl; 2010.
- [M BGriff], Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Merkblatt zur Bewertung der Straengriffigkeit bei Nässe. 2012nd ed. Köln: FGSV; 2012.
- [RStO 12], Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen. 2012nd ed. Köln: FGSV; 2012.
- [M VV], Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Merkblatt für versickerungsfähige Verkehrsflächen. 2013rd ed. Köln: FGSV-Verl; 2013.
- [TP Gestein-StB: Teil 5.4.1], Technische Prüfverfahren für Gesteinskörnung im Straßenbau Bestimmung des Polierwertes (PSV); 2015, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- [TP Asphalt StB: Teil 6], Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (editor), Technische Prüfverfahren für Asphalt. Köln; 2016.
- [PWS fgk Entwurf], Bestimmung des Polierwertes von feinen Gesteinskörnungen mit dem Prüfverfahren WEHNER/SCHULZE (PWS);

- 2019, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- [TP Asphalt-StB: Teil 49], Technische Prüfvorschriften für AsphaltReibungsbeiwert nach Polieren (Friction after Polishing – FAP); 2019, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- [M BgA], Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Merkblatt für den Bau griffiger Asphaltdeckschichten. 2004th ed. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; 2004.
- [TL Asphalt-StB], Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen (TL Asphalt-StB 07/13). Köln; 2013, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV).
- [TP Gestein-StB], Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau. Köln; 2018, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV).
- [GEIER W], Der Einfluss geometrischer Reibflächen-Rauhigkeitsformen auf das trockene und nasse Reibverhalten von Gummi; 1972.
- [GEYER W], Beitrag zur Gummireibung auf trockenen und insbesondere nassen Oberflächen; 1971.
- [GRÄTZ B], Langzeitwirkung von dünnen Schichten bezüglich der Erhaltung relevanter Oberflächenmerkmale; 1998.
- [GROSCH K A], The relation between the friction and visco-elastic properties of rubber; 1963.
- [HANUSZ Z und TARASINSKA J], Normalization of the Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilk tests of normality; 2015.
- [HUSCHEK S], Untersuchungen zum Griffigkeitsverhalten von Splittmastixasphalt-Deckschichten. Bonn: Bundesministerium für Verkehr Bau- und Wohnungswesen Abt. Straßenbau Straßenverkehr; 2002.
- [HUSCHEK S], Polierwiderstand und Griffigkeit-Langzeiterfahrungen; 2004.
- [KALBERG S], Untersuchung des Einflusses der feinen Gesteinskörnung auf das Griffigkeitspotenzial von Asphaltdeckschichten im Hinblick auf deren Mineralogie und Korngrößenverteilung. Aachen; 2020.
- [KANE M, ARTAMENDI I, SCARPAS T], Long-term skid resistance of asphalt surfacings: Correlation between WEHNER-SCHULZE friction values and the mineralogical composition of the aggregates; 2013.
- [KIRCHMAIER L], Bewertung der Korngrößenabhängigkeit des Polierwiderstandes von Sanden mit dem Prüfverfahren nach WEHNER/SCHULZE. Diplomarbeit. Wien; 2007.
- [KIRCHMAIER L], Einfluss feiner Gesteinskörnung auf die Griffigkeit von DeckschichtenGrundlegende Untersuchungen zum Polierverhalten mit dem Prüfgerät nach WEHNER/SCHULZE neuer Bauart. Dissertation. Wien; 2011.
- [KIRCHMAIER L, BLAB R, EPPENSTEINER, LITZKA, J.], Praxisrelevante Bewertung der Polierresistenz von Sanden für den Straßenbau. Wien; 2010.
- [KNILL DC], Petrographic aspects of the polishing of natural road stones; 1960.
- [KRZEMIEN R], Gesteinskörnungen. 3rd ed. Wien; 2002.
- [KUGLER H], Einfluss feiner Gesteinskörnungen auf die Griffigkeit von Straßen; 2012.
- [KUGLER H], Prognose der Griffigkeit von FahrbahnoberflächenEntwicklung eines Labor-Verfahrens PROGRIP; 2015.
- [KUMMER HW], Unified theorie of rubber and tire friction; 1966.
- [LINDENMANN HP], Zusammenhang Textur und Griffigkeit von Fahrbahnen und Einflüsse auf die Lärmemission; 2014.
- [LITZKA J, PFEILER A, ZIEGER M], Einfluss des Sandes auf das Griffigkeitsverhalten bituminöser Decken. Republik Österreich, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Bundesstraßenverwaltung; 2003.
- [LUCE A, MAHMOUD E, MASAD E, CHOWDHURY A], Relationship of aggregate microtexture to asphalt pavement skid resistance; 2007.

- [MARKL G], Minerale und Gesteine Mineralogie - Petrologie - Geochemie. 3rd ed. Berlin: Springer Spektrum; 2015.
- [MOORE DF], The Friction and Lubrication of Elastomers; 1972.
- [MULLEN W G, DAHIR S H M, EL MADANI N.F.], Laboratory Evaluation of Aggregates, Aggregate Blends, and Bituminous Mixes for Polish Resistance. Washington D.C; 1974.
- [MÜLLER W, BUCHTA H, PASS F., VASILJEVIC V], Asphalt im Straßenbau. 3rd ed. Wien; 2002.
- [NEUMANN R], Geologie für Bauingenieure. Berlin/München; 1964.
- [O'BRIAN], Frictional resistance of aggregates for Hot-Mix Asphalt Pavements; 2009.
- [OKRUSCH M, MATTHES S], Mineralogie Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. 9th ed. Berlin: Springer Spektrum; 2014.
- [PATZAK TM], Möglichkeiten der Optimierung des WEHNER/SCHULZE-Verfahrens zur Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Asphalten. Dissertation. München; 2018.
- [PEDHAZUR, E J], Multiple Regression in Behavioral Research: Explanation and Prediction; 1982.
- [PERSON B N J und VOLOKITIN A.I.], Rubber friction on smooth surface; 2006.
- [PESTALOZZI H, GROLIMUND H-J, ANGST C], Lärmarme Strassenbeläge innerorts. Bern; 2004.
- [PFEILER A], Erhöhung der Griffigkeit von Asphaltstrassen. Der Einfluss der Polierresistenz feiner Gesteinskörnungen auf das Griffigkeitsverhalten von Asphaltdeckschichten. Dissertation. Wien; 2004.
- [PFEILER A], Griffigkeitserhöhung von Asphaltstraßen Der Einfluss feiner Gesteinskörnungen. 56th ed; 2005.
- [POTSCHKA V], Die Bedeutung der Straßenoberflächeneigenschaften für die Verkehrssicherheit; 1988.
- [RAUSCHENBACH V, BOREK J], Griffigkeit ausgewählter Beobachtungsstrecken im Freistaat Sachsen in Abhängigkeit von der Zeit; 2010.
- [ROHLEDER M], Bestandsaufnahme an vorhandenen Streckenbericht zum Forschungsprojekt F 1100.3206003 des Arbeitsprogramms der Bundesanstalt für Straßenwesen. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wiss; 2010.
- [RÖTHLISBERGER F], Bewertungshintergrund für den Widerstand gegen Polieren (Polierprüfung und Petrografie) Teil 2: Petrografie; 2018.
- [SACHS L, HEDDERICH J], Angewandte Statistik; 2009.
- [SCHENDERA C], Regressionsanalyse mit SPSS; 2008.
- [SCHNIERING A], Erhaltung von Asphaltstraßen. Köln; 1983.
- [SCHULZE C], Ein geometrisch basiertes Modell zur Ableitung von Reibwerten bei Nässe aus der Textur. Dissertation. Aachen; 2011.
- [SCHULZE K-H], Typen der Oberflächenfeingestaltung und ihre Wirkung auf den Reibungswiderstand bei Nässe. Berlin; 1970.
- [SCHULZE K-H, DAMES, LANGE H], Untersuchungen über die Verkehrssicherheit bei Nässe; 1975.
- [SCHULZE C], Ein geometrisch basiertes Modell zur Ableitung der Griffigkeit aus der Textur; 2011.
- [SCHULZE K-H], Zur quantitativen Bewertung der Rauheit von Straßenoberflächen in Beziehung zum Reibungswiderstand bei Nässe. 103rd ed. Bonn; 1970.
- [SEBASTIAN U], Gesteinskunde – Ein Leitfaden für Einsteiger und Anwender. 4th ed. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum; 2018.
- [SHAPIRO S S WMB], An analysis of variance test for normality (complete samples); 1965.
- [STEINAUER B, MAYER G, VAN DER SLUIS S, PLATEN C], Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen; 2002.
- [TOURENQ C, FOURMAINTRAUX D], Propriétés des granulats et glissance routière; 1971.

[WEHNER B, SIEDEK P, SCHULZE K-H], Handbuch des Straßenbaus Band 1 Grundlagen und Entwurf. Berlin: Springer-Verlag; 1979.

[WIEHLER H-G], Straßenbau-Konstruktion und Ausführung. 3rd ed. Berlin; 1995.

[WÖRNER T, WESTINER E, BÖHNISCH S], Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung des Polierwiderstandes von Sand Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 06.077/2002/CGB des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wiss; 2006.

[YIN C], Bestimmung des Griffigkeitsniveaus auf Basis von Fahrbahntextur und Optimierung der Textur hinsichtlich der Griffigkeit. Aachen; 2016.

[ZIEGER M], Polierversuch Teil 3. BMVIT. 385th ed. Wien; 1990.

[ZIPKES E], Über das Leistungsvermögen einer Straßenoberfläche und ihres Angebots im Adhäsionsbereich; 1983.

[ZIPKES E], Griffigkeit-Bremsspur-Kraftübertragung. 56th ed. Zürich; 1984.

Bilder

Bild 2-1: Einflüsse der physikalischen Eigenschaften auf die funktionalen Eigenschaften [M OOA 2010]

Bild 2-2: Wellenspektrum der Fahrbahnoberfläche und Auswirkungen auf die Gebrauchseigenschaften [M BgA]

Bild 2-3: Auswirkungen der Oberflächenstruktur auf die Höhe des Reibungskoeffizienten nach ZIPKES [ZIPKES 1984]

Bild 2-4: Einteilung der Textur in zwei Bereiche [SCHULZE, 2011]

Bild 2-5: Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein einer Nass-Unfallhäufungsstelle in Abhängigkeit von der Griffigkeit des rechten Fahrstreifens [STEINAUER et al. 2002]

Bild 2-6: Jahreszeitliche Schwankung der Griffigkeit [HUSCHEK 1995]

Bild 2-7: Wirkende Kräfte des Coloumb'schen Reibungsbeiwerts [ANGST und BÜRGISSER 2014]

Bild 2-8: Einzelkomponenten der Reibung [GEIER 1972]

Bild 2-9: Griffigkeitsentwicklung einer Asphaltdeckschicht

Bild 2-10: Kreislauf des Gesteins [OKRUSCH und MATTHES 2014]

Bild 2-11: Textur eines plutonischen (links) und vulkanischen (rechts) Gesteins [MARKL 2015]

Bild 2-12: Eine Auswahl an Magmatiten [MARKL 2015; Ulrich 2018]

Bild 2-13: Eine Auswahl an Sedimenten [MARKL 2015; ULRICH 2018]

Bild 2-14: Eine Auswahl an Metamorphosen [MARKL 2015; ULRICH 2018]

Bild 2-15: Wichtigste gesteinsbildende Minerale [SEBASTIAN 2018]

Bild 2-16: Bindungsarten bei Mineralien [MARKL 2015]

Bild 2-17: Ternäres Phasendiagramm von Feldspäten [MARKL 2015]

Bild 2-18: Kristallstruktur von Quarz [MARKL 2015]

Bild 2-19: Kristallstruktur von Glimmer [MARKL 2015]

Bild 2-20: Kristallstruktur von Kalzit [OKRUSCH et al. 2014]

Bild 2-21: Schematische Darstellung der Versuchsfläche eines Granits [TOURENQ und FOURMAINTRAUX 1971]

Bild 2-22: Anteil der härteren Minerale im Zusammenhang mit der Griffigkeit [MULLEN et al. 1974]

Bild 2-23: Konstruktion der Fahrbahntextur in Ebene der Mineralaggregate [DAHIR 1979]

Bild 2-24: Vergleich Prüfergebnisse an Splitt 8/11 mm der beiden Verfahren PSV und PWS [HUSCHEK 2004]

Bild 2-25: Wechselwirkung des Elektronenstrahls mit der Probe [BLECK 1993]

- Bild 2-26: Der Unterschied von SE- und BSE-Abbildungen am Beispiel von Entmischungslamellen von Magnetit und Ilmenit in einem Fe-Ti-Oxidkorn [MARKL 2015]
- Bild 2-27: Schemazeichnung eines Rasterelektronenmikroskops [MARKL 2015]
- Bild 2-28: Die Braggbedingung für die Reflexion von Röntgenstrahlen an Netzebenen eines Kristalls [MARKL 2015]
- Bild 2-29: Vergleich eines digital aufgenommenen Pulver-Diffraktogramms mit einer Debye-Scherrer-Filmaufnahme [MARKL 2015]
- Bild 2-30: Schnellpoliermaschine (links, EN 1097-8), Probekörper (rechts)
- Bild 2-31: WEHNER/SCHULZE Prüfgerät
- Bild 2-32: Poliereinheit PWS
- Bild 2-33: Griffigkeitsmessgerät PWS
- Bild 2-34: Pendelgerät (links), Ausflussmessung nach Moore (rechts) [DIN EN 13036-3; RAUSCHENBACH und BOREK 2010]
- Bild 2-35: Sandfleckverfahren [DIN EN ISO 13473-1]
- Bild 2-36: Messgerät ELAtextur® [BÜRCKERT et al. 2012]
- Bild 2-37: Zusammenhang ETD und MPD [DIN EN ISO 13473-1]
- Bild 4-1: Untersuchungsmethodik
- Bild 6-1: Herstellung Sandplatten
- Bild 6-2: Probekörperherstellung Mastix-Einbettverfahren
- Bild 6-3: Polierwiderstand grobe Gesteinskörnung WEHNER/SCHULZE
- Bild 6-4: Polierwiderstand grobe Gesteinskörnung PSV
- Bild 6-5: Vergleich der Verfahren PSV und PWS
- Bild 6-6: Polierwiderstand der feine Gesteinskörnung
- Bild 6-7: Vergleich des Polierwiderstandes feine und grobe Gesteinskörnung
- Bild 6-8: Kornform Quarzsand und Quarzit
- Bild 6-9: Prüfplan feine Gesteinskörnung
- Bild 6-10: Prüfplan Korngrößenverteilung Mineralogie
- Bild 6-11: Mineralogische Zusammensetzung der verwendeten Gesteine
- Bild 6-12: Aufnahme des verwendeten Diabas in den Korngrößen 2/5 und 5/8
- Bild 6-13: Aufnahme der verwendeten Grauwacke in den Korngrößen 2/5 und 5/8
- Bild 6-14: REM-Untersuchung einer Muschelkalk Probe
- Bild 6-15: REM-Untersuchung einer Quarz Probe
- Bild 6-16: REM-Untersuchung einer Basalt Probe
- Bild 6-17: REM-Untersuchung einer Quarzit
- Bild 6-18: Herstellung Walzsektorasphaltplatten (links: TP Asphalt-StB, Teil 33)
- Bild 6-19: Prozentuale Aufteilung der feinen Gesteinskörnung (links: 244, mitte: 333, rechts 442)
- Bild 6-20: Asphaltprobekörper nach Herstellung (a), nach Sandstrahlen (b), nach Polieren (c)
- Bild 6-21: Texturmessprogramm
- Bild 6-22: MPD-Werte nach Herstellung, Sandstrahlen und Prüfung aller Probekörpervarianten
- Bild 6-23: Im Kreisring dargestellte Prüffläche eines Probekörpers
- Bild 6-24: Darstellung der FAP-Werte nach 90.000 Überrollungen an allen Probekörpervarianten
- Bild 6-25: Texturtiefe nach den Bearbeitungszuständen
- Bild 6-26: Einfluss der Asphaltart auf die Texturtiefe
- Bild 6-27: Einfluss Größtkorn auf die Texturtiefe
- Bild 6-28: Einfluss der groben Gesteinskörnungsart auf die Textur
- Bild 6-29: Repräsentative Darstellung des Griffigkeitsverlaufs von AC, SMA und PA
- Bild 6-30: Einfluss der feinen Gesteinskörnung beim Asphaltbeton (gG: Diabas1)
- Bild 6-31: Einfluss der feinen Gesteinskörnung beim Asphaltbeton (gG: Andesit1)

- Bild 6-32: Einfluss Kombination Brech-/Natursand beim Asphaltbeton
- Bild 6-33: Vergleich Brech-/Natursandvarianten mit feinen Gesteinskörnungsvarianten
- Bild 6-34: Einfluss Kombination Brech-/Natursand beim Asphaltbeton
- Bild 6-35: Vergleich Brechsandvarianten mit feinen Gesteinskörnungsvarianten
- Bild 6-36: Vergleich Asphaltbeton mit 8er und 11er Größtkorn
- Bild 6-37: Einfluss feine Gesteinskörnung beim Splittmastixasphalt (Basalt)
- Bild 6-38: Einfluss feine Gesteinskörnung beim Splittmastixasphalt (Grauwacke)
- Bild 6-39: Einfluss Brech-/Natursand beim Splittmastixasphalt
- Bild 6-40: Vergleich 11er mit 8er Größtkorn beim Splittmastixasphalt
- Bild 6-41: Einfluss feine Gesteinskörnung beim offenporigen Asphalt
- Bild 7-1: Zerlegung der Gesamtabweichung [BACKHAUS 2016]
- Bild 7-2: Tests auf Homoskedastizität [SCHULZE 2011]
- Bild 7-3: Test auf normalverteilte Residuen [SCHENDERA 2008]
- Bild 7-4: Linearitäts- und Homoskedastizitätstest von Asphaltbeton mit 11er (links) und 8er (rechts) Größtkorn
- Bild 7-5: Linearitätstest des Polierwiderstands und der Griffigkeit von Asphaltbeton mit 8er Größtkorn
- Bild 7-6: Linearitäts- und Homoskedastizitätstest des Splittmastixasphalts
- Bild 7-7: Homoskedastizitätstest des Splittmastixasphalts mit 8er Größtkorn
- Bild 7-8: Linearitätstest der Kombinationsversuche
- Bild 7-9: Homoskedastizitätstest der Kombinationsversuche
- Bild 7-10: Homoskedastizitätstest der Asphaltvarianten Diabas und Andesit
- Bild 9-1: Modell zur Entwicklung von Anforderungen an die Griffigkeit von Asphalt-oberflächen
- Bild 9-2: Anforderungswert der Griffigkeit Asphaltbeton
- Bild 9-3: Anforderungswert der Griffigkeit Splittmastixasphalt
- Bild 9-4: Gegenüberstellung ermittelter Griffigkeit und der tatsächlichen Griffigkeit (AC, SMA u. PA)
- Bild A-1: Sieblinien
- Bild A-2: Griffigkeitsverlauf AC8DS
- Bild A-3: Griffigkeitsverlauf AC11DS
- Bild A-4: Griffigkeitsverlauf SMA8S
- Bild A-5: Griffigkeitsverlauf SMA11S
- Bild A-6: Griffigkeitsverlauf PA8

Tabellen

- Tab. 2-1: Einflüsse auf die Griffigkeit [BERMEL et al. 2004]
- Tab. 2-2: Mikrohärtigkeit der Standardminerale der Mohs'schen Härteskala [OKRUSCH et al. 2014]
- Tab. 2-3: Ausgewählte Beispiele von Härtekontrasten [TOURENQ und FOUR-MAINTRAUX 1971]
- Tab. 2-4: Messverfahren zur Texturmessung
- Tab. 5-1: Auswahl feine Gesteinskörnung
- Tab. 5-2: Auswahl grobe Gesteinskörnung
- Tab. 6-1: Gesteine mit ihrer Herkunft und deren Bestandteile
- Tab. 6-2: Mineralogische Eigenschaften des Diabas
- Tab. 6-3: Mineralogische Eigenschaften der Grauwacke
- Tab. 6-4: Mineralogische Eigenschaften des Muschelkalks
- Tab. 6-5: Mineralogische Eigenschaften des Quarzes
- Tab. 6-6: Mineralogische Eigenschaften des Basalts

-
- Tab. 6-7: Mineralogische Eigenschaften des Quarzits
- Tab. 6-8: Varianten Erstprüfung
- Tab. 6-9: Probekörper Bezeichnungen und Inhalte
- Tab. 7-1: Korrelationskoeffizient
- Tab. 7-2: Bestimmtheitsmaß und Autokorrelation der Regression der Griffigkeit und des Polierwiderstands
- Tab. 7-3: F-Test Regression der Griffigkeit und des Polierwiderstands
- Tab. 7-4: Koeffizienten Regression des Polierwiderstands und der Griffigkeit
- Tab. 7-5: Normalität der Residuen Regression der Griffigkeit und des Polierwiderstands
- Tab. 7-6: Prüfung auf Ausreißer Regression der Griffigkeit und des Polierwiderstandes
- Tab. 7-7: Korrelation des Asphaltbetons
- Tab. 7-8: Bestimmtheitsmaß und Autokorrelation Regression des Asphaltbetons
- Tab. 7-9: F-Test Regression des Asphaltbetons
- Tab. 7-10: Koeffizienten Regression des Asphaltbeton
- Tab. 7-11: Korrelation Asphaltbeton mit 11er (links) und 8er (rechts) Größtkorn
- Tab. 7-12: Bestimmtheitsmaß und Autokorrelation der Regression der Versuche mit dem Größtkorn
- Tab. 7-13 F-Test der Regression der Versuche mit dem Größtkorn
- Tab. 7-14: Koeffizienten Regression des Asphaltbetons mit 8er und 11er Größtkorn
- Tab. 7-15: Korrelation des Splittmastixasphalts
- Tab. 7-16: Koeffizienten Regression des Splittmastixasphalts
- Tab. 7-17: Bestimmtheitsmaß und Autokorrelation Regression des Splittmastixasphalts
- Tab. 7-18: F-Test Regression des Splittmastixasphalts
- Tab. 7-19: Korrelation und Regression des Splittmastixasphalts mit 11er Größtkorn
- Tab. 7-20: Korrelation des Splittmastixasphalts mit 8er Größtkorn
- Tab. 7-21: Koeffizienten des Splittmastixasphalts mit 8er Größtkorn
- Tab. 7-22: Bestimmtheitsmaß und Autokorrelation Regression des Splittmastixasphalts mit 8er Größtkorn
- Tab. 7-23: F-Test Regression des Splittmastixasphalts mit 8er Größtkorn
- Tab. 7-24: Korrelation der Kombinationsversuche
- Tab. 7-25: Bestimmtheitsmaß und Autokorrelation Regression der Kombinationsversuche
- Tab. 7-26: F-Test Regression der Kombinationsversuche
- Tab. 7-27: Koeffizienten der Kombinationsversuche
- Tab. 7-28: Korrelation der Asphaltvarianten Diabas (links) und Andesit (rechts)
- Tab. 7-29: Koeffizienten der Asphaltvarianten Diabas und Andesit
- Tab. 7-30: Bestimmtheitsmaß und Autokorrelation Regression der Asphaltvarianten Diabas und Andesit
- Tab. 7-31: F-Test Regression der Asphaltvarianten Diabas und Andesit
- Tab. 7-32: AH, CH, TH und Polierwiderstand der Gesteine
- Tab. 7-33: Korrelation Total Hardness und Polierwiderstand
- Tab. 7-34: Bestimmtheitsmaß und Autokorrelation Regression Total Hardness und Polierwiderstand
- Tab. 7-35: F-Test Regression Total Hardness und Polierwiderstand
- Tab. 7-36: Koeffizienten der Regression Total Hardness und Polierwiderstand
- Tab. 9-1: Anforderung an den Polierwiderstand nach TL-Asphalt
- Tab. 9-2: Globale Güte des Regressionsmodells von errechneter und tatsächlicher Griffigkeit
- Tab. A-1: Korngrößenverteilung 1
- Tab. A-2: Korngrößenverteilung 2
- Tab. A-3: Rohdichten

-
- Tab. A-4: Widerstandes gegen mechanische Beanspruchung und Verwitterung
- Tab. A-5: Polierwiderstände PSV und PWS der groben Gesteinskörnung
- Tab. A-6: Polierwiderstände PWS feine Gesteinskörnung
- Tab. A-7: ETD-Werte 1
- Tab. A-8: ETD-Werte 2
- Tab. A-9: errechnete, ermittelte Griffigkeit und errechnete PSV-Werte nach Norm
- Tab. A-10: statistische Voraussetzung Regressionsmodell Asphaltbeton
- Tab. A-11: statistische Voraussetzung Regressionsmodell Splittmastixasphalt
- Tab. A-12: statistische Voraussetzung Regressionsmodell Variation Größtkorn Asphaltbeton
- Tab. A-13: Regressionsmodell Splittmastixasphalt mit 11 mm Größtkorn
- Tab. A-14: statistische Voraussetzung Regressionsmodell Variation Splittmastixasphalt mit 8 mm Größtkorn
- Tab. A-15: statistische Voraussetzung Regressionsmodell Kombinationsvarianten
- Tab. A-16: statistische Voraussetzung Regressionsmodell Variation Polierwiderstand grobe Gesteinskörnung
- Tab. A-17: Regressionsmodell der errechneten Griffigkeit mit der tatsächlichen Griffigkeit ($FAP_{90.000}$) des Asphaltbetons
- Tab. A-18: Regressionsmodell der errechneten Griffigkeit mit der tatsächlichen Griffigkeit ($FAP_{90.000}$) des Splittmastixasphaltes
- Tab. A-19: Reibwerte Asphaltvarianten Mineralogie und Korngrößenverteilung
- Tab. A-20: ETD-Werte Versuche Einfluss Mineralogie und Korngrößenverteilung feine Gesteinskörnung

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2021

S 147: Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST

Birle, Cudmani, Melsbach

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 148: Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken

Freudenstein, Eger, Pichottka, Riwe, K. Villaret, S. Villaret, Frohböse
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 149: Untersuchungen zur Durchsickerung von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen

Koukoulidou, Birle, Cudmani

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 150: Abschätzung des Restwerts im PMS am Ende des Bewertungszeitraums

Stöckner, Sagnol, Brzuska, Wellner, Blasl, Sommer, Krause, Komma € 19,50

S 151: Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Waschbetonfahrbahndecken mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze

Klein, Gehlen, Kränkel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 152: Wiederverwendung von RC-Baustoffen aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken

Mielich

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 153: Optimierung von Fugensystemen in Betonfahrbahndecken – Messtechnische Grundlage zur Ermittlung realer Beanspruchungen in situ

Recknagel, Spitzer, Hoppe, Wenzel, Pirkawetz € 23,00

S 154: Prozessoptimierung der Asphaltextraktion mit Oktansäuremethylester (OME)

Büchler, Wistuba

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 155: KIST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton – Verteilungsfunktion und Extremwerte

Villaret, Augter, Kayser, Riwe

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 156: Asphaltoberbau und extreme Temperaturen

Beckedahl, Schrödter, Koppers, Mansura, Reutter, Thelen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 157: Erfassung von Bäumen mittels Laserscan-Daten zur Expositionsanalyse entlang des Bundesfernstraßennetzes in NRW

Schipek, Steffen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 158: Anforderungen an Baustoffe für schwach durchlässige, dauerhaft tragfähige, ungebundene Bankette

Cudmani, Henzinger, Birle, Barka

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 159: Dauerhafte Betondecken – Optimierung der Fahrbahnoberfläche durch Texturierung mittels Grinding-Verfahren

Villaret, Alte-Teigeler, Altreuther, Beckenbauer, Frohböse, Gehlen, Oeser, Skarabis, Tulke, Wang

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 160: Untersuchungen zur Ursache von Treiberscheinungen in Tragschichten ohne Bindemittel unter Verwendung von RC-Baustoffen aus Beton

Rigo, Unterderweide

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 161: Ermittlung der realistischen Verkehrsverteilung auf mehrstreifigen Bundesfernstraßen als Eingangsgröße für die rechnerische Dimensionierung und Bewertung der strukturellen Substanz

Kathmann, Schroeder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 162: Beurteilung von Betonfahrbahndecken hinsichtlich deren in-situ AKR-Potenzial bei Gesteinskörnungen nach dem ARS Nr. 04/2013

Böhm, Eickschen, Hermerschmidt, Müller, Pierkes

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 163: NANOASPHALT – Optimierung der Gebrauchseigenschaften und der Beständigkeit von Asphaltstraßen unter Nutzung der Nanotechnologie

Beginn, Belke, Oeser, Meyer, Paffrath, Wellner, Clauß,

Beckedahl, Koppers, Schmidt, Erdmann, Schmidt, Hofmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 164: Untersuchung der Quellempfindlichkeit veränderlich fester Gesteine bei der Verwendung als Erdbaustoff

Cudmani, Heyer, Birle, Möller

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 165: Analyse des gefügeabhängigen Löslichkeitsverhaltens potenziell AKR-empfindlicher Gesteinskörnungen

Weise, Oesch, Wilsch, Sigmund, Hüniger, Kositz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 166: Vibrationshammerverfahren zur Bestimmung der Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel

Demond, Reiche, Haas, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 167: Aktualisierung und Anpassung der Straßenbelastungsdaten für die Dimensionierung

K. Villaret, S. Villaret, Kathmann, Oeser, Ückermann, Schröder,

Riwe

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 168: Entwicklung einer Prüfsystematik zur Identifizierung der Bitumenart und der verwendeten Modifizierungsmittel in einem Ausbaupasphalt

Gehrke, Stephan, Weigel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 169: Untersuchung eines praxisbezogenen Instrumentariums zur Bewertung der Rissicherheit von Gussasphalten

Radenberg, Holzwarth

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 170: Kriterien für die Dauerhaftigkeit von Asphaltsschichten - Untersuchungen zur Ansprache des Haftverhaltens

Radenberg, Twer, Louis, Buscham

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2022

S 171: Informationssystem Straßenzustand Teil 2: Entwicklung von Sensoren zur Erfassung des strukturellen Zustandes von Asphaltstraßen (SENSOR)

Bald, Böhm, Čičkovič, Tielmann, Hill, Peitsch, Gablovský, Muschalla, Czaja, Ulrich, Farbischewski, Huczek
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 172: Verbesserung der Erfassung des Verhaltens von Trag-schichten ohne Bindemittel (ToB) zur Berücksichtigung in den RStO, RDO und den RSO

Wellner, Leischner, Spanier € 16,50

S 173: Analyse der Auswirkungen von Witterungsextremen an bestehenden Straßenbefestigungen in Betonbauweise

Villaret, Beckenbauer, Riwe, Tschernack
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 174: Raumdichtebestimmung an hohlraumreichen Asphalten

Dudenhöfer, Rückert
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 175: Einfluss der Fugenöffnungsweite auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken aus Beton

Altreuther, Beckenbauer, Ertsey, Otto, Schubert, Kropp, Hoever
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 176: Strömungsmodelle zur Simulation der Durchsickerung von Straßenbauwerken mit Implementierung hydrologischer Parameter

Michaelides, Koukoulidou, Birle, Heyer, Vogt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 177: Bestimmung von Kenndaten zur sicheren Charakterisierung von Fugenvergussmassen

Breitenbücher, Buckenhüskes, Radenberg, Twer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 178: Ringversuch zum statischen Spaltzugversuch nach AL Sp-Beton

Weise, Hüsken, Niedack-Nad
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 179: Die neue Autobahnverwaltung des Bundes – das Straßenrecht der Verkehrswende

Durner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 180: Entwicklung eines aktuellen Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung gemäß den RDO Beton

Kathmann, Hermes, Kucera, Stöver, Neumann, Lehmkuhl, Pfeifer € 14,50

2023

S 181: Möglichkeiten und Grenzen des Georadarverfahrens

Hülsbömer, Weißelborg, Gogolin, Mörchen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 182: Optimierung der Anwendbarkeit der Probabilistik in der Dimensionierung und Substanzbewertung von Betonstraßen

Neumann, Liu, Blasl, Reinhardt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 183: Potenzialuntersuchung zum Einsatz von Asphalt-einlagen

Mollenhauer, Wetekam, Wistuba, Büchler, Al-Qudsi, Falchetto, Kollmus, Trifunović, Schmalz, Ziegler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 184: Generelle Methodik zur Abschnittsbildung bei der Erhaltung kommunaler Straßen

Berthold, Großmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 185: Potenzialanalyse – Prozesssichere Herstellung lärm- armer Straßen in Betonbauweise OPB – Offenporiger Beton

Freudenstein, Bollin, Eger, Klein, Kränkel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 186: Praxisgerechte Anforderungen an den Polierwiderstand feiner Gesteinskörnungen

Oeser, Schulze, Benninghoff, Renken
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.