



Dissertation

**EINFLUSS FEINER GESTEINSKÖRNUNGEN AUF DIE GRIFFIGKEIT
VON DECKSCHICHTEN IM STRASSENBAU**

Grundlegende Untersuchungen zum Polierverhalten mit dem Prüfgerät
nach Wehner/Schulze neuer Bauart

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaft
eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Dipl.-Ing. Lukas KIRCHMAIER
Matrikelnummer 0026812
Westbahnstraße 16/23
1070 Wien

Gutachter: Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald BLAB
Institut für Verkehrswissenschaften
Professur für Straßen- und Flugbetriebsflächenbau
Technische Universität Wien
Gußhausstraße 28/E230-3, 1040 Wien

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. J. Stefan BALD
Institut für Verkehr
Fachgebiet Straßenwesen
Technische Universität Darmstadt
Petersenstraße 30, 64289 Darmstadt

Wien, März 2011

Einfluss feiner Gesteinskörnungen auf die Griffigkeit von Deckschichten im Straßenbau

Grundlegende Untersuchungen zum Polierverhalten mit dem Prüfgerät nach Wehner/Schulze neuer Bauart

Kurzfassung

An die Straßenoberflächen werden spezielle Anforderungen gestellt, die nach Fertigstellung bzw. während der Gebrauchsdauer erfüllt werden müssen. In Hinblick auf die Verkehrssicherheit kommt vor allem der Straßengriffigkeit besondere Bedeutung zu. Sowohl das Niveau als auch die zeitabhängige Entwicklung der Straßengriffigkeit hängen maßgeblich von der Polierresistenz der verwendeten Gesteinskörnungen ab. Bisher sind auf Normungsebene lediglich Anforderungen an die Polierresistenz von groben Gesteinskörnungen (in der Regel > 2 mm) gestellt. An feine Gesteinskörnungen (≤ 2 mm) wurden bislang keine eigenen Anforderungen an das Polierverhalten gestellt.

In dieser Arbeit wird unter Verwendung einer Prüfanlage nach Wehner/Schulze neuer Bauart das Polierverhalten der feinen Gesteinskörnungen erstmals in Österreich umfassend untersucht. Dazu wird eine Routineprüfmethode entwickelt und im Zuge der Durchführung eines Ringversuchs die Präzision dieser Prüfmethode bestimmt. Die erarbeitete Prüfroutine mit den zugehörigen Präzisionswerten wird in Form einer Überarbeitung der RVS 11.06.23: in den nationalen Richtlinien für den Straßenbau implementiert.

Weiteres wesentliches Ziel dieser Arbeit ist die Schaffung eines Bewertungshintergrundes für das Polierverhalten von feinen Gesteinskörnungen, welcher durch eine Reihenuntersuchung an für den österreichischen Straßenbau repräsentativen Gesteinen ermittelt wird. Anhand dieses Bewertungshintergrundes wird ein Anforderungswert an die Polierresistenz des Sandes abgeleitet. Für den Einsatz von feinen Gesteinskörnungen im hochrangigen Straßennetz findet dieser Anforderungswert Eingang in die nationale Richtlinie für die Herstellung von Betondecken (RVS 08.17.02) sowie in die nationale Richtlinie für Anforderungen an Asphaltmischgut (RVS 08.97.05).

Diese Arbeit weist nach, dass sich das Polierverhalten von feinen und groben Gesteinskörnungen zum Teil erheblich voneinander unterscheidet. Zur Sicherstellung einer lang anhaltend griffigen Straße sind somit sowohl Anforderungen an die Polierresistenz von feinen als auch groben Gesteinskörnungen notwendig.

Da das Prüfverfahren nach Wehner/Schulze in Österreich noch nicht weit verbreitet ist, wird zusätzlich eine alternative Prüfmethode zur Bestimmung der Polierresistenz von feinen Gesteinskörnungen mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät erarbeitet und Kategorien für die Umrechnung zwischen den beiden Prüfverfahren festgelegt. Durch diese alternative Prüfmöglichkeit kann eine erste, kostengünstige Einstufung der Polierresistenz von feinen Gesteinskörnungen durchgeführt werden.

Die vorliegende Arbeit leistet durch ihre Forschungsergebnisse und den daraus getätigten Überarbeitungen der nationalen Richtlinien einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Straßengriffigkeit und somit der Verkehrssicherheit. Zusätzlich können nun durch die Verwendung von polierresistenten groben und feinen Gesteinskörnungen die Kosten für die Straßenerhaltung in Form von reduzierten Sanierungsmaßnahmen gesenkt werden.

Significance of fine aggregates for skid resistance of wearing courses in road construction

Fundamental studies on the polishing behaviour using the testing device according to Wehner/Schulze of the latest design

Abstract

Wearing courses have to meet several requirements after completion and during their service life. Regarding road safety skid resistance is a very important property of wearing courses. Both the actual and the time-dependent development of skid resistance depend beside the texture profile mainly on the polishing resistance of mineral aggregates used for wearing courses. In European and national standards requirements concerning the polishing behaviour of mineral aggregates are set merely with regard to coarse aggregates (> 2 mm). So far, no requirements have been established for fine aggregates (≤ 2 mm).

For the first time, a Wehner/Schulze testing device of the latest design has been used for a comprehensive study on the polishing behaviour of fine aggregates in Austria. In this thesis, a test routine for measuring polishing resistance of fine aggregates was developed. In the course of a round robin test the precision associated with the developed test routine has been elicited. Both the test instructions and the precision values will be implemented in the new edition of the RVS 11.06.23 for determination of the polishing resistance of fine aggregates.

Another main goal of this thesis was to draw up an evaluation background for polishing resistance of fine aggregates. For this purpose, within a mass screening eleven samples of fine aggregates, which are representative for mineral aggregates used in Austrian road construction, were examined with regard to their polishing behaviour. Based on the new evaluation background a threshold is specified for polishing resistance of fine aggregates used for wearing courses on the Austrian motorway and expressway network. This new requirement will be implemented in the Austrian technical contract conditions for concrete pavements (RVS 08.17.02) and in the technical contract conditions for requirements on bituminous mixtures (RVS 08.97.05).

This thesis proves that polishing behaviour of coarse and fine aggregates from the same rock or stone source may widely differ. Due to these differences, separate requirements for fine and coarse aggregates are necessary because only the combination of highly polishing resistant fine and coarse aggregates enables a sustainable skid resistance of wearing courses.

Since the Wehner/Schulze testing device of the latest design is not very widespread in Austrian laboratories, the possibility of determination of fine aggregate polishing behaviour using the accelerated polishing machine and the portable skid resistance tester as stipulated in the European standard EN 1079-8 was investigated. Finally, categories for characterization of polishing resistance of fine aggregates using the testing devices according to EN 1097-8 were defined. With this alternative test method, a first low-cost estimation of the polishing resistance of fine aggregates can be achieved.

The results of this thesis are an important contribution to the national efforts of improving road skid resistance and therefore to increase road safety. Using fine and coarse aggregates with good polishing resistance will improve the level of skid resistance of wearing courses and may help to reduce road maintenance costs.

Vorwort

Der physikalische Reibungsvorgang begleitet uns in annähernd jeder Alltagssituation – ob erwünscht oder unerwünscht. Auf dem Weg in die Arbeit sorgt die Reibung zwischen den Reifen unseres Verkehrsmittels und der Fahrbahn dafür, dass wir uns fortbewegen können. Das Halten des Buches in unserer Hand wird uns durch die zwischen der menschlichen Haut und dem relativ rauen Papier erzeugte Reibung ermöglicht.

In der Wissenschaft widmet sich die Tribologie als eigenes Forschungsgebiet der Lehre und der Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen sich relativ zueinander bewegenden Körpern. Ist das Hauptziel der Tribologie, den Verschleiß zwischen sich bewegenden Körpern zu reduzieren, so ist zur Gewährleistung der Verkehrssicherheit bei hohen Geschwindigkeiten eine möglichst hohe Reibung erforderlich. Im Motorsport ist hierbei umgangssprachlich oft vom notwendigen „Grip“ die Rede. Mag die Messung und Beurteilung der Reibung zwischen zwei Gleitflächen im klassischen Maschinenbau (z.B. im Motorenbau) mittlerweile bereits recht gut beherrschbar sein, so ist das Verständnis um den Reibungsvorgang auf der Straße, und hier insbesondere die Messung und Optimierung, noch weitgehend unklar. Neben der zum Teil noch fehlenden Messtechnik sorgt vor allem die Komplexität des Themas dafür, dass noch viele Fragestellungen offen sind.

Umso mehr freut es mich, dass ich mit meiner vorliegenden Arbeit einen weiteren Schritt zur Beherrschung der Thematik und zur Sicherstellung einer ausreichend hohen Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn und somit zur Verkehrssicherheit beitragen kann.

In diesem Zusammenhang möchte ich mich sehr herzlich bei meinem akademischen Lehrer und Förderer, Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Ronald Blab bedanken. Sein wertvoller, fachlicher Rat, seine Ideen aber auch seine Geduld waren für die Erstellung meiner Arbeit von unschätzbarem Wert. Insbesondere sein Verständnis dafür, zu den richtigen Zeitpunkten für die notwendige, zusätzliche Motivation zu sorgen, hat mir sehr geholfen, diese Arbeit zu verfassen.

Danken möchte ich auch meinem Zweitgutachter Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Stefan Bald, der kurzfristig durch intensive Durchsicht meiner Arbeit für den letzten Feinschliff gesorgt und somit den Abschluss dieser Arbeit ermöglicht hat.

Besonderer Dank gebührt jedoch meinen Eltern, die es mir ermöglicht haben zu wachsen, zu lernen und mich zu entfalten. Ihr habt euch in meinen jüngeren Jahren um mich gekümmert, gleichzeitig aber auch jenen nötigen Freiraum gegeben, den es gebraucht hat, um mich zu dem Menschen entwickeln zu können, der ich nun bin. Für all das danke ich euch von ganzem Herzen.

Beschließen möchte ich mein Vorwort mit einem Zitat, dessen Kenntnis ich mir schon am Anfang meiner Arbeit gewünscht hätte:

In den Wissenschaften ist viel Gewisses, sobald man sich von den Ausnahmen nicht irre machen lässt und die Probleme zu ehren weiß.

Johann Wolfgang von Goethe (1749 - 1832)
in Wilhelm Meisters Wanderjahre

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	ALLGEMEINES	1
1.2	PROBLEMSTELLUNG	2
1.3	ZIELSETZUNGEN	3
2	POLIERRESISTENZ VON GESTEINSKÖRNUNGEN	4
2.1	BEGRIFFSBESTIMMUNGEN	4
2.1.1	<i>Griffigkeit</i>	4
2.1.2	<i>Reibungsbeiwert μ</i>	4
2.1.3	<i>Rauheit, Oberflächentextur</i>	5
2.1.4	<i>Polierverhalten von Gesteinskörnungen</i>	8
2.2	STAND DER TECHNIK.....	9
2.3	EINFLUSS DER POLIERRESISTENZ VON SAND AUF DIE GRIFFIGKEIT VON ASPHALTOBERFLÄCHEN - PRAXISBEISPIEL.....	16
3	BERÜHRENDE PRÜFVERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DER POLIERRESISTENZ.....	20
3.1	PRÜFANLAGE NACH WEHNER/SCHULZE	21
3.1.1	<i>Entwicklung des Prüfverfahrens</i>	21
3.1.2	<i>Bestandteile der Prüfanlage</i>	25
3.1.3	<i>Probekörperherstellung</i>	31
3.1.4	<i>Sandpolierprüfung gemäß RVS 11.06.23:2005</i>	38
3.1.5	<i>Durchführen der Splittpolierprüfung</i>	41
3.2	SCHNELLPOLIERMASCHINE – VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DES PSV	42
3.2.1	<i>Entwicklung des Prüfverfahrens</i>	42
3.2.2	<i>Bestandteile der Prüfeinrichtung</i>	42
3.2.3	<i>Probekörperherstellung</i>	44
3.2.4	<i>Versuchsdurchführung</i>	45
3.3	KOMBINIERTES VERFAHREN MIT DEM WEHNER/SCHULZE POLIERSIMULATOR UND DEM FRICTOMETER.....	46
3.4	DAS POLIER- UND GRIFFIGKEITSMESSGERÄT PGM.....	48
3.5	ERFURTER GRIFFIGKEITSPROGNOSEVERFAHREN EGPV	50
3.6	KRITISCHE BETRACHTUNG DER PRÜFVERFAHREN.....	52
3.6.1	<i>Allgemeines</i>	52
3.6.2	<i>Prüfanlage nach Wehner/Schulze</i>	52
3.6.3	<i>Verfahren zur Bestimmung des PSV</i>	56
3.6.4	<i>Zusammenfassende Bewertung</i>	59
4	PRÄZISIONSUNTERSUCHUNGEN ZUR POLIERWERTBESTIMMUNG MIT DEM WEHNER/SCHULZE VERFAHREN	61
4.1	ALLGEMEINE ÜBERLEGUNGEN ZUR DURCHFÜHRUNG EINES RINGVERSUCHS	62
4.2	PRÄZISION DER POLIERWERTBESTIMMUNG VON SPLITT	63
4.2.1	<i>Prüfprogramm</i>	64
4.2.2	<i>Ergebnisse</i>	64
4.2.3	<i>Diskussion der Ergebnisse</i>	66

4.3	PRÄZISION DER POLIERWERTBESTIMMUNG VON SAND.....	67
4.3.1	<i>Zielstellungen des österreichischen Ringversuchs.....</i>	67
4.3.2	<i>Festlegungen für die Durchführung des Ringversuchs.....</i>	67
4.3.3	<i>Versuchsprogramm.....</i>	74
4.3.4	<i>Datenauswertung.....</i>	76
4.3.5	<i>Einzelmessergebnisse.....</i>	77
4.3.6	<i>Präzisionswerte nach DIN ISO 5725-2.....</i>	86
4.3.7	<i>Präzisionswerte nach DIN ISO 5725-5.....</i>	90
4.3.8	<i>Zusammenfassung der Auswertemethoden.....</i>	93
4.3.9	<i>Anwendung der Präzisionswerte in der Praxis.....</i>	94
4.3.10	<i>Absolute Messabweichung zwischen den zwei Prüfmaschinen.....</i>	97
4.4	EINFLUSSFAKTOREN AUF DEN PWS VON SAND.....	102
4.4.1	<i>Materialgewinnung.....</i>	102
4.4.2	<i>Prüfvorbereitung.....</i>	103
4.4.3	<i>Prüfdurchführung.....</i>	104
4.5	BEWERTUNG DER RELEVANZ VON PRÜFFPARAMETERN AUF DEN PWS VON SAND.....	106
4.5.1	<i>Datengrundlage.....</i>	106
4.5.2	<i>Datenbereinigung mittels Test auf Aufreißer.....</i>	107
4.5.3	<i>Test auf Unabhängigkeit.....</i>	109
4.5.4	<i>Regressionsanalyse.....</i>	111
4.5.5	<i>Zusammenfassung der Relevanzanalyse.....</i>	112
4.6	EINFLUSS DER PRÜFGUMMIS AUF DEN PWS VON SAND.....	113
4.6.1	<i>Allgemeine Gummieigenschaften.....</i>	113
4.6.2	<i>Wichtige Gummiarten.....</i>	117
4.6.3	<i>Gummimischung für das Wehner/Schulze-Verfahren.....</i>	118
4.6.4	<i>Qualität neuer Prüf gummis nach der „Berliner Mischung“.....</i>	120
4.6.5	<i>Überlegungen zur Einführung eines Korrekturfaktors für die Prüf gummiqualität.....</i>	122
4.7	BEURTEILUNG DER PRÜFGUMMITOPOGRAPHIE.....	125
4.7.1	<i>Grundlagen der Rauheitsmessung.....</i>	125
4.7.2	<i>Oberflächenkennwerte.....</i>	128
4.7.3	<i>Optisches Gerät zur Erfassung der Topographie.....</i>	129
4.7.4	<i>Untersuchungsprogramm.....</i>	130
4.7.5	<i>Ergebnisse.....</i>	131
4.7.6	<i>Zusammenfassung.....</i>	144
5	BEWERTUNG DER POLIERRESISTENZ VON FEINEN GESTEINSKÖRNUNGEN.....	146
5.1	VORUNTERSUCHUNGEN.....	146
5.1.1	<i>Prüfmatrix.....</i>	146
5.1.2	<i>Korngrößenabhängigkeit des PWS.....</i>	147
5.1.3	<i>Repräsentative Kornklassen.....</i>	149
5.1.4	<i>Zusammenfassung und Erkenntnisse.....</i>	151
5.2	VERSUCHSÜBERBLICK UND GRUNDLAGEN.....	152
5.2.1	<i>Versuchsprogramm.....</i>	152
5.2.2	<i>Gesteinsauswahl und Sieblinienbestimmung.....</i>	153
5.2.3	<i>Bestimmung des Konfidenzintervalls und Prüfung auf Normalverteilung.....</i>	156

5.3	PHASE 1 – BESTIMMUNG DES PWS VON SAND	158
5.3.1	Übersicht über die ermittelten Ergebnisse.....	158
5.3.2	Betrachtung hinsichtlich des derzeit gültigen Grenzwertes	161
5.3.3	Beurteilung der Repräsentanz der Stichproben	162
5.4	PHASE 2 – SANDPOLIERPRÜFUNG MIT DER SCHNELLPOLIERMASCHINE UND DEM PENDELGERÄT..	164
5.4.1	Probekörperherstellung.....	164
5.4.2	Prüfdurchführung	166
5.4.3	Ergebnisse der Bestimmung des PSV_{JGK}	166
5.5	PHASE 3 – BESTIMMUNG DES PWS VON SPLITT	168
5.5.1	Prüfdurchführung	168
5.5.2	Ergebnisse der Bestimmung des PWS von Splitt.....	168
5.6	PHASE 4 – BESTIMMUNG DES PSV GEMÄß EN 1097-8	170
5.6.1	Prüfdurchführung	170
5.6.2	Ergebnisse der Bestimmung des PSV im Labor.....	170
5.6.3	Vergleich des PSV mit den Angaben in der Güteschutzliste	172
5.7	KORRELATIONSUNTERSUCHUNGEN DER POLIERWERTE VON SAND UND SPLITT.....	174
5.7.1	Zusammenfassung der Prüfergebnisse.....	174
5.7.2	Korrelation des PWS von Sand und Splitt	178
5.7.3	Korrelation PSV_{JGK} und PSV	179
5.7.4	Korrelation PWS von Splitt und PSV	180
5.7.5	Korrelation PWS von Sand und PSV_{JGK}	181
5.7.6	Zusammenfassung der Korrelationsanalysen	185
6	ZUSAMMENFASSUNG UND RESÜMEE	186
6.1	AUSGANGSSITUATION UND ZIELSETZUNGEN	186
6.2	UNTERSUCHUNGSPROGRAMM	187
6.3	FORSCHUNGSERGEBNISSE	188
6.4	UMSETZUNG DER FORSCHUNGSERGEBNISSE IN DIE NATIONALEN RICHTLINIEN	191
6.4.1	Stand der Normung und Richtlinien bis 2010.....	191
6.4.2	Änderungen in den nationalen Regelwerken.....	192
6.5	AUSBLICK.....	193
7	GLOSSAR	194
8	LITERATURVERZEICHNIS	197
9	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	202
	ANHANG A – VEREINHEITLICHTE PRÜFBEDINGUNGEN	207
	ANHANG B – STATISTISCHE AUSWERTUNG NACH DIN 5725 – TEIL 2 UND 5.....	210
	ANHANG C – ERGEBNISSE DER AUSREIßERTESTS.....	217
	ANHANG D – ROHDATEN UND DETAILS ZUR RELEVANZUNTERSUCHUNG.....	224
	ANHANG E – OBERFLÄCHENKENNGRÖßEN	238

1 EINLEITUNG

1.1 Allgemeines

Die Vermeidung von Verkehrsunfällen und den daraus resultierenden menschlichen als auch volkswirtschaftlichen Schäden ist seit vielen Jahren ein Hauptanliegen der Verkehrspolitik und der Straßenverwaltungen. Im Jahr 2008 wurden in Österreich auf dem gesamten Straßennetz dennoch 8,2 Verkehrstote pro 100.000 Einwohner verzeichnet. Österreich lag damit im Vergleich zu 18 anderen europäischen Ländern - negativ gesehen - im „vorderen“ Mittelfeld. Bezogen auf die Verkehrsleistung weisen insbesondere die europäischen Staaten Dänemark, Niederlande, Vereinigtes Königreich und die Schweiz im Vergleich zu Österreich nur halb so viele Getötete im Straßenverkehr auf.

Durch umfassende Verkehrssicherheitskampagnen des Kuratoriums für Verkehrssicherheit und des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie sowie durch die Verbreitung von neuentwickelten Fahrassistenzsystemen in den Fahrzeugen, konnte in den letzten Jahren ein Rückgang der auf Österreichs Straßen getöteten Personen, verzeichnet werden. Insgesamt kam es im Jahr 2009 auf Österreichs Autobahnen und Schnellstraßen (A&S) zu 2.061 Unfällen mit 75 Todesfällen. 39% dieser Unfälle sind sogenannte Alleinunfälle, also Unfälle, die ohne Fremdeinwirkung zustande kamen. Die Alleinunfälle waren in den meisten Fällen auf nicht angepasste Geschwindigkeit zurück zu führen [KfV, 2010].

Durch die im Jahr 1997 eingeführte Mautpflicht für Personen- und Lastkraftwagen auf Österreichs Autobahn- und Schnellstraßennetz besteht nun ein privatrechtliches Vertragsverhältnis zwischen jedem einzelnen Verkehrsbenützer und dem Straßenerhalter (ASFINAG¹). Durch die Einhebung einer Benützungsgebühr liegt die Verantwortung für die Verkehrssicherheit der Straße beim Straßenerhalter und er ist auch bei leichter Fahrlässigkeit haftbar. Weiters gilt die Beweislastumkehr, d.h. der Straßenerhalter muss nachweisen, dass die Straße zum Unfallzeitpunkt in einem ordnungsgemäßen Zustand war. Selbiges gilt für den privaten Rechtsträger bei einem PPP-Projekt (Private Public Partnership). Bei dem im Frühjahr 2010 für den Verkehr freigegebenen Projekt Y² war die Bonaventura Straßenerrichtungs-GmbH für die Planung, Finanzierung und den Bau verantwortlich und ist in weiterer Folge 32 Jahre für den Betrieb und für die Sicherstellung einer gefahrlosen Benützung der Verkehrsfläche zuständig. Nach diesen 32 Jahren wird der Abschnitt nach Feststellung der Einhaltung von Qualitätskriterien mit all den Pflichten an die ASFINAG übertragen.

Für die Gewährleistung der Sicherheit der Verkehrsteilnehmer müssen einerseits bereits in der Planung vorgegebene Mindesttrassierungsparameter für den Straßenverlauf eingehalten, andererseits festgelegte Anforderungen an die Straßenoberfläche nach Fertigstellung bzw. während der Gebrauchsdauer erfüllt werden. Mit Hinblick auf die Verkehrssicherheit kommt der Straßengriffigkeit als ein Parameter der Straßenoberfläche besondere Bedeutung zu. Unter

¹ Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft. Seit dem Jahr 1997 ist die ASFINAG im Besitz eines Fruchtgenussrechtes, das sie berechtigt, auf den Verkehrsanlagen des hochrangigen Bundesstraßennetzes Mauten bzw. Benützungsgebühren einzuheben. Die ASFINAG plant, finanziert, baut, erhält, betreibt und bemaute das gesamte österreichische Autobahnen- und Schnellstraßennetz mit einer Streckenlänge von derzeit ca. 2.200 km.

² Auf dem Gebiet des Autobahn- und Schnellstraßenbaus erstes PPP-Projekt in Österreich. Es ist Bestandteil des Regionenrings um Wien und beinhaltet die Teilabschnitte S2 (Umfahrung Süßenbrunn), S1 –West (Eibesbrunn bis Korneuburg), S1 – Ost (Eibesbrunn bis Süßenbrunn) sowie der südliche Abschnitt der A5 (Eibesbrunn bis Schrick). Die Länge des Streckennetzes beträgt insgesamt ca. 51 km.

dem Begriff Griffigkeit wird die Wirkung der Rauheit der Oberfläche auf das Kraftschlussvermögen zwischen dem Fahrzeugreifen und der Fahrbahn verstanden. Die Griffigkeit ist eine wesentliche Kenngröße für die Gebrauchstauglichkeit einer Straße. Vor allem bei hohen Geschwindigkeiten, nasser Fahrbahn, in Bereichen kleiner Kurvenradien sowie großer Längsneigungen und in Bremsstrecken (z. B. auf Autobahnrampen) ist ein hohes Griffigkeitsniveau zur Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit erforderlich. In den Österreichischen Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau (RVS³) sind daher für Asphalt- und Betondecken auf dem hochrangigen Straßennetz entsprechende Anforderungen an die Griffigkeit verankert. Darin wird vorgeschrieben, dass die Griffigkeit durch Messungen mit dem System RoadSTAR⁴ fest zu stellen ist. Für Bauloslängen < 500 m kann die Griffigkeit auf dem A&S-Netz auch durch die kombinierte Messung mit dem SRT-Pendel und dem Ausflusszylinder bestimmt werden⁵.

1.2 Problemstellung

Sowohl das Niveau als auch die zeitabhängige Entwicklung der Straßengriffigkeit hängen neben anderen Faktoren maßgeblich von der Polierresistenz der verwendeten Gesteinskörnungen ab. Diesem Umstand Rechnung tragend, wird auf internationaler Normungsebene bereits seit vielen Jahren eine Anforderung an die Polierresistenz von groben Gesteinskörnungen⁶ gestellt. In der Sandfraktion, in der Regel Korngröße ≤ 2 mm, sind keine gesonderten Forderungen an die Polierresistenz gestellt. Für die Sicherstellung eines lang anhaltend hohen Griffigkeitsniveaus ist jedoch die Kombination aus polierresistenten Splitten und Sanden vor allem bei dichten Deckschichttypen von großer Bedeutung.

Aus einer Vielzahl an verschiedenen Prüfmaschinen bzw. Prüfsystemen hat sich in Deutschland zur Beschreibung der Polierresistenz von Gesteinskörnungen mit einem Durchmesser von ≤ 2 mm auf wissenschaftlich-technischer Ebene das Prüfverfahren nach Wehner/Schulze durchgesetzt. Mit diesem Prüfverfahren wurden in Deutschland bereits Reihenuntersuchungen zur Bestimmung der Polierresistenz von Sanden durchgeführt und ein erster Bewertungshintergrund für die Sandpolierresistenz erstellt. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde auch in Österreich in Form der RVS 11.06.23 [FSV, 2005] eine entsprechende Richtlinie zur Bestimmung der Polierresistenz von Sanden herausgegeben.

Das Prüfverfahren nach Wehner/Schulze bzw. die für die Prüfung verwendete Maschine unterlag in den letzten Jahren jedoch mehreren Modifikationen und wurde maschinentechnisch wesentlich modifiziert. Durch diese Modifikationen der Prüfmaschine kam es zu einer Änderung des Messniveaus. Das heißt, an ein und demselben Gesteinsmaterial ermitteln Maschinen neuer Bauart im Gegensatz zur ursprünglichen Prüfmaschine niedrigere Werte für die

³ Herausgegeben von der Österreichischen Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr (FSV), www.fsv.at

⁴ Auf einem LKW basierendes Messsystem zur kontinuierlichen Erfassung von Oberflächeneigenschaften im Betrieb des Austrian Institute of Technology (AIT), www.ait.ac.at

⁵ Stationäre Messmethode zur Griffigkeitsbestimmung. Mittels des SRT-Pendels wird gemäß ÖNORM EN 13036-4 [2003] der Reibungswert PTV als Charakteristikum für die Mikrorauheit bestimmt. Im Zusammenspiel mit der mit dem Ausflusszylinder gemäß ÖNORM EN 13036-3 [2003] bestimmten Ausflusszeit OT, als Charakteristikum für die Makrorauheit, erfolgt eine Beurteilung des vorhandenen Griffigkeitsniveaus.

⁶ Im Österreichischen Asphaltstraßenbau werden Korngrößen > 2 mm als grobe Gesteinskörnungen oder auch Splittkörnung bezeichnet. Hingegen werden im Betonstraßenbau alle Korngrößen > 4 mm als grobe Gesteinskörnungen bezeichnet. Korngrößen, welche kleiner als die angegebenen Grenzwerte sind, werden als feine Gesteinskörnungen oder auch Sand bezeichnet.

Polierresistenz. Über einen möglichen Umrechnungskoeffizienten zwischen den beiden Bauweisen gibt es derzeit noch keine umfassenden Untersuchungen.

Zur Gewährleistung einer hohen Griffigkeit auf Österreichs Straßen ist die ASFINAG bestrebt, für das hochrangige Straßennetz eine eigene Anforderung an die in der Deckschicht verwendeten feinen Gesteinskörnungen hinsichtlich der Polierresistenz zu stellen. Dazu ist es notwendig, für Prüfmaschinen nach Wehner/Schulze neuer Bauart eine einheitliche Prüfanleitung festzulegen und einen Bewertungshintergrund für die in Österreich verwendeten Gesteinskörnungen zu schaffen.

Die Prüfmaschine nach Wehner/Schulze neuer Bauart ist erst seit wenigen Jahren auf dem Markt erhältlich und wird bisher nur in einer Kleinserienfertigung erzeugt. Dadurch befinden sich in Österreich derzeit erst zwei Maschinen in Betrieb. Da mit der Einführung einer Anforderung an die Polierresistenz von feinen Gesteinskörnungen mit einer großen Anzahl von Polierwertbestimmungen zu rechnen ist, die Prüfkapazitäten in Österreich mit zwei Maschinen aber noch eingeschränkt sind, sollten zur Vermeidung von Engpässen in der Prüfdurchführung gegebenenfalls alternative Prüfmethode zur Verfügung gestellt werden.

1.3 Zielsetzungen

Im Rahmen dieser Arbeit wird für die Bestimmung des Polierwertes von feinen Gesteinskörnungen mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze neuer Bauart eine vereinheitlichte Prüfanweisung unter Auswahl einer für die Prüfung am besten geeigneten Prüfkörnung festgelegt. Diese vereinheitlichte Prüfanweisung dient als Grundlage für die Überarbeitung der derzeit in Österreich gültigen RVS 11.06.23:2005.

Mithilfe der definierten, vereinheitlichten Prüfanweisung wird im Rahmen dieser Arbeit ein „innerösterreichischer“ Ringversuch zur Festlegung der Wiederhol- und Vergleichspräzision der Polierwertbestimmung von Sand durchgeführt. Die dabei ermittelten Präzisionswerte sollen in einer überarbeiteten Version der RVS 11.06.23 Eingang finden. Zusätzlich werden während der Prüfung auftretende, potentielle Einflussfaktoren auf das Prüfergebnis hinsichtlich ihrer Relevanz untersucht und Vorschläge für die Berücksichtigung bei der Prüfdurchführung erstellt.

Im Zuge einer Reihenuntersuchung an, für den österreichischen Straßenbau repräsentativen, Gesteinsmaterialien wird mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze neuer Bauart ein Bewertungshintergrund für die Polierresistenz von Sanden geschaffen. Basierend auf diesem Bewertungshintergrund wird eine Empfehlung für einen neuen Grenzwert des Polierwertes von Sand gegeben.

Als Alternative zum Prüfverfahren nach Wehner/Schulze wird aufbauend auf Vorarbeiten der TU München [WÖRNER et al., 2006] die Möglichkeit der Prüfung des Polierverhaltens von Sanden mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät untersucht und eine detaillierte Arbeitsanleitung für die Probekörperherstellung erstellt. Mithilfe dieser Prüfanleitung wird eine Reihenuntersuchung durchgeführt und Bewertungsklassen für den Polierwert von Sand - bestimmt mit dem alternativen Verfahren – eingeführt.

Anhand von Bestimmungen des Polierwertes von Splitten mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze und mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät sowie des Polierwertes von Sanden mit diesen zwei Verfahren wird gezeigt, dass sich das Polierverhalten von Splitten und Sanden zum Teil erheblich voneinander unterscheidet. Dadurch wird bestätigt, dass getrennte Anforderungen an die Polierresistenz von Sanden und Splitten zur Erzielung einer optimalen Straßengriffigkeit gerechtfertigt sind.

2 POLIERRESISTENZ VON GESTEINSKÖRNUNGEN

2.1 Begriffsbestimmungen

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Begriffe, welche den Einfluss und die Bedeutung von Gesteinskörnungen auf die Straßenverkehrssicherheit charakterisieren, erläutert.

2.1.1 Griffigkeit

In der Straßenbautechnik versteht man unter dem Begriff Griffigkeit die Wirkung der Rauheit der Fahrbahnoberfläche (auch Oberflächentextur genannt, siehe Abschnitt 2.1.3) auf den Reibungswiderstand im Zusammenspiel mit dem Fahrzeugreifen. Sie charakterisiert jene Eigenschaft der Straßenoberfläche, die für die Größe der aktivierbaren Reibungskraft in der Kontaktfläche zwischen Fahrzeugreifen und Straßenoberfläche verantwortlich ist. Ein in dieser Kontaktfläche vorhandenes Zwischenmedium (z.B.: Wasserfilm) verhindert den vollflächigen Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn, wodurch der Reibungswiderstand reduziert wird. Da das vorhandene Griffigkeitsniveau den Bremsweg eines Fahrzeuges wesentlich beeinflusst und somit unmittelbare Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit hat, ist die Griffigkeit die wichtigste Eigenschaft von Straßenoberflächen [HUSCHEK, 1996a].

Wird eine Fahrbahnoberfläche über ihre Lebensdauer betrachtet, so kann festgestellt werden, dass die Griffigkeit sich langfristig entwickelt und zusätzlich auch kurzfristigen Veränderungen unterliegt. So kommt es stellenweise durch Aufraueffekte als Folge von Witterungseinflüssen⁷ zu Griffigkeitserhöhungen. [HUSCHEK et al., 1996b]. Durch die Verwendung von Spikereifen während der Winterperiode und einer damit einhergehenden Aufrauung der Straßenoberfläche kann das vorhandene Griffigkeitsniveau ebenfalls verbessert werden.

Physikalisch quantifiziert wird die Griffigkeit mittels eines Reibungskoeffizienten, auch Reibungsbeiwert μ genannt.

2.1.2 Reibungsbeiwert μ

Reibung ist die Gesamtheit der Kräfte an der Grenzfläche zweier Körper, die ihre gegenseitige Bewegung hemmen oder verhindern. Zur quantitativen Beschreibung der Griffigkeit wird der Reibungsbeiwert (μ) basierend auf dem Coloumb'schen Reibungsgesetz für trockene Reibung von festen Körpern verwendet.⁸ Der Reibungsbeiwert μ ist eine dimensionslose Zahl und ermittelt sich vereinfacht ausgedrückt aus dem Quotienten der zwischen Reifen und Fahrbahn mithilfe der Oberflächenrauheit aktivierten Horizontalkraft (F_x) und der einwirkenden Normalkraft – Reifenauflast – (F_z), siehe Abb. 2-1 und Formel (2.1). Die theoretische Obergrenze für (μ) liegt bei 1 [-], bei der ein ursprünglich unbewegliches System weiterhin unbeweglich bleibt.

⁷ Als wesentlichster Grund für diese Aufraueffekte gilt „saurer Regen“. „Saurer Regen“ weist einen pH-Wert von $< 5,5$ auf und ist vor allem auf die im Niederschlagswasser gebundene Schwefelsäure (H_2SO_4) und Salpetersäure (HNO_3) zurückzuführen. Schwefel- und Salpetersäure entstehen durch die bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen erzeugten Abgase Stickoxid (NO_x) und Schwefeloxid (SO_x) und deren Reaktion mit Wasser in der Atmosphäre. Neben den negativen Auswirkungen auf die Pflanzen wird durch die vorhandene freie Säure im Niederschlagswasser das im Gestein von Straßenbefestigungen vorhandene Carbonat gelöst und ausgewaschen. Dadurch werden einerseits harte Minerale im Gestein frei gelegt und andererseits wird die Oberflächenrauheit der Gesteinskörnungen erhöht.

⁸ Charles Augustin de Coulomb (1736 - 1806): französischer Physiker

Entgegen der Coloumb'schen Reibungstheorie hat bei Autoreifen neben der Normalkraft und der Oberflächenrauheit auch die Reifenaufstandsfläche einen Einfluss auf die aktivierbare Reibungskraft, da bei der Reibung von gummielastischen Stoffen auf rauer Oberfläche die Verzahnung eine Rolle spielt. Je nach Gummimischung und Fahrbahnbelag treten auch effektive Haftreibungszahlen auf, die deutlich größer als 1 sind. So werden z. B. im Motorsport aktive Haftreibungszahlen von annähernd $\mu = 2$ [-] erreicht.

$$\mu = \frac{F_x}{F_z} [-] \quad (2.1)$$

μReibungsbeiwert
 F_xaktivierte Horizontalkraft
 F_zeinwirkende Vertikalkraft

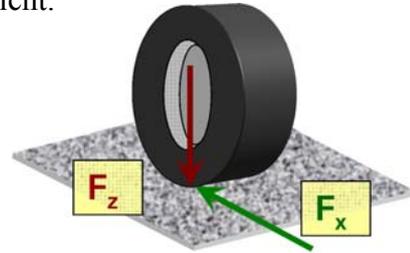


Abb. 2-1: Einwirkende Reifenkräfte gemäß dem Coloumb'schen Reibungsmodell

Die Anwendung von einfachen Haftreibungsmodellen auf Gummi ist jedenfalls problematisch, da sich das Material wie eine hochviskose Flüssigkeit verhält, d. h. es zeigt sich eine deutlichere Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Normalkraft als bei anderen Stoffen. Die Gummireibung ist deshalb auch Gegenstand vieler Forschungen, siehe dazu [GEYER, 1971] [GROSCH, 1963 und 1996] [KLÜPPEL und HEINRICH, 2000] [KUMMER und MEYER, 1967a und 1967b] [SCHRAMM, 2002].

2.1.3 Rauheit, Oberflächentextur

Der Begriff Rauheit beziehungsweise Oberflächentextur beschreibt die geometrische Gestalt der Fahrbahnoberfläche im Wellenlängenbereich von wenigen Mikrometern bis einigen Dezimetern. Bedingt durch die Herstellungsungenauigkeiten beim Bau von Straßen sowie der vorhandenen Feingestalt von Deckschichtmaterialien folgt, dass jede Straßenoberfläche Abweichungen von der ideal ebenen Oberfläche aufweist. Interpretiert werden diese Abweichungen als Wellen mit unterschiedlichen Wellenlängen und Amplituden, die sich als Spektrum überlagern. Je nach Wellenlängenbereich wird zwischen Textur, auch Rauheit genannt, und Unebenheit unterschieden. Die Rauheit wird außerdem in Mikro-, Makro- und Megatextur unterteilt, siehe Abb. 2-2.

a) Unebenheit

Rauheitselemente mit einer Ausdehnung von größer 500 mm werden in der Straßenbautechnik als Unebenheit bezeichnet. Gemessen und beurteilt werden dabei insbesondere die Quer- und Längsebenheit einer Straße.

b) Megatextur

bezeichnet Rauheitselemente mit einer horizontalen Ausdehnung von 50 mm bis 500 mm. Sie können einen Einfluss auf die Bildung von Wasseransammlungen auf der Fahrbahn, in Bodenwellen oder auch in Spurrinnen haben. Rauheitselemente im Megatexturbereich und großer Amplitude führen außerdem zu einem niedrigen Fahrkomfort, der sich durch ein starkes „Rumpeln“ im Fahrzeuginneren bemerkbar macht.

c) Makrotextur

bezeichnet Rauheitselemente mit einer horizontalen Ausdehnung von 0,5 mm bis 50 mm. Eine ausgeprägte Makrotextur kennzeichnet eine grobporige Oberfläche, wie sie z.B. bei der Verwendung von offenporigen Asphalten entsteht. Diese grobporige Oberfläche hat neben der Reduzierung des Rollgeräusches die Aufgabe, vor allem bei höheren Geschwindigkeiten, das Reifenprofil beim Abführen des Wassers aus der

Kontaktfläche Reifen – Straßenoberfläche, dem so genannten Latsch, zu unterstützen. Für die Drainagewirkung der Deckschicht und somit für das Griffigkeitsverhalten der Fahrbahnoberfläche sind allerdings nur Rauheitselemente bis 10 mm wesentlich. Größere Rauheitselemente mit hoher Amplitude, wie etwa bei Brückendilatationen, führen bereits zur Anregung von mechanischen, niederfrequenten Schwingungen.

d) **Mikrotextur**

bezeichnet Rauheitselemente mit einer horizontalen Ausdehnung kleiner 0,5 mm. Im Wesentlichen wird dadurch die Rauheit des einzelnen Gesteinskorns an der Fahrbahnoberfläche beschrieben. Rauheiten bis zu einer Größenordnung von 1/100 mm haben einen sehr großen Einfluss auf die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn bei Nässe. Die Mikrorauheit bestimmt also wesentlich das Niveau der Griffigkeit. Bei dichten Asphalten, wie z.B. bei Asphaltbeton, und Betondecken gewinnen hier vor allem die Eigenschaften der verwendeten Sande an Bedeutung.

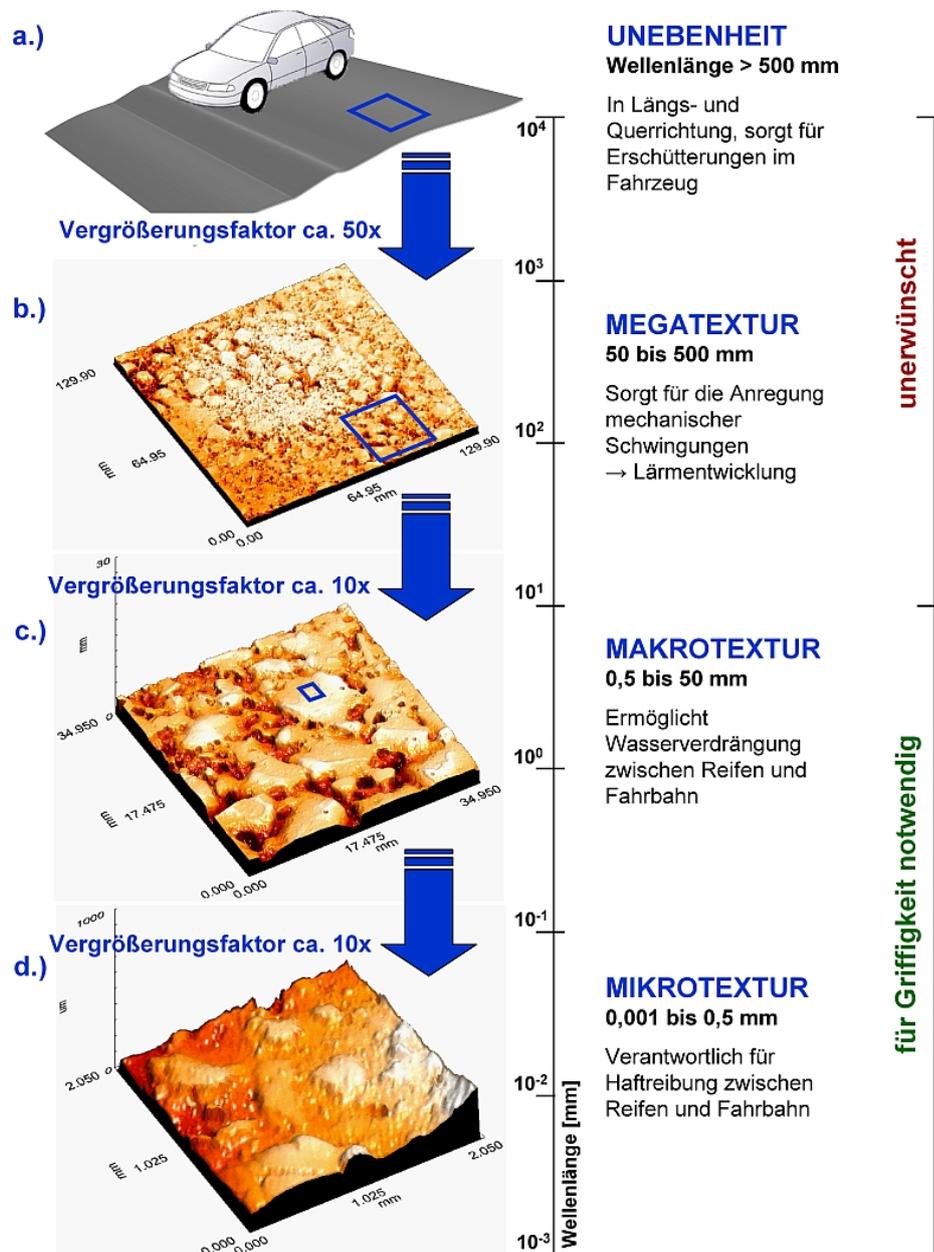


Abb. 2-2: Übersicht über die Rauheitsbezeichnungen im Straßenwesen

Gemäß Abb. 2-2, ist die vorhandene Griffigkeit ausschließlich von der Ausprägung der Mikro- und Makrostruktur abhängig. Somit ist die Griffigkeit einerseits abhängig von dem Drainagevermögen und andererseits vom Grad der „Schärfe“ der Oberfläche. Wird das Drainagevermögen der Makrostruktur zugeordnet, so ist der Grad der „Schärfe“ der exponierten Oberflächen von den verwendeten Gesteinskörnungen für die Ausbildung der Mikrostruktur verantwortlich.

Abb. 2-3 zeigt qualitativ die Auswirkung der Makro- und Mikrostruktur der Straßenoberfläche auf die Reibungsbeiwerte μ in Abhängigkeit der Geschwindigkeit. Die in dieser Abbildung angeführte Oberflächenkenngröße (R_p) ist in der EN ISO 4287 [ON, 2010] definiert und gibt ausgehend von der mittleren Höhe des betrachteten Rauheitselementes die Höhe der größten vorhandenen Profilspitze an (siehe dazu Abb. 2-4 links). Die Kenngröße (R_p) kann als ein Indikator für die Ausbildung der Makrostruktur gesehen werden. Ein großes (R_p), in Abb. 2-3 mit $R_p > 0,4 \text{ mm}$ angegeben, ermöglicht zwischen den Gesteinskörnungen das Abführen von Wasser in der Kontaktfläche Reifen/Fahrbahn. Somit wird Aquaplaning verhindert und die resultierenden Reibbeiwerte bei nassen Straßenverhältnissen liegen generell auf einem höheren Niveau als bei einer geschlossenen Oberfläche ($R_p < 0,4 \text{ mm}$).

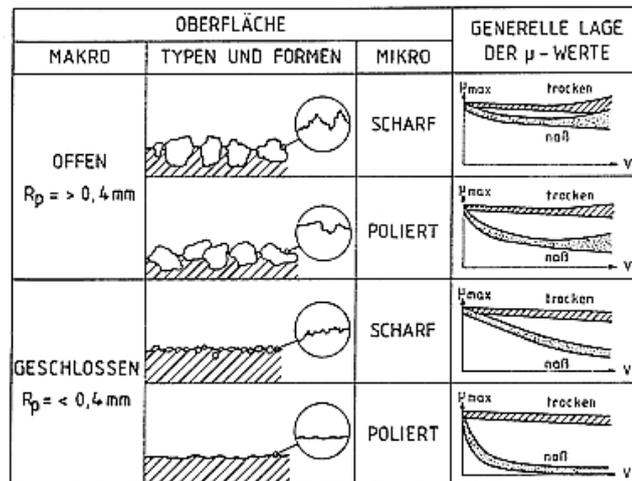


Abb. 2-3: Auswirkungen der Oberflächenstruktur auf die Höhe des Reibungsbeiwertes μ [ZIPKES, 1989]

Die Abb. 2-3 veranschaulicht weiters den großen Einfluss einer polierten Oberfläche auf den Reibungsbeiwert (μ) speziell bei nasser Fahrbahn. Auffallend dabei ist, dass nicht nur eine starke Abnahme des Reibungsbeiwertes mit zunehmender Geschwindigkeit eintritt, sondern die Abnahme bei polierten bzw. glatten Oberflächen schon bei geringen Geschwindigkeiten sehr deutlich ausfällt. Hingegen ist bei trockener Fahrbahn der Einfluss der polierten Mikrostruktur im Gegensatz zu einer Mikrostruktur mit ausgebildeter Schärfe eher gering.

Rollt ein Reifen mit einem Anpressdruck von ca. $0,2 \text{ N/mm}^2$ über eine Fahrbahn, so deformiert sich der Reifen in Abhängigkeit der Härte der Gummimischung und Ausprägung der Stollen sowie in Abhängigkeit der Oberflächentextur mehr oder weniger stark. Im Gegensatz zu den vorhandenen Bergen eines Oberflächenprofils spielen schmale, tiefe Rauheitstäler für die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn keine Rolle mehr. Vergleicht man das in Abb. 2-4 rechts dargestellte wahre Oberflächenprofil einer Asphaltstraßenoberfläche mit dem in Abb. 2-4 links dargestellten überhöhten Oberflächenprofil, so wird aufgrund des flächenmäßigen Anteils die große Bedeutung der Mikrostruktur der exponierten Gesteinskörner für die aktivierbare Reibkraft zwischen Reifen und Fahrbahn ersichtlich.

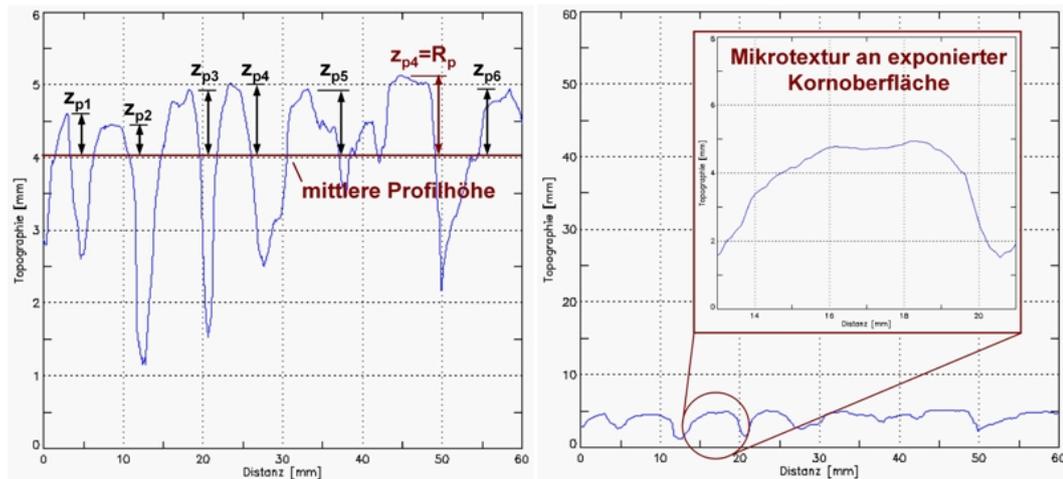


Abb. 2-4: Definition der Höhe der größten Profilspitze R_p (links), zugehöriges, nicht überhöhtes Profil mit Kennzeichnung der Mikrotextrur von Kornoberflächen (rechts)

2.1.4 Polierverhalten von Gesteinskörnungen

Eine unter Verkehrsbeanspruchung stehende Straße ist durch die ständigen Überrollungen von Fahrzeugreifen einer starken mechanischen Polierwirkung ausgesetzt. Vor allem die an der Straßenoberfläche vorhandenen Mineralstoffe sind davon betroffen. Je nach Deckschichtart sind dabei besondere Anforderungen an die Polierresistenz von Sanden und/oder Splitten zu stellen.

Die Polierresistenz von Gesteinskörnungen gibt Auskunft darüber, wie sich die Körnung gegenüber der einwirkenden Polierbeanspruchung der Fahrzeugreifen im Hinblick auf die Beibehaltung ihrer Rauheit, insbesondere der Mikrorauheit, verhält. So werden Gesteinskörnungen mit einer sehr niedrigen Polierresistenz schneller und in höherem Ausmaß durch die mechanische Beanspruchung poliert als dies bei polierresistenten Gesteinen der Fall ist. Die polierende Wirkung entsteht dadurch, dass alle angetriebenen bzw. verzögerten Fahrzeugreifen unter Schlupf auf der Oberfläche abrollen. Dadurch werden die Mineralstoffe an der Oberfläche poliert und sorgen dadurch für die Glättung oder auch Einebnung der exponierten Kornoberflächen während der Übertragung von Horizontalkräften auf die Fahrbahn. Abb. 2-5 zeigt Sandkörner der Fraktion 0,63/1,0 mm vor und nach einer Polierbeanspruchung.

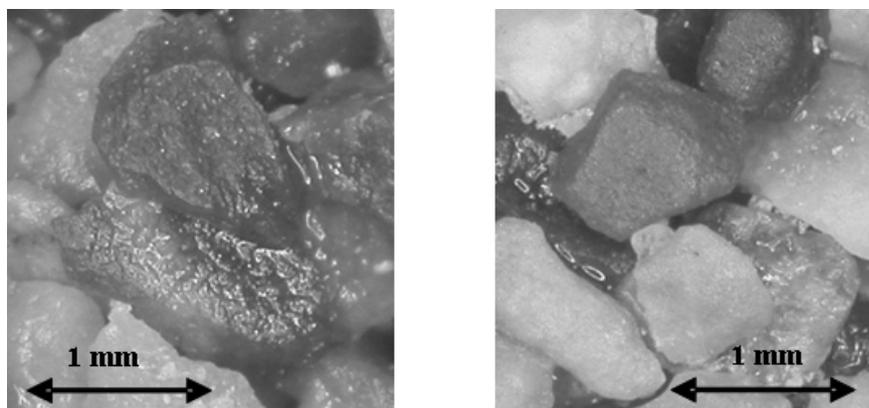


Abb. 2-5: Kalksteinsandkörner der Fraktion 0,63/1,0 mm vor (links) und nach (rechts) einer Polierbeanspruchung [KIRCHMAIER, 2007].

2.2 Stand der Technik

Asphalt- und –Betonstraßen setzen sich im Wesentlichen aus den drei Komponenten Gestein, Bindemittel⁹ und Zusatzmittel¹⁰ zusammen. Der Gesteinsanteil am gesamten Straßenbaustoff liegt in der Regel über 90 M-%. Die im Straßenbau verwendeten Gesteinskörnungen können natürlichen Ursprungs¹¹, industriell hergestellt¹² oder rezykliert¹³ sein.

Für den Einsatz im Straßenbau werden Gesteinskörnungen entsprechend ihrem enthaltenen Kleinst- und Größtkorn, ausgedrückt als (d/D), deklariert. Werden Gesteinskörnungen als Korngruppe bezeichnet so schließt dies mit ein, dass einige Körner auf dem oberen Sieb liegen bleiben (Überkorn) und einige durch das untere Sieb durchfallen (Unterkorn). Als Kornklasse werden Gesteinskörnungen bezeichnet, deren Über- und Unterkorn ausgesiebt wurde.

In Abhängigkeit der Korngröße werden die Gesteine grundsätzlich in drei Kategorien eingeteilt:

- Grobe Gesteinskörnungen (Splitt)
- Feine Gesteinskörnungen (Sand)
- Füller (Gesteinsmehl)

Die geometrische Unterscheidung der drei Gesteinskategorien variiert zwischen Asphalt- und Betonstraßenbau. Im Asphaltstraßenbau zählen Korngruppen mit einem Größtkorn (D) über 2 mm zur Splittfraktion, wohingegen im Betonstraßenbau erst Gesteinskörnungen mit einem Durchmesser größer als 4 mm als Splitt bezeichnet werden. Die Grenzsieböffnung für den Füller liegt bei beiden Straßenbaustoffen bei 0,063 mm, siehe Tab. 2.1.

Tab. 2.1: Einteilung der Gesteinskategorien im Asphalt- und Betonstraßenbau

<i>Straßenart</i>	 <i>Grobe Gesteinskörnungen</i>	 <i>Feine Gesteinskörnungen</i>	 <i>Füller</i>
Asphaltstraßen	$D \leq 45 \text{ mm} / d \geq 2 \text{ mm}$	$D \leq 2 \text{ mm}$, überwiegender Teil $> 0,063 \text{ mm}$	Überwiegender Teil $\leq 0,063 \text{ mm}$
Betonstraßen	$D \geq 4 \text{ mm} / d \geq 2 \text{ mm}$	$D \leq 4 \text{ mm}$	Überwiegender Teil $\leq 0,063 \text{ mm}$

⁹ Als Bindemittel wird im Asphaltstraßenbau das bei der Vakuumdestillation von Erdöl gewonnene Straßenbaubitumen und im Betonstraßenbau das aus Kalkstein, Ton, Sand und Hochofenschlacke hergestellte hydraulische Bindemittel Portlandkompositzement verwendet.

¹⁰ Im Betonstraßenbau werden als Zusatzmittel Komponenten wie z.B. Luftporenbildner, Fließmittel und Verflüssiger sowie Verzögerer verwendet. Im Asphaltstraßenbau werden Komponenten wie z.B. Cellulosefasern (als Bindemittelträger), Wachse und Polymere (zur Mischtemperaturabsenkung bzw. zur Veränderung des Gebrauchsverhaltens), Haftverbesserer (zur Erhöhung der Affinität zwischen Bindemittel und Gestein) sowie Gummigranulate als Zusatzmittel bzw. Additive bezeichnet.

¹¹ Dazu zählen alle Gesteinskörnungen aus mineralischen Vorkommen, wie z.B. aus einem Steinbruch oder einer Schottergrube, die ausschließlich einer mechanischen Aufbereitung in einem Brecher unterzogen worden sind.

¹² Industriell hergestellte Gesteinskörnungen sind mineralischen Ursprungs und wurden in einem industriellen Prozess unter Einfluss eines thermischen oder chemischen Prozesses verändert.

¹³ Dazu zählen Gesteinskörnungen aus aufbereitetem anorganischem Material, das zuvor als Baustoff eingesetzt worden war.

Die Art und Zusammensetzung der verwendeten Gesteinskörnungen hat eine sehr große Bedeutung für die dauerhafte Qualität und Nutzbarkeit einer Straßenkonstruktion. Zur Gewährleistung dieser Dauerhaftigkeit wird auf europäischer Ebene die Einhaltung von geometrischen, physikalischen und chemischen Anforderungen an das verwendete Gesteinsmaterial normativ verlangt. Die Harmonisierung dieser Anforderungsnormen auf europäischer Ebene stellte die Grundlage für die CE-Kennzeichnung von Gesteinskörnungen¹⁴ dar. Da Gesteinskörnungen im Beton zum Teil anderen chemischen Beanspruchungen ausgesetzt sind als Gestein in Asphaltstraßen, wird im Normenwesen wiederum zwischen Gesteinskörnungen für den Einsatz in Asphalt- und in Betonstraßen unterschieden, siehe Abb. 2-6. So werden in den europäischen Normen EN 13043 [ON, 2004] und EN 12620 [ON, 2008] für die geometrischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften von Gesteinskörnungen für den Einsatz in Asphalt- und Betonstraßen Anforderungen gestellt und Kategorien festgelegt. Die nationale Umsetzung der europäischen Anforderungsnormen erfolgt durch die ÖNORM B 3130 [ON, 2010] sowie die ÖNORM B 3131 [ON, 2010]. In den österreichischen Umsetzungsdokumenten wurden aus den europäischen Normen zu erfüllende Kategorien für den nationalen Gebrauch ausgewählt.

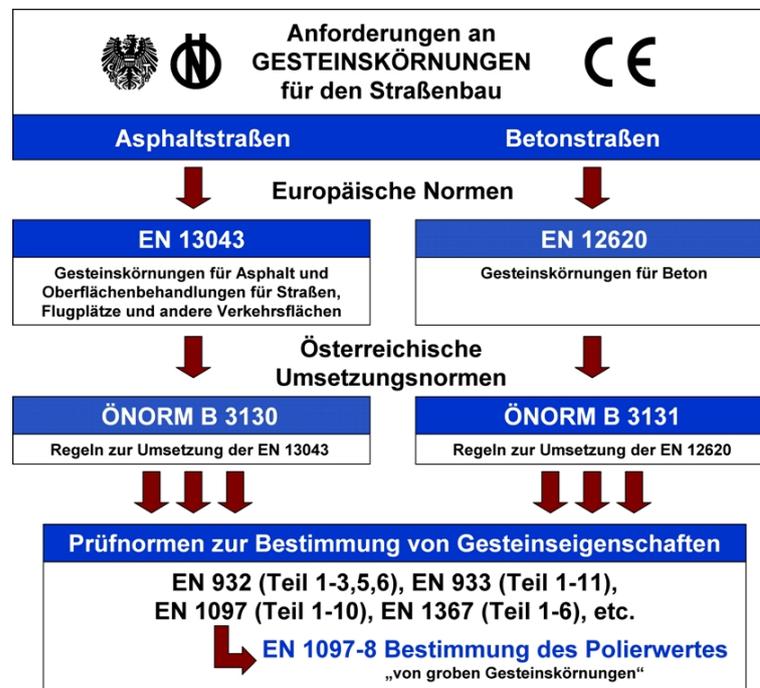


Abb. 2-6: Übersicht über relevante Gesteinsnormen für den Straßenbau in Österreich

Die Bestimmung der geforderten geometrischen, physikalischen und chemischen Gesteinseigenschaften hat wiederum nach europäisch vereinheitlichten Prüfnormen zu erfolgen. Zu den wesentlichsten Prüfnormen zählen die Normenserien EN 932 für allgemeine Eigenschaften, EN 933 für geometrische Eigenschaften, EN 1367 für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit sowie die Serie EN 1097 für mechanische und physikalische Eigenschaften. In letztere Normenserie fällt auch die Prüfung der Polierresistenz von Gesteins-

¹⁴ Die CE-Kennzeichnung von Gesteinskörnungen wurde per 1.6.2004 mit der Einführung der harmonisierten europäischen Gesteinskörnungsnormen wirksam. Diese CE-Kennzeichnung dient zur Feststellung, dass die Gesteinskörnungen der europäischen Bauproduktenrichtlinie entsprechen, und muss vom Produzenten angebracht werden, um das Produkt in Verkehr bringen zu dürfen. Die Bauproduktenrichtlinie wiederum legt fest, dass Baustoffe, die dauerhaft in Bauwerke eingebaut werden, bestimmten Kriterien im Hinblick auf Sicherheit, Gesundheit, Umweltschutz, Energieeinsparung und Wirtschaftlichkeit entsprechen müssen.

körnungen, welche in der Prüfnorm EN 1097-8 [ON, 2009] „Bestimmung des Polierwertes“ – auch als PSV¹⁵ bezeichnet – verankert ist. (vgl. Kapitel 3.2.43.2).

Wie bereits einleitend erläutert, trägt die Polierresistenz der verwendeten Gesteinskörnungen in der Deckschicht einen wesentlichen Anteil zur Gewährleistung einer dauerhaft griffigen Straße bei. Das in der Prüfnorm EN 1097-8 festgelegte Prüfverfahren beschränkt sich allerdings nur auf die Korngruppe 8/11 mm. Zusätzlich wird in der Prüfnorm festgelegt, dass für die Prüfung aus der Korngruppe 8/11 durch Verwendung eines Schlitz- und eines Quadratlochsiebtes die Kornklasse 7,2/10 mm auszusieben ist¹⁶. Gemäß dieser Prüfnorm wird also nur die Polierresistenz von groben Gesteinskörnungen bestimmt. Da bisher davon ausgegangen wurde, dass die Polierresistenz ermittelt an der Splittfraktion, auch Gültigkeit für die Sandfraktion (0/2 mm) hat, wurde an die Sandfraktion auf europäischer Ebene bisher keine eigene Anforderung gestellt. Gemäß den europäischen Gesteinsnormen ist für die verwendete feine Gesteinskörnung lediglich nachzuweisen, dass die Polierresistenz des zugehörigen Splittes den gestellten Anforderungen entspricht, siehe dazu auch Abb. 2-7.

In früheren systematischen Untersuchungen zum Polierverhalten von Mineralstoffen konnte allerdings nachgewiesen werden, dass aufgrund der mineralogischen Zusammensetzung und der Mineralkorngröße nicht ohne weiteres vom Polierwiderstand eines Splittes der Korngruppe 8/11 mm auf den des zugehörigen Sandes (0/2 mm) geschlossen werden kann. So zeigte bereits DAMES [2000], dass Basalte und Hochofenschlacke wegen ihrer sehr feinkristallinen Oberflächenstruktur als Splittkörnung 8/11 mm oft nur mäßige Polierwerte erzielen, wohingegen die gleichen Mineralstoffe als Brechsandkörnung meistens Spitzenwerte für den Polierwiderstand aufweisen.

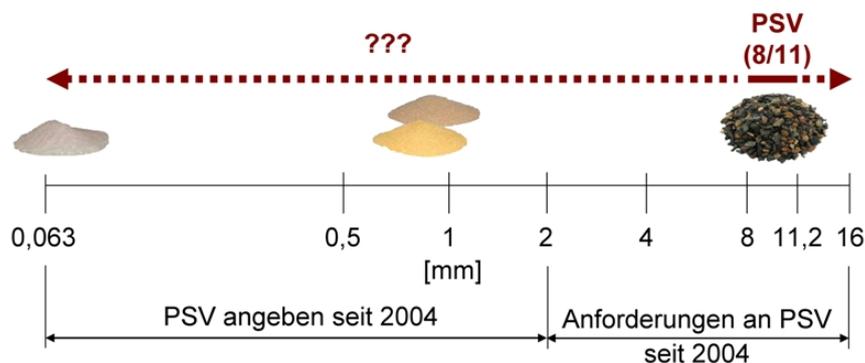


Abb. 2-7: Der PSV und seine Gültigkeit gemäß den Vorgaben in den harmonisierten Normen

Je nach Straßenart (d.h. Beton- oder Asphaltstraße) sowie nach Deckschichttyp variiert der verwendete Anteil der drei Gesteinskörnungskategorien, siehe Tab. 2.2. Die in dieser Tabelle angegebenen Werte entsprechen den zulässigen Bandbreiten für das jeweilige Mischgut, wie sie in den nationalen Umsetzungsdokumenten (ÖNORM Serie B 3580ff) der europäischen Asphaltnormen (Normenserie EN 13108) angegeben sind. Für das Asphaltmischgut AC 11¹⁷ beträgt demnach der mittlere Anteil der Splittfraktion am gesamten Gesteinszuschlag ca. 55 M-%, der Anteil der Fraktion 0,063/2,0 mm liegt bei ca. 37 M-%.

¹⁵ Polierwert PSV = Polished Stone Value, Maß für die Polierresistenz einer Gesteinskörnung.

¹⁶ Streng genommen ist daher die in der Literatur häufig angegebene Prüfkörnung 8/11 mm gegen die tatsächlich untersuchte Prüfkörnung 7,2/10 mm zu ersetzen.

¹⁷ AC 11 deck – asphalt concrete für Deckschichten. Auf europäischer Ebene vereinheitlichte Abkürzung für einen Asphaltbeton mit dem Größtkorn 11 mm. Dieses Mischgut ist durch eine kontinuierliche, weitgestufte Sieblinie gekennzeichnet.

Bei einem SMA 11¹⁸ hingegen ist der mittlere Anteil der groben Gesteinskörnungen mit ca. 70 M-% und der mittlere Anteil der feinen Gesteinskörnung mit ca. 25 M-% festgelegt. Der Fülleranteil (Korngrößen < 0,063 mm) liegt bei diesen beiden Deckschichttypen im Mittel bei ca. 8 M-%. Einen noch höheren Splittanteil weist das Mischgut eines PA 11¹⁹ auf. Grobe Gesteinskörnungen im Sieblinienbereich von 2 bis 11 mm sind im Mittel mit insgesamt ca. 85 M-% an der Korngrößenverteilung beteiligt. Der Sandanteil beträgt hingegen lediglich ca. 14 und der Fülleranteil ca. 4 M-%.

Im Betonstraßenbau beträgt der mittlere Anteil der groben Gesteinskörnungen (> 4 mm) an der Sieblinie eines Oberbetons mit GK 16²⁰ ca. 65 M-%, der Anteil der feinen Gesteinskörnungen beträgt ca. 35 M-%. Der Fülleranteil der verwendeten Gesteinskörnung ist mit weniger als 5 M-% festgelegt. Durch die Beimischung des hydraulischen Bindemittels liegt der effektive Fülleranteil eines Betonmischguts jedoch über 5 M-%.

Tab. 2.2: Anteil der drei Gesteinskategorien an der Gesamtsieblinie ausgesuchter Deckschichtarten (angegeben sind die zulässigen Bandbreiten gemäß Anforderungsnormen)

<i>Deckschichtart</i>	<i>Grobe Gesteinskörnungen</i>	<i>Feine Gesteinskörnungen</i>	<i>Füller</i>
Asphaltbeton (AC 11 deck)	50 bis 70 M-%	30 bis 50 M-%	5 bis 11 M-%
Splitt-Mastix-Asphalt (SMA 11)	67 bis 80 M-%	20 bis 33 M-%	5 bis 11 M-%
PA 11	83 bis 90 M-%	10 bis 17 M-%	2 bis 6 M-%
Oberbeton (GK 16)	60 bis 65 M-%	35 bis 40 M-%	2 bis 5 M-%

Wie aus Tab. 2.2 ersichtlich wird, bestehen Straßendeckschichtmaterialien in der Regel zu mehr als 50 M-% aus groben Gesteinskörnungen mit einem Durchmesser von ≥ 2 mm. Daraus folgt, dass bei offenporigen Asphaltdeckschichten, wie etwa einem PA 11, die alleinige Forderung nach der Bestimmung des PSV, geprüft an der Korngruppe 8/11, durchaus ihre Berechtigung hat, da auch vorwiegend diese Korngruppe am Mischgut beteiligt ist und auch nach langjähriger Verkehrsbeanspruchung die Griffbarkeit von Straßen zu gewährleisten hat.

Anders verhält es sich bei dichten Asphaltdeckschichten, wie etwa einem Asphaltbeton AC 11 deck. Aufgrund des hohen Sandanteils tragen sowohl feine Gesteinskörnungen als auch grobe Gesteinskörnungen zur Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn bei und sind zudem einer Polierbeanspruchung durch den Straßenverkehr ausgesetzt. Bei diesem

¹⁸ SMA 11 – stone mastix asphalt. Auf europäischer Ebene vereinheitlichte Abkürzung für einen Splitt-Mastix-Asphalt mit einem Größtkorn von 11 mm. Dieses Mischgut ist gekennzeichnet durch eine diskontinuierliche, eng gestufte Sieblinie mit einem hohen Splittanteil der Korngruppe 8/11 mm.

¹⁹ PA 11 – porous asphalt. Englische Abkürzung für einen offenporigen Asphalt mit einem Größtkorn von 11 mm– oft auch als Drainasphalt oder Flüsterasphalt bezeichnet. Dieses Mischgut ist gekennzeichnet durch eine diskontinuierliche, eng gestufte Sieblinie mit einem sehr hohen Splittanteil der Korngruppe 8/11 mm. Standardmäßig wird der offenporige Asphalt jedoch mit einem Größtkorn von 8 mm ausgeführt.

²⁰ Neue Betonfahrbahnen werden in der Regel immer 2-lagig, bestehend aus einem Unter- und Oberbeton frisch auf frisch eingebaut. Oberbeton unterscheidet sich vom Unterbeton vor allem hinsichtlich der geforderten physikalischen Gesteinseigenschaften wie z.B Polierresistenz, Widerstand gegen Zertrümmerung, etc. des Zementgehalts und der Sieblinie. Abweichend von der üblichen Fuller-Kurve, weist das Mischgut für Oberbeton einen höheren Splittanteil auf, da an der Oberfläche nur eine dünne Zementleimschicht gewünscht wird. Bei herkömmlichen Betondecken wird mit Hilfe eines Jutetuches oder eines Besenstriches die Oberfläche zusätzlich texturiert, um eine gute Griffbarkeit sicherzustellen. GK 16 weist auf das im Oberbeton verwendete Größtkorn von 16 mm hin. Für die Erzeugung von Waschbetondecken wird in der Regel ein Größtkorn von 8 bzw. 11 mm verwendet.

Deckschichttyp erscheint in Anbetracht der Feststellungen von DAMES [2000] die Bestimmung der Polierresistenz des verwendeten Gesteins allein an der Fraktion 8/11 mm aus technischer Sicht nicht ausreichend.

Ebenso wie bei einem PA 11 ist auch bei einem SMA 11 der Anteil der feinen Gesteinskörnungen mit ca. 25 M-% um ein vielfaches niedriger als bei einem AC 11. Beim Einbau eines SMA entstehen jedoch aufgrund des für diesen Mischgutttyp hohen Bindemittelgehaltes²¹ sowie bei unsachgemäßer Verdichtungsarbeit manchmal sogenannte Mastixflecken, also Bindemittelanreicherungen auf der Oberfläche. Diese führen zu einer Reduktion der Anfangsgriffigkeit neuer Straßendeckschichten. Da mit dem Bindemittel auch vorwiegend feine Sandpartikel an die Oberfläche gelangen, erscheint eine Anforderung an die Polierresistenz von feinen Gesteinskörnungen auch bei diesem Mischgutttyp aus technischer Sicht sinnvoll.

Bis Februar 2010 wurden in den österreichischen Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau die im Asphaltstraßenbau zu verwendenden Gesteinskörnungen unabhängig von ihrer Korngröße in drei Gesteinsklassen (G1 bis G3) eingeteilt. Die Zuordnung zu diesen Gesteinsklassen erfolgte aufgrund der chemischen, physikalischen und thermischen Eigenschaften. Die an diese drei Gesteinsklassen bis Anfang 2010 gestellte physikalische Anforderung hinsichtlich der zu erreichenden Polierresistenz ist in Tab. 2.3 angeführt. Für Korngruppen mit $d \geq 2$ mm wurde für die Gesteinsklasse G1 ein PSV von ≥ 50 und für die Klasse G2 ein PSV von ≥ 44 gefordert. Polierwerte < 44 sind bereits Indikatoren für eine niedrige Polierresistenz, weswegen für die Klasse G3 keine explizite Forderung an den PSV mehr gestellt war. An die Korngruppe der Sandfraktion (0/2) war keine separate Anforderung an die Polierresistenz gestellt. Der Sand musste jedoch aus einem Material bestehen, dessen Korngruppe 8/11 einen der Gesteinsklassen entsprechenden PSV aufweist.

Tab. 2.3: Anforderungen an die Polierresistenz von Gesteinsmaterial für Asphaltdeckschichten gemäß RVS 08.97.05 [FSV, 2007] (gültig bis Februar 2010)

<i>Merkmal gem. CE-Kennzeichen</i>	<i>Gesteinsklasse</i>	<i>Alle Mischgutttypen</i>	
	<i>Korngruppe</i>	0/2	2/4, 4/8, 8/11, 11/16, 16/22
Widerstand gegen Polieren gemäß EN 1097-8	G1	PSV ¹⁾ _{angeben}	PSV ₅₀
	G2		PSV ₄₄
	G3		PSV _{angeben}

¹⁾ Die Körnung 0/2 ist aus einem Material herzustellen, bei dem die grobe Gesteinskörnung den der Gesteinsklasse entsprechenden PSV erreicht.

Die Fragestellung der Bestimmung des Polierwiderstandes von Gesteinskörnungen ≤ 2 mm und dessen Einfluss auf die Griffigkeit von Asphaltoberflächen wurde in ersten Reihenuntersuchungen bei LITZKA et al., 2003 und PFEILER, 2004 mit einem W/S- Poliergerät alter Bauart und einem sogenannten Frictometer (vgl. Kapitel 3.3) erstmals in Österreich untersucht. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeiten lag dabei auf der Erhöhung der Griffigkeit durch den Einsatz polierresistenter Sande. Dafür wurde der Polierwiderstand der feinen Gesteinskörnungen von 30 österreichischen Produkten an eigens hergestellten Probekörpern mit dem Polierverfahren nach Wehner/Schulze (alter Bauart) und anschließender Griffigkeitsmessung mit dem Frictometer ermittelt. In weiterer Folge wurden mit ausgewählten Sanden verschiedene Asphaltmischungen (AC und SMA) hergestellt und der Einfluss der feinen Gesteinskör-

²¹ Der Mindestbindemittelgehalt eines SMA ist mit 6 M-% ca. doppelt so hoch als für einen AC 11 oder PA 11.

nungen auf das Griffigkeitsverhalten der Asphaltmischgutttypen untersucht. Dabei zeigte sich, dass vor allem der Polierwiderstand der Gesteinskörnungen in den Kornklassen 0/2 mm bzw. 0/4 mm einen wesentlichen Einfluss auf die Griffigkeit von Asphaltbetonen und Betondecken hat und dadurch eventuell sogar ein geringer PSV im Splittbereich kompensiert werden kann. Somit ist es naheliegend, jene Korngruppen hinsichtlich ihrer Polierresistenz zu beurteilen, welche zu einem überwiegenden Teil die Gesamtsieblinie einer Mischgutrezeptur beeinflussen. Im Zuge der Arbeiten wurde auch ein Richtlinienentwurf für die Prüfung des Polierwiderstandes von Sanden ausgearbeitet, der im Jahr 2005 als RVS 11.06.23 [FSV, 2005] erschien. Der gemäß dieser Richtlinie bestimmte Polierwert von Sand war als PWS-F (Polierwert nach Wehner und Schulze von feinen Gesteinskörnungen) zu bezeichnen. Für diese Untersuchungen wurde die in Kapitel 3.3 angeführte Prüfanordnung mit einem Wehner/Schulze Poliersimulator alter Bauart und dem Frictometer verwendet. Eine auf diese Arbeiten aufbauende Untersuchung an zwei Asphaltmischgütern mit unterschiedlicher Zusammensetzung der Sande ist in Kapitel 2.3 angeführt.

Anders als bei Asphaltstraßen verhält es sich bei Betonstraßen. In Österreich wird auf der Oberfläche von Autobahnneubauten aus Beton in der Regel immer eine Waschbetonstruktur²² zur Gewährleistung einer hohen Griffigkeit und zur Reduzierung der Sprühhahnenbildung bei Nässe erzeugt. Da es z. B. witterungsbedingt²³ manchmal lokal zu einer unzureichenden Ausführung der Waschbetonstruktur kommen kann, und somit eine aus Zementleim und Feinsand bestehende feine (griffigkeitsreduzierende) Mörtelschicht an der Oberfläche zurückbleibt, erscheint auch hier zur Gewährleistung der Straßengriffigkeit eine Anforderung an die Polierresistenz von feinen Gesteinskörnungen als notwendig. Im Betonstraßenbau haben deswegen bereits im Jahr 2007 unabhängig von der europäischen Normung getrennte Anforderungen an die Polierresistenz von groben und feinen Gesteinskörnungen Eingang in die nationalen technischen Vertragsbedingungen für die Betondeckenherstellung - RVS 08.17.02 [FSV, 2007] - gefunden. In dieser RVS wird für Korngrößen > 4 mm der Nachweis eines PSV von 50 gemäß EN 1097-8 gefordert. Zusätzlich wird von Gesteinskörnungen ≤ 4 mm der Nachweis eines PWS $\geq 0,55$ ²⁴ gemäß RVS 11.06.23, siehe dazu Kapitel 3.1.4, gefordert. Alternativ kann für Gesteinskörnungen ≤ 4 mm auch der Nachweis eines CO₂-Gehalts von < 15 % gemäß EN 196-2 [ON, 2005] erbracht werden, siehe dazu Tab. 2.4²⁵.

Außer in Österreich wurden auch in anderen Ländern Europas zur Beschreibung des Polierwiderstandes von Gesteinskörnungen ≤ 2 mm Forschungsarbeiten durchgeführt. Aufgrund dieser Arbeiten zeigt sich, dass sich auf wissenschaftlich - technischer Ebene das Polierverfahren nach Wehner/Schulze durchgesetzt hat (siehe dazu Kapitel 3.1). An der TU Berlin

²² Für die Herstellung der Waschbetonstruktur, wird auf dem fertig eingebauten, verdichteten und geglätteten Oberbeton ein kombinierter Kontaktverzögerer und Verdunstungsschutz aufgebracht. Durch den Verzögerer wird ein Aushärten des Zements in den obersten 1-2 mm verhindert. Nach einer definierten Zeitspanne wird der oberste Feinmörtel auf der Oberfläche ausgekehrt.

²³ Der Zeitpunkt für das Auskehren der obersten Feinmörtelschicht hängt sehr stark vom verwendeten Verzögerer und der Dosierung sowie von der vorhandenen Umgebungstemperatur ab. Letztere unterliegt zum Teil erheblichen Schwankungen, was die Festlegung des richtigen Auskehrzeitpunktes erschweren kann.

²⁴ In der RVS 08.17.02 [FSV, 2007] wird der Polierwert von Sand abweichend von der RVS 11.06.23 [FSV, 2005] als PWS (Polierwert nach Wehner/Schulze) bezeichnet.

²⁵ In dieser Norm werden zwei Verfahren zur Bestimmung des CO₂-Gehalts von Zement angeführt. Bei beiden Verfahren wird durch Beaufschlagung der zu untersuchenden Gesteinskörnung entweder mit Phosphor- oder Schwefelsäure das Kohlenstoffdioxid ausgetrieben. Mittels Gravimetrie wird anschließend der CO₂-Gehalt bestimmt. Der CO₂-Gehalt gibt unter anderem Auskunft über den in der Gesteinskörnung enthaltenen Carbonatanteil, welcher in der Regel ein Kennzeichen für eine hohe Polierbarkeit von Gesteinskörnungen ist.

wurde zur Beschreibung des Polierwertes von Sanden in einer durchgeführten Reihenuntersuchung das Prüfgerät nach Wehner/Schulze alter Bauart (vgl. HUSCHEK et al., 1989) und die Sandfraktion 0,2/0,4 mm verwendet.

Tab. 2.4: Anforderungen an die Polierresistenz von Gesteinskörnungen für Oberbeton gemäß RVS 08.17.02 [FSV, 2007]

Anforderung	Kriterium
Widerstand gegen Polieren > 4 mm	PSV ₅₀ gem. EN 1097-8
Widerstand gegen Polieren ≤ 4 mm	PWS ≥ 0,55 gem. RVS 11.06.23 [2005] oder CO ₂ < 15 % gem. EN 196-2 [2005]

Die Festlegung auf die Prüfkörnung 0,2/0,4 mm fand aufgrund von Untersuchungen statt, die grundsätzlich eine Korngrößenabhängigkeit des Polierwiderstandes innerhalb der feinen Körnungen bis 1,0 mm bestätigten. Aufgrund eines reproduzierbaren Polierverhaltens von mehreren Gesteinsmaterialien in verschiedenen Sandfraktionen hinsichtlich ihrer Reihung, erschien es gerechtfertigt, die Sandpolierprüfung repräsentativ nur an einer sehr eng gestuften Körnung (0,2/0,4) durchzuführen [DAMES, 2000].

So fand die Verwendung dieser Prüfkörnung auch Eingang in die deutschen Prüfvorschriften der FGSV²⁶ [FGSV, 2008] sowie in das österreichische Regelwerk der FSV [RVS 11.06.23, FSV, 2005]. Der gemäß dieser RVS 11.06.23 ermittelte Polierwert der Sandfraktion 0,2/0,4 mm wird als PWS-F bezeichnet.

Somit stehen in Österreich zur Quantifizierung der Polierresistenz von Gesteinen derzeit zwei Prüfverfahren zur Verfügung, siehe Abb. 2-8.

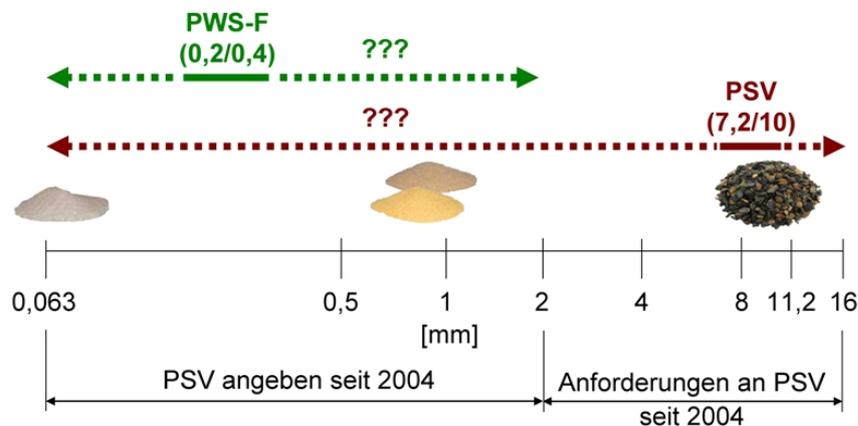


Abb. 2-8: Kennwerte der Polierresistenz und ihre Prüffraktion

In obiger Abbildung wird der schmale Bereich der durch die Prüfverfahren abgedeckten Fraktionen zur Beurteilung der Polierresistenz deutlich erkennbar. Vor allem der Korngrößenbereich von 1 bis 2 mm ist durch ausführliche Reihenuntersuchungen noch mit keinem der beiden Polierverfahren ausreichend untersucht.

In Deutschland sind in der TP Gestein-StB, Teil 5.4.2 [FGSV, 2008] zur Bestimmung der Polierresistenz von Splitten mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze zusätzliche Verfahren angeführt. Dazu zählt das Mosaik-Auslegeverfahren für die Fraktion 8/11,2 mm und das Mastixgussverfahren für die Fraktionen 2/5, 5/8 sowie 8/11,2 mm, siehe dazu Abschnitt 3.1.3.2.

²⁶ Deutsche Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. www.fgsv.de

2.3 Einfluss der Polierresistenz von Sand auf die Griffigkeit von Asphaltoberflächen - Praxisbeispiel

Wie groß der Einfluss von Sand auf die vorhandene Griffigkeit bzw. auf die Griffigkeitsentwicklung einer Fahrbahndeckschicht konkret ist, soll anhand des folgenden Beispiels dargestellt werden. Im Gegensatz zu den von DAMES et al. [1988] und PFEILER [2004] durchgeführten Untersuchungen wurde für die nachfolgend beschriebenen Griffigkeitsbestimmungen das Prüfgerät nach Wehner/Schulze neuester Bauart verwendet.

Ein AC 11 deck mit polymermodifiziertem Bitumen stellt ein konventionelles Asphaltmischgut für den Einsatz auf Straßen mit höherer Verkehrsbedeutung dar. Kennzeichen für einen AC 11 ist ein stetiger Verlauf der Korngrößenverteilungslinie mit einem Fülleranteil zwischen 6 und 10 M-% und einem Anteil der Korngröße 11,2 mm zwischen 90 und 100 M-%. Die zulässige Bandbreite der Sieblinie für einen AC 11 deck A2 ist in Tab. 2.5 angeführt bzw. in Abb. 2-9 blau schraffiert dargestellt.

Gemäß dieser Sieblinienverteilung wurden zwei Mischgüter hergestellt. Beim Mischgut A wurden in der Sandfraktion 0/2 mm sowohl Kalksand (27 M-%) als auch LD-Schlacke²⁷ (14 M-%) verwendet. Für das Mischgut B wurde in der Sandfraktion nur Kalksand verwendet (41 M-%). Somit ist der Kalksandanteil beim Mischgut B um 14 M-% höher als beim Mischgut A. Da noch kein Sammelwerk für den Polierwert der Sandfraktion 0/2 mm vorliegt, wurde sowohl vom verwendeten Kalksand als auch vom verwendeten Sand der LD-Schlacke die Polierresistenz mit dem in Kapitel 3.1.4 angeführten Verfahren nach Wehner/Schulze bestimmt. Der Polierwert des Sandes (PWS-Wert) aus LD-Schlacke beträgt 0,57 [-]. Der Kalksand besitzt mit 0,36 [-] eine um ca. 60 % niedrigere Polierresistenz als die LD-Schlacke.

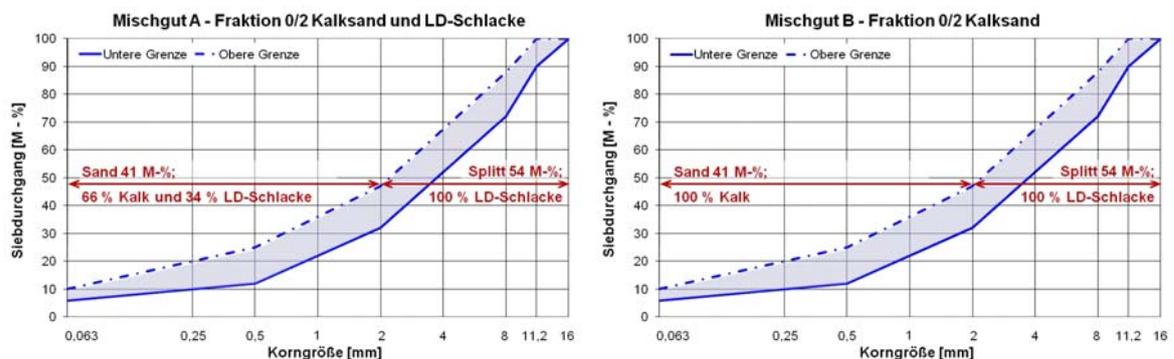


Abb. 2-9: Zulässige Korngrößenverteilung für ein Mischgut Typ AC 11 deck A2 mit Angabe der verwendeten Gesteinskörnungen

Für die Splittfraktion wurden sowohl beim Mischgut A als auch beim Mischgut B ausschließlich Gesteinskörnungen aus LD-Schlacke verwendet, siehe Tab. 2.5. Verwendet wurden die Splittfraktionen 2/4 mm (11,4 M-%), 4/8 mm (23,7 M-%) und 8/11 mm (19 M-%). Der PSV-Wert der LD-Schlacke liegt gemäß Güteschutzliste [GSV, 2010] bei 50 [-].

Als Bindemittel wurde ein PmB 45/80-65 verwendet. Der Bindemittelgehalt mit 3,5 M-% sowie der Hohlraumgehalt mit 4,0 V-% sind für beide Mischgüter ident.

²⁷ Schlacke ist ein bei der Erzeugung von Stahl anfallendes Nebenprodukt, welches sehr hart und abriebsfest ist. Das Kürzel „LD“ steht für die österreichischen Stahlproduktionsstandorte Linz und Donawitz, in deren Stahlproduktion die Schlacke anfällt. Bei den hier verwendeten Gesteinskörnungen handelt es sich um veredelte und aufbereitete Schlacke, welche in Deckschichten zur Anwendung gelangt.

Tab. 2.5: Sollsieblinie AC 11 deck A2 mit Angabe der verwendeten Gesteinskörnungen

<i>Sollsieblinie AC 11 deck A2 (zul. Bandbreiten)</i>		<i>Verwendete Gesteinsfraktionen</i>	
<i>Siebgröße [mm]</i>	<i>Massenanteil [M-%]</i>	<i>Mischgut A</i>	<i>Mischgut B</i>
0,063	6 – 10	Korngruppe 0/2 mm insgesamt 41 M-%: 66 % 0/2 Kalk 34 % 0/2 LD	0/2 Kalk 41 M-%
0,5	12 – 25		
2	32 – 47		
8	72 – 88	2/4 LD 11,4 M-%	2/4 LD 11,4 M-%
11,2	90 – 100	4/8 LD 23,7 M-%	4/8 LD 23,7 M-%
16	100	8/11 LD 19 M-%	8/11 LD 19 M-%

Von diesen beiden Mischgütern wurden im Labor mit einem Walzsegmentverdichter unter Anwendung eines weggesteuerten Verdichtungsprogramms je eine Asphaltplatte hergestellt. Aus einer Asphaltplatte wurden in weiterer Folge je zwei Probekörper ausgebohrt. Diese Probekörper wurden anschließend gemäß dem „Berliner Prognoseverfahren“²⁸ auf ihre Griffigkeitsentwicklung hin untersucht. Das dem Prognoseverfahren zugrunde liegende Prüfprogramm ist in Tab. 2.6 angeführt. Dabei wird zuerst im Ausgangszustand (= B-Stufe [0]), also jenem Zustand der sich auf der Straße nach dem Einbau einstellt, die Griffigkeit der Oberfläche bestimmt. Danach erfolgt eine Simulation der Verkehrsbeanspruchung mit anschließender Griffigkeitsprüfung (= B-Stufe [1]). Dadurch wird eine „Einfahrphase“ simuliert, welche auf der realen Straße einer Zeitdauer von wenigen Monaten entspricht. Nach dem Bestimmen der Griffigkeit werden die Oberflächen der Asphaltproben durch dosiertes Sandstrahlen aufgeraut und wiederum die Griffigkeit bestimmt (= B-Stufe [2]). Das Aufrauen der Oberfläche soll den Verwitterungseffekt durch Niederschlag und Frosteinwirkung sowie die Beanspruchung durch Spikereifen simulieren. Anschließend erfolgt eine neuerliche Simulation der Verkehrsbeanspruchung mit nachfolgender Griffigkeitsprüfung (= B-Stufe [3]). Bis zum Erreichen eines sogenannten „Endpolierwertes“ werden abschließend weitere Griffigkeitsprüfungen durchgeführt (= B-Stufe [4]). Der Endpolierwert gilt als erreicht, wenn die absolute Spannweite von drei aufeinanderfolgenden Griffigkeitsmessungen nicht größer als $\Delta\mu = 0,003$ [-] ist.

Tab. 2.6: Prüfprogramm gemäß dem „Berliner Prognoseverfahren“

<i>Beanspruchungsstufen nach dem „Berliner Prognoseverfahren“</i>	<i>[B-Stufen]</i>
Griffigkeitsmessung im unbeanspruchten Ausgangszustand	[0]
Polierbeanspruchung von 90.000 Überrollungen mit anschließender Griffigkeitsmessung	[1]
Aufrauen der Oberfläche durch dosiertes Sandstrahlen mit anschließender Griffigkeitsmessung	[2]
Polierbeanspruchung von 90.000 Überrollungen mit anschließender Griffigkeitsmessung	[3]
Weitere Griffigkeitsmessungen bis zum Erreichen eines „Endpolierwertes“	[4]

Je Mischgut wurden gemäß dem in Tab. 2.6 angeführten Prüfprogramm insgesamt zwei Probekörper geprüft und aus den Einzelmessergebnissen je B-Stufe der Mittelwert gebildet.

²⁸ Das „Berliner Prognoseverfahren“ wurde an der TU Berlin zur Beurteilung der Griffigkeitsentwicklung von unterschiedlichen Deckschichten unter Anwendung des Prüfgerätes nach Wehner/Schulze, siehe Kapitel 3.1, entwickelt. Mit diesem Verfahren lässt sich qualitativ die Griffigkeitsentwicklung bestimmen. Eine eindeutige zeitliche Zuordnung zu realen Straßenzuständen lässt sich damit nicht herstellen, da diese stark von der Verkehrsbelastung, insbesondere vom Schwerverkehr, als auch von den klimatischen Gegebenheiten abhängig sind.

In Tab. 2.7 sind die ermittelten Griffigkeitswerte der beiden Mischgüter sowie die zugehörigen Standardabweichungen für jede Belastungsstufe angegeben.

Tab. 2.7: Ergebnisse der Griffigkeitsentwicklung der zwei Mischgüter A und B

<i>B-Stufe</i>	<i>Mischgut A</i>		<i>Mischgut B</i>	
	<i>Mittelwert</i>	<i>Stabw.</i>	<i>Mittelwert</i>	<i>Stabw.</i>
[0]	0,39	0,006	0,39	0,021
[1]	0,27	0,023	0,18	0,009
[2]	0,53	0,001	0,48	0,002
[3]	0,18	0,001	0,14	0,011
[4]	0,18	0,003	0,14	0,009

In Abb. 2-10 links sind die ermittelten Griffigkeitswerte der beiden Mischguttypen einander in Form eines Histogramms gegenübergestellt. In Abb. 2-10 rechts werden die relativen Griffigkeitswerte dargestellt, wobei der in der jeweiligen Belastungsstufe höhere Griffigkeitswert dem Maximum von 100 % entspricht.

Im unbeanspruchten Ausgangszustand wurde für beide Mischguttypen ein Griffigkeitswert von 0,39 [-] ermittelt. Der höhere Kalksandanteil mit der geringeren Polierresistenz des Mischguts B hat somit auf die Anfangsgriffigkeit keinerlei Auswirkung. Dies lässt sich dadurch erklären, dass für die Anfangsgriffigkeit vor allem die Makro- und Mikrotextur von Bedeutung ist. Diese sind bedingt durch die Sieblinie und die Ausprägung der Bruchflächen der verwendeten Gesteinskörnungen. Aufgrund derselben Sieblinie und verwendeten Splitte ist die anfängliche Oberflächentextur bei beiden Mischguttypen nahezu ident. Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf die Anfangsgriffigkeit ist der an der Oberfläche vorhandene Bindemittelfilm. Da bei beiden Mischguttypen sowohl der Bindemittelgehalt als auch die eingebrachte Verdichtungsarbeit bei der Probekörperherstellung ident ist, wurde bei beiden Mischguttypen dasselbe Griffigkeitsniveau im unbeanspruchten Ausgangszustand ermittelt.

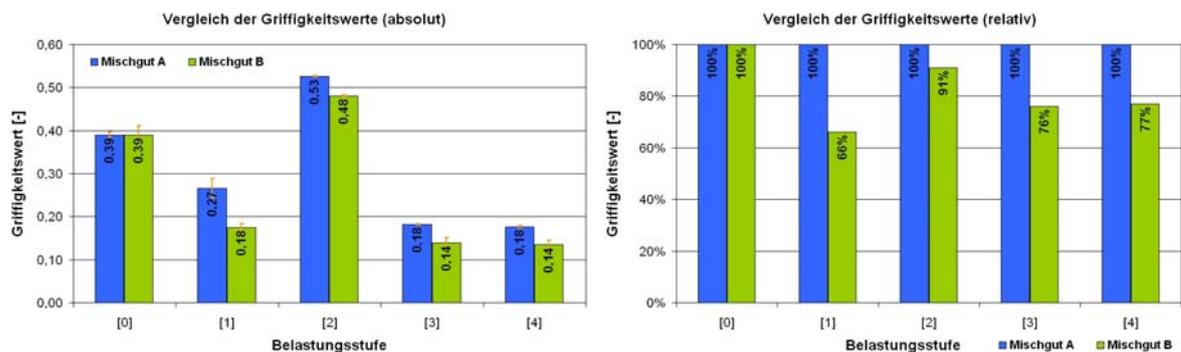


Abb. 2-10: Griffigkeitsentwicklung der beiden Mischguttypen – links – absolut, rechts – relativ

Der nach der Poliersimulation im Zustand [1] ermittelte Griffigkeitswert beträgt beim Mischgut A 0,27 [-]. Beim Mischgut B beträgt der Griffigkeitswert 0,18 [-] und ist somit um 0,09 [-] oder um 34 % niedriger als beim Mischguttyp A. Durch den ersten Poliervorgang wurde einerseits der an der Oberfläche vorhandene Bindemittelfilm durch die Gummirollen zum Teil ausgefahren und andererseits die an der Oberfläche vorhandenen Gesteinskörnungen poliert. Da bei dichten Mischguttypen wie dem AC 11 in diesem Zustand noch sehr viele feine Gesteinskörnungen, also Sandkörner, an der Oberfläche vorhanden sind, wirkte sich beim

Mischguttyp A insbesondere die höhere Polierresistenz des Sandes der LD-Schlacke positiv auf den Griffigkeitswert aus.

In der B-Stufe [2] wurde für das Mischgut A ein Griffigkeitswert von 0,52 [-] und für das Mischgut B ein Griffigkeitswert von 0,47 [-] ermittelt. Durch das dosierte Sandstrahlen werden einerseits viele feine Gesteinskörnungen aus der Bindemittel-Gesteinsmastix entfernt, was zu einer deutlicheren Ausprägung der Makrotextur führt, andererseits werden die Oberflächen und hier insbesondere die groben Gesteinskörnungen wieder aufgeraut. Diese Veränderungen der Oberfläche führen zu dem Anstieg der Griffigkeitswerte von beiden Mischgütern.

Nach einer weiteren Poliersimulation (Zustand [3]) stellte sich für das Mischgut A ein Griffigkeitswert von 0,18 [-] und für das Mischgut B ein Griffigkeitswert von 0,14 [-] ein. Wie schon im Zustand [1] äußert sich die höhere Polierresistenz der in der Sandfraktion verwendeten LD-Schlacke des Mischguts A in Form eines um 23 % höheren Griffigkeitswertes als jener des Mischguts B. Der in diesem Zustand ermittelte Griffigkeitswert, entsprach bei beiden Mischgütern dem „Endpolierwert“, da durch die nachfolgenden Messungen ([B-Stufe [4]]) keine weitere Reduktion des Griffigkeitswertes festgestellt werden konnte.

An dem hier gezeigten Praxisbeispiel wird deutlich, dass durch das Ersetzen eines polierfreudigen Sandes durch einen polierresistenten Sand die Langzeitentwicklung der Griffigkeit von Asphaltbetondeckschichten wesentlich beeinflusst werden kann. Durch den Ersatz von lediglich 34 % Kalksand durch einen Sand aus LD-Schlacke mit einem um ca. 60 % höheren Polierwert lässt sich die Langzeitentwicklung des Griffigkeitsniveaus um 23 % steigern.

Um mittels Mix-Design die Straßengriffigkeit hinsichtlich ihrer Langzeitentwicklung zu optimieren sind daher neben der Information über die Polierresistenz von groben Gesteinskörnungen ebenso Informationen über die Polierresistenz der feinen Fraktionen notwendig. Um für letztere einen Bewertungshintergrund zu schaffen, muss ein Verfahren zur Prüfdurchführung gefunden und standardisiert werden. Zusätzlich sind Informationen über die Wiederhol- und Vergleichbarkeit des Verfahrens zu ermitteln, um eine Aussage über die Zuverlässigkeit des Verfahrens zu ermöglichen.

3 BERÜHRENDE PRÜFVERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DER POLIERRESISTENZ

Zur Beschreibung von geometrischen Gesteinseigenschaften wie der Kornform können einfache Messverfahren, wie z.B. eine Kornform-Schiebelehre verwendet werden. Für die Bestimmung von physikalischen Gesteinseigenschaften, wie z.B. des LA-Wertes²⁹ oder des Polierwertes PSV gibt es bereits seit vielen Jahren beanspruchende bzw. berührende Prüfverfahren, welche durch europäische Prüfnormen verbindlich erklärt wurden. Daneben gibt es auch erprobte Prüfverfahren für die Beschreibung von physikalischen Gesteinseigenschaften, wie das Prüfverfahren nach Wehner/Schulze, für das es auf nationaler Ebene – so z.B. in Deutschland und Österreich – bereits erste Fassungen einer entsprechenden Prüfanweisung in Form einer Richtlinie bzw. einer Prüfvorschrift gibt. Auf europäischer Ebene ist das Verfahren nach Wehner/Schulze jedoch noch nicht im Rahmen einer Prüfnorm verankert. Dazu bedarf es noch intensiverer Forschungstätigkeit und Diskussionen in den einschlägigen Gremien. Insbesondere über die Reproduzierbarkeit der Prüfung mit der Anlage nach Wehner/Schulze sowie über die genaue Prüfdurchführung gibt es noch keine detaillierten Untersuchungen. Die gegenständliche Arbeit soll deswegen einen wesentlichen Beitrag zur wissenschaftlichen Dokumentation der Präzision dieses Verfahrens leisten.

Die oben erwähnten Prüfverfahren sind in der Regel einfach durchzuführen, verlangen jedoch immer eine zum Teil sehr aufwendige Kalibrierung der Prüfeinrichtungen und hohe Sorgfalt des Laboranten bei der Prüfdurchführung. Ein weiterer Nachteil dieser Prüfverfahren liegt darin, dass die für die Prüfung aufbereiteten oder hergestellten Proben während der Prüfung zerstört werden. Somit ist es nicht möglich Proben zweimal zu prüfen.

Abgesehen von diesen berührenden bzw. beanspruchenden Prüfverfahren wird derzeit an berührungslosen Verfahren zur Beschreibung von physikalischen Gesteinseigenschaften geforscht. Ein sehr vielsprechender Ansatz zur Beschreibung der petrografischen Eigenschaften³⁰ von Gesteinskörnungen basiert auf der Nutzung der IR-Spektroskopie³¹ im nahen infraroten Bereich. Zusätzlich wird das untersuchte Gesteinsmaterial fotografiert und mit einer Bildauswertungssoftware Gesteinseigenschaften wie z.B. Bruchflächigkeit, Kornform, etc. bestimmt. Durch Nutzung neuester statistischer Verfahren kann aus all diesen Kenndaten bereits mit hoher Bestimmtheit der LA-Wert der Gesteinskörnung bestimmt werden [HOFER, 2007] [EUREKA, 2006].

Bis zur Erlangung der Serienreife von berührungslosen Prüfverfahren sind noch umfassende Studien und Weiterentwicklungen notwendig. Zusätzlich müssen diese neuen Ansätze zur Charakterisierung von Gesteinseigenschaften mit herkömmlichen Prüfverfahren kalibriert

²⁹ Der LA-Wert ist ein Maß für den Widerstand einer Gesteinskörnung gegen Zertrümmerung. Bei der Ermittlung des LA-Wertes wird das Prüfgut (in der Regel dient als Prüfkörnung die Kornklasse 10/14 mm) durch Stahlkugeln in einer rotierenden Trommel beansprucht. Das Prüfverfahren ist in der ÖNORM EN 1097-2, Ausgabe 2010, normativ geregelt.

³⁰ Als Petrografie wird die Wissenschaft von Gesteinen bezeichnet. Sie befasst sich mit der chemischen und physikalischen Beschaffenheit der Gesteine, ihren Eigenschaften und ihrer Zusammensetzung aus einzelnen Mineralen, sowie mit ihrer Körnung und teilweise der Kristallstruktur.

³¹ Bei der IR-Spektroskopie erfolgt durch Zufuhr von Energie (infrarotes Licht, Wellenlänge 0,8 - 2,5 µm) eine Schwingungsanregung der Moleküle bzw. Molekülbindungen eines Stoffes. Diese Schwingungen sind in Form von Ausschlägen in einem Diagramm über den gemessenen Frequenzbereich sichtbar. Da für die Anregung einer bestimmten Bindung eine spezifische Energie bzw. Frequenz notwendig ist, können anhand von Referenzspektren auch ganze Gesteinsarten qualitativ identifiziert werden.

werden, um einen Bezug zu den bestehenden Anforderungsnormen herstellen zu können. Deswegen muss zurzeit noch auf berührende Prüfverfahren zurückgegriffen werden. Zur Gewährleistung, dass neue Prüfmethode auch mit hinreichend genauen Referenzdaten kalibriert werden, ist eine vereinheitlichte Versuchsdurchführung der bestehenden Prüfmethode notwendig. Zusätzlich müssen Untersuchungen über die Wiederhol- und Vergleichbarkeit von Prüfergebnissen vorhanden sein, um die Präzision der Prüfmethode hinreichend genau beurteilen zu können.

Gegenwärtig befinden sich im deutschsprachigen Raum vorwiegend zwei Prüfverfahren zur Bestimmung der Polierresistenz von Mineralstoffen in Verwendung. Dazu zählt das Eingang erwähnte Verfahren nach British Standard zur Bestimmung des PSV (ebenso Verfahren mit dem Schnellpoliergerät oder auch Schnellpoliermaschine genannt) sowie das in Deutschland bereits weit verbreitete Polierverfahren nach Wehner/Schulze. Neben diesen zwei Verfahren werden in diesem Kapitel noch drei weitere in Deutschland bzw. Österreich entwickelte Verfahren vorgestellt, welche in Forschungsarbeiten Anwendung fanden. Dazu zählt das kombinierte Verfahren mit dem Wehner/Schulze Poliersimulator und dem Frictometer, das Polier- und Griffigkeitsmessgerät (PGM) sowie das Erfurter Griffigkeitsprognoseverfahren (EGPV). Mit diesen Prüfverfahren wurde ähnlich dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze einerseits der Polierwert von Gesteinskörnungen bestimmt andererseits versucht, eine Prognose der Langzeitentwicklung der Straßengriffigkeit anzustellen.

3.1 Prüfanlage nach Wehner/Schulze

Die Prüfanlage nach Wehner/Schulze ist ein Laborgerät zur Bestimmung und Prognose der Griffigkeitseigenschaften von Straßenoberflächen und zur Bestimmung des Polierwiderstandes von Gesteinskörnungen.

3.1.1 Entwicklung des Prüfverfahrens

Seit Mitte 1950 stand in Deutschland mit dem „Stuttgarter Reibungsmesser“³² ein Großgerät zur Messung der Griffigkeit von Straßenoberflächen zur Verfügung, welches auch in Österreich eingesetzt wurde. Mit diesem Großgerät konnten jedoch nur die Ist-Zustände auf den Straßen erfasst werden, eine Prognose über die Griffigkeitsentwicklung konnte nicht getätigt werden.

3.1.1.1 Berliner Prototyp

Das Simulieren der Verkehrseinwirkungen auf der Straße und deren Einflüsse auf die Deckschichten, hier insbesondere des Einflusses auf die Mineralstoffe, unter definierten Bedingungen im Labor, zählt jedoch seit jeher zu einer der wichtigsten Aufgaben in der Straßenbauforschung. Um die Änderung der Griffigkeit von Fahrbahnen infolge von Verkehrseinwirkung untersuchen zu können, wurde Anfang der 60er Jahre des vergangenen Jahrhunderts an der TU Berlin das Verfahren nach Wehner/Schulze (W/S) entwickelt. Dabei wird im Labor, unter definierten Bedingungen, die polierende Wirkung durch den Straßenverkehr simuliert und anschließend eine Griffigkeitsprüfung an den polierten Probekörpern durchgeführt. Anfangs bestand die Prüfeinrichtung noch aus zwei getrennten Maschinen. So wurden

³² Beim „Stuttgarter Reibungsmesser“ handelte es sich um einen Einradanhänger, der von einem Zugfahrzeug gezogen wurde. Im Gegensatz zu neueren Messsystemen wurde das Messrad während der Messung blockiert, wodurch ein Schlupf von 100% erzeugt bzw. ein Gleitreibungsbeiwert ermittelt wurde. Da sich die maximal aktivierbare Reibungskraft zwischen Rad und Fahrbahn bei einem Schlupf von 10-15% einstellt, arbeiten neuere Messsysteme, ähnlich den ABS-Systemen von Straßenfahrzeugen, in diesem Schlupfbereich.

von der ehemaligen Firma „Tonindustrie“ je eine Prüfmaschine für das Polieren der Probekörper sowie für die Messung des Reibwertverlaufes der Probenoberfläche über einen definierten Geschwindigkeitsverlauf gebaut.

In Abb. 3-1 links ist die Poliereinheit – auch Wehner/Schulze-Poliersimulator genannt – dargestellt. Eine wesentliche Besonderheit der Prüfeinrichtung war die Vorrichtung zur Verwendung von ebenen Probenoberflächen. Dadurch konnten bereits sowohl im Labor hergestellte Proben als auch direkt aus der Fahrbahn entnommene Bohrkern in den Poliersimulator eingespannt werden. Der Polierkopf, bestehend aus drei konischen, unprofilierten Gummirollen, ist im Detail in Abb. 3-1 rechts dargestellt. Zur Aufbringung der Polierwirkung wurde der Polierkopf mittels einer Handkurbel auf die Probenoberfläche abgesenkt und anschließend maschinell in Rotation versetzt. Zusätzlich wurde bereits damals die Polierwirkung durch Beaufschlagung der Probenoberfläche mit einem Quarzmehl-Wasser-Gemisch verstärkt.

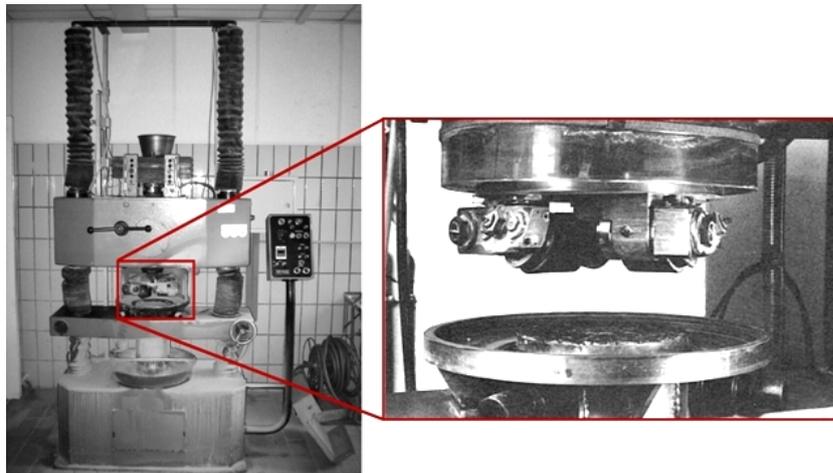


Abb. 3-1: Poliersimulationsmaschine (links) sowie Detail des Polierkopfes (rechts) [Fotos: DAMES, 1990]

Nach der Poliersimulation konnte in einer separaten Prüfmaschine, siehe Abb. 3-2 links, die Griffigkeit der polierten Oberfläche bestimmt werden. Dazu wurde ein mit drei Messgummis bestückter Prüfkopf auf ca. 100 km/h beschleunigt, auf die Probenoberfläche abgesenkt und bis zum Stillstand abgebremst. Die Aufzeichnung des Reibwertes über den ganzen Geschwindigkeitsbereich erfolgte über einen externen, analogen x-y-Schreiber³³. In Abb. 3-2 rechts ist ein x-y-Schreiber mit einem in grün dargestellten aufgezeichneten Reibwertverlauf einer Oberfläche dargestellt.

Typisch ist, dass die Prüfgummis bei 100 km/h, also beim ersten Kontakt mit der Probe, auf der Oberfläche „hüpfen“ und erst ab ca. 80 km/h ein vollflächiger Kontakt zwischen den Prüfgummis und der Probenoberfläche hergestellt und somit ab dieser Geschwindigkeit eine durchgängige Kurve aufgezeichnet werden konnte.

Durch die im Verhältnis zu modernen Datenerfassungsgeräten, wie z.B. einem Datalogger oder einem digitalen Speicheroszilloskop, größere Trägheit des Messzeigers, wurden mit dem „Urgerät“ keine großen Schwankungen in den Reibwertkurven festgestellt. Durch diese Trägheit der Messaufzeichnung und die im Vergleich zu modernen Geräten niedrige Messrate wurden mit dieser Griffigkeitsmessmaschine gute Wiederholbarkeiten von Prüfergebnissen erzielt.

³³ x-y-Schreiber sind Linienschreiber, die anstelle einer Zeitachse eine zweite Messachse besitzen. Diese Messschreiber verfügen i.d.R. über keinen Papiervorschub, sondern es wird die Schreibplatte mit einem Blatt Papier belegt.

Eine erste Veröffentlichung mit Forschungsergebnissen über die Bestimmung von Griffigkeitswerten und die Polierfähigkeit von Gesteinsmaterial für den Straßenbau durchgeführt mit dem neuen Prüfsystem erfolgte von WEHNER im Jahr 1965 [WEHNER, 1965].

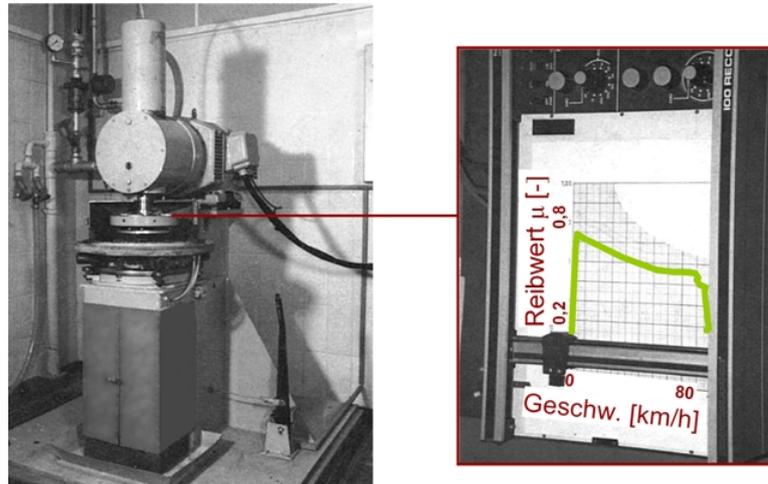


Abb. 3-2: Reibwertbestimmungsmaschine (links) sowie externe Geschwindigkeits-Reibwertaufzeichnung (rechts) [Fotos: DAMES, 1990]

Von den in Berlin entwickelten Prototypen erfolgten anschließend noch drei Nachbauten, wovon einer zur BAST³⁴ in Deutschland, einer nach Delft in den Niederlanden und einer in die ehemalige Österreichische Bundesversuchs- und Forschungsanstalt Arsenal Wien gelangte.

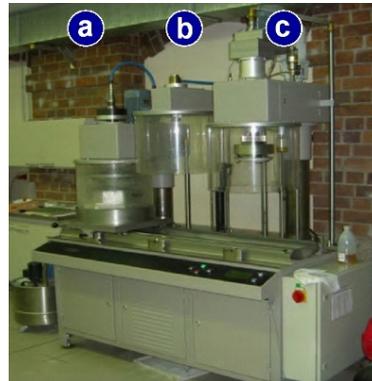
Stand ursprünglich das Bestimmen des Verhaltens von Straßenoberflächen unter Verkehrseinwirkung im Vordergrund, so wurden an der TU Berlin im Laufe der Zeit zunehmend Forschungen über die Polierresistenz von Mineralstoffen für den Einsatz im Straßenbau und hier insbesondere über die Polierresistenz der Sandfraktion unternommen [HUSCHEK et al., 1988 bzw. HUSCHEK et al., 1997]. Die zahlreichen von WEHNER, SCHULZE, DAMES und HUSCHEK erschienenen Veröffentlichungen basieren alle auf Untersuchungen mit einer Wehner/Schulze Prüfanlage alter Bauart. Über 40 Jahre wurde das Prüfverfahren in Berlin für viele Forschungsarbeiten verwendet und somit auch der auf dem Fachgebiet der Straßentechnik tätigen wissenschaftlichen Öffentlichkeit präsentiert. Doch erst seit wenigen Jahren ist dieses Prüfverfahren auf wissenschaftlich-technischer Ebene in Europa anerkannt. Insbesondere zur Bestimmung der Polierresistenz von Sanden hat sich dieses Verfahren aufgrund der vielen Vorteile gegenüber dem englischen Verfahren zur Bestimmung der Polierresistenz von Splitten (Schnellpoliermaschine) auf wissenschaftlicher Ebene durchgesetzt.

3.1.1.2 Modernisierung des Prüfverfahrens

Der Durchbruch des Prüfverfahrens nach Wehner/Schulze auf wissenschaftlicher Ebene ist den technischen Modifikationen und Neuerungen zu verdanken, die von der Firma Maschinen- und Gerätebau Josef Freundl in langjähriger Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Straßenbau der Technischen Universität Berlin unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr. sc. techn. ETH S. Huschek vorgenommen wurden. Die so Anfang der 2000er Jahre konzipierte Maschine erhielt zusätzlich zu der Polier- und Griffigkeitsmessstation noch eine dritte Station, welche zum automatisierten Waschen der Probekörper nach der Poliersimulation diente. Die wesentlichste Änderung bestand darin, die Polier- und die Griffigkeitsmessanlage sowie die

³⁴ BAST = Bundesanstalt für Straßenwesen. Die BAST ist ein Forschungsinstitut des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung in Deutschland. www.bast.de

Waschstation zu einem Bausatz zu kombinieren. Dadurch wurde der erforderliche Platzbedarf gegenüber der getrennten Bauweise wesentlich reduziert. In Abb. 3-3 ist eine Wehner/Schulze Maschine der 1. Version, welche an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden betrieben wird, dargestellt.



a....Polierstation
b....Waschstation
c....Prüfstation

Abb. 3-3: Prüfanlage nach Wehner/Schulze - Version 1 der Fa. Maschinen- und Gerätebau Josef Freundl [Foto: RAUSCHENBACH und BOREK, 2010]

Die Neukonzeption der Prüfmaschine brachte aber auch versuchstechnische Vorteile mit sich. Durch die Modifikationen entfiel der Probenumbau zwischen dem Polieren und der Griffigkeitsmessung. Zusätzlich wurde die Messdatenerfassung und Datenverarbeitung gebündelt und die Aufzeichnung der Poliersimulation und der Griffigkeitsmessung erfolgte ab sofort digital mit einem PC. Neben diesen Änderungen wurden auch Modifikationen im Detail durchgeführt. So veränderte sich das Aussehen der für die Poliersimulation verwendeten Polierrollen. Waren diese früher glatt, so erhielten sie nun acht Rillen, welche das Profil von Autoreifen imitieren sollen. Ebenso wurden die Abmessungen der Polierrollen und der Prüfummis zur Griffigkeitsmessung modifiziert. Von dieser 1. Version der von der Fa. Freundl entwickelten Neukonzeption wurden Maschinen unter anderem nach Dresden, München und Aachen ausgeliefert.

Nach ersten Erfahrungen mit diesen Prototypen im Prüfalltag wurden weitere Veränderungen, vorwiegend Anpassungen der Nutzerfreundlichkeit, an der Maschine vorgenommen. Die bedeutendste Änderung in der folgenden 2. Version bestand darin, die Waschstation in die Polierstation zu integrieren. So konnten abermals Platz und maschinentechnische Elemente eingespart werden. Diese 2. Version ist die aktuellste Entwicklungsstufe der Prüfanlage und wird deswegen auch als Prüfanlage nach Wehner/Schulze neuer Bauart bezeichnet.

Die Prüfanlage nach Wehner/Schulze neuester Bauart zeichnet sich durch einen sehr geringen Platzbedarf und einen hohen Automatisierungsgrad des Prüfablaufes aus. Ein weiterer wichtiger Aspekt, der für dieses Prüfverfahren bzw. diese Prüfanlage spricht, ist die große Bandbreite an prüfbareren Korngruppen und Baustoffen. So können von Gesteinskörnungen nahezu alle Korngrößen – denkbar von 0,2 bis 32 mm – untersucht werden. Zusätzlich ist es mit dieser Prüfanlage, wie schon bei der Urversion aus den 1960er Jahren, möglich, das Griffigkeitsverhalten von Asphalt- und Betonprobekörper, die entweder einer bestehenden Straße entnommen oder im Labor hergestellt wurden, zu untersuchen. Durch die genaue Erfassung der Poliereinwirkung sind Zusammenhänge zwischen der realen Griffigkeitsentwicklung von Fahrbahnen und den im Labor erzielten Polierwerten herstellbar.

Der Fachbereich Straßenwesen des Instituts für Verkehrswissenschaften an der TU Wien ist seit dem Frühjahr 2006 im Besitz einer Wehner/Schulze Prüfanlage neuester Bauart. Diese ist in Abb. 3-4 dargestellt.



Abb. 3-4: Prüfanlage nach Wehner/Schulze - Version 2 der Fa. BPS Wennigsen³⁵
 [Foto: Kirchmaier, 2007]

In Österreich betreibt neben der TU Wien zurzeit noch ein weiteres privates Labor eine W/S-Prüfanlage. Europaweit sind laut Herstellerangaben knapp 20 stationäre Maschinen der Versionen 1 und 2 in Betrieb, u.a. in Deutschland, Frankreich und England.

Das Institut für Straßenwesen der RWTH Aachen verfügt zusätzlich zum stationären System über eine mobile Wehner/Schulze-Prüfanlage, siehe Abb. 3-5. Diese ermöglicht Griffigkeitsuntersuchungen direkt auf der Fahrbahn, wodurch ein Ziehen von Probekörpern entfällt. Für den Transport und die Wasserversorgung benötigt die mobile Prüfanlage jedoch zusätzlich einen Kleintransporter.



Abb. 3-5: Mobile Wehner/Schulze Anlage [Foto: ISAC, 2010]

3.1.2 Bestandteile der Prüfanlage

Die W/S Prüfanlage besteht im Wesentlichen aus zwei Bauteilen – der Polierstation und der Prüfstation. Weiterer wichtiger Bauteil ist ein Probentisch mit integriertem Drehmomentaufnehmer. Zusätzlich sind ein Behälter für das Quarzmehl-Wasser-Gemisch inklusive einer Förderpumpe, sowie ein Druckluftkompressor notwendig. Zum Einspannen der Gesteinsprobekörper sowie der Probekörper aus Asphalt oder Beton dient eine Probeneinspannvorrichtung. In Abb. 3-6 sind die wesentlichen Bauteile dargestellt.

³⁵ Die Firma BPS Wennigsen ist die Nachfolgegesellschaft der im Jahr 2007 aufgelassenen Firma Maschinen- und Gerätebau Josef Freundl. www.bps-wennigsen.com

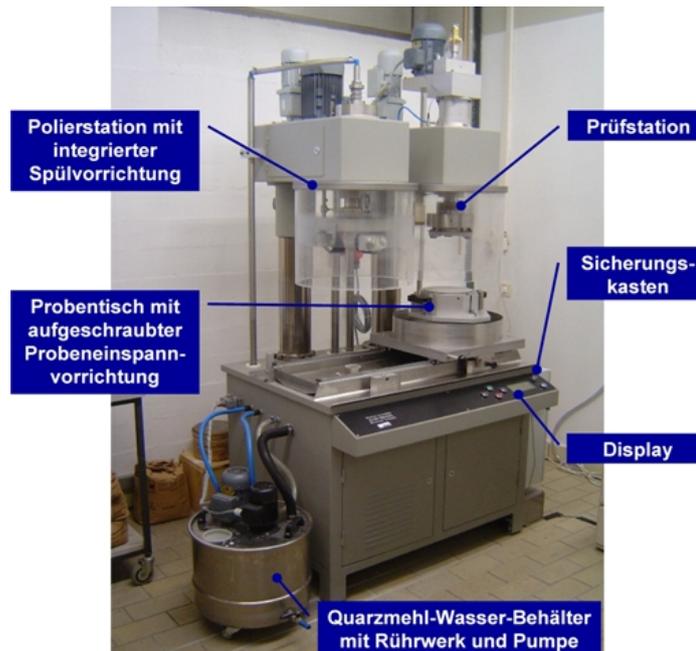


Abb. 3-6: Bestandteile der Prüfanlage nach Wehner/Schulze neuester Bauart
[Foto: KIRCHMAIER, 2007]

Da die Prüfmaschine des Forschungsbereich Straßenwesen der TU Wien die erste Wehner/Schulze Prüfanlage neuer Bauart ist, welche in Österreich in Betrieb genommen wurde, wird im Folgenden detaillierter auf die einzelnen Bestandteile eingegangen.

3.1.2.1 Polierstation

Die Polierstation besteht aus einem maschinenbetriebenen Polierkopf mit drei Polierrollen (siehe Abb. 3-7), der auf die Probenfläche abgesenkt werden kann. Die Prüfkörperplatten besitzen einheitlich einen Durchmesser von 225 mm, wobei nur ein äußerer Kreisring mit einer Breite von 60 mm, das entspricht einer polierten Fläche von ca. 305 cm^2 , von den Polierrollen erfasst wird. Die Auflast des Polierkopfes auf die Prüfkörperoberfläche beträgt ca. 392 N. Das entspricht einem mittleren Kontaktdruck der Polierrollen auf die Prüfkörperoberfläche von ca. $0,37 \text{ N/mm}^2$. Der Spitzenkontaktdruck liegt zwischen $0,6$ und $0,7 \text{ N/mm}^2$ und entspricht somit dem mittleren Spitzenkontaktdruck von LKW-Reifen [Angaben Fa. BPS Wennigsen].



Abb. 3-7: Polierkopf mit den drei Polierrollen [Foto: KIRCHMAIER, 2007]

Die Polierrollen bestehen aus einem kreiskegelförmigen Metallträgergehäuse, auf dem eine 8,8 mm starke Gummischicht aufgebracht ist. In diese Gummischicht sind acht Profilirillen von etwa 4,5 mm Tiefe und 3,5 mm Breite eingeschnitten. Die äußeren Abmessungen der Gummirollen sind in Abb. 3-8 dargestellt. Die Shorehärte der Gummimischung beträgt (65 ± 5) Shore A, siehe dazu auch Kapitel 4.6.1.

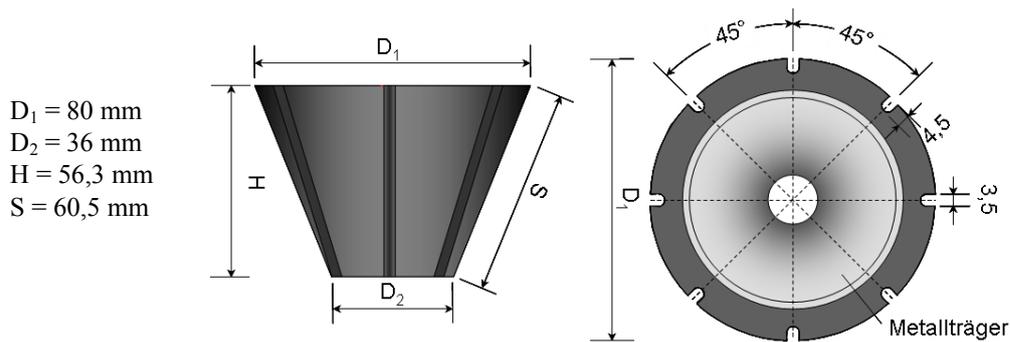


Abb. 3-8: Detailansicht einer Polierrolle

Die Drehzahl des Polierkopfes lässt sich stufenlos zwischen 0 und 1000 U/min regeln. Die zu verwendende Drehzahl für die Poliersimulation ist durch Erfahrungen an der TU Berlin mit 500 U/min – das entspricht einer Bahngeschwindigkeit von 17 km/h – festgelegt. Somit beträgt die Dauer eines Poliervorganges von 90.000 Überrollungen genau eine Stunde.

Die Polierbeanspruchung der Probenoberflächen wird einerseits durch Zugabe eines Wasser-Quarzmehl-Gemisches, andererseits durch einen festgelegten Schlupf der Polierrollen sichergestellt. Der durch die Lagerreibung bei den Polierrollen während der Poliersimulation hervorgerufene Schlupf beträgt laut Herstellerangaben 0,5 bis 1,0 %. Die Anordnung der Polierrollen auf der Probenoberfläche ist in Abb. 3-9 dargestellt.

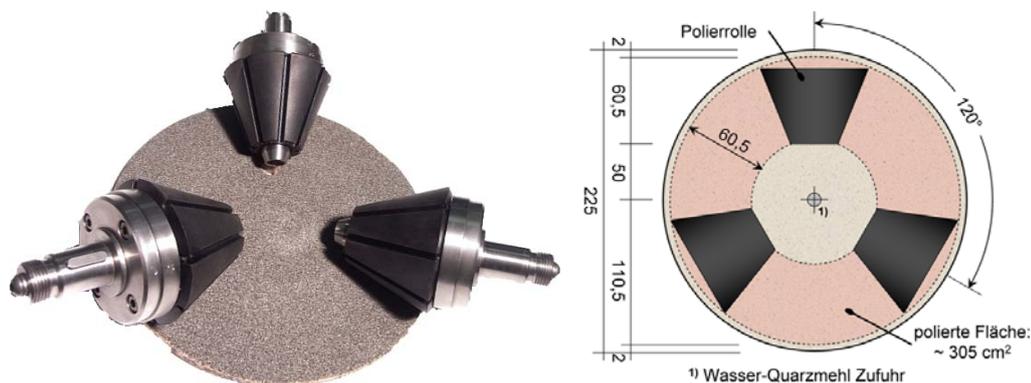


Abb. 3-9: Anordnung der Polierrollen auf der Probenoberfläche. Maßangaben in mm
[Foto: KIRCHMAIER und BLAB, 2010a]

Als Poliermittel wird in Österreich derzeit ein Quarzmehl verwendet dessen vom Hersteller deklarierte Sieblinie in Abb. 3-10 dargestellt ist.

Die wichtigsten Kenngrößen des Quarzmehls sind:

- Obere Korngröße $d_{95\%}$: 120 μm
- Mittlere Korngröße $d_{50\%}$: 40 μm
- Mohs Härte: 7
- pH-Wert: 7
- SiO_2 -Anteil: 99 M-%

Das Masse-Verhältnis von Quarzmehl zu Wasser ist mit 2,4:40 festgelegt, d.h. auf 1 Liter Wasser sind 60 g Quarzmehl zuzugeben. Die geforderte Temperatur des während der Poliersimulation zugeführten Wasser-Quarzmehl-Gemisches hat $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ zu betragen.

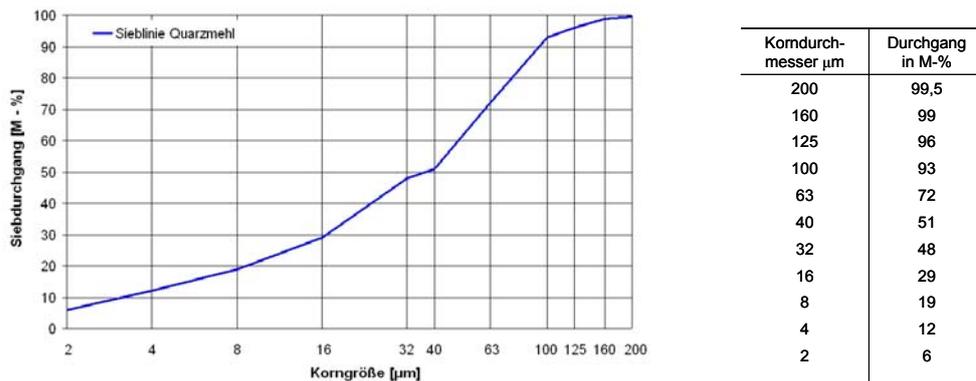


Abb. 3-10: Sieblinie des Poliermittels

Die Zufuhrrate des Wasser-Quarzmehl-Gemisches beträgt im Regelfall ($5 \pm 0,5$) Liter pro Minute. Eine konstante Zufuhr des Wasser-Quarzmehl-Gemisches wird durch eine regelbare Pumpe gewährleistet.

Durch Erhöhung der Förderleistung der Pumpe kann die Zufuhrate des Wasser-Quarzmehl-Gemisches gesteigert werden, was wiederum eine höhere Polierbeanspruchung der Probekörperfläche zur Folge hat. Ein diesbezüglich durchgeführter Versuch mit einer Anhebung der Pumpenleistung von 47 auf 88 % der Maximalleistung hatte bei zwei Sanden (Kalkstein und Diabas) der Fraktion 0,2/0,4 mm absolut betrachtet eine Verminderung des Polierwertes um ca. 0,110 [-] zur Folge (siehe Abb. 3-11). Dies entspricht beim Kalkstein einer relativen Abnahme des Polierwertes von 29 %. Aufgrund der höheren Polierresistenz des Diabases ergab sich für dieses Gestein eine relative Abnahme des Polierwertes von lediglich 18 %. Dies zeigt, dass durch eine Erhöhung der Zufuhrate des Quarzmehl-Wasser-Gemisches eine zusätzliche Spreizung der Ergebnisse möglich ist.

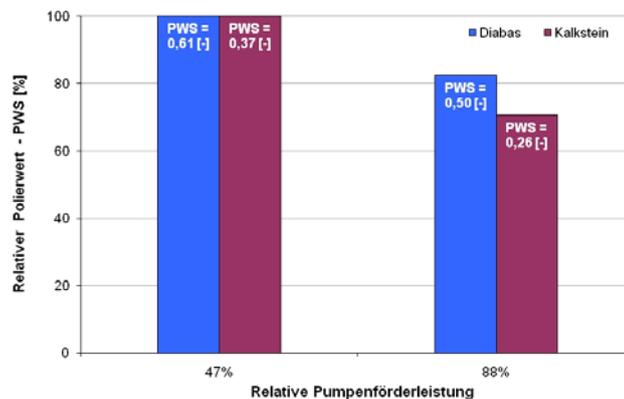


Abb. 3-11: Änderung des Polierwertes durch erhöhte Poliermittelzufuhr

In die Polierstation ist zusätzlich die Spülvorrichtung integriert, die zur Reinigung der Prüfkörper unmittelbar nach dem Poliervorgang dient. Dies ist notwendig, um die Proben von den vorhandenen Quarzmehlrückständen zu befreien, da diese das Ergebnis nachhaltig beeinflussen. Eine Polierdauer von 120 Sekunden mit einer Umdrehungsgeschwindigkeit des Polierkopfes von 100 U/min ist für das Reinigen der Probekörper in der Regel ausreichend. Die dann unter dem Mikroskop sichtbaren Quarzmehlrückstände sind vernachlässigbar gering. Da beim Spülvorgang die Polierrollen mit demselben Anpressdruck wie bei der Poliersimulation auf die Prüfkörperoberfläche drücken, werden diese zusätzlichen Überrollungen für die Gesamtüberrollungen mitgerechnet.

3.1.2.2 Prüfstation

Die Prüfstation bzw. das Laborgriffigkeitsmessgerät ist in Abstimmung mit der Poliereinrichtung für Messungen auf ebenen, kreisförmigen Prüfoberflächen eingerichtet, die einen Durchmesser von 225 mm aufweisen. Sie besteht aus einem kuppelbaren, maschinenbetriebenen Messkopf der mit drei Prüfgummis (Gleitschuhe) bestückt ist (siehe Abb. 3-12).

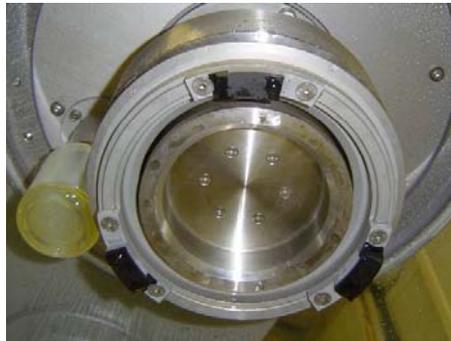


Abb. 3-12: Prüfkopf mit den Prüfgummis [Foto: KIRCHMAIER, 2007]

Die Prüfgummis bestehen aus einem 14,5 mm breiten, kreisringsegmentförmigen Metallträger mit Einspannöffnungen, auf dem eine ca. 4,5 mm dicke Gummischicht aufvulkanisiert ist, siehe Abb. 3-13.

Der Innenradius des Kreisrings beträgt 82,75 mm, der mittlere Radius der Aufstandsfläche 90 mm. Die mittlere Aufstandslänge L_m eines Prüfgummis misst 30 mm. Die gesamte Aufstandsfläche eines Gleitschuhs ist ca. 4,35 cm² groß. Das entspricht der Stollenfläche eines durchschnittlichen PKW-Reifens. Die gesamte Prüffläche beträgt bei einer Prüfbahnlänge von 565 mm je Messkopfumdrehung ca. 82 cm². Die Prüfgummis weisen eine Shorehärte von (65 ± 5) Shore A auf. Die speziell für diese Prüfung zusammengesetzte Gummimischung wird in der Literatur auch als die „Berliner Mischung“ bezeichnet.

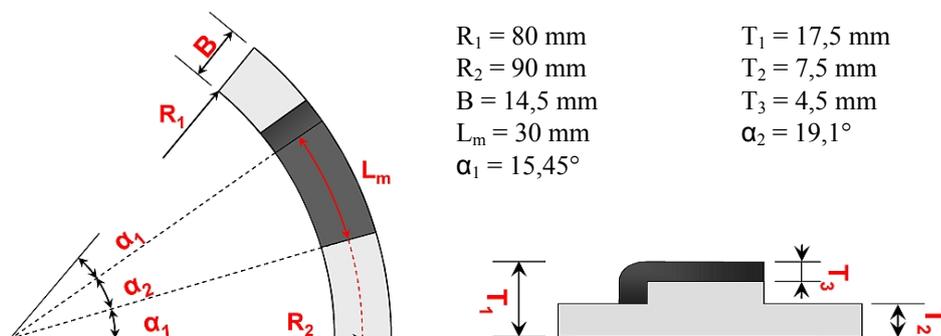


Abb. 3-13: Detailansicht eines Prüfgummis

Der mittlere Kontaktdruck der Prüfgummis auf die Probenoberfläche beträgt ca. 0,2 N/mm² (vergleichbar dem mittleren Reifeninnendruck von 2 bar bei PKW-Reifen). Dies entspricht einer Auflast von ca. 250 N. [Angaben Fa. BPS-Wennigsen]. Bei der auf der Prüfstation durchgeführten Griffigkeitsmessung handelt es sich um einen dynamischen Prozess. D.h. der Kontaktdruck ist beim ersten Auftreffen der Prüfgummis auf der Probenoberfläche höher und variiert solange bis die Prüfgummis gleichmäßig über die Probenoberfläche gleiten. Untersuchungen zum Verlauf der Auflast während des Abbremsvorganges wurden bislang nicht veröffentlicht. Ein grundsätzliches Problem der Prüfstation steckt in der fehlenden Kalibriermöglichkeit. Es gibt vom Hersteller keine exakten Angaben zur tatsächlich vorhandenen Auflast samt zugehöriger Toleranz sowie zur Überprüfung derselben.

Abb. 3-14 zeigt die Position der Prüfummis auf der zu prüfenden Oberfläche.

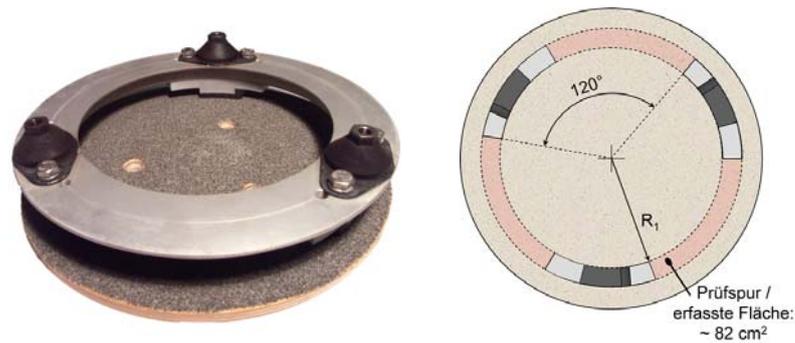


Abb. 3-14: Anordnung der Prüfummis auf der Probenoberfläche
[Foto: KIRCHMAIER und BLAB, 2010b]

Die Zufuhrate des Prüfwassers während des Abbremsvorganges beträgt 20 Liter pro Minute, wobei eine Prüfwassertemperatur von $(10 \pm 2)^\circ\text{C}$ einzuhalten ist. Die Kühlung des Prüfwassers erfolgt mit einem integrierten Kälteaggregat.

3.1.2.3 Probentisch mit Drehmomentaufnehmer

Die Polier- sowie die Prüfstation dienen zur Aufbringung einer externen Beanspruchung der Probekörper. Die messtechnische Erfassung der Poliereinwirkung sowie des Reibwertverlaufes während der Griffigkeitsmessung erfolgt beim Prüfverfahren nach Wehner/Schulze neuer Bauart elektrisch. Elektrische Einrichtungen zur Messung von mechanischen Einflussgrößen bestehen grundsätzlich aus einem Messwertaufnehmer, einem Messverstärker sowie einer Messdatenverarbeitungseinheit. Der Messwertaufnehmer wandelt die mechanische Einflussgröße, hier ein Drehmoment, in ein elektrisches Signal um und sendet es an einen Messverstärker, der das analoge, elektrische Signal filtert, verstärkt und in ein digitales Messsignal umwandelt. Das digitale Signal wird in der Regel rechnergestützt gespeichert und verarbeitet.

Bei der Wehner/Schulze Prüfanlage neuer Bauart wird für die Erfassung des einwirkenden Drehmomentes eine Referenz-Drehmomentmessscheibe des Typs TB1A mit einem Nennmoment von 200 Nm der Firma HBM³⁶ verwendet. In Abb. 3-15 wird der geschlossene Probentisch (links) sowie der geöffnete Probentisch mit eingebauter Referenz-Drehmomentmessscheibe (rechts) dargestellt.



Abb. 3-15: Verfahrenbarer Probentisch im Betriebszustand (links), Geöffneter Probentisch mit Darstellung der eingebauten Referenz-Drehmomentmessscheibe

³⁶ Hottinger Baldwin Messtechnik. www.hbm.com/de

Die verwendete Referenz-Drehmomentmessscheibe weist eine sehr hohe mechanische Belastbarkeit auf und ist relativ unempfindlich gegenüber zusätzlich auftretende Axialkräfte (durch den Anpressdruck des Polier- bzw. Prüfkopfes). Vom Hersteller werden die Drehmomentaufnehmer werkseitig mit einem 3 oder 1 Meter langem Kabel ausgeliefert und je nach Kabellänge gesondert kalibriert. Bei der Prüfanlage nach Wehner/Schulze neuer Bauart, ist die benötigte Kabellänge vom Drehmomentaufnehmer bis zum Messverstärker jedoch länger, weswegen eine Verlängerung des Kabels notwendig ist. Wichtig hierbei ist, dass eine Veränderung der Kabellänge eine Veränderung des Kennwertes des Aufnehmers zur Folge hat.

Bei dem verwendeten Messverstärker zur Umwandlung des elektrischen Signals in ein digitales Signal handelt es sich um ein von der Fa. BPS-Wennigsen konzipiertes Bauteil über dessen Funktionsweise vom Hersteller keine Informationen zur Verfügung gestellt wurden.

Die Datenaufzeichnung und –Auswertung erfolgt rechnergestützt mit einem Tabellenverarbeitungsprogramm, siehe dazu Abschnitt 3.1.4.3.

3.1.3 Probekörperherstellung

Mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze können Griffigkeitsuntersuchungen an Sand-, Splitt- sowie Asphalt- und Betonprobekörpern durchgeführt werden. Die Sandprobekörperherstellung erfolgt durch das Einrieselverfahren, welches im Abschnitt 3.1.3.1 detaillierter erläutert wird. Für die Herstellung der Splittprobekörper, siehe Abschnitt 3.1.3.2 werden zurzeit zwei unterschiedliche Verfahren angewandt. Dazu zählen das Mosaikauslege- und das Mastixeingussverfahren. In Abb. 3-16 sind sowohl Probekörper für das Sandeinrieselverfahren (a), das Mastixeingussverfahren (b), das Mosaikauslegeverfahren (c) als auch ein Asphaltbohrkern (d) dargestellt.

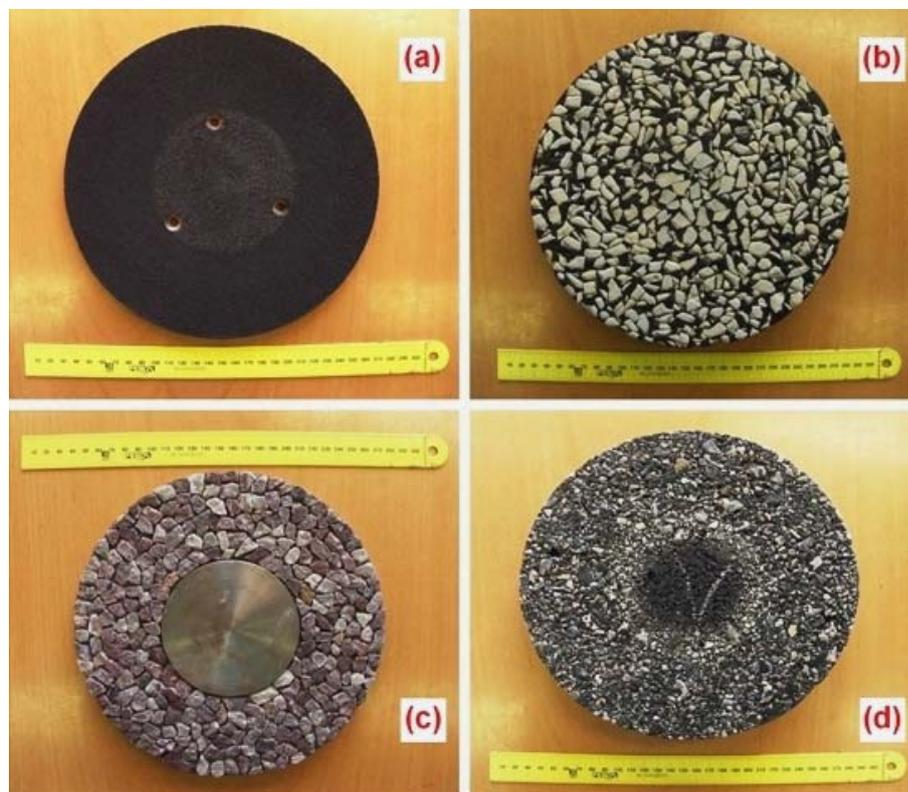


Abb. 3-16: (a) Sandprobekörper, (b) Splittprobekörper nach dem Mastixeingussverfahren, (c) Splittprobekörper nach dem Mosaikauslegeverfahren, (d) Asphaltprobekörper
[Foto: KIRCHMAIER et al., 2010c]

3.1.3.1 Sandprobekörper

Der Herstellung der Probekörper kommt bei der Prüfung nach Wehner/Schulze eine sehr große Bedeutung zu. Generell erfordert das Herstellen von homogenen, ebenen Oberflächen Übung und ist mit besonderer Sorgfalt durchzuführen. Nachfolgend wird das Verfahren zur Herstellung von Sandprüfplatten nach der Berliner Methode, auch Sand-Aufklebeverfahren genannt, kurz beschrieben.

Die für die Prüfung vorgesehene Gesteinsfraktion wird durch Nasssiebung aus der angelieferten Korngruppe gewonnen und dadurch von den anhaftenden Feinteilen befreit. Das Entfernen der Feinteile ist auch deshalb notwendig, um das Haftvermögen zwischen Gesteinskorn und Holzträgerplatte nicht zu beeinträchtigen. Nach Trocknung der ausgesiebten Kornklasse bis zur Massenkonstanz bei $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ ist diese nochmals einer Trockensiebung zu unterziehen. Pro Prüfplatte sind ca. 100 g der zu untersuchenden Fraktion aufzubereiten.

Für die Prüfung von Sanden werden Holzträgerplatten aus Sperrholz mit einem Durchmesser von 225 mm benötigt. Die Trägerplatten bestehen aus einer ca. 9 mm dicken Sperrholzplatte mit drei Bohröffnungen ($\varnothing 6$ mm, Lochabstand 76 mm, siehe Abb. 3-17 links), welche beidseitig und an den Rändern mit einer klaren Holzschutzlasur zu versiegeln sind. Das Versiegeln der Trägerplatte verhindert das Aufsaugen des Klebers durch die Holzplatte und erhöht dadurch den Haftverbund zwischen Gestein und Holzplatte. Probepplatten mit unversiegelter beziehungsweise unzureichend versiegelter Oberfläche weisen nach der Versuchsdurchführung mit der W/S-Prüfanlage das in Abb. 3-17 rechts dargestellte Schadensbild auf.

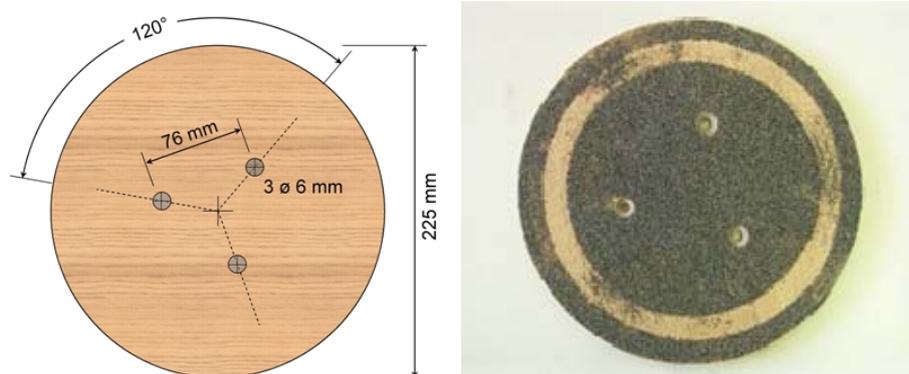


Abb. 3-17: Abmessungen der Holzträgerplatte bzw. Schadensbild einer nicht versiegelten Holzträgerplatte nach der Wehner/Schulze Prüfung [Foto: KIRCHMAIER, 2007]

Die Plattenoberfläche wird zunächst mit einem 2-Komponenten Kleber dünn und gleichmäßig bestrichen und anschließend mit der Prüfkörnung bestreut. Die Prüfkörnung ist dabei aus einem Sieb mit einer Maschenweite etwas größer als das Größtkorn auf die mit Klebstoff bestrichene Holzplatte einzurieseln und kräftig mit einer Handgummiwalze in Längs- und Querrichtung einzuwalzen. Dieser Vorgang wird mehrmals wiederholt. Es ist darauf zu achten, dass kein Kleber an die Prüfoberfläche tritt, wie dies bei zu dick aufgetragenem Kleber vorkommt. Nach der Aushärtung des Klebers werden die nicht gebundenen Körner abgebürstet. Abb. 3-18 zeigt den gesamten Ablauf der Probekörperherstellung.

Die fertigen Einzelmessproben dürfen keine deutlich erkennbaren Kleberanhäufungen in der Prüfspur aufweisen. Diese sind durch weiße Stellen auf der Probe erkennbar. Solche Proben müssen verworfen werden.



Abb. 3-18: Fotodokumentation der Probekörperherstellung [Fotos: KIRCHMAIER et al., 2010c]

3.1.3.2 Splittprobekörper

Die Beurteilung der Polierresistenz von Splitten mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze erfolgt an der Korngruppe 8/11 mm. Dafür ist eine repräsentative Laboratoriumsprobe zu waschen und Über- sowie Unterkorn abzusieben. Die aufbereitete Probe ist anschließend bei $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ zu trocknen.

Für die Herstellung der Splittprobekörper wurden in Deutschland zwei Verfahren entwickelt. Dazu zählen das Mosaikauslegeverfahren und das Splitt-Mastix-Eingussverfahren. Die Herstellungsmethodik und die jeweiligen Vor- und Nachteile werden in diesem Abschnitt erläutert.

Mosaikauslegeverfahren

Für das Mosaikauslegeverfahren benötigt man kreisrunde Schalformen mit einem Durchmesser von 225 mm und einer Wandhöhe von ca. 20 mm. Die Schalform kann mit einem Platzhalter versehen werden, um die mit Körnern auszulegende Fläche zu verkleinern und um den Klebstoffbedarf für späteren Verfüllvorgang zu reduzieren. In diese Schalformen werden von Hand die gewaschenen und somit staubfreien Körner eingelegt. Dazu sind die Körner mit ihrer ebensten Fläche nach unten, möglichst dicht nebeneinander einzulegen, jedoch ohne dass sie sich berühren. Es ist besonders auf eine möglichst verzahnte bzw. willkürliche Anordnung der Gesteinskörner zu achten, um eine repräsentative Prüfoberfläche zu erhalten, siehe Abb. 3-19.



Abb. 3-19: Auslegen und Verfüllen der Splittkörner

Im nächsten Arbeitsschritt werden die Freiräume bzw. Spalten zwischen den ausgelegten Körnern mit einem rieselfähigen Sand der Kornklasse 0,2/0,4 mm verfüllt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Körner nicht verschoben und angehoben werden. Die Verfüllhöhe mit feinem Sand muss einerseits so hoch sein, dass im anschließenden Klebeprozess kein Klebstoff bis an die Auflagefläche durchdringt, andererseits muss gewährleistet sein, dass alle eingelegten Splittkörner ausreichend tief in der Klebstoffmastix verankert sind. Dazu sind die Zwischenräume zu ca. 2/3 ihrer Höhe mit Sand zu füllen. In Abb. 3-20 ist eine Schemaskizze mit Darstellung der Verfüllhöhe im eingeschalteten Zustand und nach Fertigstellung des Probekörpers dargestellt.

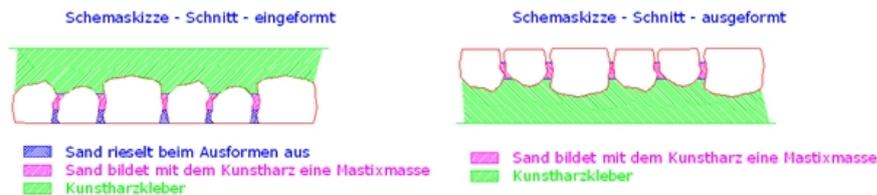


Abb. 3-20: Skizzenhafter Querschnitt eines Probekörpers hergestellt nach dem Mosaikauslegeverfahren

Nach dem Verfüllen mit Sand wird ein mit Quarzmehl vermengter Klebstoff in zwei Lagen aufgebracht. Als Klebstoff eignet sich ein 2-Komponenten Epoxydharz Klebstoff. Die 1. Lage soll sehr zähflüssig sein, um ein Durchdringen an die spätere Prüboberfläche zu verhindern. Die 2. Lage soll dünnflüssig sein, sodass sich die eingebrachte Klebstoffmasse von selbst nivelliert und eine ebene, spätere Prüfkörperunterseite entsteht. In Abb. 3-21 ist das Einfüllen und der fertig verfüllte Probekörper während der Aushärtephase dargestellt.



Abb. 3-21: Auffüllen der Schalform mit einem Klebstoff-Quarzmehl Gemisch

Nach dem Aushärten des Klebstoffes ist der Probekörper auszuschalen und mit Druckluft von lose anhaftenden Sandkörnern zu befreien. An der Prüfoberfläche dürfen insbesondere in der Messspur der Prüfgummis keine Kleberanhäufungen vorhanden sein. Fertige Prüfkörper mit und ohne einem eingelegtem Platzhalter sind in Abb. 3-22 dargestellt.



Abb. 3-22: Splittprobekörper mit und ohne eingelegtem Platzhalter nach dem Mosaikauslegeverfahren

Splitt-Mastix-Eingussverfahren

Beim Splitt-Mastix-Eingussverfahren werden ca. 20 cm hohe, zylindrische Splitt-Asphalt-Proben hergestellt und anschließend in ca. 5 cm dicke, kreisrunde Scheiben geschnitten und die Oberflächen aufgeraut.

Für die Herstellung benötigt man außer einer zylindrischen Metallschalung mit einer Höhe von ca. 200 mm und einem Innendurchmesser von 225 mm, siehe Abb. 3-23, eine im Labor hergestellte Asphaltmastix, welche zu ca. 70 M-% aus Kalksteinmehl (Füller) und zu 30 M-% aus einem herkömmlichen Straßenbaubitumen der Sorte 20/30 besteht.



Abb. 3-23: Zylindrische Metallschalung für die Probenherstellung

Die Asphaltmastix und die von Feinteilen befreite Splittkörnung 8/11 wird auf ca. 200 bis max. 230 °C in einem Trockenschrank erhitzt. Die auf der Innenseite mit Formtrennmittel bestrichene Metallzylinderschalung wird auf eine Rüttelplatte gestellt und zu ca. 1/3 ihrer Höhe mit Gestein befüllt. Durch Rütteln auf der Rüttelplatte wird das Gestein in eine möglichst dichte Lagerung gebracht. Anschließend wird unter ständigem Rütteln Asphaltmastix eingefüllt, bis eine vollständige Mastixausfüllung der Gesteinshohlräume erreicht wird. Diese Arbeitsschritte werden 2-Mal wiederholt bis der ganze Zylinder mit Gestein und Asphaltmastix gefüllt ist.

Nachdem der Splitt-Mastix-Zylinder erkaltet ist, wird er mit einer Diamantsäge in 4 - 5 cm dicke, planparallele Scheiben geschnitten. Die Schnittflächen dürfen keine Stufen oder Riefen aufweisen und sind gegebenenfalls nachzuschleifen. Die Proben werden anschließend gereinigt und bei (5 ± 3) °C gelagert. Vor der eigentlichen Wehner/Schulze Prüfung müssen die durch das Schneiden glatten Probenoberflächen in weiterer Folge durch dosiertes Sandstrahlen aufgeraut werden. Durch das Behandeln in einer Sandstrahlkabine werden die Gesteinskörner einerseits von der umgebenden Mastix befreit und andererseits wieder aufgeraut und versucht, die ursprüngliche Ausgestaltung der Bruchflächen wieder herzustellen. In Abb. 3-24 sind zwei nach dem Splitt-Mastix-Eingussverfahren hergestellte Probekörper dargestellt.



Abb. 3-24: Splittprobekörper hergestellt nach dem Splitt-Mastix-Eingussverfahren

Diskussion der beiden Herstellungsverfahren

Beide Verfahren der Splittprobekörperherstellung haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile, welche in diesem Abschnitt diskutiert werden sollen.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist vor allem die Dauer der Probekörperherstellung und der nachfolgenden Prüfung relevant. Aus technischer Sicht sind einerseits die Abbildung von realen Zuständen bei der Laborprüfung und andererseits die Reproduzierbarkeit von Prüfergebnissen von Bedeutung. Für die Reproduzierbarkeit, also der Wiederhol- und Vergleichbarkeit von Prüfergebnissen der Polierwertbestimmung an Splitten wird an dieser Stelle auf Kapitel 4.2 verwiesen.

a) Dauer der Probekörperherstellung

Da die Gesteinsaufbereitung und die eigentliche Prüfung der Probekörper sowohl beim Mosaikauslege- als auch beim Splitt-Mastix-Eingussverfahren demselben Ablauf folgen, hat lediglich die Probenherstellung einen Einfluss auf die wirtschaftliche Betrachtung der Prüfdurchführung. Für das Aufbereiten der Gesteinskörnung sind ca. zwei Stunden zu veranschlagen. Die maschinentechnische Prüfdurchführung bei der Bestimmung des Polierwertes der Splittkörnung mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze gemäß Kapitel 3.1.5 dauert insgesamt drei Stunden. Somit fallen je Splittkörnung insgesamt fünf Stunden für die Probenaufbereitung und für die Prüfdurchführung an zwei Probekörpern an.

Das Auslegen der Gesteinskörner in die Schalform mit dem anschließenden Verfüllen der Gesteinszwischenräume beim Mosaikauslegeverfahren ähnelt der Probenherstellung des in Kapitel 3.2 beschriebenen Verfahrens mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät. Dieser Vorgang ist bedingt durch die große Prüffläche sehr langwierig und erfordert hohe Sorgfalt. Die Dauer der Herstellung eines Probekörpers inkl. des Einfüllens des Klebstoffes und der Nachbearbeitung beträgt konservativ geschätzt ca. vier Stunden. Zur Erzeugung von zwei fehlerlosen Probekörpern benötigt man somit insgesamt maximal acht Stunden.

Für die Herstellung der Probekörper nach dem Splitt-Mastix-Eingussverfahren sind zwar mehr Prüfhilfsmittel (Straßenbaubitumen, Diamantsäge, Strahlkabine) notwendig als beim Mosaikauslegeverfahren, insgesamt ist die Dauer der Probekörperherstellung jedoch kürzer. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens ist, dass aus einem ca. 20 cm hohen Splitt-Mastix-Zylinder durch zwei Schnitte mit der Diamantsäge zumindest drei Scheiben abgeschnitten werden können. Somit stehen für das anschließende Sandstrahlen und Prüfen insgesamt vier Schnittflächen zur Verfügung. Dadurch sind in der Regel vier repräsentative Prüfoberflächen aus lediglich einem Zylinder erzielbar. Inklusive Prüfmittelvorbereitung, dazu zählt u. a. das Mischen der Asphaltmastix, sowie Schneiden und Sandstrahlen sind für einen Probekörper ca. zwei Stunden zu veranschlagen. Für die Erzeugung von zwei Probenflächen fallen somit insgesamt ca. vier Stunden an.

Der Prüfaufwand nach dem Splitt-Mastix-Eingussverfahren ist mit insgesamt neun Stunden um vier Stunden bzw. um 30 % kürzer als beim Mosaikauslegeverfahren. Der relative Anteil der Dauer der Probenherstellung an der gesamten Prüfdauer beträgt beim Mosaikauslegeverfahren ca. 62 %, beim Splitt-Mastix-Eingussverfahren hingegen nur ca. 44 %.

In Tab. 3.1 sind der Zeitaufwand und die geschätzten Personalkosten³⁷ für die gesamte Prüfdurchführung für die beiden Probekörperherstellungsverfahren einander gegenübergestellt. Diese Kostenschätzung inkludiert lediglich die anfallenden Zeitkosten, jedoch keine

³⁷ Basierend auf einer produktiven Jahresarbeitszeit von 1600 Stunden wurde für einen Labortechniker mit einem Stundensatz von € 21 die Kostenschätzung durchgeführt.

Kosten für die benötigten Prüfmittel und für die Abschreibung der Maschinenanlagen. Die Personalkosten für die gesamte Prüfung nach dem Mosaikauslegeverfahren betragen € 273 (Preisstand 2010). Für das Splitt-Mastix-Eingussverfahren errechneten sich anfallende Personalkosten in der Höhe von € 189. Aufgrund von wirtschaftlichen Überlegungen ist somit das Splitt-Mastix-Eingussverfahren zu bevorzugen.

Tab. 3.1: Vergleich des Personalaufwandes der beiden Herstellungsverfahren

<i>Herstellungsverfahren</i>	<i>Zeitaufwand [h]</i>				<i>Personalkosten für die Prüfung [€] (Stand: 2010)</i>
	<i>Steinaufbereitung</i>	<i>Probenherstellung</i>	<i>Prüfdurchführung</i>	<i>Gesamtdauer</i>	
<i>Mosaikauslegeverfahren</i>	2	8	3	13	273
<i>Splitt-Mastix-Eingussverfahren</i>	2	4	3	9	189

b) Bezug der Prüfoberflächen zum realen Straßenzustand und zu anderen Prüfverfahren

Durch das händische Auslegen der Gesteinskörner in die Schalform beim Mosaikauslegeverfahren besteht die Gefahr, dass eine für das Gestein nicht repräsentative Prüfoberfläche entsteht. Dieser Effekt ist aufgrund der sehr großen Prüffläche jedoch nur in einem sehr geringen Ausmaß zu erwarten. Bedingt durch die Vorgaben bei der Prüfkörperherstellung werden die Gesteinskörner beim Mosaikauslegeverfahren immer mit einer möglichst ebenen Fläche in die Schalform gelegt. Dies entspricht nicht der realen, willkürlichen Ausrichtung der Gesteinskörner beim Mischguteinbau. Dieses Einlegeverfahren garantiert jedoch, dass tatsächlich die Polierresistenz der Gesteinskörnung bzw. die Widerstandsfähigkeit der real vorhandenen Mikrorauheiten der Bruchflächen gegenüber einer Polierbeanspruchung bestimmt wird.

Das Mosaikauslegeverfahren erzeugt Prüfoberflächen, welche jenen der in Kapitel 3.2.3 erläuterten Prüfoberflächen ähneln. Dadurch ist es möglich einen direkten Vergleich dieser beiden Verfahren anzustellen.

Beim Splitt-Mastix-Eingussverfahren wird durch das Verdichten bzw. Rütteln beim Vermischen des Splittes mit der Asphaltmastix einerseits eine willkürliche Lagerung der Splittkörner, aber andererseits auch ein repräsentatives Spektrum der Gesteinskörner in der Probe gewährleistet. Durch das Schneiden und somit Erzeugen von glatten Flächen werden die vorhandenen Mikrorauheiten der Bruchflächen zerstört. Durch das Sandstrahlen wird zwar eine der realen Asphaltstraßenoberfläche ähnliche Oberflächenbeschaffenheit nachempfunden, dennoch entspricht der Aufraueffekt der Bruchflächen nicht den tatsächlichen Zuständen.

Ein weiterer zu erwähnender negativer Faktor bei der Probenherstellung nach dem Splitt-Mastix-Eingussverfahren ist der durch das Schneiden und Sandstrahlen der Probenoberflächen zusätzlich geschaffene Einflussfaktor der Probenbehandlung auf das Prüfergebnis. So können beim Schneiden leichte Stufen bzw. Unebenheiten entstehen. Zusätzlich besteht beim Sandstrahlen die Gefahr, dass durch Druckschwankungen, unregelmäßigen Strahlabstand, verunreinigtes Strahlmittel, etc. der Aufraueffekt nicht bei allen Proben gleich erzielt wird, wodurch die Prüfgenauigkeit durch zusätzliche Streuungen beeinträchtigt wird.

Da vor allem die Mikrorauheit der Bruchflächen sowie das natürliche Bruchverhalten aufgrund der Mineralogie die Polierresistenz beeinflussen, erscheint für eine korrekte Beurteilung des Polierwertes einer Splittkörnung das Mosaikauslegeverfahren als geeigneter.

3.1.4 Sandpolierprüfung gemäß RVS 11.06.23:2005

Die Ermittlung des Polierwertes PWS erfolgt bei der Gesteinsprüfung grundsätzlich in zwei Teilschritten:

- Verkehrssimulation
- Griffigkeitsmessung

Zusätzlich muss vor der Prüfung einer Einzelmessprobe noch die Tauglichkeit des verwendeten Prüfgummisatzes kontrolliert werden. Dies erfolgt auf einer Kontrolloberfläche. Bisher wird als Kontrolloberfläche eine Glasoberfläche mit einem sehr niedrigen Reibwert, im Bereich von 0,095 bis 0,115 [-] herangezogen. Gemäß der RVS 11.06.23:2005 muss der für die Prüfung einer Einzelmessprobe verwendete Prüfgummisatz im Neuzustand innerhalb dieser Bandbreite liegen. Gebrauchte Prüfgummisätze dürfen gemäß der Festlegung dieser Richtlinie maximal um 10 % vom Neuzustand abweichen. Ergebnisse einer Untersuchung zur Überprüfung dieser Festlegung sind in Kapitel 4.6.4 angeführt.

3.1.4.1 Verkehrssimulation

Gemäß RVS 11.06.23:2005 sind die Sandprobekörper einer Polierbeanspruchung von 90.000 Überrollungen auszusetzen. Dazu werden die Einzelmessproben horizontal auf einer Einspannvorrichtung befestigt und bei (500 ± 5) U/min eine Stunde lang poliert. Nach dem Polieren wird die Probenoberfläche für ca. 120 Sekunden mit Wasser gründlich von Poliermittel und Abrieb gereinigt. Die Reinigung der Probenoberfläche erfolgt mit einer Umdrehungsgeschwindigkeit von (100 ± 5) U/min, wodurch eine zusätzliche, wenn auch vernachlässigbar geringe, Polierbeanspruchung der Proben von ca. 600 Überrollungen stattfindet.

3.1.4.2 Griffigkeitsmessung

Bei Messbeginn werden die Prüfgummis in abgehobenem Zustand auf eine Umlaufgeschwindigkeit von 100 km/h beschleunigt. Bei Erreichen der maximalen Geschwindigkeit beginnt die Beaufschlagung der Probenoberfläche mit 20 l/min des auf $(10 \pm 2)^\circ\text{C}$ temperierten Prüfwassers. Nach Abschalten des Antriebs wird der Prüfkopf mit den Prüfgummis durch das Eigengewicht auf die bewässerte Probenoberfläche abgesenkt, wo er bis zum Stillstand abgebremst wird. Beim Abbremsen entstehen zwischen den drei Prüfgummis und der Prüfoberfläche horizontale Reibungskräfte (F_x), welche ein Drehmoment (M_D) erzeugen. Das erzeugte Drehmoment wird über die fest montierte Probeneinspannvorrichtung auf den Probentisch übertragen, wo es während des Abbremsvorganges über den gesamten Geschwindigkeitsbereich von der Referenz-Drehmomentmessscheibe aufgezeichnet wird. Das zugehörige statische System ist in Abb. 3-25 dargestellt.

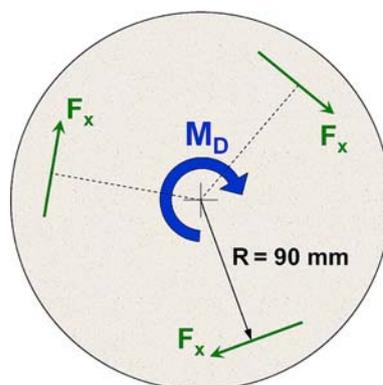


Abb. 3-25: Statisches System bei der Griffigkeitsmessung

Mithilfe des bekannten Auflastgewichtes sowie dem Abstand der Prüfummis zum Drehmittelpunkt wird anschließend auf den Reibungswert (μ) rückgerechnet. Die Berechnung erfolgt nach (3.1).

$$M_D = 3 \cdot R \cdot F_x \text{ [Nm] mit}$$

$$\mu = \frac{3 \cdot F_x}{F_z} \text{ [-] folgt} \quad (3.1)$$

$$\mu = \frac{M_D}{R \cdot F_z} \text{ [-]}$$

M_D Aufgezeichnetes Drehmoment mittels Referenz-Drehmomentmessscheibe

R Abstand zum Drehpunkt (= 0,09 m)

F_x aktivierte Horizontalkraft an einem Gleitschuh

F_z einwirkende Vertikalkraft zufolge Auflast (= 250 N)

μ Reibungsbeiwert

3.1.4.3 Ermittlung des Polierwertes nach Wehner/Schulze

Zum Ablesen des Messwertes einer Einzelmessprobe wird der während der Prüfung aufgezeichnete Reibwertverlauf durch ein Polynom 6. Ordnung angenähert. Auf dieser angenäherten Messkurve erfolgt dann bei 60 km/h die Ablesung des Prüfwertes. Die durchgeführte Glättung des Reibwertverlaufes wird in den folgenden Schritten erklärt.

Bei der Ermittlung des PWS für eine Probe werden über den gesamten Geschwindigkeitsbereich während des Bremsvorganges (100 bis 0 km/h) Reibwerte berechnet und aufgezeichnet. Die in Abb. 3-26 deutlich zu erkennenden Schwankungen im Reibwertverlauf ergeben sich einerseits aus dem vorhandenen Filterrauschen der Drehmomentaufnahme, und andererseits aus dem prüftechnisch bedingten „Hüpfen“ der Messgummis während des Abbremsens.

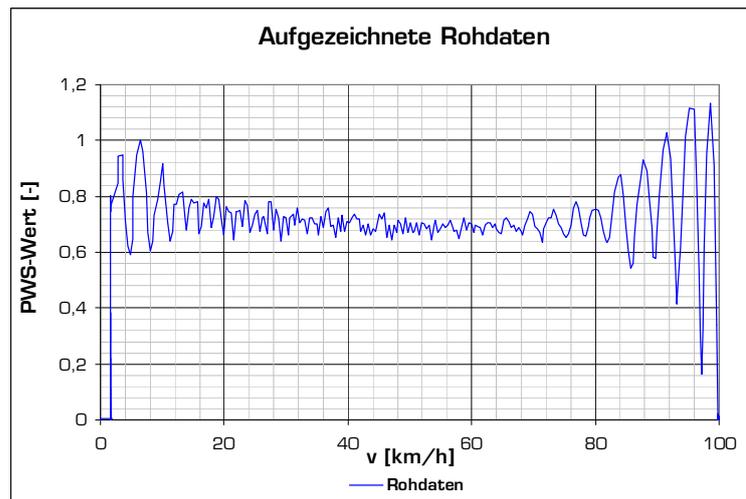


Abb. 3-26: Rohdaten der Griffigkeitsmessung mit dem Prüfgerät nach Wehner/Schulze

Dieser „Hüpf-Effekt“ resultiert einerseits aus dem Aufprall des Prüfkopfes auf die Probenoberfläche – die Prüfummis werden frei fallend aus einer konstanten Höhe auf die Probenfläche abgesenkt – andererseits aus dem 100 %-igen Schlupf, welcher dem Prinzip des blockierten Messrades entspricht. Ein ähnlicher Effekt entsteht beim Verschieben eines Tisches,

dessen Tischbeine beim Überwinden der Haftreibung³⁸ und dem Übergang zur Gleitreibung³⁹ ebenfalls eine ruckartige Vorwärtsbewegung durchführen.

Zur weiteren Auswertung werden durch die Auswertesoftware des Geräteherstellers in Folge die aufgezeichneten Rohdaten im Geschwindigkeitsbereich von 95 bis 5 km/h durch ein Polynom 6. Ordnung angenähert. Das Polynom ergibt sich in der Form:

$$y = \sum_{i=1}^{i=7} a_i \cdot x^{(i-1)} \quad (3.2)$$

Für die Näherung wird ein Polynom 6. Grades verwendet, da es die höchste von Microsoft Excel berechenbare Polynomfunktion ist. In der Regel wird mit einem Polynom 6. Ordnung jedoch der tatsächliche Verlauf sehr gut abgebildet. Durch die mathematische Näherung wird gewährleistet, dass die aufgezeichneten Messwerte der einzelnen Proben untereinander vergleichbar werden, da die prüf- und messtechnisch bedingten Extremwerte gemittelt werden.

In Abb. 3-27 ist die mathematische Annäherung der Rohdaten mit Angabe des Polynoms 6. Ordnung und des zugehörigen Bestimmtheitsmaßes dargestellt.

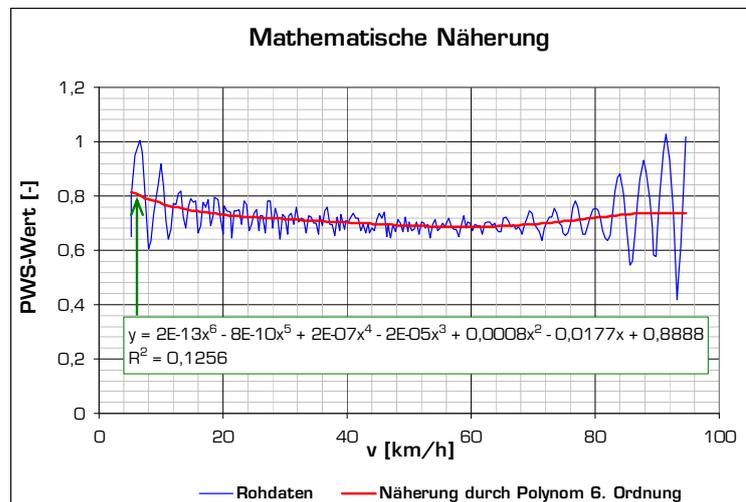


Abb. 3-27: Mathematische Näherung durch Polynom 6. Ordnung

Der PWS einer Oberfläche ist jener Wert, der sich bei 60 km/h am Schnittpunkt mit der angenäherten Gleitreibungskurve ergibt, siehe Abb. 3-28.

Für die Polierwertbestimmung eines Sandes werden gemäß RVS 11.06.23:2005 die Reibwerte von zwei Einzelmessproben herangezogen und deren Mittelwert gebildet. Die maximale Spannweite zwischen den zwei Einzelmessproben darf einen Wert von 0,03 [-] nicht übersteigen. Der so berechnete Polierwert ist auf zwei Dezimalstellen anzugeben und wird laut RVS 11.06.23:2005 als PWS-F⁴⁰ bezeichnet.

³⁸ Haftreibung ist eine physikalische Kraft, die zwei sich berührende Körper daran hindert, sich gegeneinander zu verschieben. Zur Aktivierung dieser Kraft muss die Berührungsfläche dieser zwei Körper unter einem Druck stehen, der in der Regel durch das Eigengewicht der Körper erzeugt wird. Es wirkt also eine Normalkraft auf die Berührungsfläche.

³⁹ Gleitreibung tritt an Kontaktflächen zweier Körper auf, die sich gegeneinander bewegen. Sie ist kleiner als die Haftreibung bei gleicher einwirkender Normalkraft.

⁴⁰ Polierwert Wehner/Schulze von feinen Gesteinskörnungen.



Abb. 3-28: Ablesen des PWS aus dem geglätteten Reibwertverlauf

Die Bezeichnung PWS-F ist für die Prüfkornklasse 0,2/0,4 mm vorbehalten. Da in der gegenständlichen Arbeit jedoch neben der Fraktion 0,2/0,4 mm noch andere Prüfkörnungen für die Sandpolierwertbestimmung herangezogen wurden, ist die Bezeichnung PWS-F alleine nicht ausreichend. Deshalb wird bei dem mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze ermittelten Polierwert einer Sandkörnung auf den Zusatz F verzichtet und zusätzlich die geprüfte Fraktion im Index angegeben. So wird der Polierwert eines Sandes bestimmt an der Fraktion 0,63/1,0 mm als $PWS_{0,63/1,0}$ bezeichnet. Dies soll gewährleisten, dass die PWS-Werte eindeutig voneinander unterschieden werden können.

3.1.5 Durchführen der Splittpolierprüfung

Für die Bestimmung des Polierwertes von Splitten mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze gibt es in Österreich noch keine eigene Prüfvorschrift. In Deutschland hingegen wurde dieses Verfahren für die Bestimmung der Splittpolierresistenz bereits in die nationalen Prüfvorschriften, TP Gestein-StB Teil 5.4.2 [FGSV, 2008], aufgenommen.

Zur Gewährleistung gleichartiger Prüfbedingungen wurden im Rahmen dieser Arbeit die nach dem Mosaikauslegeverfahren hergestellten Splittprobekörper in derselben Weise einer Polierbeanspruchung und einer anschließenden Griffigkeitsbestimmung unterzogen, wie in Kapitel 3.1.4 angeführt. Die Probekörper hergestellt nach dem Splitt-Mastix-Eingussverfahren sind vor der eigentlichen Prüfung in der Wehner/Schulze Anlage jedoch durch dosiertes Sandstrahlen in einer Sandstrahlkabine zu behandeln.

3.2 Schnellpoliermaschine – Verfahren zur Bestimmung des PSV

Das weltweit verbreitetste Verfahren zur Bewertung der Polierresistenz von Gesteinskörnungen ist das Verfahren zur Bestimmung des PSV (PSV = Polished Stone Value), welches bereits seit vielen Jahren im Einsatz ist. Dieses Prüfverfahren wird aufgrund des zu bestimmenden Kennwertes auch als das PSV-Verfahren bezeichnet. Der PSV ist ähnlich dem PWS ein Maß für die Widerstandsfähigkeit eines Mineralstoffes gegen die polierende Wirkung von Gummireifen unter im Labor simulierten Bedingungen, wie sie auf der Straße vorherrschen.

3.2.1 Entwicklung des Prüfverfahrens

In vielen Ländern Europas wurde nach dem 2. Weltkrieg an der Messung und Bewertung der Straßengriffigkeit geforscht. So entstanden zu dieser Zeit viele verschiedene, vorwiegend dynamische Messgeräte, die für den Einsatz auf der Straße gedacht waren. Ein stationäres Gerät wurde in Frankreich entwickelt und ist als das Pendelgerät von Leroux bekannt.

Durch die nach 1950 stark zunehmende Verkehrsbelastung sowie die immer höher werdenden Geschwindigkeiten wurde in Großbritannien mit der Erforschung des Zusammenhangs zwischen verwendeten Gesteinskörnungen und der auf der Straße vorhandenen Griffigkeit begonnen. Dafür wurde vom damaligen Transport and Road Research Laboratory⁴¹ (TRRL) in England das Laborverfahren mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät entwickelt. Das Pendelgerät entspricht dabei dem bereits in Frankreich und in Deutschland getesteten Messsystem. 1967 wurde in Großbritannien das vom TRRL konzipierte Prüfverfahren erstmals in die nationale Normung aufgenommen und erschien als ein wesentlicher Teil der BS 812⁴². Nach diversen Überarbeitungen in den Jahren 1975⁴³ und 1989⁴⁴ wurde dieses Verfahren schließlich für die europäische Normung vorgeschlagen. In diese aufgenommen erschien im Jahr 1997 erstmalig das österreichische Umsetzungsdokument, die ÖNORM EN 1097-8 „Bestimmung des Polierwertes“. In den Folgejahren wurde in den einschlägigen Österreichischen Anforderungsnormen für Asphaltmischgut bzw. für Oberbeton schrittweise der Nachweis des Polierwertes von Gesteinskörnungen gemäß diesem Verfahren gefordert.

3.2.2 Bestandteile der Prüfeinrichtung

Ähnlich dem Wehner/Schulze Verfahren erfolgt die Bestimmung der Polierresistenz von Gesteinskörnungen mit dem PSV-Verfahren in zwei separaten Prüfschritten mit zwei unterschiedlichen Prüfgeräten. Dazu gehören ein Poliersimulator und ein Griffigkeitsmessgerät. Da das Prüfverfahren in der EN 1097-8 hinreichend genau beschrieben ist, werden hier nur die wesentlichsten Eckdaten der Prüfgeräte angeführt.

⁴¹ Das TRRL wurde in Transport and Research Laboratory - TRL umbenannt.

⁴² Britisch Standard, BS 812:1967 – Methods for the sampling and testing of mineral aggregates, sands and fillers.

⁴³ Erschien als BS 812:Part 3:1975 – Testing aggregates. Methods for determination of mechanical properties.

⁴⁴ Erschien als BS 812-114:1989 – Testing aggregates. Method for determination of the polished-stone value.

3.2.2.1 Poliersimulator

Die Simulation der Polierwirkung von Fahrzeugreifen erfolgt mit der Schnellpoliermaschine, siehe Abb. 3-29. Dabei werden die gemäß Kapitel 3.2.3 hergestellten Probekörper auf das Straßenrad (früher auch als Prüfrad bezeichnet) montiert und unter Zugabe eines Poliermittels durch das Polierrad beansprucht. Das Straßenrad hat einen äußeren Durchmesser von 400 mm. Als Polierrad wird ein Vollgummireifen mit einem Durchmesser von 200 mm und einer Breite $b = 38$ mm verwendet. Die Shorehärte des zu verwendenden Polierrads hat im Ausgangszustand (69 ± 3) zu betragen. Der Vollgummireifen wird während der Poliersimulation mit einer Anpresskraft von (725 ± 10) N gegen die Prüfkörper gepresst. Der bei diesem Verfahren aufgebrachte Kontaktdruck zwischen Polierrad und Prüfkörper ist mit ca. $1,2 \text{ N/mm}^2$ dreimal höher als jener beim Verfahren nach Wehner/Schulze. Das Straßenrad dreht sich während der Versuchsdurchführung mit einer Umdrehungsgeschwindigkeit von 320 U/min.

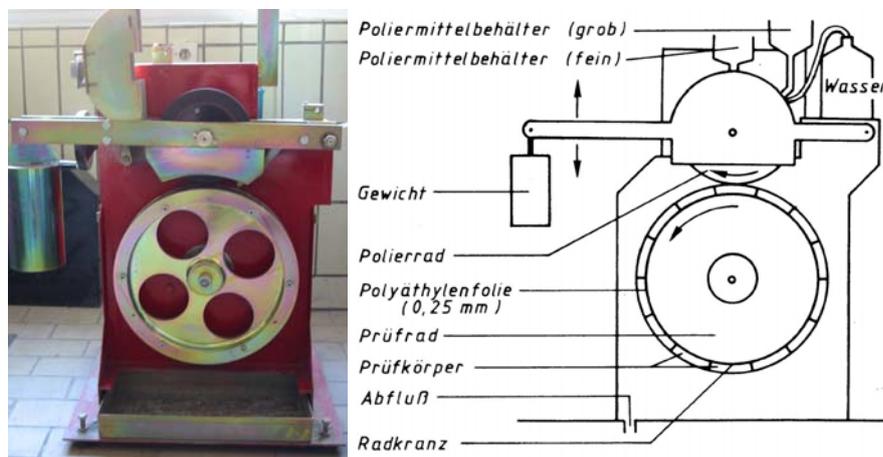


Abb. 3-29: Schnellpoliermaschine [Foto: PFEILER, 2004] bzw. [Skizze: FSV, 1986]

Die Anforderungen an die bei der Poliersimulation zugegebenen Poliermittel sind in der EN 1097-8 angeführt.

3.2.2.2 Griffigkeitsmessgerät

Die Bestimmung des Polierwertes PSV einer Gesteinskörnung erfolgt im Anschluss an das Polieren der Probekörper mittels einer Pendelprüfung. Das dafür zu verwendende Pendelgerät ist in Abb. 3-30 dargestellt.

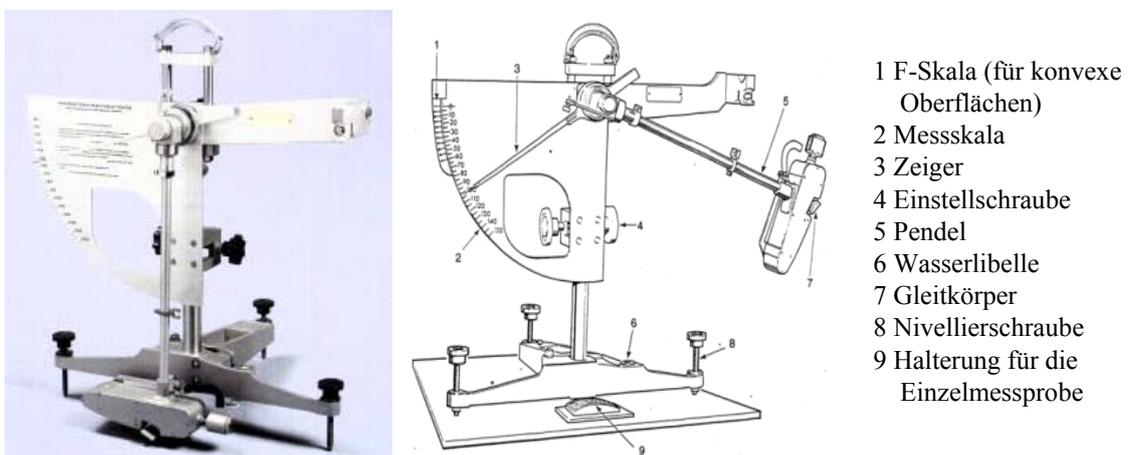


Abb. 3-30: Pendelgerät [Foto: MASTRAD, 2010] bzw. [Skizze: ÖNORM EN 1097-8:2009]

Die mit ihrer konvexen Oberfläche nach oben zeigenden Probekörper werden während der Pendelprüfung von einem an einem Pendel montierten Gleitkörper auf einer einzustellenden Länge überstrichen. Der Gleitkörper für die Prüfung von konvexen Proben weist eine Breite von $(31,75 \pm 0,5)$ mm, eine Länge in Schwingrichtung von $(25,4 \pm 1,0)$ mm und eine Dicke von $(6,35 \pm 0,5)$ mm auf. Der Energieverlust, der beim Überstreichen der Probe mit dem Gummigleiter entsteht, wird durch einen Schleppzeiger gemessen und aufgezeichnet.

Das in Abb. 3-30 dargestellte Pendel wird auch für die in-situ Bestimmung der Straßengriffigkeit verwendet und wird für diesen Zweck als SRT-Pendel⁴⁵ bezeichnet.

3.2.3 Probekörperherstellung

Die Bestimmung des PSV erfolgt an im Labor hergestellten Probekörpern. Bisher ist in der europäischen Norm EN 1097-8 lediglich die Bestimmung des PSV an der Splittfraktion vorgesehen. Die darin festgelegte Herstellungsmethodik wird im Folgenden kurz vorgestellt.

Für die Probekörperherstellung ist aus einer Splittprobe der Korngruppe 8/11 mm mittels Analysen- und Schlitzsieben die Fraktion 7,2/10 mm auszusieben und zu waschen. Von der aufbereiteten und getrockneten Splittprobe 7,2/10 mm werden dann jeweils zwischen 36 und 46 Gesteinskörner mit ihrer ebenen Oberfläche so dicht als möglich in einen Schalkörper gelegt. Körner mit abweichendem Aussehen sind zufällig auf die Prüfkörper aufzuteilen. Nachdem die Hohlräume mit feinem Sand (0,2/0,4 mm) ausgefüllt wurden, wird die Schalform mit einer 2-Komponenten Spachtelmasse bis zum Überlaufen befüllt. Die überschüssige Spachtelmasse wird mit einer Spachtel entfernt oder durch Aufsetzen einer Metallabdeckung herausgepresst. Der ausgehärtete und abgekühlte Probekörper wird mit einer Bürste vom Sand befreit und darf anschließend keine Klebstoffrückstände auf den Gesteinsoberflächen aufweisen. Die fertige, konvexe Gesteinsoberfläche soll repräsentativ für die zu prüfende Gesteinsprobe sein. In Abb. 3-31 sind Prüfkörper mit den standardisierten Abmessungen (90,6 x 44,5 x 12,5 mm) abgebildet. Im Regelfall werden je Laborprobe vier Probekörper hergestellt.



Abb. 3-31: Prüfkörper für die Bestimmung des PSV-Wertes [KIRCHMAIER et al., 2010c]

⁴⁵ SRT = Skid Resistance Tester. Für die Bestimmung eines Griffigkeitswertes auf ebenen Flächen, wie z. B. auf Straßen, wird im Gegensatz zur Bestimmung des PSV einer Splittkörnung ein Gleitkörper mit einer Breite von $(76,2 \pm 0,5)$ mm verwendet. Für die Pendelprüfung ist mittels einer Längenskala eine definierte Reiblänge von $(126 \pm 1,0)$ mm einzustellen, um vergleichbare Griffigkeitswerte zu gewährleisten. Der mit diesem Verfahren bestimmte Reibungswert wird als PTV-Wert bezeichnet und wird am Pendel auf der Messskala abgelesen. Die für die Prüfung zugrunde liegende Österreichische Norm ist die ÖNORM EN 13036-4 [ON, 2009].

3.2.4 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung ist in Österreich in der ÖNORM EN 1097-8, Ausgabe 15.08.2009 geregelt. Deshalb werden im Folgenden nur die grundsätzlichen Prüfabläufe beschrieben. Je zu untersuchendem Gestein werden insgesamt vier Einzelmessproben geprüft. Diese werden auf zwei einzelne Prüfdurchläufe aufgeteilt. Je Prüfdurchlauf können somit insgesamt sechs verschiedene Gesteine geprüft werden. Zusätzlich werden je Prüfdurchlauf zwei Probekörper eines für ganz Europa einheitlichen Kontrollgesteins⁴⁶ mitgeprüft. Das Kontrollgestein dient einerseits zur Überprüfung der korrekten Poliersimulation, andererseits werden die ermittelten PSV-Werte der Splittproben in Bezug zu diesem Kontrollgestein gesetzt, um prüfablaufbedingte Abweichungen korrigieren zu können.

3.2.4.1 Poliersimulation

Bei der Poliersimulation eines Prüfdurchlaufs werden zwei Einzelmessproben eines Gesteins zusammen mit dem Kontrollgestein in der Schnellpoliermaschine für die Dauer von zwei mal drei Stunden poliert. Zur Verstärkung der Polierwirkung wird kontinuierlich eine genau dosierte Menge an Fein- und Grobkorund⁴⁷ sowie Wasser zugegeben. Nach vollendeter Poliersimulation werden die Probekörper vom Straßenrad abgenommen, gewaschen und mit der Oberseite nach unten für eine Zeitspanne zwischen 30 und 120 min bei einer Temperatur von $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ in einem Wasserbad gelagert. Die Griffigkeitsprüfung wird unmittelbar nach der Entnahme aus dem Wasser durchgeführt, da die Probekörper vor der Prüfung nicht austrocknen dürfen.

3.2.4.2 Griffigkeitsprüfung

Für die Bestimmung des Polierwertes werden die Probekörper eines Prüfdurchlaufes einzeln mit der konvexen Prüfoberfläche nach oben zwängungsfrei in die dafür vorgesehene Halterung eingelegt, wobei darauf zu achten ist, dass der Pendelarm die Probekörper entgegengesetzt der Laufrichtung auf dem Straßenrad überstreicht. Für jeden Durchgang der Pendelprüfung ist der Probekörper mit Wasser zu benetzen. Insgesamt werden fünf Pendelprüfungen auf einer Einzelmessprobe durchgeführt. Die auf der F-Skala abgelesenen Pendelwerte sind aufzuzeichnen. Die letzten drei ermittelten Werte je Probekörper dienen zur Berechnung des PSV-Wertes.

3.2.4.3 Berechnung des PSV

Der Mittelwert der aufgezeichneten letzten drei Pendelwerte der beiden Einzelmessproben einer Gesteinskörnung sowie der Mittelwert der beiden Einzelmessproben des Kontrollgesteins aus jedem Prüfdurchlauf sind auf 0,1 Einheiten zu berechnen. Der PSV errechnet sich ganzzahlig gerundet gemäß (3.3).

$$PSV = S + 52,5 - C \quad (3.3)$$

S.....Mittelwert aus den vier Einzelmessproben einer Gesteinskörnung

C.....Mittelwert aus den vier PSV-Kontrollgesteinsprobekörpern

⁴⁶ Als Kontrollgestein ist derzeit ein Quarzdolerit, welcher in Großbritannien zu beziehen ist, vorgeschrieben. In Deutschland wurde jedoch im Jahr 2008 ein Ringversuch durchgeführt, welcher die Verwendung eines alternativen Kontrollgesteins zum Ziel hatte. Die Ergebnisse sind in BALD et al. [2010] erschienen.

⁴⁷ Korund ist ein häufig vorkommendes Mineral der Oxide und wird als Aluminiumoxid (Al_2O_3) bezeichnet. Für den industriellen Gebrauch wird Korund jedoch auch künstlich hergestellt. Nach Diamant ist Korund mit einer Mohshärte von 9 das zweithärteste Mineral. Detaillierte Anforderungen an den zu verwendenden Fein- und Grobkorund sind in der EN 1097-8 definiert.

3.3 Kombiniertes Verfahren mit dem Wehner/Schulze Poliersimulator und dem Frictometer

Das von PFEILER [2004] benutzte kombinierte Prüfverfahren nutzt eine Wehner/Schulze Poliersimulationsmaschine alter Bauart, siehe Abb. 3-1, sowie ein Frictometer, siehe Abb. 3-32. Bei letzterem handelt es sich um einen Prototypen des von AUGUSTIN [1987] entwickelten gleichnamigen Feldmessgerätes. Das Frictometer ist so wie das Laborgriffigkeitsmessgerät nach Wehner/Schulze für Prüfungen auf ebenen, kreisrunden Oberflächen mit einem Durchmesser von 225 mm ausgelegt, wobei die beim Frictometer genutzte Prüffläche etwas geringer als jene beim Laborgriffigkeitsmessgerät nach Wehner/Schulze ist.

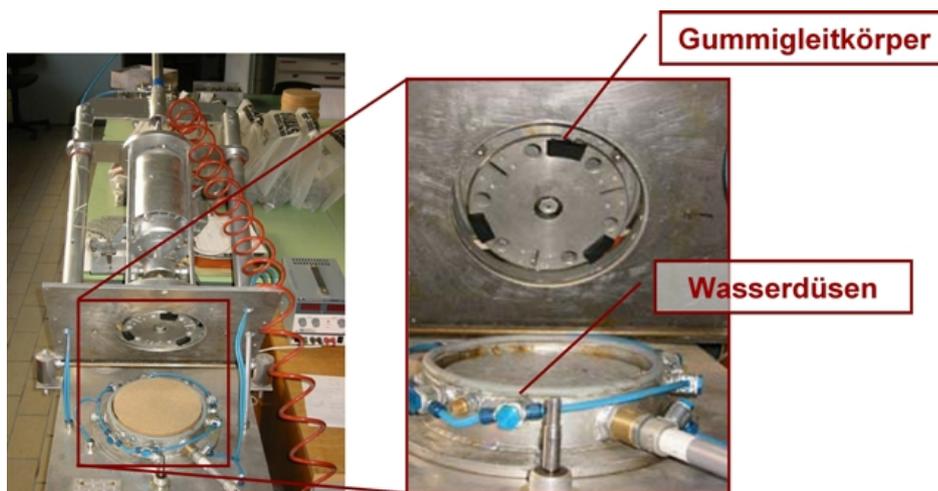


Abb. 3-32: Laborgriffigkeitsmessgerät – Frictometer [PFEILER, 2004]

Die Prüfdurchführung erfolgt ident mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze. Zuerst wird mit dem Poliersimulator eine Probenoberfläche poliert und anschließend wird diese in das Frictometer eingespannt. Das Frictometer ist der Griffigkeitsmessstation der Prüfanlage nach Wehner/Schulze sehr ähnlich, arbeitet allerdings nach einem etwas anderen Messprinzip.

Der wesentlichste Unterschied besteht in der unterschiedlichen Auswertegeschwindigkeit. Beim Prüfverfahren mit der Wehner/Schulze Anlage wird der Prüfkopf abgebremst und der Reibbeiwert über den gesamten Geschwindigkeitsbereich aufgezeichnet. Die Bestimmung des PWS erfolgt dabei bei 60 km/h. Beim Frictometer hingegen wird der Prüfkopf auf 80 km/h beschleunigt und für die Dauer von 5 s auf die Prüfkörperoberfläche abgesenkt. Die während des Kontakts entstehende Reibkraft wird aufgezeichnet und als Reibwert ausgegeben. Der mit dem Frictometer ermittelte Reibwert wird als PWF bezeichnet.

Die Reibbeiwertmessung erfolgt beim Frictometer über eine Zugfeder. Diese reagiert auf die Verdrehung des drehbar gelagerten Elektromotors während der Griffigkeitsmessung, Ein Wegaufnehmer zeichnet den Federweg auf und mittels der bekannten Federkennlinie wird die entsprechende Horizontalkraft F_x ermittelt. Damit lässt sich der vorhandene Reibwert PWF errechnen. Das Messergebnis ist dadurch wesentlich von der Genauigkeit des gemessenen Federwegs und der Federkennlinie der verwendeten Feder abhängig.

Der Kontaktdruck bei der Reibwertbestimmung mit dem Frictometer beträgt $0,01 \text{ N/mm}^2$ und ist somit wesentlich geringer als jener bei der Prüfanlage nach Wehner/Schulze mit $0,2 \text{ N/mm}^2$. Das Frictometer benötigt im Gegensatz zum Wehner/Schulze Griffigkeitsmessgerät Proben mit einem Durchmesser von 200 mm. Der mittlere Radius der Prüfbaumlauf-

bahn ist beim Frictometer mit 78 mm um 12 mm kleiner als bei der Prüfanlage nach Wehner/Schulze. Bei beiden Prüfmaschinen kommen jedoch dieselben Prüfummis zum Einsatz.

Die wesentlichsten Unterschiede zwischen der Griffigkeitsmessstation der Prüfanlage nach Wehner/Schulze und dem Frictometer sind in Tab. 3.2 übersichtlich zusammengefasst.

Tab. 3.2: Vergleich der Laborgriffigkeitsmessgeräte Wehner/Schulze - Frictometer

<i>Eigenschaft</i>	<i>Wehner/Schulze Griffigkeitsmessstation</i>	<i>Frictometer</i>
Bezeichnung des Messwertes	PWS	PWF
Prüfplattendurchmesser [mm]	225	200
Radius der mittleren Prüfummiumlaufbahn [mm]	90	78
Auswertegeschwindigkeit [km/h]	60	80
Messprinzip	Beschleunigung auf 100 km/h und Ermittlung des Reibungswiderstandes bis zum Stillstand; ausgewertet wird der Reibungswert bei 60 km/h	Beschleunigung auf 80 km/h und Ermittlung des Reibungswiderstandes bei einer für 5 s konstant gehaltenen Geschwindigkeit
Prüfummianordnung	Radialsymmetrisch mit gleichen Abmessungen	
Mittlerer Kontaktdruck [N/mm ²]	0,2	0,01

PFEILER [2004] führte in seiner Arbeit Vergleichsuntersuchungen an Sandproben der Fraktion 0,2/0,4 mm zwischen dem Frictometer und einer W/S-Anlage alter Bauart, welche an der TU Berlin im Einsatz war, durch. Die W/S-Anlage alter Bauart bestand noch aus zwei separaten Maschinen für die Poliersimulation und für die Griffigkeitsmessung, siehe Kapitel 3.1.1 bzw. die Abb. 3-1 und Abb. 3-2.

Für die Vergleichsuntersuchungen wurden mit jedem Prüfgerät Griffigkeitsmessungen an vier verschiedenen Brechsanden der Fraktion 0,2/0,4 mm mit unterschiedlichen Griffigkeitsniveaus sowie an zwei unterschiedlichen Glaskontrollplatten mit einem sehr niedrigen Reibwertniveau durchgeführt. Dabei wurde die in (3.4) angeführte lineare Regressionsbeziehung ermittelt.

$$PWF = 1,11 \cdot PWS \quad [-] \quad (3.4)$$

Das zugehörige Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,98$ ergab für die vorhandenen sechs Stichproben eine sehr hohe Güte der Regression. Jedoch zeigten sich vor allem im Bereich von höheren Griffigkeitsniveaus größere Abweichungen der Polierwerte von der Regressionsgeraden. So wurde zum Beispiel für einen Kersantitsand mit dem Frictometer ein um 0,11 [-] höherer Wert als mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze alter Bauart ermittelt.

Von Interesse ist vor allem, dass alle mit dem Frictometer gemessenen Gleitreibungswerte höher als jene mit dem Wehner/Schulze Prüfgerät gemessenen lagen, obwohl den Ergebnissen beim Frictometer eine höhere Auswertegeschwindigkeit zugrunde liegt. Ein Grund dafür könnte ein dünnerer Wasserfilm auf der Probenoberfläche während der Griffigkeitsmessung mit dem Frictometer sein. Detaillierte Informationen zur genauen Wasserbeaufschlagung während der Reibwertermittlung mit dem Frictometer gibt es jedoch nicht.

3.4 Das Polier- und Griffigkeitsmessgerät PGM

Das Polier- und Griffigkeitsmessgerät (PGM) wurde in den 1990er Jahren am Institut Dr.-Ing. Gauer Ingenieurgesellschaft mbH⁴⁸ in Regenstauf entwickelt und mehrmals verbessert. Bisher wurde jedoch nur der entwickelte Prototyp gebaut und wird am Institut Dr.-Ing. Gauer betrieben. Das Verfahren eignet sich ebenso wie das Verfahren nach Wehner/Schulze für die Bestimmung des Polierwertes von Gesteinskörnungen bzw. Gesteinskörnungsgemischen sowie für die Beurteilung der Griffigkeitsentwicklung von Asphalt- und Betonoberflächen. Dementsprechend können mit diesem System im Labor hergestellte und direkt aus der Fahrbahn entnommene Bohrkernproben untersucht werden. Die Probekörper sollen einen Durchmesser von ca. 150 mm besitzen und können somit um ca. 80 mm kleiner als jene für das Prüfverfahren nach Wehner/Schulze sein.

Bei dem Polier- und Griffigkeitsmessgerät, siehe Abb. 3-33 handelt es sich um eine kompakte, rechnergesteuerte Prüfmaschine, wobei der Polier- und der Griffigkeitsmessvorgang von derselben Maschine ausgeführt wird.



Abb. 3-33: Das Polier- und Griffigkeitsmessgerät PGM [GAUER, 2010] bzw. Detailansicht der Polier- und Griffigkeitsmessstößel [RAUSCHENBACH und BOREK, 2010]

Beim Polier- und Griffigkeitsmessgerät werden die zu prüfenden rechteckigen oder runden Probekörper in einen vertikal verstellbaren Haltebock eingespannt. In diesen Haltebock sind ein Drehmomentaufnehmer zum Messen des einwirkenden Drehmoments während der Griffigkeitsmessung sowie eine Kraftmessdose zum Messen der Auflagerkraft eingebaut.

Neben dem Haltebock verfügt die Prüfmaschine auch über einen rotierenden Prüfkopf auf dem drei Metallstößel für die Poliersimulation und drei Metallstößel für die Griffigkeitsmessung angebracht sind. Die Metallstößel lassen sich vertikal in der Höhe verschieben.

Die für den Poliervorgang verwendeten drei Metallstößel sind mit speziellen Gumminoppen versehen, in die Quarzmehl eingearbeitet wurde. Während des Polierens werden diese drei Stößel unter Zugabe von Wasser rotierend über die Probe geführt. Durch die Reibung der Gumminoppen auf dem Prüfkörper wird das in den Gummi eingearbeitete Quarzmehl freigelegt und sorgt für eine Verstärkung der Polierwirkung ähnlich dem Verfahren nach Wehner/Schulze. Die Drehzahl der Metallstößel bei der Poliersimulation beträgt 800 U/min.

Die Griffigkeitsmessung erfolgt wie beim Verfahren nach Wehner/Schulze gemäß dem Prinzip des blockierten Rades. Es wird somit auch bei diesem Verfahren ein Gleitreibungs-

⁴⁸ Das IFB Gauer ist eine bautechnische Versuchsanstalt in Regenstauf, Deutschland. www.ifbgauer.de

beiwert gemessen. Beim Messvorgang gleiten drei mit Gumminoppen versehene Metallstößel für 5 s mit einer konstanten Geschwindigkeit von 16 km/h (entspricht 800 U/min) in einer Kreisbahn über die Probe. Dadurch wird in Abhängigkeit der Oberflächentextur ein Moment erzeugt, welches vom Drehmomentaufnehmer erfasst wird. Der mittlere Radius der von den Gumminoppen überstrichenen Kreisbahn beträgt ca. 53 mm. Im Gegensatz zur Poliersimulation beinhalten die für die Griffigkeitsmessung verwendeten Gumminoppen kein Quarzmehl. Wie beim Wehner/Schulze Verfahren erfolgt der gesamte Prüfablauf rechnergesteuert.

Aufgrund der gewählten Maschinenkonzeption mit den vertikalen Metallstößeln entstehen bei diesem Prüfverfahren Probleme, sobald die zu untersuchenden Proben keine ausreichende Ebenheit aufweisen. Deshalb werden die Proben, welche für eine Griffigkeitsprognose bestimmt sind, eben geschliffen und anschließend sandgestrahlt.

An der TU München wurde im Rahmen eines Forschungsauftrages eine Vergleichsuntersuchung zwischen dem Polier- und Griffigkeitsmessgerät sowie einer Prüfanlage nach Wehner/Schulze Ver. 1, siehe Abb. 3-3, durchgeführt [WÖRNER und BÖHNISCH, 2003].

In dieser Arbeit wurde anhand von acht Oberflächen mit unterschiedlichem Griffigkeitsniveau ein Vergleich der mit den beiden Prüfgeräten ermittelten Griffigkeitswerte unternommen. Zum Versuchsumfang gehörten einerseits natürliche Oberflächen (aus Sand bzw. Granit- und Basaltgestein) andererseits auch industriell hergestellte Oberflächen. Zu letzteren zählten ein geriffeltes Blech, eine Schleifscheibe sowie eine Glasplatte mit sehr niedrigem Griffigkeitsniveau. Die Verwendung von industriell hergestellten Oberflächen hatte zusätzlich das Ziel, eine geeignete Oberfläche für das Kalibrieren von verschiedenen Prüfgeräten zu finden, siehe WÖRNER und BÖHNISCH [2004].

Zwischen den mit dem PGM und dem Prüfgerät nach Wehner/Schulze ermittelten Ergebnissen konnte eine lineare Umrechnungsfunktion gefunden werden. Die ermittelte Regressionsgleichung ist in (3.5) angegeben.

$$PGM = 1,3208 \cdot PWS + 0,11 [-] \quad (3.5)$$

Das zugehörige Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,97$ ergab für die vorhandenen acht Stichproben eine sehr hohe Güte der Korrelation.

Wie aufgrund der Konzeption des Griffigkeitsmessgerätes beim PGM zu erwarten ist, sind die mit dem PGM ermittelten Reibwerte aufgrund der niedrigeren Prüfgeschwindigkeit höher als jene des Prüfverfahrens nach Wehner/Schulze.

Neben dem Vergleich der beiden Prüfverfahren wurde in der Arbeit von WÖRNER und BÖHNISCH [2003] auch versucht, mit den beiden Prüfverfahren die Griffigkeitsentwicklung von Asphalt- und Betonoberflächen zu prognostizieren. Dabei zeigte sich zwar, dass das Prüfverfahren nach Wehner/Schulze in der Regel eine bessere Wiederholpräzision als das PGM aufweist, generell aber das von HUSCHEK [2002] konzipierte Griffigkeitsprognosemodell nicht dieselbe Aussagekraft ermöglicht als das dem PGM zugrunde liegende Prognoseverfahren. Beim Prognoseverfahren mit dem PGM wird nämlich vor allem die kurzzeitige Griffigkeitsentwicklung sehr detailliert erfasst. Dies wird durch eine Griffigkeitsbestimmung nach 1, 5, 10, 15, 30, 60, 120 und 180 Minuten Poliersimulation ermöglicht. Zum Vergleich wird beim Verfahren nach Wehner/Schulze erst nach 60 Minuten Poliersimulation die erste Griffigkeitsbestimmung durchgeführt.

3.5 Erfurter Griffigkeitsprognoseverfahren EGPV

Ein weiteres in Deutschland Mitte der 90er Jahre konzipierte Gerät zur Bestimmung der Griffigkeit von Asphalt- und Betonoberflächen ist das Erfurter Griffigkeitsprognoseverfahren (EGPV) [RICHTER et al., 2004].

Das EGPV wurde entwickelt da in einer 1996 durchgeführten Arbeit festgestellt wurde, dass die im Labor bestimmten PSV-Werte von Gesteinskörnungen nicht mit den tatsächlichen in-situ Griffigkeitswerten, bestimmt mit dem Skid Resistance Tester (SRT), korrelieren [WILHELM, 1996]. Der Nachweis wurde in der Form geführt, dass zuerst der SRT-Wert von alten Großpflasterplatten bestimmt wurde. Diese von den Stadtstraßen entnommenen Großpflasterplatten wurden in weiterer Folge mit einem Laborbrecher zu Edelsplitt aufbereitet. Anschließend wurde mit den aufbereiteten Edelsplitten der PSV bestimmt. Es zeigte sich, dass die nach langer Liegezeit ermittelten in-situ Griffigkeitswerte wesentlich schlechter waren als sie mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät prognostiziert wurden, siehe Tab. 3.3. Eine Ausnahme bildet der Quarzporphyr, auf dem sich im Gegensatz zu den anderen Steinmaterialien im Laufe der Zeit ein höheres Griffigkeitsniveau einstellte. Dieser Effekt ist auf Verwitterung der „weichen Minerale“ und gleichzeitiges Freilegen der „harten Minerale“, in diesem Fall Quarz, zurückzuführen.

Tab. 3.3: Vergleich Griffigkeitsmessungen mit dem SRT-Pendel in der Praxis und im Labor [RICHTER et al., 2004]

<i>Großpflaster/Splitt</i>	<i>SRT (Großpflaster)</i>	<i>PSV (Splitt)</i>
Kupferschlacke	28	47
Basalt	36	52
Granit	44	53
Diabas	44	54
Quarzporphyr	56	53

Das EGPV besteht aus einem Zweiwegetisch mit Probenwanne, einem Kühlgerät für das Wasserbad, einer Poliereinheit, einem SRT-Pendel zur Griffigkeitsmessung und einer Steuereinheit. In Abb. 3-34 ist das Schema des EGPV dargestellt.

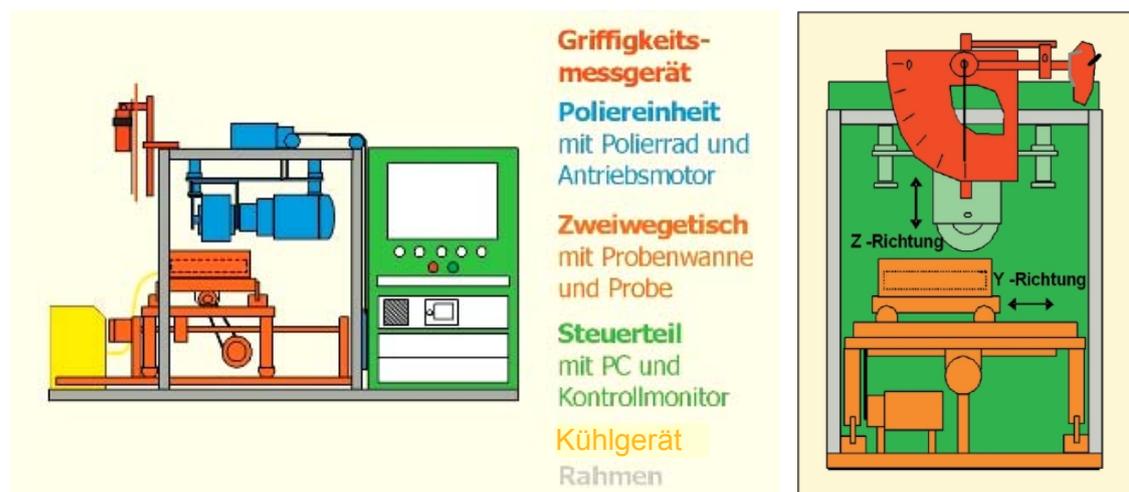


Abb. 3-34: Das Erfurter Griffigkeitsprognoseverfahren [Skizze: RICHTER et al., 2004]

Ziel des EGPV war es, folgende vom Prüfverfahren nach Wehner/Schulze abweichende Einflussfaktoren bzw. Aspekte zu berücksichtigen:

- Berücksichtigung der zum Teil nachschärfenden winterlichen sowie der sommerlichen Einflüsse
- Poliervorgang nur mit Gummi ohne Schmirgel
- Messung der Griffigkeit im Labor und auf der Straße mit demselben Messverfahren

Winterliche Verhältnisse werden beim EGPV berücksichtigt indem außerhalb der Griffigkeitsmesseinrichtung eine Frost – Tauwechsel – Belastung aufgebracht wird. Dazu wird die Probe in einer 1 %-igen NaCl-Lösung gelagert und zehn Frost-Tau-Wechselbeanspruchungen von + 20°C bis -20°C im Schnellverfahren durchgeführt

Das für den Poliervorgang verwendete Polierrad weist eine Shorehärte von (80 ± 3) Shore A und eine Breite von 86 mm auf. Damit ist es wesentlich härter als die beim Verfahren nach Wehner/Schulze verwendeten Prüfgrundgummis aber auch härter als durchschnittliche Autoreifen. Beim Poliervorgang wird das Polierrad in Rotation versetzt und mit einem Anpressdruck von $0,2 \text{ N/mm}^2$ auf die unter Wasser befindliche Probenoberfläche aufgesetzt. Anschließend wird die Probe entgegengesetzt der Drehrichtung des Polierrades unter konstantem Druck des Polierrades auf eine Länge von 140 mm gezogen. Dadurch wird ein zusätzlicher Schlupf erzeugt, der für die Polierwirkung sorgt. Nach dem Polieren der Probe über eine Länge von 140 mm wird das Polierrad abgehoben, in die Ausgangsposition zurück gefahren und der Poliervorgang vom Startpunkt aus wiederholt. Das Polieren erfolgt dabei ohne Zugabe eines Poliermittels. Das die Probe bedeckende Wasser dient der Kühlung und wird durch ein Kühlaggregat konstant auf 20°C gehalten. In Abb. 3-35 links ist das aufgesetzte Polierrad beim Polieren einer mit Wasser überdeckten Probe dargestellt. In Abb. 3-35 rechts ist das Polierschema auf einer mit einem Walzsegmentverdichter im Labor hergestellten Asphaltplatte gekennzeichnet.

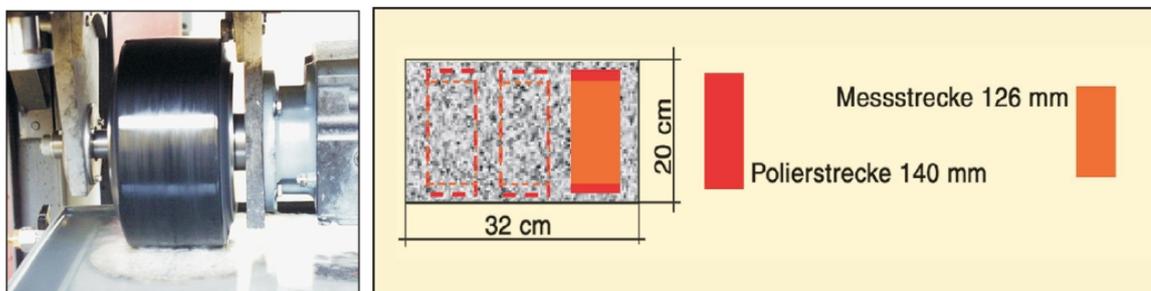


Abb. 3-35: Das Erfurter Griffigkeitsprognoseverfahren [Skizze: RICHTER et al., 2010]

Beim EGPV wird die Griffigkeit mit einem SRT-Pendel bestimmt. Dadurch wird gewährleistet, dass das Prognoseverfahren mit demselben Prüfverfahren arbeitet, das auf der Straße im Zuge von Abnahme- oder Kontrollprüfungen verwendet wird. Die erfasste Reiblänge beträgt 126 mm.

Obwohl mit diesem Verfahren in vierjähriger Forschungsarbeit eine gute Prognose der Griffigkeit von in der Praxis eingebauten Asphaltmischgütern getätigt werden konnte, wurde von dem EGPV nur der eine an der FH Erfurt befindliche Prototyp gebaut. Detaillierte Vergleichsuntersuchungen mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze wurden nicht durchgeführt.

3.6 Kritische Betrachtung der Prüfverfahren

In Kapitel 3.1 bis 3.5 wurden fünf verschiedene Prüfverfahren vorgestellt, mit denen eine Bestimmung des Polierwertes von Gesteinskörnungen durchgeführt werden kann. Da sowohl das kombinierte Verfahren mit der Wehner/Schulze Anlage und dem Frictometer sowie das Polier- und Griffigkeitsmessgerät PGM und das Erfurter Griffigkeitsprognoseverfahren EGPV nur als Prototypen existieren, werden in diesem Kapitel lediglich das Prüfverfahren nach Wehner/Schulze sowie das Verfahren zur Bestimmung des PSV einer genaueren Betrachtung unterzogen.

3.6.1 Allgemeines

Die wenigsten Steinbrüche beziehungsweise Kiesgruben verfügen geologisch bedingt über eine homogene Lagerstätte, die eine gleichbleibende Qualität der gelieferten Gesteinskörnungen garantiert. Somit sind im Gegensatz zu anderen Produkten der Bauindustrie (z. B. Stahl), in der durch Einhaltung von Qualitätskontrollen in der Produktion eine annähernd gleichbleibende Qualität erzeugt werden kann, Schwankungen in den Gesteinseigenschaften unvermeidbar.

Die Inhomogenität der Lagerstätten in Hinblick auf unterschiedliche Gesteinseigenschaften werden durch zum Teil erhebliche Ungenauigkeiten der zur Bestimmung der Gesteinseigenschaften herangezogenen Prüfverfahren überlagert.

Hinsichtlich der Bestimmung des Polierwiderstandes von Gesteinskörnungen arbeiten die in Kapitel 3.1 und Kapitel 3.2 vorgestellten Prüfverfahren nach demselben Grundgedanken: Zuerst wird das Gesteinskorn unter Zugabe eines Poliermediums von Gummikörpern poliert und anschließend erfolgt eine Griffigkeitsmessung mit speziellen Gleitkörpern.

In diesem Abschnitt werden sowohl die vorhandenen bzw. bestehenden Unzulänglichkeiten als auch die jeweiligen Vorzüge der Bestimmung des Polierwiderstandes von Mineral- und Baustoffen für den Straßenbau mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze und mit dem Verfahren mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät diskutiert. Dabei wird auf folgende Punkte eingegangen:

- Einsatzgebiet
- Probekörperherstellung
- Poliersimulation
- Reibwertbestimmung
- Prüfdauer

3.6.2 Prüfanlage nach Wehner/Schulze

Die Prüfanlage nach Wehner/Schulze arbeitet weitestgehend vollautomatisiert. Lediglich bei der Herstellung der Probekörper hat der Laborant noch einen großen Einfluss auf die Prüfgenauigkeit. Aufgrund der Automatisierung und digitalen Aufzeichnung können Schwankungen beziehungsweise Abweichungen bei der Aufbringung der Polierbeanspruchung sowie bei der Griffigkeitsmessung erfasst und ausgewertet werden.

3.6.2.1 Einsatzgebiet

Mit diesem Prüfverfahren lassen sich nicht nur die Poliereigenschaften von Splitten und Sanden, sondern auch die vorhandenen Griffigkeitswerte von Asphalt- und Betonoberflächen bestimmen. Letztere können aus der Straße ausgebohrt und direkt in die Versuchseinrichtung

eingespannt werden. Dabei ermöglicht die Versuchseinrichtung über die Polierstation die Aufbringung einer weiteren Poliereinwirkung auf die gezogenen Bohrkern. Somit können auch Prognosen über die Entwicklung der Griffigkeit von Oberflächen getätigt werden.

Die Bestimmung des Polierwiderstandes von Gesteinskörnungen beziehungsweise die Messung der Griffigkeit von Straßenoberflächen erfolgt an Prüfkörpern mit einem Durchmesser von 225 mm. Die Fläche des Kreisringes, die durch die Polierrollen erfasst und einer Poliereinwirkung ausgesetzt wird, beträgt ca. 305 cm². Die für die Ermittlung des Reibungsbeiwertes PWS herangezogene polierte Fläche beträgt ca. 82 cm². Somit steht zur Beurteilung der Griffigkeit von Oberflächen beziehungsweise des Polierwiderstandes von Gesteinskörnungen eine repräsentative und vor allem ebene Fläche zur Verfügung.

3.6.2.2 Probekörperherstellung

Im Kapitel 3.1.3 wurden bereits verschiedene Herstellungsmethoden für die Bestimmung des Polierwertes von feinen und groben Gesteinskörnungen erläutert.

Das Splitt-Mastix-Eingussverfahren eignet sich nicht nur für die Korngruppe 8/11, sondern auch für die Splittfraktionen 4/8 bzw. 11/16. Aufgrund des nachträglichen Aufrauens der Prüfoberfläche werden jedoch nicht die ursprünglichen Bruchflächen reproduziert. Der wesentlichste Vorteil dieses Verfahrens liegt in der relativ kurzen Herstellungszeit der Probekörper.

Splittprobekörper, hergestellt nach dem Mosaikauslegeverfahren, erfordern jedoch einen enormen Zeitaufwand, da eine große Fläche mit Splittkörnern der Fraktion 8/11 mm ausgelegt werden muss. Ähnlich wie bei der Probekörperherstellung für das Verfahren mit der Schnellpoliermaschine, hat der Laborant durch die Auswahl der einzelnen Körner einen großen Einfluss auf das resultierende Prüfergebnis.

Das Herstellen von Probekörpern für die Polierwiderstandsbestimmung von Sanden, sowie der Einbau von aus der Straße gezogenen Bohrkernen, geht generell sehr schnell vor sich. Die Herstellung von mehreren homogenen Sandprobekörpern erfordert dennoch Übung und eine sehr sorgfältige Vorgangsweise. Dabei können Mängel bereits bei der Versiegelung der Sperrholzplatten auftreten. So sorgt sowohl eine zu dicke, als auch zu magere Versiegelung für ein unzureichendes Ankleben der Sandkörner auf der Holzplatte, wodurch im Zuge der Poliersimulation schadhafte Stellen entstehen. Ebenso muss das Anmischen und das Auftragen des Klebstoffes sehr genau ausgeführt werden. Bereits geringe Unebenheiten der Klebstoffschicht sorgen dafür, dass an die fertige Probenoberfläche Klebstoffreste durchdringen. Weiters muss die aufgebrauchte Sandfraktion immer gründlich durchgemischt werden, um eine Entmischung vor dem eigentlichen Einstreuen des Sandes zu verhindern.

3.6.2.3 Poliersimulation

Die Steuerung der Zufuhr des Poliermittel-Wassergemisches und des Prüfwassers während der Reibwertbestimmung erfolgt durch eine Förderpumpe, die sich genau regeln lässt und somit eine konstante Zufuhr rate garantiert. Jedoch unterliegt das Mischungsverhältnis des Poliermittel-Wassergemisches einer zum Teil recht hohen Schwankung. Das während einer Poliereinwirkung aufgebrauchte Gemisch aus Quarzmehl und Wasser zirkuliert ständig zwischen Probe und dem Behälter mit integriertem Rührwerk und Förderpumpe. Dadurch reichert sich das Gemisch mit Abrieb aus der Poliersimulation an und verändert im Laufe der Zeit seine Polierwirkung. Zusätzlich zur Anreicherung der Polierflüssigkeit mit Abrieb bleiben nach jeder Poliersimulation erhebliche Mengen Poliermittel auf der Probe und auf der Probeneinspanneinrichtung zurück, wohingegen das Wasser wieder zurück in den Behälter

fließt. Dadurch kommt es zu einer Verringerung der Quarzmehlkonzentration in der Polierflüssigkeit. Diesem Umstand wird in der derzeit gültigen österreichischen Richtlinie keine Bedeutung beigemessen. Zur Vermeidung dieses Effektes ist es aber notwendig, dem Poliermittel-Wassergemisch vor jeder neuen Poliersimulation eine zusätzliche Menge Quarzmehl beizumengen und zusätzlich das Gemisch in regelmäßigen Intervallen zu wechseln. Die zuzugebende Menge kann nur grob geschätzt werden, denn nach jeder Poliersimulation variiert die Menge des auf der Probeneinspannvorrichtung zurückgebliebenen Quarzmehls. Für die Auswechslung des kompletten Poliermittel-Wassergemisches gibt es derzeit keine exakten Vorschriften. Aufgrund von Erfahrungen ist jedoch ein Austausch des Gemisches nach spätestens 540.000 Überrollungen der Polierrollen (dies entspricht sechs Standardpolierzyklen) zu empfehlen. Zusätzlich zu der variierenden Quarzmehl-Wasserkonzentration zeigte sich auch, dass das in den Behälter integrierte Rührwerk nicht ausreicht, um nach einer längeren Stillstandszeit das ganze Quarzmehl im Wasser in Schwebelage zu versetzen und homogen zu vermischen. So sollte nach einer längeren Nutzungspause das Poliermittel-Wassergemisch von Hand kräftig umgerührt werden.

Die konischen Polierrollen weisen für Prüfungen auf Sandoberflächen eine sehr lange Lebensdauer auf. Auf rauen Oberflächen, wie z.B. mit dem Grinding-Verfahren behandelte Betonoberflächen, ist der Verschleiß der Polierrollen jedoch sehr hoch. Zusätzlich ist der Verschleiß der Polierrollen nicht nur von der Rauigkeit der Oberflächen, sondern auch von dem vorhandenen Schlupf abhängig. Laut Herstellerangaben laufen die Polierrollen über die Prüfoberfläche mit einem Schlupf von 0,5 bis 1,0 %, der durch die Lagerreibung der Polierrollen hervorgerufen wird. Während des Poliervorganges wird einerseits die Umdrehungsgeschwindigkeit des Polierkopfes und andererseits das auf die Probenoberfläche wirkende Drehmoment kontinuierlich aufgezeichnet. Das aufgezeichnete Moment resultiert aus der auf die Probenoberfläche wirkenden horizontalen Kraft (F_x). Diese Kraft ist zurückzuführen auf den vorhandenen Schlupf der Polierrollen. In den bisher existierenden Prüfvorschriften wird lediglich darauf hingewiesen, dass vor Durchführung einer Polierbeanspruchung die Polierrollenlager händisch auf Leichtgängigkeit kontrolliert werden sollen. Diese wagenformulierte Kontrollmöglichkeit erscheint beim Einsatz einer modernen und großteils automatisierten Prüfeinrichtung nicht zufriedenstellend.

Bei neuen Polierrollenlagern stellt sich für das einwirkende Moment durch die Polierüberrollungen nach einer kurzen Einlaufzeit ein konstanter Verlauf über die gesamte Dauer der Poliersimulation von etwa 4 Nm ein, siehe Abb. 3-36 (links). Nach längerer Nutzungsdauer verändert sich durch den Eintritt von Quarzmehl in die Lagerbuchsen die Lagerreibung und damit das einwirkende Moment durch die Polierüberrollungen. In Abb. 3-36 (rechts) ist das stark variierende Moment beschädigter Polierrollenlager dargestellt.

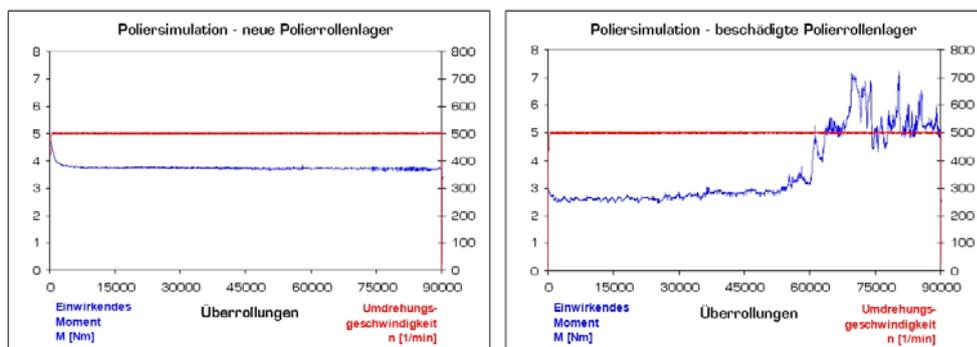


Abb. 3-36: Aufgezeichnetes Poliermoment neuer Rollenlager (links) und beschädigter Rollenlager (rechts)

Da ein Zusammenhang zwischen der Poliereinwirkung (aufgebrachtes Moment) und dem resultierenden PWS Wert einer Gesteinskörnung zu vermuten ist, kommt es bei einem variierenden Moment zu einem systematischen Messfehler, der das Messergebnis maßgeblich beeinflussen kann. Die Prüfung der ordnungsgemäßen Funktion der Polierrollenlager und die regelmäßige Kontrolle des auf die Probe einwirkenden Moments stellen daher wesentliche, qualitätssichernde Maßnahmen dar.

3.6.2.4 Reibwertbestimmung

Die Rohdatenerfassung und die Ermittlung des Reibwertes wurden bereits in Kapitel 3.1.4 ausführlich beschrieben. Durch die während des ganzen Abbremsvorganges aufgezeichneten Daten lässt sich über einen Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 100 km/h für jede beliebige Geschwindigkeit ein Reibwert berechnen. Die Wasserzuflussrate während einer Reibwertbestimmung wird von einer Förderpumpe automatisch geregelt. Dadurch wird gewährleistet, dass die aufgebrachte Wassermenge bei allen Proben konstant ist, wodurch besonderes Drainageverhalten von verschiedenen Oberflächen bei der Reibwertbestimmung Berücksichtigung findet.

Die für die Ermittlung der Reibung herangezogene Prüffläche von ca. 82 cm² ist für regelmäßige Oberflächen, wie sie zum Beispiel bei Sandprobekörpern und kleinen Splittfraktionen auftreten, repräsentativ. Bei Straßenoberflächen mit einer ausgeprägten Makrotextur haben die schmalen Abmessungen der Prüf gummi allerdings Einfluss auf die Wiederholbarkeit von Messergebnissen an verschiedenen Probekörpern aus ein und derselben Deckschicht. Zur Verbesserung wären Prüf gummi mit zumindest der doppelten Breite zu empfehlen. Dadurch können gegebenenfalls bessere Korrelationen mit Feldmessergebnissen von dynamischen Griffigkeitsmesssystemen (z.B. dem GripTester) erzielt werden.

Die verwendeten Prüf gummi sind bei der Griffigkeitsmessung sehr hohen Beanspruchungen ausgesetzt, weswegen eine spezielle Gummimischung, die sogenannte „Berliner Mischung“ Anwendung findet. Diese Gummimischung ähnelt Gummimischungen wie sie für die Erzeugung von Autoreifen verwendet werden. Charakteristisch dafür ist die Shorehärte und die hohe Verschleißfestigkeit. Die Härte beträgt bei der „Berliner Mischung“ (65 ± 5)° Shore A. Trotz der hohen Verschleißfestigkeit weisen Prüf gummi bei PWS Reibwertwerten von > 0,60 [-] bereits nach wenigen Messungen eine ausgeprägte Rillen- bzw. Abriebskeilbildung auf, siehe Abb. 3-37 (a). Solche Prüf gummi sätze weichen auf einer Kontrolloberfläche aus Glas bereits wesentlich von der in der derzeit gültigen RVS 11.06.23:2005 erlaubten Toleranzgrenze ab und wären somit von weiteren Prüfungen auszuschließen, was einen sehr hohen Verbrauch von Prüf gummi zur Folge hätte.

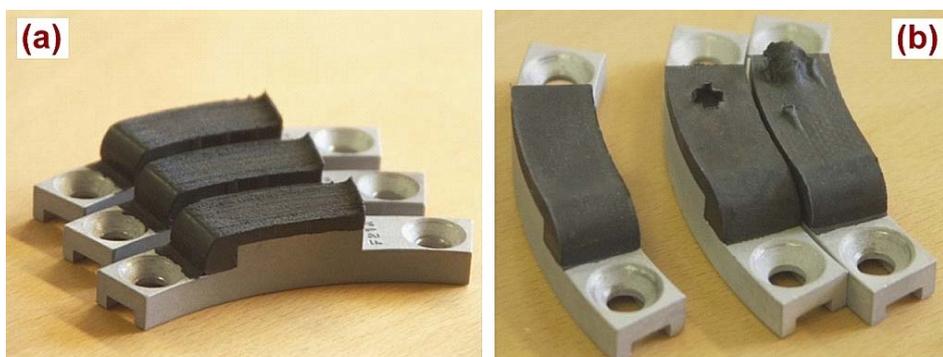


Abb. 3-37: (a) Prüf gummi mit Abriebskeil, (b) Prüf gummi mit Blasenbildung

Zusätzlich zu der Abriebskeilbildung können bei den Prüf gummi s auch Blasen entstehen. Wird durch die Prüfkörperoberfläche die während des Abbremsvorganges entstehende Hitze nicht ausreichend schnell abgeführt, so „verbrennen“ die Prüf gummi s und es entstehen unter der Oberfläche Blasen. In Abb. 3-37 (b) sind links ein neuer Prüf gummi und rechts zwei Prüf gummi s mit ausgeprägter Blasenbildung dargestellt. Diese Blasenbildung tritt nicht bei allen Prüf gummi sätzen auf, weswegen von produktionstechnischen Fehlern auszugehen ist. Um Prüf gummi sätze mit einem Potential zur Blasenbildung bereits vor einer routinemäßigen Prüfung ausscheiden zu können, ist es notwendig eine Konditionierung auf einer rauen Kontrolloberfläche durchzuführen. Eine solche raue Oberfläche wird in Abschnitt 4.3.2.2 beschrieben.

3.6.2.5 Prüfdauer

Für die Bestimmung des Polierwertes einer feinen Gesteinskörnung ist gemäß der derzeit gültigen RVS 11.06.23:2005 eine Doppelbestimmung erforderlich. Für die Aufbringung der Polierwirkung auf der Polierstation ist eine Überrollungszahl von 90.000 ÜR vorgesehen. Dies entspricht insgesamt 30.000 Umdrehungen des Polierkopfes und einer Prüfdauer von 1 Stunde. Inklusiv Probenein- und -umbau sowie der Bestimmung des Reibwertes ergibt sich somit für die Polierwiderstandsbestimmung eines Gesteins eine Prüfdauer von ca. 3 Stunden. Gemäß existierenden Prüfanweisungen für die Bestimmung des Polierwertes von groben Gesteinskörnungen ist für diese Prüfungen dieselbe reine Prüfdauer zu veranschlagen.

Die Herstellung von Proben zur Bestimmung des Polierwiderstandes von Sanden beträgt inklusive Gesteinsaufbereitung ca. 4 Stunden. Somit ist die Prüfung eines Gesteins nach insgesamt ca. 7 Stunden abgeschlossen.

Für die Bestimmung des Polierwertes von Splittkörnungen hängt die Prüfdauer sehr stark von der Art der Prüfkörperherstellung ab, siehe Abschnitt 3.1.3.2. Die gesamte Prüfdauer für eine Gesteinskörnung schwankt demnach zwischen 9 und 15 Stunden.

Bei den Prüfkosten wirken sich vor allem die Gummiverschleißteile, die zurzeit in der geforderten Qualität nur von einer Firma vertrieben werden, stark aus. Da bei höherer Rauheit der Probenoberflächen der Prüf gummi satz sehr schnell verschleißt und zusätzlich einige Prüf gummi sätze aufgrund mangelnder Qualität bereits nach einer Prüfung Schadstellen aufweisen, entstehen für die Polierwiderstandsbestimmung eines Gesteins erhebliche Fixkosten. Weiters fallen für die zu verwendenden Polierrollen sehr hohe Kosten an, welche bezogen auf die Anzahl der geprüften Gesteine in einem kürzeren Intervall zu ersetzen sind, als dies bei dem Prüfverfahren mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät der Fall ist.

3.6.3 Verfahren zur Bestimmung des PSV

Diese Prüfeinrichtung existiert in ihrer derzeitigen Form weltweit schon seit vielen Jahrzehnten. Mangels Weiterentwicklung der Prüfmethode und der Prüftechnik ist es generell nicht möglich, Daten während des Poliervorgangs aufzuzeichnen. Weiters sind viele Vor- aber auch Nachjustierungen während der Prüfdurchführung vorzunehmen.

3.6.3.1 Einsatzgebiet

Bisher wurde die Schnellpoliermaschine lediglich zur Bestimmung des Polierwiderstandes von groben Gesteinskörnungen eingesetzt. Aufgrund der langjährigen Erfahrung mit dieser Prüfeinrichtung ist es derzeit auch als einziges Prüfverfahren zur Bestimmung des Polierwiderstandes von Gesteinskörnungen in der europäischen Normung verankert, vgl. Kapitel 2.2. Der dabei ermittelte Wert für die Polierresistenz wird als PSV bezeichnet. Ein Nachteil für anderweitige Anwendungen stellt die Notwendigkeit der Präparation von konvexen Probe-

körpern dar. So ist es nicht möglich, Proben von Straßenoberflächen zu ziehen und mit diesem Prüfverfahren einer Polierbeanspruchung zu unterziehen.

Zusätzlich zu dem bereits vielfach erprobten Einsatzgebiet wurde von WÖRNER et al. [2006] auch die Möglichkeit der Prüfung von Sandfraktionen mit der Schnellpoliermaschine untersucht. Das darin konzipierte Probenherstellungsverfahren wurde im Rahmen dieser Arbeit adaptiert und weiterentwickelt, siehe Kapitel 5.4.

3.6.3.2 Probekörperherstellung

Die für die Polierwiderstandsbestimmung von Splitten benötigten Probekörper werden nach dem Mosaikauslegeverfahren in eigens dafür angefertigten Schalkkörpern hergestellt. Durch die relativ kleinen Proben kommt dabei der Auswahl der Gesteinskörner und der Qualität der Einlage in die Schalkkörper eine sehr große Bedeutung zu. Aufgrund einer nicht repräsentativen Auswahl von Gesteinskörnern sind Änderungen des resultierenden PSV von bis zu fünf Einheiten möglich. Zur Einengung der Fehler bei der Probekörperherstellung sind Anforderungen hinsichtlich der Anzahl der einzulegenden Körner gestellt. Weiters sind je Gestein jeweils vier Probekörper herzustellen, um einen möglichst repräsentativen Querschnitt der vorhandenen Gesteinskörner zu erzielen.

Bei der im Rahmen dieser Arbeit erarbeiteten Arbeitsanleitung (siehe Kapitel 5.4.1) zur Herstellung von Sandprobekörpern ist insbesondere die Aufbringung der Sandkörnung auf die mit Klebstoff bestrichenen Rohkörper sehr sorgfältig durchzuführen. Hierbei ist es wichtig, alle Probekörper in der gleichen Höhe herzustellen, da ansonsten die nachfolgende Poliereinwirkung beeinflusst wird.

3.6.3.3 Poliersimulation

Die Zufuhr der bei der Poliersimulation verwendeten Poliermittel Grob- und Feinkorund erfolgt mittels sogenannten „Feeder“, der händisch mit einer Stellschraube zu justieren ist. Da die Beaufschlagung der Proben mit Poliermittel einen großen Einfluss auf die Polierwirkung hat, ist regelmäßig die ordnungsgemäße Funktionsweise zu überprüfen. Die Wasserzufuhr erfolgt mit einem Wasserdurchflussmesser, dessen angezeigte Zufuhr rate sich laufend mit der Füllhöhe des Wassers im Behälter ändert. Auch hierbei ist ständig die Zufuhr rate nachzujustieren. Aufgrund der ungenauen Steuerung der Poliermittel- und Wasserbeaufschlagung weicht die Polierbeanspruchung von Prüfung zu Prüfung ein wenig ab.

Bei der Zugabe des Grobkorundes fällt ein Teil der Menge erst gar nicht in die Zulaufschiene, sondern neben das Straßenrad. Weiters neigt die Zulaufschiene für den Grobkorund durch die gleichzeitige Beschickung mit Poliermittel und Wasser dazu, zu verstopfen. Deswegen muss die Schiene laufend kontrolliert und unter Umständen mit entsprechenden Hilfsmitteln wieder frei gelegt werden.

Besonders bei der Beaufschlagung mit Feinkorund ist die tatsächlich auf die Probekörper auftreffende Menge nicht quantifizierbar, da die Luftströmung, verursacht durch das sich drehende Straßenrad, einen großen Teil des Feinkorundes verbläst, bevor es auf die Probekörper gelangen kann. Zusätzlich erfolgt die Beaufschlagung mit Feinkorund nicht direkt auf die Probekörper, sondern zuerst auf das Gummirad. Dadurch wird es als erstes an die Schutzabdeckung geschleudert, wo es mit dem anhaftenden Wasser Klumpen bildet und unkontrolliert hinabfällt, siehe Prinzipskizze in Abb. 3-38.

Ein Vorteil der Poliersimulation mit der Schnellpoliermaschine ist die Möglichkeit der gleichzeitigen Beanspruchung von bis zu 14 Probekörpern. Da von einer Gesteinskörnung immer zwei Probekörper auf einmal geprüft werden und zusätzlich immer zwei Probekörper

von einem Kontrollgestein mitzuprüfen sind, entspricht dies sechs verschiedenen Gesteinsproben. Sind die Probekörper sorgfältig auf das Straßenrad aufgespannt, sodass das Gummirad ohne starke Vibrationen über die Prüfkörper rollt, erfolgt an allen 14 Proben eine gleichmäßige Polierbeanspruchung. Dies macht den ermittelten Polierwert mehrerer Gesteine, welche im selben Durchgang geprüft wurden, miteinander vergleichbar.

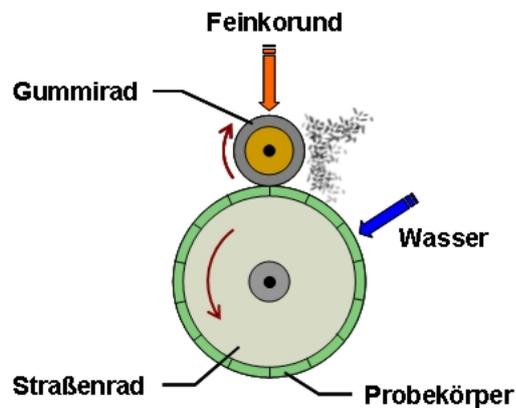


Abb. 3-38: Prinzipskizze der Poliersimulation mit der Schnellpoliermaschine (Feinpolieren)

3.6.3.4 Reibwertbestimmung

Die Ermittlung des PSV-Wertes erfolgt mit der in Abschnitt 3.2.4.2 beschriebenen Pendelmessung. Der für die Prüfung zu verwendende Gleitkörper ist genauen Spezifikationen hinsichtlich der Gleitkantenausbildung und Lagerung unterworfen. Außerdem zeichnen sich die Gleitkörper unter Einhaltung der Vorschriften durch eine lange Lebensdauer und oftmalige Verwendbarkeit aus.

Die Justierung der Pendelhöhe muss vor jedem Probekörper mittels einer Reiblängenlehre geprüft und gegebenenfalls händisch nachjustiert werden. Dadurch ergeben sich bei der Prüfung der einzelnen Proben zwangsläufig unterschiedliche Reiblängen, da eine exakte Einstellung per Hand mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht möglich ist. Vor jeder einzelnen Pendelmessung werden die Proben mit Wasser benässt. Diese Benässung erfolgt in der Regel händisch durch eine Spritzflasche. Somit ist der aufgebrauchte Wasserfilm bei der Prüfung davon abhängig, wie schnell die Messung nach der Benässung der Probekörper mit Wasser ausgeführt wird. Bei der Pendelmessung wird wiederum nur ein kleiner Teil der konvexen Prüfkörperoberfläche durch den Gleitkörper überstrichen. Zusätzlich gleitet der Gummikörper nicht gleichmäßig über die gesamte Reiblänge, sondern springt beginnend mit dem ersten Aufsetzen über den Probekörper. Eine thermographische Aufnahme eines Probekörpers unmittelbar nach einer Pendelmessung zeigt jene Stellen an denen der Gleitkörper mit dem Prüfkörper in Kontakt war, siehe Abb. 3-39.

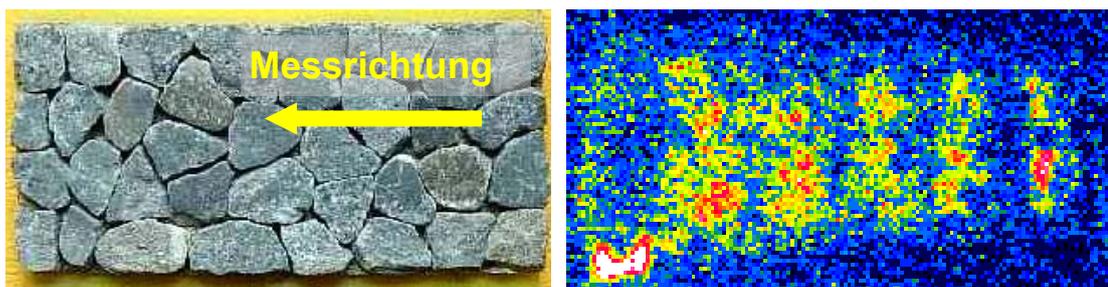


Abb. 3-39: Thermografische Aufnahme einer Pendelmessung [NEUBAUER, 2002]

Vor allem die Beschaffenheit des Probekörpers an der Stelle des ersten Kontakts mit dem Gleitkörper hat große Auswirkungen auf die weiteren Kontaktflächen und somit auf den resultierenden Pendelwert. Die Ablesung des Pendelwertes für die konvexen Prüfkörper erfolgt auf der sogenannten F-Skala des Pendelgerätes. Dabei handelt es sich um eine zusätzliche Skala, auf der die PSV-Werte jeweils in 2er Schritten unterteilt angeführt sind. Die Ablesung erfolgt durch Runden und ist somit stark von der Betrachtungsweise des Laboranten abhängig. Die Bestimmung der Reibwerte mittels der Pendelmessung ist somit vielen Unsicherheitsfaktoren bei der Prüfdurchführung unterworfen.

3.6.3.5 Prüfdauer

Die Dauer der Poliersimulation beträgt zweimal 6 Stunden. Berücksichtigt man das Wechseln der Gummiräder, das Reinigen der Poliermaschine zwischen der Grob- und Feinpolierphase sowie die anschließende Pendelmessung, so benötigt man für die Prüfdurchführung eines Durchganges insgesamt ca. 7 ½ Stunden. Dies entspricht bei zwei Prüfdurchgängen insgesamt 15 Stunden. Der Vorteil dieses Verfahrens ist jedoch die Möglichkeit der gleichzeitigen Polierbeanspruchung von insgesamt sechs unterschiedlichen Gesteinen. Somit reduziert sich die anteilige Dauer der maschinellen Prüfdurchführung je Gestein auf ca. 2 ½ Stunden.

Die Herstellungszeit von vier Splittprobekörpern je Gestein beträgt ca. 2 ½ Stunden. Inklusive einer Arbeitszeit von ca. 2 Stunden für die Gesteinsaufbereitung ergibt sich für die Bestimmung des PSV-Wertes von groben Gesteinskörnungen eine Prüfdauer von insgesamt ca. 7 Stunden. Diese Angaben beruhen jedoch auf der Annahme, dass die volle Kapazität bei der Poliersimulation ausgenutzt wird und somit die Herstellungszeit der benötigten Prüfkörper des Kontrollgesteins auf sechs zu prüfende Gesteinskörnungen anteilig aufgeteilt wird. Muss hingegen für nur ein Gestein der volle Prüfdurchlauf durchgeführt werden, so ist die Prüfdauer beim Verfahren mit der Schnellpoliermaschine im Vergleich zum Prüfverfahren nach Wehner/Schulze länger.

Gemäß der in Kapitel 5.4.1 vorgestellten Arbeitsanleitung zur Herstellung von Sandprobekörper für die Schnellpoliermaschine, beträgt die Dauer der Herstellung von vier Probekörpern inklusive Gesteinsaufbereitung ca. 4 ½ Stunden. Wird auch hierbei die volle Kapazität der Schnellpoliermaschine ausgenutzt, so liegt die Prüfdauer je Gestein unter jener des Verfahrens nach Wehner/Schulze. Zumal ist aufgrund des bisherigen Erfahrungsstands für die Sandpolierprüfung noch kein Mitprüfen eines Kontrollgesteins erforderlich. Erfolgt allerdings eine Bestimmung des Polierwiderstandes an nur einem oder zwei Sanden, so steigt der Prüfaufwand erheblich.

Da die Haltbarkeit der Gleitkörper bei der Pendelmessung sehr gut ist und die benötigten Poliermittel für die Poliersimulation in großen Mengen beschafft werden können, fallen abgesehen von den Personalkosten bei der Prüfdurchführung mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät keine weiteren wesentlichen Kosten an. Dies stellt somit einen wesentlichen Vorteil gegenüber dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze dar.

3.6.4 Zusammenfassende Bewertung

Zusammenfassend werden die beiden gebräuchlichsten Prüfverfahren zur Bestimmung des Polierwertes von Gesteinskörnungen einander gegenübergestellt und bewertet. Der Bewertung liegen dabei eine 3-jährige Prüferfahrung sowie Einzelgespräche mit anderen Betreibern dieser Prüfeinrichtungen zugrunde. Die in Tab. 3.4 angeführte Bewertungsmatrix unterteilt die beiden Prüfverfahren Wehner/Schulze und Schnellpoliermaschine in die fünf Bewertungskategorien:

- Einsatzgebiet
- Probekörperherstellung
- Poliersimulation
- Reibwertbestimmung
- Prüfdauer und -kosten.

Die Wertung erfolgt dabei von sehr gut (👍👍👍👍) über gut (👍👍👍) und brauchbar (👍👍) bis akzeptabel (👍).

Tab. 3.4: Bewertung der Prüfverfahren zur Bestimmung des Polierwertes von Gesteinskörnungen

Bewertungskategorie	Prüfverfahren	
	Wehner/Schulze	Schnellpoliermaschine
Einsatzgebiet	👍👍👍👍	👍👍
Probekörperherstellung	Sand 👍👍👍👍	👍👍👍
	Splitt 👍	👍👍
Poliersimulation	👍👍👍	👍
Reibwertbestimmung	👍👍👍	👍👍
Prüfdauer und -kosten	👍👍	👍👍👍

Aufgrund der Geometrie der Probekörper kann das Verfahren nach Wehner/Schulze für eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen eingesetzt werden und ermöglicht auch Griffigkeitsuntersuchungen beziehungsweise Untersuchungen hinsichtlich der Griffigkeitsentwicklung von realen Fahrbahnoberflächen. Bezugnehmend auf das Einsatzgebiet ist das Prüfverfahren nach Wehner/Schulze deutlich besser als die Schnellpoliermaschine zu bewerten.

Die Herstellung von Sandprobekörpern stellt bei beiden Verfahren keine großen Probleme dar, sofern man die Größe der Prüfkörnung außer Acht lässt. Aufgrund von Erfahrungen aus den in dieser Arbeit erläuterten Untersuchungen hat sich gezeigt, dass für den Einsatz in der Wehner/Schulze Prüfanlage die Fraktion 0,2/0,4 mm am besten geeignet ist. Bei diesem Verfahren ist die leichtere Herstellbarkeit der Sandprobekörper vor allem in der Ebenheit der Holzträgerplatten begründet. Die Herstellung der Splittprobekörper nach dem Mosaikauslegetherfahren erfordert bei beiden Verfahren einen recht hohen Zeitbedarf. Aufgrund der größeren Probekörper ist die Herstellungsdauer beim Verfahren nach Wehner/Schulze länger und somit schlechter bewertet.

Die Poliersimulation erfolgt bei der Schnellpoliermaschine unter Vorhandensein von vielen Ungenauigkeitsfaktoren. Ein versuchter Ausgleich dieser erfolgt bei der Splittpolierprüfung durch das Mitprüfen eines Kontrollgesteins. Durch die großteils automatisierte Zufuhr des Poliermittels beim Verfahren nach Wehner/Schulze werden viele Fehlerquellen beseitigt.

Eine Vergleichsuntersuchung zwischen dem Wehner/Schulze- und dem PSV-Verfahren ergab für das Wehner/Schulze-Verfahren eine Wiederholbarkeit von $r = 0,025$, wohingegen das PSV-Verfahren nur eine Wiederholbarkeit von $r = 3$ erzielte [HUSCHEK 2002]. In Kapitel 4.3 wird die Präzision von einem W/S-Gerät neuer Bauart untersucht. Ursachen für die geringe Wiederholbarkeit der PSV Bestimmung sind sicherlich in der kleinen Prüffläche sowie in der Griffigkeitsmessung mit dem SRT-Pendel an einer gewölbten Oberfläche zu suchen.

Lediglich die derzeit noch mit hohen Kosten verbundene Beschaffung von Ersatzteilen und Verschleißteilen (z.B. Prüfummis, Polierrollen, etc.) bewirkt, dass das Verfahren nach Wehner/Schulze im Routinebetrieb bezüglich der Prüfkosten schlechter zu bewerten ist.

4 PRÄZISIONSUNTERSUCHUNGEN ZUR POLIERWERTBESTIMMUNG MIT DEM WEHNER/SCHULZE VERFAHREN

Unter „Präzision“ versteht man das Ausmaß der gegenseitigen Annäherung von unabhängigen Ermittlungsergebnissen unter festgelegten Bedingungen. Die „Präzision“ kann entweder unter Wiederholbedingungen⁴⁹ oder unter Vergleichsbedingungen⁵⁰ ermittelt worden sein. Im Gegensatz dazu wird manchmal auch der Terminus „Richtigkeit“ verwendet, um die Genauigkeit eines Messverfahrens zu beschreiben. „Richtigkeit“ bezieht sich auf das Ausmaß der Annäherung zwischen dem Mittelwert einer großen Anzahl von Ermittlungsergebnissen und dem wahren oder richtigen Wert [DIN, ISO 5725-1]. Für die Angabe in Prüfnormen wird die „Präzision“ üblicherweise damit ausgedrückt, „wie unpräzise ein Vorgang ist“. Errechnet wird die „Präzision“ üblicherweise als die Standardabweichung von Ermittlungsergebnissen. In diesem Fall spricht man von der Wiederholstandardabweichung (s_r) und der Vergleichsstandardabweichung (s_R), welche unter Wiederhol- bzw. Vergleichsbedingungen ermittelt werden. Eine geringe „Präzision“ spiegelt sich somit in einer großen Standardabweichung der Einzelmessergebnisse wider. Anstelle der Angabe von Wiederhol- und Vergleichsstandardabweichung wird in manchen Prüfnormen als Maß für die Präzision eines Verfahrens auch die Wiederholgrenze⁵¹ (r) und die Vergleichsgrenze⁵² (R) angegeben.

Am intensivsten wurde an der TU Berlin die Wiederholbarkeit von Prüfergebnissen ermittelt mit dem Wehner/Schulze-Verfahren untersucht. Die dort durchgeführten Untersuchungen fanden jedoch alle noch am ursprünglichen, im Abschnitt 3.1.1.1 diskutierten Prototyp statt. Im Rahmen dieser Vergleichsuntersuchungen wurde für die Bestimmung des Polierwertes von Splitt unter Anwendung des Mosaikauslegeverfahrens eine Wiederholgrenze von $r = 0,025 [-]$ ermittelt [HUSCHEK, 2002]. Die dieser Präzisionsuntersuchung zugrunde liegenden Polierwerte PWS von Splittkörnungen wurden anhand einer Doppelbestimmung⁵³ ermittelt. Im Zuge dieser Präzisionsuntersuchungen wurde festgestellt, dass die Anwendung des Polierverfahrens nach Wehner/Schulze im Vergleich zum Polierverfahren nach EN 1097-8 eine deutlich größere Spreizung der Polierwerte von Gesteinskörnungen sowie geringere Prüffehler zur Folge hat. Aufgrund von fehlenden, sich im Einsatz befindlichen Vergleichsmaschinen des Prototypen konnten keine Untersuchungen zur Bestimmung der Vergleichsgrenze von Prüfergebnissen zwischen mehreren Prüflabors durchgeführt werden.

In Österreich ist die Prüfung des Polierwertes von Sand mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze in der RVS 11.06.23:2005 geregelt. Darin angegeben ist lediglich ein Wert für

⁴⁹ Wiederholbedingungen sind Bedingungen, welche die Anwendung desselben Verfahrens am identischen Untersuchungsobjekt im selben Labor durch denselben Bearbeiter mit derselben Geräteausstattung innerhalb kurzer Zeitabstände zur Gewinnung von einander unabhängigen Messergebnissen umfassen.

⁵⁰ Vergleichsbedingungen sind Bedingungen, welche die Anwendung desselben Verfahrens an identischen Untersuchungsobjekten in verschiedenen Labors durch verschiedene Bearbeiter mit verschiedenen Geräteausstattungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten zur Gewinnung von einander unabhängigen Messergebnissen umfassen.

⁵¹ Ist jener Wert, unter dem oder gleich dem der Betrag der Differenz von zumindest zwei unter Wiederholbedingungen gewonnenen Ermittlungsergebnissen mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % erwartet werden kann.

⁵² Ist jener Wert, unter dem oder gleich dem der Betrag der Differenz von zumindest zwei unter Vergleichsbedingungen gewonnenen Ermittlungsergebnissen mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % erwartet werden kann.

⁵³ Bei einer Doppelbestimmung wird der Prüfwert in der Regel als der Mittelwert von zwei Prüfergebnissen, ermittelt an zwei annähernd identen Proben, berechnet.

die Wiederholgrenze der Prüfergebnisse. Die Wiederholgrenze wird basierend auf den in Berlin durchgeführten Präzisionsbestimmungen mit $r = 0,02$ [-] angegeben. Die Vergleichsgrenze der Polierwerte von Sand, bestimmt an verschiedenen, bauartgleichen Prüfgeräten wird darin als „noch nicht bekannt“ angeführt. Da die Prüfanlage nach Wehner/Schulze neuer Bauart erst seit wenigen Jahren von der Firma BPS Wennigsen in Serie produziert wird, gibt es bislang auch nur sehr wenige Angaben bzw. Untersuchungen zur Wiederhol- bzw. Vergleichbarkeit dieses Verfahrens.

Einerseits liegen von den in Berlin durchgeführten Präzisionsuntersuchungen keine öffentlich zugänglichen Aufzeichnungen vor, andererseits wurden diese Untersuchungen mit einem Prototyp des Wehner/Schulze Verfahrens ermittelt. Deswegen sind zusätzliche Präzisionsuntersuchungen mit Prüfanlagen neuer Bauart zwingend notwendig. Vor allem in Anbetracht der Tatsache, dass sowohl in Deutschland als auch in Österreich in den einschlägigen Anforderungsnormen bzw. Richtlinien Grenzwerte für den Polierwert von Gesteinskörnungen, welcher mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze zu bestimmen ist, gestellt werden.

In diesem Kapitel werden zunächst die Ergebnisse eines europäischen Ringversuchs zur Bestimmung der Präzision der Splittpolierprüfung zusammengefasst. Weiters werden die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zur Präzision der Sandpolierprüfung ausführlich erläutert.

4.1 Allgemeine Überlegungen zur Durchführung eines Ringversuchs

Viele unterschiedliche Faktoren können, abgesehen von Streuungen zwischen vermeintlich identischen Proben, zu den Schwankungen der Ergebnisse eines Messverfahrens beitragen und somit die Präzision beeinträchtigen. Dazu gehören

- der Bearbeiter
- die verwendeten Geräte
- die Kalibrierung der Geräte
- die Umgebung (Temperatur, Feuchte, Luftverschmutzung, usw.)
- der Zeitabstand zwischen Messungen

Bei der Planung eines Ringversuchs sind gemäß der DIN ISO 5725-1 generell folgende Aspekte in Betracht zu ziehen:

- (a) Ist eine Norm oder Arbeitsanleitung für das Messverfahren verfügbar?
- (b) Wie viele Labors sollen an dem Ringversuch teilnehmen?
- (c) Was ist der Bereich der in der Praxis angetroffenen Merkmalniveaus und wie viele Merkmalniveaus sollen im Ringversuch behandelt werden?
- (d) Was sind geeignete Materialien für die Repräsentation dieser Merkmalniveaus und wie sollten diese vorbereitet werden?
- (e) Wie viele gleichartige Proben sollen je Merkmalniveau geprüft werden?
- (f) Welcher Zeitrahmen sollte für die vollständige Durchführung aller Messungen vorgegeben werden?
- (g) Welches statistische Auswertemodell soll für die Ermittlung der Präzision herangezogen werden?

Damit im Rahmen eines Ringversuches die durchgeführten Messungen in gleicher Weise ausgeführt werden, muss das Messverfahren vorher vereinheitlicht worden sein. Dazu ist vorher ein Dokument zu verfassen, in welchem alle wesentlichen Prüf- und Arbeitsschritte der

Versuchsdurchführung geregelt werden. Wesentliches Ziel bei der Durchführung eines Ringversuches mit vorher vereinheitlichtem Messverfahren ist es, Unterschiede zwischen Anwendern (Labors) so weit wie möglich zu beseitigen und somit eine gute Wiederhol- und Vergleichspräzision zu erzielen.

In der Regel werden bei einem Ringversuch Proben eines speziell ausgewählten Materials von einem zentralen Ort aus zu einer Anzahl von Labors an verschiedenen Orten gesandt. Im Sinne einer europäischen Normung sollen die Ringversuche immer unter Einbeziehung von Labors aus verschiedenen Ländern durchgeführt werden.

Die Anzahl der zu untersuchenden Proben je Merkmalniveau wird einerseits durch prüftechnische und praktische Überlegungen beeinflusst, andererseits von der erzielbaren Genauigkeit bzw. Wiederholbarkeit von Prüfergebnissen. Eine große Prüfstreuung aufgrund einer unzuverlässigen Prüfmethodik erfordert zur Erzielung eines statistisch gesicherten Prüfergebnisses eine höhere Anzahl von Einzelmessproben als dies bei Prüfmethoden mit einer sehr geringen Prüfstreuung der Fall ist.

Für die Ermittlung der Präzision legt die ISO 5725-1 ein statistisches Grundmodell fest. In Abhängigkeit des zu untersuchenden Materials können jedoch auch von diesem statistischen Grundmodell abweichende Auswerteverfahren angewandt werden.

4.2 Präzision der Polierwertbestimmung von Splitt

Ein erster umfassender Bericht über die Durchführung und die Ergebnisse eines Ringversuchs unter Beteiligung vieler Labors zur Bestimmung der Präzision der Polierwertbestimmung von Splitt ist im Jahr 2009 erschienen [LINDNER et al., 2009]. Vorrangiges Ziel des von der ASPHALTA⁵⁴ koordinierten, unter Teilnahme von 14 europäischen Prüflabors durchgeführten Ringversuchs war es, die Präzision unter Vergleichsbedingungen zu bestimmen, denn für die Wiederholgrenze fand bereits der in Berlin mit einer Wehner/Schulze Prüf-anlage alter Bauart ermittelte Wert Eingang in die deutschen Prüfvorschriften [FGSV, 2008].

Folgende 14 Prüflabors waren an dem Ringversuch beteiligt:

- ASPHALTA Prüf- und Forschungslaboratorium GmbH, Berlin
- asphalt-labor, Arno J. Hinrichsen GmbH & Co. KG, Wahlstedt
- Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach
- Fachhochschule Köln FB Bauingenieurwesen, Köln
- Institut für Baustoffe und Umwelt GmbH, Lauta
- LCPC Nantes, Bouguenais Cedex
- LRPC Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers
- RWTH Institut für Straßenwesen, Aachen
- Technische Universität Berlin, Fachgebiet Straßenbau
- Technische Universität Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau
- Technische Universität München, Centrum Baustoffe und Materialprüfung
- Technische Universität Wien, Forschungsbereich Straßenwesen
- Transport Research Laboratory Crowthorne House, Berkshire
- TPA Gesellschaft für Qualitätssicherung und Innovation GmbH, Wien

Es beteiligten sich somit neun Labors aus Deutschland, jeweils zwei aus Österreich und Frankreich sowie ein Labor aus Großbritannien.

⁵⁴ ASPHALTA Prüf- und Forschungslaboratorium GmbH Berlin, www.asphalta.de

4.2.1 Prüfprogramm

Der Ringversuch wurde an Gesteinskörnungen der Korngruppe 8/11 mit drei unterschiedlichen Polier-Niveaus durchgeführt, die jeweils den unteren, den mittleren und den oberen Bereich von üblichen Straßenbaugesteinen repräsentieren sollten. Als Prüfgesteine wurden verwendet:

- Kalkstein mit einem PSV von 43
- Basalt mit einem PSV von 52
- Quarzit mit einem PSV von 61

Von den Gesteinskörnungen wurden den teilnehmenden Labors von einer zentralen Stelle Laboratoriumsproben von jeweils ca. 50 kg zugestellt. Aus der Laboratoriumsprobe war die Kornklasse 8/11,2 mm nass auszusieben und zu trocknen.

Zur Klärung welches Verfahren der Probekörperherstellung die bessere Reproduzierbarkeit aufweist, wurden sowohl das Mosaikauslegeverfahren als auch das Splitt-Mastix-Eingussverfahren angewandt. Die Prüfung erfolgte anhand einer Doppelbestimmung. Somit betrug der Untersuchungsumfang je Labor 2 x 6 Probeplatten.

Wegen des teilweise unterschiedlichen Erfahrungsstandes mit der Splittpolierprüfung nach Wehner/Schulze – einige Labors hatten die Splittpolierprüfung noch nie durchgeführt – wurde vor der eigentlichen Ausführung des Ringversuches eine Laborantenschulung durchgeführt. Diese Schulung sollte vor allem die Probekörperherstellung der teilnehmenden Labors vereinheitlichen. Die Herstellung der Probekörper erfolgte dabei gemäß der in Abschnitt 3.1.3.2 angeführten Arbeitsanleitungen. Die Probekörper wurden anschließend einer Polierbeanspruchung von 90.000 Überrollungen durch die konischen Gummirollen ausgesetzt. Nach dem Reinigen der Proben wurden je Probe zwei Griffigkeitsmessungen durchgeführt und die Werte aufgezeichnet.

4.2.2 Ergebnisse

Je Labor lagen für ein Gestein und eine Herstellungsmethode insgesamt vier Messergebnisse vor. Zur grafischen Darstellung der Streuung der Messergebnisse sind in Abb. 4-1 die Mittelwerte der vier Messergebnisse je Labor sowohl für das Mosaikauslege- als auch für das Splitt-Mastix-Eingussverfahren abgebildet. Zusätzlich wird der Mittelwert aus allen Messergebnissen in Form einer horizontalen Linie dargestellt.

Das Labor 1 erzielte generell höhere Messwerte als der Durchschnitt, wodurch auf einen systematischen Fehler geschlossen werden kann. Bei den anderen Labors konnte kein eindeutiger Trend festgestellt werden. Deutlich erkennbar wird aus Abb. 4-1, dass beim Splitt-Mastix-Eingussverfahren tendenziell niedrigere PWS-Werte erzielt werden.

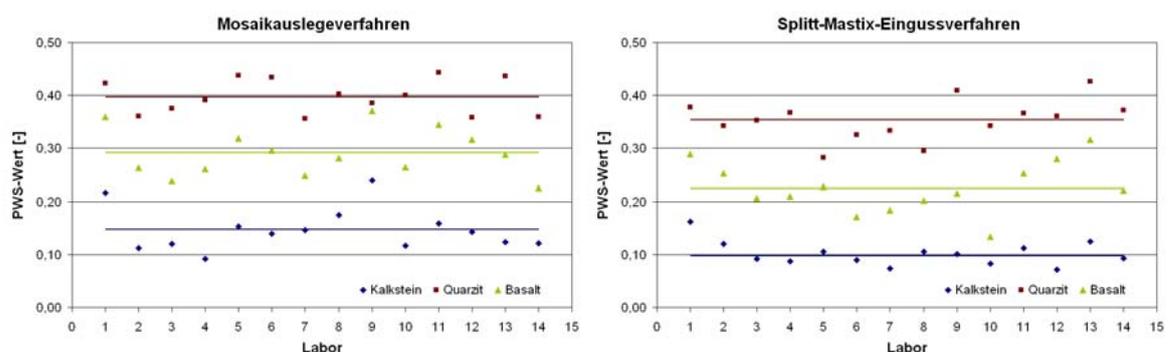


Abb. 4-1: Ermittelte PWS-Werte der drei Gesteinskörnungen für das Mosaikauslegeverfahren (links) und das Splitt-Mastix-Eingussverfahren (rechts)

Für die statistische Auswertung wurden die Mittelwerte der zwei Messergebnisse einer Probe gebildet. Diese Mittelwerte wurden anschließend gemäß dem Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen [FGSV, 1982] auf Ausreißer geprüft. Beim Mosaikauslegeverfahren wurden insgesamt vier Proben, davon bei einem Labor beide Kalksteinproben, als Ausreißer detektiert. Für das Splitt-Mastix-Eingussverfahren wurden insgesamt nur drei Proben als Ausreißer identifiziert, jedoch waren auch hier von einem Labor beide Kalksteinproben zu streichen. Ausgewertet wurde anschließend die Standardabweichung der ermittelten Prüfergebnisse einer Gesteinskörnung unter Vergleichsbedingungen.

In Tab. 4.1 sind für das Mosaikauslegeverfahren die um die Ausreißer beseitigten Mittelwerte je Gesteinskörnung mit Angabe der vorhandenen Vergleichsstandardabweichung und der Vergleichbarkeit angegeben. Aufgrund der Durchführung einer Doppelbestimmung ermittelt sich die Vergleichbarkeit oder auch Vergleichsgrenze nach (4.1).

$$\text{Vergleichsgrenze (R)} = s_R \cdot 1,96 \cdot \sqrt{n} \quad (4.1)$$

s_RStandardabweichung unter Vergleichsbedingungen
 nAnzahl der Schätzwerte ($n = 2$ für Bestimmung der Vergleichsgrenze)

Das niedrigste Polierniveau wurde mit einem PWS von 0,144 [-] für den Kalkstein ermittelt. Der Basalt weist einen mittleren PWS von 0,291 [-] und der Quarzit einen mittleren PWS von 0,397 [-] auf. Auffallend ist, dass die Standardabweichung nicht mit der Höhe des PWS korreliert. So wurde zwar für die Ergebnisse beim Kalkstein die niedrigste Standardabweichung festgestellt, der Basalt mit seinem mittleren Polierniveau weist jedoch mit 0,0459 [-] die höchste Standardabweichung auf. Für das Mosaikauslegeverfahren wurde eine Vergleichsgrenze von 0,094 [-] ermittelt.

Tab. 4.1: Ergebnisse des Ringversuchs - Mosaikauslegeverfahren

	<i>Kalkstein</i>	<i>Quarzit</i>	<i>Basalt</i>	<i>Mittelwert</i>
Mittelwert der Prüfergebnisse	0,144	0,397	0,291	
Standardabweichung unter Vergleichsbedingungen	0,0209	0,0345	0,0459	0,034
Vergleichsgrenze	0,0580	0,0956	0,1271	0,094

In Tab. 4.2 sind sowohl die ermittelten PWS sowie die zugehörigen Standardabweichungen und Vergleichsgrenzen für das Splitt-Mastix-Eingussverfahren angeführt. Auch bei dieser Probenherstellungsmethode wurde für den Quarzit das höchste Polierniveau mit 0,354 [-], gefolgt vom Basalt mit 0,225 [-] und dem Kalkstein mit 0,097 [-] ermittelt. Wie beim Mosaikauslegeverfahren weisen die Proben des Basaltgesteins die größte und die Proben des Kalksteins die niedrigste Standardabweichung auf. Die ermittelte Standardabweichung des Quarzitgesteins ist beim Splitt-Mastix-Eingussverfahren geringfügig höher als beim Mosaikauslegeverfahren. Für das Splitt-Mastix-Eingussverfahren wurde für alle drei Gesteinskörnungen eine mittlere Vergleichsgrenze von 0,096 [-] ermittelt.

Tab. 4.2: Ergebnisse des Ringversuchs – Splitt-Mastix-Eingussverfahren

	<i>Kalkstein</i>	<i>Quarzit</i>	<i>Basalt</i>	<i>Mittelwert</i>
Mittelwert der Prüfergebnisse	0,097	0,354	0,225	
Standardabweichung unter Vergleichsbedingungen	0,0182	0,0398	0,0464	0,035
Vergleichsgrenze	0,0505	0,1102	0,1285	0,096

4.2.3 Diskussion der Ergebnisse

Aufgrund der annähernd identen Präzision der beiden Herstellungsverfahren mit einer Vergleichsgrenze von $R = 0,094 [-]$ respektive $R = 0,096 [-]$ wird von LINDNER et al. [2009] die Verwendung des Splitt-Mastix-Eingussverfahrens aufgrund der kürzeren Probenherstellungszeit sowie der größeren Spreizung empfohlen. Zumal dieses Probekörperherstellungsverfahren für Splittkörnungen < 8 mm anzuwenden ist.

Es muss bei der Auswertung jedoch berücksichtigt werden, dass bei beiden Herstellungsverfahren von einem Labor beide Kalksteinproben als Ausreißer eliminiert wurden, weswegen auch für den Kalkstein die niedrigste Vergleichsgrenze ermittelt wurde. Diese wirkt sich in weiterer Folge positiv auf den Mittelwert der Vergleichsgrenze aus.

Setzt man die in diesem Ringversuch ermittelte Vergleichspräzision in Bezug zur vorhandenen Spannweite der mittleren Polierniveaus, so ergibt sich für die Vergleichsgrenze beim Mosaikauslegeverfahren ein relativer Wert von 37,2 % und beim Splitt-Mastix-Eingussverfahren ein geringfügig höherer Wert von 37,4 %, siehe Tab. 4.3. Für das Verfahren zur Bestimmung des PSV gemäß EN 1097-8 wurde in einem europäischen Ringversuch unter Teilnahme von 18 Prüflabors und unter Prüfung von drei unterschiedlichen Polierniveaus eine mittlere Vergleichsgrenze von $R = 5,2 [-]$ ermittelt. Setzt man diese Vergleichsgrenze in Bezug zur Spannweite des PSV der drei Gesteinskörnungen Basalt, Kalkstein und Quarzit, so ergibt sich ein relativer Wert von 28,9 %.

Tab. 4.3: Vergleich PWS mit PSV - Vergleichsgrenze R bezogen auf die vorhandene Spannweite

	<i>PWS - Mosaik</i>	<i>PWS – Splitt-Mastix</i>	<i>PSV</i>
Höchstes Polierniveau	0,397	0,354	61
Niedrigstes Polierniveau	0,144	0,097	43
Spannweite	0,253	0,257	18
Vergleichsgrenze	0,094	0,096	5,2
In % der Spannweite	37,2	37,4	28,9

Beim Verfahren nach Wehner/Schulze sind die Streuwerte der Prüfergebnisse in Bezug zur Spannweite der Prüfniveaus also um 10 % höher als beim Verfahren zur Bestimmung des PSV, was einer geringeren Präzision des Prüfverfahrens nach Wehner/Schulze gleichzusetzen ist. Es zeigt sich somit, dass hinsichtlich der Prüfgenauigkeit der Splittpolierprüfung beim Verfahren nach Wehner/Schulze noch Handlungsbedarf besteht. Durch die Auswertung eines Fragebogens konnten jedoch bereits folgende wesentlichen Einflussfaktoren auf die hohe Prüfstreuung identifiziert werden:

- Das Probekörperherstellungsverfahren wurde von einigen teilnehmenden Labors noch nicht ausreichend beherrscht, wodurch die ermittelte Präzision als nicht hinreichend gesichert zu bewerten ist.
- Die Prüfeinrichtungen weisen zum Teil einen unterschiedlichen Ausbauzustand auf, da manche Maschinen im Laufe der Jahre nicht auf- bzw. umgerüstet wurden.
- Der Sandstrahlvorgang beim Splitt-Mastix-Eingussverfahren ist nicht ausreichend genau geregelt bzw. funktioniert die verfügbare Prüfeinrichtung nicht im gewünschten Umfang.

Aufgrund der ermittelten Präzision und der zusätzlichen Fehlerquelle bei der Sandstrahlbehandlung der Splitt-Mastix-Probekörper erscheint für die Polierwertbestimmung von Splitten das Mosaikauslegeverfahren geeigneter als das Splitt-Mastix-Eingussverfahren.

4.3 Präzision der Polierwertbestimmung von Sand

In der derzeit in Österreich gültigen Richtlinie über die Durchführung der Polierwertbestimmung von Sand (RVS 11.06.23:2005) wird für die Wiederholgrenze der Wert $r = 0,02$ [-] angegeben. Als zusätzliches Qualitätskriterium wird eine maximal zulässige Spannweite der zu prüfenden zwei Einzelmessproben von $0,03$ [-] vorgegeben.

Im Zuge einer am Institut für Verkehrswissenschaften der TU Wien durchgeführten Reihenuntersuchung zur Bestimmung der Polierresistenz von Sanden mit einer Wehner/Schulze Prüfanlage neuer Bauart wurde festgestellt, dass die in der österreichischen Richtlinie angegebene Wiederholpräzision in manchen Fällen nicht erreicht wurde [KIRCHMAIER et al., 2010]. Zur Bestimmung der Wiederhol- und Vergleichsgrenze wurde im Rahmen dieser Arbeit ein österreichischer Ringversuch mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze durchgeführt. In diesem Kapitel werden die verschiedenen Einflussfaktoren auf das Prüfergebnis erläutert sowie manche Faktoren im Detail untersucht und analysiert. Weiters wird die Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichbarkeit des Verfahrens ausführlich beschrieben.

4.3.1 Zielstellungen des österreichischen Ringversuchs

Aufgrund von ersten Untersuchungen zur Abschätzung der Wiederholbarkeit, welche am Forschungsbereich Straßenwesen der TU Wien durchgeführt wurden, ist der in der derzeit gültigen RVS 11.06.23:2005 angeführte Wert zu hinterfragen. Da zusätzlich noch keine Untersuchungen für die Vergleichbarkeit der Polierwertbestimmung von Sand mit dem Polierverfahren nach Wehner/Schulze vorliegen, wurde ein innerösterreichischer Ringversuch durchgeführt. Die Zielsetzungen des Ringversuchs stellen sich wie folgt dar:

- Festlegung eines vereinheitlichten Messverfahrens bzw. vereinheitlichte Prüfbedingungen zur Bestimmung des PWS von feinen Gesteinskörnungen zur Aufnahme in einer Neufassung der derzeit gültigen Richtlinie
- Ermittlung der Wiederholstandardabweichung
- Ermittlung der Vergleichsstandardabweichung
- Identifikation von prüfanlagenbedingten, systematischen Fehlerkomponenten unter Zuhilfenahme einer zusätzlichen Kontrollplatte und Bestimmung von maschinentechnischen Unterschieden zwischen den Prüflabors.

4.3.2 Festlegungen für die Durchführung des Ringversuchs

In diesem Abschnitt werden alle für die Durchführung des Ringversuchs notwendigen Festlegungen und vorgenommenen Einschränkungen angeführt und im Detail erläutert.

4.3.2.1 Auswahl von Prüflabors

In der ISO 5725, Teil 1 [DIN, 1997] werden Empfehlungen über die notwendige Anzahl von an einem Ringversuch teilnehmenden Prüflabors (p) gegeben. Je höher die Anzahl der teilnehmenden Prüflabors und je höher die Anzahl der untersuchten Einzelmessproben (n) eines Merkmalniveaus sind, desto geringer wird die Unsicherheit der ermittelten Wiederhol- und Vergleichsstandardabweichungen, siehe Abb. 4-2.

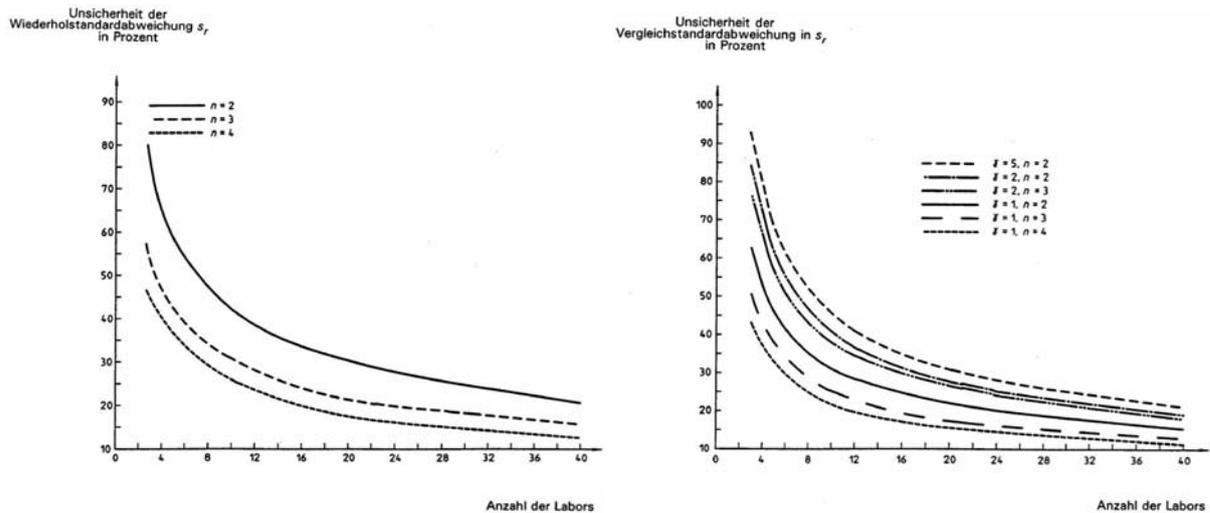


Abb. 4-2: Relative Unsicherheit der ermittelten Wiederhol- und Vergleichsstandardabweichungen bei einem Erwartungswert von 95 % in Abhängigkeit von der Anzahl der teilnehmenden Prüflabors und Anzahl der untersuchten Einzelmessproben [DIN, ISO 5725-1:1997]

Mit einer höheren Anzahl von zu untersuchenden Einzelmessproben (n) lässt sich, mit Hinblick auf die vorhandene Unsicherheit, eine geringe Anzahl von zur Verfügung stehenden Prüflabors kompensieren. Neben der Anzahl der untersuchten Einzelmessproben eines Merkmalniveaus und der Anzahl der teilnehmenden Labors hat bei der Ermittlung der Vergleichsstandardabweichung auch das Verhältnis zwischen Vergleichs- und Wiederholstandardabweichung (γ) einen Einfluss auf den Unsicherheitsfaktor. Je größer das Verhältnis zwischen (s_R) und (s_r) wird, desto mehr am Ringversuch teilnehmende Prüflabors sind notwendig, um eine geringe Unsicherheit zu erzielen.

Wie aus Abb. 4-2 ersichtlich wird, lässt sich eine mit einem Erwartungswert von 95 % eintretende Unsicherheit für die aus einem Ringversuch ermittelte Wiederhol- und Vergleichsstandardabweichung von $< 50\%$ nur mit einer höheren Anzahl von Einzelmessproben ($n \geq 3$) und einer höheren Anzahl von Prüflabors ($p \geq 4$) erzielen.

In Österreich gibt es zurzeit lediglich zwei Prüflabors, welche im Besitz einer Prüfanlage nach Wehner/Schulze neuer Bauart sind. Dazu zählen der Forschungsbereich Straßenwesen der TU Wien und die Technische Prüfanstalt (TPA)⁵⁵ mit ihrer Niederlassung in Wien. Beide Prüflabors betreiben seit dem Jahr 2006 eine Prüfmaschine der neuesten Bauart und haben bereits umfangreiche Prüferfahrung gesammelt.

Im Rahmen dieser Arbeit war die Organisation und Durchführung eines europäischen Ringversuches unter Einbeziehung von mehr als zehn Prüflabors aus finanziellen Gründen nicht möglich. Deswegen wurde im Jahr 2008 unter Zustimmung der im austrolab⁵⁶ angesiedelten Arbeitsgruppe Verkehrswegebau der Sektion Bautechnik beschlossen, einen innerösterreichischen Ringversuch mit Beteiligung der existierenden zwei Prüfmaschinen durchzuführen.

Die Durchführung eines Ringversuches unter Beteiligung von lediglich zwei Prüflabors bedarf einer Modifizierung des für Ringversuche üblichen Prüfprogramms. Das modifizierte

⁵⁵ TPA - Gesellschaft für Qualitätssicherung und Innovation. Die TPA ist ein eigenes Kompetenzzentrum der STRABAG SE. www.tpaqi.com

⁵⁶ austrolab ist ein gemeinnütziger Verein und hat unter anderem das Ziel, eine einheitliche Umsetzung von Anforderungen an Versuchsanstalten und Prüf-, Überwachungs-, Beglaubigungs-, Kalibrier- und Zertifizierungsstellen sicherzustellen. www.austrolab.at

Prüfprogramm wird in Kapitel 4.3.3 ausführlich erläutert. Im Folgenden wird das Prüflabor des Forschungsbereichs Straßenwesen der TU Wien als Labor A und das Prüflabor der Gesellschaft für Qualitätssicherung und Innovation als Labor B abgekürzt.

4.3.2.2 Materialien für den Ringversuch

Verwendete Gesteine

Für die Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichspräzision der Polierwertbestimmung von Sand an der Kornfraktion 0,2/0,4 mm wurden zwei Sande mit bekannt unterschiedlichem Polierniveau ausgewählt.

Verwendung fand ein Silikatmarmor mit einem Polierwert im mittleren Bereich (zwischen 0,30 und 0,45 [-]). Bei diesem Silikatmarmor handelt es sich um einen mit Silikaten durchsetzten Kalkstein, der eine Metamorphose durchlaufen hat. Dieses Gestein kommt in Österreich sehr selten vor. Es besteht vorwiegend aus Calcit, Pyroxen und Granat. Der Sand wird in einem Steinbruch in Niederösterreich gewonnen und in weiterer Folge als Gestein G309 bezeichnet.

Das zweite Prüfmaterial, ein kalzitischer Marmor, stammt aus dem ostalpinen Kristallin und wird in Kärnten abgebaut. Dabei handelt es sich um einen kalkreichen Sand mit einem sehr niedrigen Polierwert $< 0,30$ [-], welcher in weiterer Folge als Gestein GTPA bezeichnet wird.

Das Gestein G309 wurde gemäß den Festlegungen in Abschnitt 4.3.2.3 vom Labor A (Prüflabor der TU Wien) und das Gestein GTPA vom Labor B (Prüflabor TPA) aufbereitet. Insgesamt wurden von jedem Material ca. 3,5 kg Sand der Fraktion 0,2/0,4 mm ausgesiebt.

Auf die Verwendung eines Sandes mit einem Polierwert im Bereich zwischen 0,50 und 0,60 [-] wurde aus prüftechnischen Gründen verzichtet. Aus Erfahrungen ist bekannt, dass sich die für die Prüfung von solch einem Gestein verwendeten Prüfummis, sehr schnell abnutzen. Somit ist es in der Regel nicht möglich, mit einem Prüfummisatz mehr als drei bis vier Einzelmessproben zu prüfen. Mit einem derart polierresistenten Sand hätte sich das in Kapitel 4.3.3 beschriebene Versuchsprogramm also nicht realisieren lassen.

Kontrolloberflächen

Die Funktionskontrolle des Laborgriffigkeitsmessgerätes und des verwendeten Prüfummisatzes hat gemäß RVS 11.06.23:2005 mithilfe einer Kontrolloberfläche zu erfolgen. Kontrolloberflächen mit einem konstanten Griffigkeitsniveau eignen sich auch zur Bestimmung der absoluten Messwertabweichung zwischen den beiden Wehner/Schulze Prüfmaschinen sowie zur Ermittlung der Qualität der Prüfummis und in weiterer Folge deren möglicher Einfluss auf den PWS von Sand. Im Rahmen der Präzisionsuntersuchungen wurden mit mehreren Prüfummisätzen Referenzmessungen an zwei Kontrolloberflächen durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde zusätzlich zur Standardkontrolloberfläche aus Drahtornamentglas⁵⁷ eine Kontrolloberfläche aus Stahl angefertigt.

a) Glaskontrollplatte

Die Glaskontrollplatte, siehe Abb. 4-3, besteht aus Drahtornamentglas mit der Handelsbezeichnung 521 – 7 mm, welches auf eine Aluminiumplatte aufgeklebt ist. Aufgrund des Herstellungsprozesses des Ornamentglases und der gleichbleibenden Oberflächenstruktur weisen

⁵⁷ Drahtornamentglas ist ein Gussglas mit einer Einlage aus Draht. Bei der Herstellung wird vor dem Abkühlen des zähflüssigen Glasbandes ein Geflecht aus Draht eingelegt und anschließend mit Prägwalzen ein Muster (Ornament) in das Glas gedrückt. Dadurch wird eine hohe Reproduzierbarkeit der Oberflächenstruktur erreicht.

die Glaskontrolloberflächen ein sehr ähnliches und vor allem konstantes Griffigkeitsniveau auf.

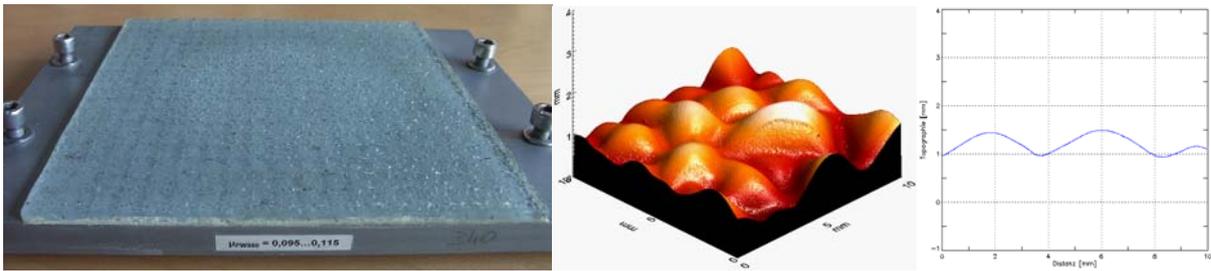


Abb. 4-3: Drahtornamentglasplatte 521-7 mm, 3D-Ausschnitt und mittleres Oberflächenprofil

Kennzeichnend für die Drahtornamentkontrollplatte ist die langwellige Oberflächentextur mit Rautiefen von bis zu 1,0 mm. Bei der Verwendung von neuen Prüf gummi sätzen gemäß der „Berliner Mischung“ wird mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze auf der Glaskontrollplatte ein Reibwert im Bereich zwischen 0,095 und 0,115 [-] gemessen.

Bereits für die Polierwertbestimmung von Sand verwendete Prüf gummi sätze weisen in Abhängigkeit der Rauigkeit der geprüften Oberfläche einen um 10 bis 30 % höheren Kontrollwert auf der Glasplatte auf.

b) Riffelplatte aus Stahl

Die auf der Glaskontrollplatte ermittelten Reibwerte liegen auf einem viel niedrigeren Niveau als Reibwerte, welche auf durchschnittlichen Oberflächen aus Sand oder Asphalt ermittelt werden. Bisher wurde in der österreichischen Prüfvorschrift für die Polierwertbestimmung von Sand davon ausgegangen, dass Prüf gummi sätze mit einem gegenüber dem Neuzustand 10 % höheren Kontrollwert auf der Glasoberfläche keinen Einfluss auf das Prüfergebn haben. Im Jahr 2008 wurde mit mehreren neuen Prüf gummi sätzen auf der Glasplatte ein Kontrollwert bestimmt. Eine Analyse dieser Werte zeigte, dass das Reibwertniveau von neuen Prüf gummi s zwischen 0,100 und 0,115 [-] schwankt. Setzt man die Differenz von 0,015 [-] in Bezug zu dem in Deutschland gebräuchlichen mittleren Messniveau von neuen Prüf gummi s von ca. 0,100 [-], so ergibt sich eine Streuung der Kontrollwerte von bis zu 15 %.

Zur Untersuchung inwieweit abgenutzte Prüf gummi s das Prüfergebn beeinflussen sowie zur Bestimmung der Kontrollwertabweichung von neuen Prüf gummi s auf einem höheren Reibwertniveau wurde im Rahmen der gegenständlichen Arbeit eine Riffelplatte konstruiert, siehe Abb. 4-4.

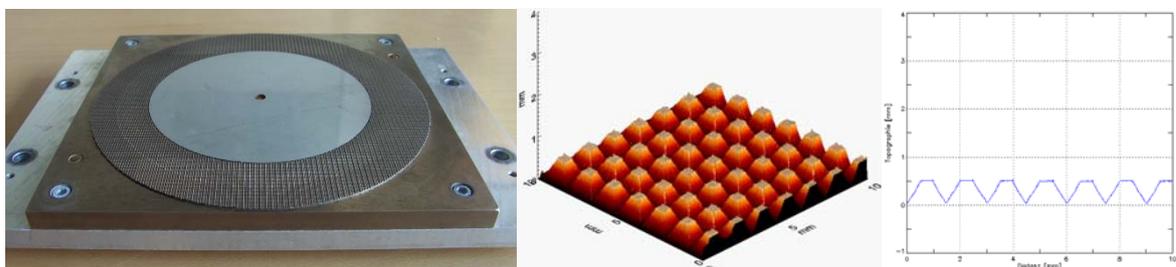


Abb. 4-4: Riffelplatte aus gehärtetem Stahl, 3D-Ausschnitt und mittleres Oberflächenprofil

Die Riffelplatte weist ein regelmäßiges, gefrästes Noppenprofil mit konstanter Rautiefe auf und wurde nach dem Fräsen und Schleifen der quadratischen Noppen gehärtet. In Abb. 4-5 sind die quadratischen Noppen im Detail mit Kennzeichnung zweier Profile dargestellt. Die Abmessungen der Profilnoppen betragen:

- $a = 0,5 \pm 0,01 \text{ mm}$
- $b = 0,5 \pm 0,01 \text{ mm}$
- $R_t = 0,5 \pm 0,01 \text{ mm}$

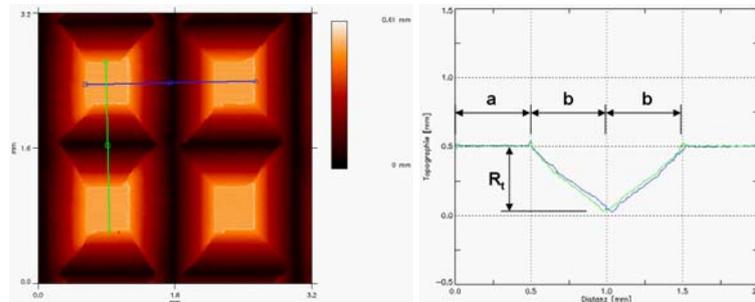


Abb. 4-5: Riffelplatte – Detailansicht mit Profilausschnitt

Durch den Fräs- und anschließenden Schleifvorgang entstehen auf den Ecken der quadratischen Profilmoppen feine Schleifgrate. Diese sorgen für einen hohen Reibwert, werden jedoch durch die Beanspruchung während des Prüfvorganges mit der Zeit abgefahren. Erst nach Entfernung dieser Schleifgrate stellt sich ein gleichmäßiges Griffigkeitsniveau auf der Riffelplatte ein. Dieses liegt bei der hier gewählten Geometrie der Profilmoppen im Bereich von 0,280 bis 0,300 [-].

4.3.2.3 Vereinheitlichte Prüfbedingungen

Zur Sicherstellung einer ordnungsgemäßen Durchführung des Ringversuches wurde im Vorfeld der Prüfungen aufbauend auf der Arbeit von KIRCHMAIER [2007] eine vereinheitlichte Probenaufbereitung und Probekörperherstellung sowie Prüfdurchführung festgelegt. Diese vereinheitlichten Prüfbedingungen sollten zusätzlich als Grundlage für die Überarbeitung der RVS 11.06.23:2005 dienen. Die wesentlichsten Verfahrensschritte werden in diesem Abschnitt erläutert. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Arbeitsschritte der vereinheitlichten Prüfbedingungen ist im Anhang A angeführt.

a) Probenaufbereitung

Im Zuge der Bestimmung der Wiederhol- und Vergleichspräzision wurden die Einflüsse der Probenaufbereitung auf die Prüfstreuung minimiert, indem ein Laborant das gesamte für die Prüfdurchführung benötigte Material einer Gesteinskörnung, ca. 3,5 kg, aufbereitete. Durch das Aufbereiten von 3,5 kg Prüfmaterial wird sichergestellt, dass das für die Herstellung der Einzelmessproben benötigte Prüfmaterial repräsentativ für die Korngruppe 0/2 des Ausgangssandes ist.

b) Prüfplattenherstellung

Die in den Prüflabors vorrätigen Holzträgerplatten sind mit einer klaren Holzschutzlasur zu versiegeln und auf ihre Ebenheit zu kontrollieren. Anschließend werden nach dem Einstreuverfahren, siehe Abschnitt 3.1.3.1, die Einzelmessproben hergestellt.

Als Klebstoff wird ein 2-Komponenten Klebstoff der Marke MC-DUR 1200 VK verwendet.

c) Polieren

Der Poliervorgang erfolgt grundsätzlich gemäß den in der RVS 11.06.23:2005 angeführten Arbeitsschritten und Messeinstellungen. Das heißt, die Einzelmessproben werden durch

90.000 Überrollungen der Polierrollen unter Zugabe eines Wasser-Quarzmehl-Gemisches im Verhältnis von 60 g Quarzmehl pro 1 Liter Wasser beansprucht.

Wesentlichste Festlegung im gegenständlichen Ringversuch ist die Aktivierung der Blattfedern⁵⁸ auf der Polierstation.

d) Prüfen

Der Prüfungsvorgang erfolgt wie die Poliersimulation grundsätzlich gemäß den Festlegungen der RVS 11.06.23:2005.

Zur Überprüfung der Qualität der Prüfummisätze wurden im Rahmen des Ringversuchs zusätzliche Untersuchungen unternommen. Dazu wurden verschiedene Prüfummisätze auf einer neu konstruierten Kontrolloberfläche von beiden Prüflabors abwechselnd getestet, siehe dazu Abschnitt 4.3.10.

In Tab. 4.4 sind wesentliche Einflussfaktoren auf den Polierwert von Sand und deren Berücksichtigung im durchgeführten Ringversuch angeführt. Die darin verwendeten Markierungen (✓) und (✗) haben folgende Bedeutung:

- (✓) Der angeführte Einflussfaktor wurde im Ringversuch entweder durch Verwendung von gleichen Prüfhilfsmitteln sowie durch Einhaltung genauer Vorschriften berücksichtigt, oder es wurden für den betreffenden Einflussfaktor in beiden Labors genaue Daten für eine nachfolgende statistische Auswertung erfasst.
- (✗) Der Einflussfaktor konnte im Ringversuch nicht berücksichtigt werden. Entweder konnte durch einfache Maßnahmen im Labor auf den Einflussfaktor nicht eingegangen werden (z.B. Wägung, etc.) oder aber der Einflussfaktor ist anderen Ursprungs (z.B. Geologie des Gesteins).

Als Beispiel seien hier die Klebstoffqualität bei der Prüfplattenherstellung und die verwendeten Polierrollen bei der Poliersimulation erwähnt. Beide Labors verwendeten zwar denselben Klebstoff, jedoch kann sich die Qualität des Klebstoffes zufolge unterschiedlicher Lagerdauer in den Labors unterscheiden. Die in den Labors verwendeten Polierrollen stammen alle von der Fa. BPS Wennigsen. Allerdings dürfen für die Prüfung von Sandproben keine neuen Polierrollen verwendet werden, weswegen in den Labors vor Durchführung des Ringversuchs unterschiedliche Proben für die „Einlaufphase“ der Gummirollen verwendet wurden. Zudem wurde nicht aufgezeichnet, wie viele Proben mit den Gummirollen vor Durchführung des Ringversuchs poliert wurden.

Eine genauere Analyse des Einflusses von einigen dieser Faktoren auf den Polierwert von Sand wird in Kapitel 4.5 durchgeführt.

⁵⁸ Die Blattfedern sind eine bei den Maschinen der Fa. BPS Wennigsen integrierte Neuentwicklung, welche bei dem ursprünglichen Wehner/Schulze Poliersimulator nicht vorhanden waren. Die Blattfedern ermöglichen die Kompensation von dynamischen Schwingungen während der Poliersimulation bzw. können aktivierte Blattfedern geringfügige Unebenheiten der Prüfoberfläche ausgleichen. Wehner/Schulze Maschinen neuer Bauart wurden manchmal mit aktivierter und manchmal ohne aktivierte Blattfederlagerung ausgeliefert, wodurch sich die Polierwirkung zwischen den Maschinen unterscheiden kann.

Tab. 4.4: Berücksichtigung von Einflussfaktoren auf den PWS im Ringversuch

<i>Einflussfaktor</i>	<i>Berücksichtigung im Ringversuch</i>	
<i>Materialgewinnung und Probennahme</i>		
Geologie	✗	} Nicht berücksichtigt, Verwendung einer Laboratoriumsprobe, Entnahmeart und Abbaumethode sowie Aufbereitung un- bekannt.
Wetter / Witterung	✗	
Abbaumethode / Nachbearbeitung	✗	
Lagerung	✗	
Probemenge	✗	
Probennehmer	✗	
<i>Probenaufbereitung</i>		
Laborant	✗	1 Laborant bereitet das Gestein für beide Labors auf
Siebe	✓	Verwendung von kalibrierten Sieben
Feinteile	✓	Behandlung der Fraktion 0,2/0,4 mm im Ultraschallbad
Trocknung	✓	18 Stunden bei $(110 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$
Repräsentative Menge	✓	Je Gestein werden ca. 3500 g aufbereitet
<i>Prüfplattenherstellung</i>		
Laborant	✓	1 Laborant je Prüflabor
Versiegeln der Holzträgerplatten	✓	Einheitlicher Lack, 15 Platten auf einmal, Höhenkontrolle
Klebstoffqualität	✗	Verwendung von MC-DUR 1200 VK Vorräten
Temperatur	✓	Herstellung bei Raumtemperatur
Klebstoffmenge	✓	28 g auf drei Probeplatten gleichmäßig verteilt
Gesteinsmenge	✓	Mittels Wägung für jede Einzelmessprobe erfasst
Einriesel- / Einwalzvorgang	✓	Im Zuge der Vereinheitlichung des Herstellungsverfahrens gere- gelt
<i>Polieren</i>		
Poliertemperatur	✓	Konstant mit $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$
Anzahl der Polierüberrollungen	✓	Gemäß RVS 11.06.23 mit 90.000 festgelegt
Poliermoment	✓	Wird aufgezeichnet und analysiert
Quarzmehl-Wasser-Gemisch	✓	Wird nach Prüfung von sechs Einzelmessproben getauscht
Polierrollen	✗	Verwendung von benützten Polierrollen (Fa. BPS Wennigsen)
Gesteinsverlust	✓	Mittels Wägung für jede Einzelmessprobe erfasst
Spülvorgang	✓	Mit 120 Sekunden festgelegt
<i>Prüfen</i>		
Prüfwassertemperatur	✓	Konstant mit $(10 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$
Prüfgummiqualität	✓	Verwendung von Prüfgummis der Fa. BPS Wennigsen
Kalibrierung, Oberfläche	✓	Kontrollmessung auf der Glasplatte vor jeder Prüfung
Prüfgummitemperatur	✓	Prüfgummis werden vor Verwendung für 12 Stunden temperiert
Datenausgabe	✓	Erfolgte mit Standardauswertung gem. Abschnitt 3.1.4.3

✓ berücksichtigt, ✗ nicht berücksichtigt bzw. nicht mit Daten erfasst

4.3.3 Versuchsprogramm

In KIRCHMAIER et al. [2010c] wurde festgestellt, dass einerseits sehr oft die zulässige Spannweite zwischen den Ergebnissen von zwei Einzelmessproben erreicht bzw. auch überschritten wird und andererseits, dass die in der RVS 11.06.23 [FSV, 2005] angegebene Wiederholbarkeit der PWS Bestimmung nicht eingehalten wird. Als Konsequenz der unzureichenden Wiederholbarkeit wurde empfohlen, anstelle einer 2-fach-Bestimmung routinemäßig eine 3-fach-Bestimmung durchzuführen. In dem hier beschriebenen Ringversuch wurde deswegen bereits dazu übergegangen, den Polierwert von Sand (PWS) anhand von drei Einzelmessproben zu bestimmen.

Das im Rahmen des Ringversuchs durchgeführte Versuchsprogramm gliedert sich generell in drei Prüfphasen, siehe Tab. 4.5.

Tab. 4.5: Übersicht über die Prüfphasen

	<i>Beschreibung</i>
Prüfphase 1	Ermittlung der Wiederholstandardabweichung – Prüfung von 10 x 3 Einzelmessproben je Gestein. 1 Laborant stellt alle 30 Einzelmessproben eines Gesteins her.
Prüfphase 2	Ermittlung der Vergleichsstandardabweichung – Prüfung von 4 x 3 Einzelmessproben je Gestein. 1 Laborant aus beiden Labors stellt je Gestein 6 Einzelmessproben her.
Prüfphase 3	Bestimmung des prüfmaschinenbedingten, systematischen Prüffehlers mithilfe von zwei Kontrolloberflächen

In der **ersten Prüfphase** wird die Wiederholstandardabweichung innerhalb eines Labors ermittelt. In dieser Prüfphase wird untersucht wie hoch die durchschnittliche Standardabweichung innerhalb einer 3-fach-Bestimmung ist und wie groß die Abweichung zwischen mehreren 3-fach-Bestimmungen innerhalb eines Labors ist. Dazu stellt ein Laborant von einem Gestein insgesamt 30 Einzelmessproben gemäß den Anleitungen des vereinheitlichten Messverfahrens her. Das heißt, es werden 10-Mal drei Einzelmessproben in einem Herstellungsprozess angefertigt. Die von einem Laboranten hergestellten Proben erhalten dabei die fortlaufenden Nummern 01 bis 30. Das Labor A stellt die 30 Einzelmessproben des Gesteins G309 und das Labor B die 30 Einzelmessproben des Gesteins GTPA her. Probekörper mit einer ungeraden fortlaufenden Nummer verbleiben beim Labor A, jene mit einer geraden fortlaufenden Nummer beim Labor B. Somit erhält jedes Labor aus einer auf einmal hergestellten 3er Serie von Einzelmessproben zumindest eine Probe. Der Probenaustausch dient dazu, einen Fehler des Laboranten bei der Herstellung einer 3er Serie von Einzelmessproben zu erkennen.

In der **zweiten Prüfphase** wird die vorhandene Vergleichsstandardabweichung bei der PWS-Bestimmung zwischen den Labors ermittelt. Dafür erzeugt und prüft das Labor A mit dem Gestein GTPA und das Labor B mit dem Gestein G309 sechs Einzelmessproben (zwei 3er Serien). Die zusätzlichen sechs Proben eines Gesteins erhalten die fortlaufende Nummerierung 31 bis 36. Von jedem Labor wurden somit insgesamt 36 Einzelmessproben geprüft. Zwischen der Durchführung der ersten und der zweiten Prüfphase lag ein Zeitunterschied von ca. 3 Monaten.

Alle in einem Prüflabor produzierte Einzelmessproben sowie die Aufteilung dieser Proben auf die beiden Prüflabors inklusive dem Austauschschema der Prüfkörper ist in Abb. 4-6 grafisch aufbereitet. Blau umrandete Probennummern kennzeichnen Einzelmessproben, welche vom Labor A geprüft worden sind. Gelb umrandete Probennummern kennzeichnen Einzelmessproben, welche vom Labor B geprüft worden sind.

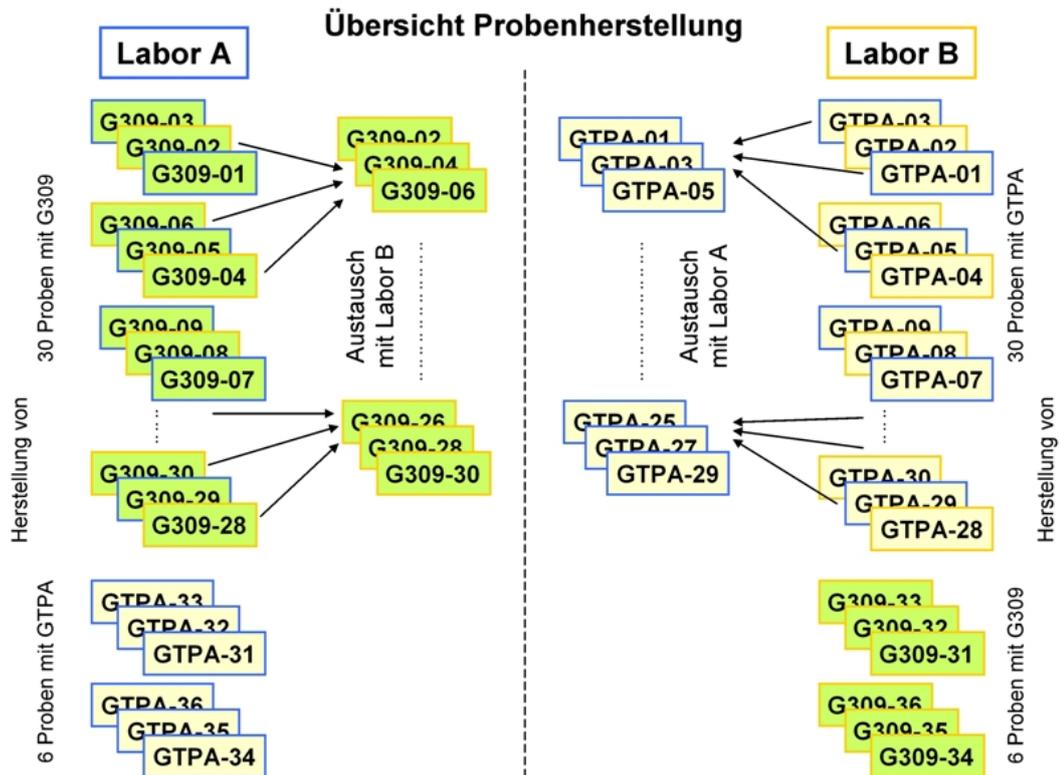


Abb. 4-6: Übersicht über die im Ringversuch hergestellten Probekörper

Eine detaillierte Auflistung der von einem Labor geprüften Einzelmessproben mit Angabe des für die Prüfung verwendeten Prüfgrundstoffes (z.B. F39X) ist in Abb. 4-7 angeführt.

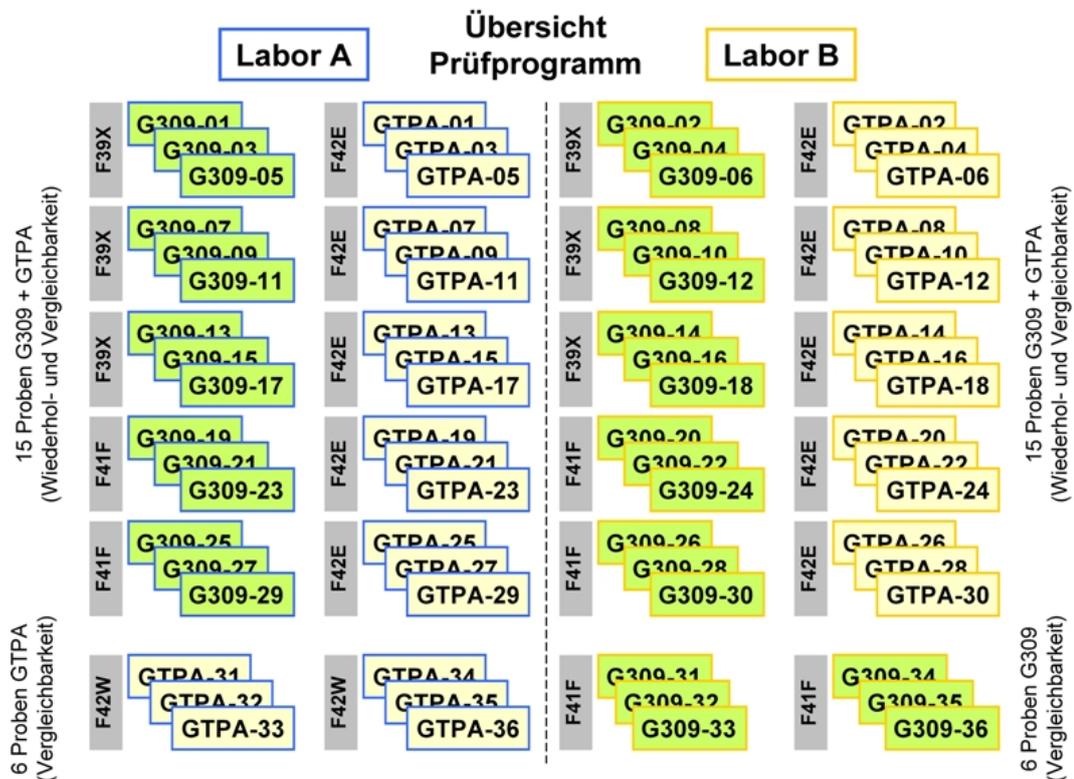


Abb. 4-7: Übersicht über das Prüfprogramm zur Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichsstandardabweichung der Polierwertbestimmung von Sand mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze

Wie aus Abb. 4-7 ersichtlich, wurden bei der Prüfung des Gesteins G309 in der ersten Prüfphase zwei verschiedene Prüfgummisätze verwendet. Dies war notwendig, da der Prüfgummisatz F39X bereits nach 18 geprüften Einzelmessproben starke Abnutzungserscheinungen in Form einer Abriebskeilbildung aufwies. Beim Gestein GTPA konnten in der ersten Prüfphase alle 30 Einzelmessproben mit dem Prüfgummisatz F42E geprüft werden. Da für ein Gestein von beiden Labors derselbe Prüfgummisatz zu verwenden war, wurde der Prüfgummisatz zwischen den Labors ausgetauscht. Das heißt: Labor A prüfte mit dem Prüfgummisatz F39X die Proben G309-01, -03 und -05, während das Labor B mit dem Prüfgummisatz F42E die Einzelmessproben GTPA-02, -04 und -06 prüfte. Nach dem Tausch der beiden Prüfgummisätze zwischen den Labors prüfte das Labor A mit dem Prüfgummisatz F42E die Proben GTPA-01, -03 und 05, während das Labor B für die Proben G309-02, -04 und -06 den Prüfgummisatz F39X verwendete. Diese Prozedur wurde während der gesamten ersten Prüfphase beibehalten.

Für die zweite Prüfphase, in der die Bestimmung der Vergleichsstandardabweichung der Prüfdurchführung im Vordergrund stand, wurde vom Labor A für das Gestein GTPA der Prüfgummisatz F42W und vom Labor B für das Gestein G309 der Prüfgummisatz mit der Nummer F41F verwendet. Die in dieser Prüfphase ermittelte Vergleichsstandardabweichung berücksichtigt somit folgende Parameter:

- Unterschiedlicher Laborant bei der Probekörperherstellung
- Unterschiedliche Prüfmaschinen und Prüfmittel
- Unterschiedliche Zeitabstände zwischen den Messungen

In der dritten Prüfphase wurden mit verschiedenen Prüfgummisätzen auf der Glas- und auf der Riffelplatte Vergleichsmessungen zwischen dem Labor A und dem Labor B durchgeführt. Ziel dieser dritten Prüfphase war es, den prüfmaschinenbedingten, systematischen Messfehler zwischen den beiden Prüfmaschinen an homogenen Prüfoberflächen zu bestimmen.

4.3.4 Datenauswertung

Zur Bestimmung der Wiederhol- und der Vergleichspräzision des vereinheitlichten Prüfverfahrens wurde den Empfehlungen der Normenserie DIN ISO 5725-ff gefolgt. In dieser Normenserie werden sowohl Anleitungen für die Durchführung als auch Empfehlungen für die statistische Auswertung von Ringversuchen angeführt.

Die Normenserie ISO 5725 bietet mehrere unterschiedliche Möglichkeiten zur Auswertung von Ringversuchen in Abhängigkeit des zu bestimmenden Parameters, der vorgegebenen Zwischenbedingungen und des zu untersuchenden Materials an. Für die gegenständliche Auswertung wurden folgende zwei Auswertungsmethoden bzw. Normenteile angewandt:

a) Auswertung gemäß DIN ISO 5725-2 [DIN, 2002]

Darin wird ein grundlegendes Verfahren für die Planung und Durchführung eines Ringversuchs, der mit Einzelproben auf einheitlichem Merkmalsniveau arbeitet, erläutert. Dieser Teil der ISO 5725 geht davon aus, dass zwischen den Labors nur kleine Differenzen bezüglich der Streuungen innerhalb der Labors bestehen, sprich alle Labors arbeiten auf demselben Level bei der Prüfdurchführung. Um dies zu gewährleisten, ist der Vereinheitlichung des Prüfverfahrens und der Schulung des Laborpersonals besonders große Bedeutung zuzumessen. Im Zuge der Auswertung werden Maße für die Präzision eines Prüfverfahrens anhand der Wiederhol- und Vergleichsstandardabweichung geschätzt. Dieses Verfahren wird in der Prüftechnik zumeist angewandt, bedingt jedoch das Vorhandensein von einer Vielzahl an identischen Materialproben bzw. homogenes Material.

Details der für den gegenständlichen Ringversuch angewandten Auswertung nach DIN ISO 5725-2 sind im Anhang B, Abschnitt B.1 angeführt.

b) Auswertung gemäß DIN ISO 5725-5 [DIN, 2002]

Darin wird ein Verfahren zur Bestimmung der Wiederhol- und Vergleichsstandardabweichung unter Berücksichtigung von heterogenem Prüfmaterial erläutert. Dabei wird auch die vorhandene Schwankung zwischen den Proben berücksichtigt. Mit diesem Verfahren können also Schätzwerte für die Vergleichsstandardabweichung ermittelt werden, aus welchen die Schwankung zwischen den Proben abgetrennt wurden.

Bei der statistischen Auswertung gemäß DIN ISO 5725-5 werden neben dem Gesamtmittelwert (m_j) folgende Standardabweichungen (s_j) ermittelt:

- Wiederholstandardabweichung s_{rj}
- Standardabweichung zwischen den Proben s_{Hj}
- Standardabweichung zwischen den Labors s_{Lj}
- Vergleichsstandardabweichung s_{Rj}

Details der für den gegenständlichen Ringversuch verwendeten Auswertemethode nach DIN ISO 5725-5 sind im Anhang B, Abschnitt B.2 angeführt.

Beide Auswertemethoden werden für die Prüfphasen 1 und 2 angewandt und die Ergebnisse anschließend im Kapitel 4.3.8 diskutiert.

4.3.5 Einzelmessergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des österreichischen Ringversuchs im Detail beschrieben. Zuerst werden die ermittelten Einzelmessergebnisse für die beiden Gesteinskörnungen angeführt und getrennt nach Prüfdatum und Prüfreihefolge dargestellt, sowie der Median⁵⁹, berechnet für alle 36 Einzelmessproben, angegeben. Die statistische Ringversuchsauswertung mit Angabe der bestimmten Präzisionswerte erfolgt anschließend getrennt nach den beiden für die statistische Auswertung herangezogenen Teilen der Reihe DIN ISO 5725.

4.3.5.1 Gestein G309 – Einzelprüfwerte

In Tab. 4.6 sind alle ermittelten Einzelmessergebnisse der Gesteinskörnung G309 mit Angabe des Prüfdatums, des ausführenden Prüflabors sowie dem verwendeten Prüfgummisatz angeführt.

Der höchste Einzelwert mit 0,375 [-] wurde vom Labor A bei der Probennummer G309-03 bestimmt. Das Labor A führte zugleich die Herstellung dieser Probe aus. Das niedrigste Einzelmessergebnis mit 0,322 [-] trat bei der vom Labor B hergestellten Probennummer G309-31 auf und wurde auch vom Labor B bestimmt. Die maximale Spannweite (w_{\max}) zwischen den Einzelmessergebnissen beträgt somit 0,053 [-]. Der mittlere Prüfwert beträgt 0,355 [-], der

⁵⁹ Der Median ist eine Zahl, die in der Mitte einer Zahlengruppe liegt. Das heißt, dass die Werte einer Hälfte der Zahlen größer als der Median und die Werte einer Hälfte der Zahlen niedriger als der Median sind. Der Median ist robuster gegenüber Ausreißern als der Mittelwert und wird deswegen in der Statistik häufig als Kennwert für eine Zahlengruppe angegeben. Nähern sich der Median und der Mittelwert stark an, so ist das ein Kennzeichen für eine normalverteilte Zahlenreihe ohne Ausreißer.

Median weicht nur geringfügig ab und liegt bei 0,357 [-]. Eine Zusammenfassung der Extremwerte erfolgt in Tab. 4.7.

Tab. 4.6: Einzelmessergebnisse der Gesteinskörnung G309

<i>Nummer</i>	<i>Datum</i>	<i>Gummi</i>	<i>Labor</i>	<i>PWS</i>	<i>Nummer</i>	<i>Datum</i>	<i>Gummi</i>	<i>Labor</i>	<i>PWS</i>
G309-01	08.09.09	F39X	A	0,372	G309-19	14.10.09	F41F	A	0,352
G309-02	09.09.09	F39X	B	0,370	G309-20	22.10.09	F41F	B	0,356
G309-03	08.09.09	F39X	A	0,375	G309-21	14.10.09	F41F	A	0,353
G309-04	09.09.09	F39X	B	0,364	G309-22	30.10.09	F41F	B	0,351
G309-05	08.09.09	F39X	A	0,372	G309-23	14.10.09	F41F	A	0,355
G309-06	09.09.09	F39X	B	0,365	G309-24	02.11.09	F41F	B	0,359
G309-07	10.09.09	F39X	A	0,325	G309-25	07.12.09	F41F	A	0,369
G309-08	14.09.09	F39X	B	0,347	G309-26	17.12.09	F41F	B	0,362
G309-09	10.09.09	F39X	A	0,342	G309-27	07.12.09	F41F	A	0,360
G309-10	14.09.09	F39X	B	0,372	G309-28	17.12.09	F41F	B	0,355
G309-11	10.09.09	F39X	A	0,350	G309-29	07.12.09	F41F	A	0,364
G309-12	14.09.09	F39X	B	0,372	G309-30	17.12.09	F41F	B	0,367
G309-13	15.09.09	F39X	A	0,355	G309-31	08.03.10	F41F	B	0,322
G309-14	15.10.09	F39X	B	0,363	G309-32	08.03.10	F41F	B	0,327
G309-15	15.09.09	F39X	A	0,345	G309-33	08.03.10	F41F	B	0,333
G309-16	15.10.09	F39X	B	0,373	G309-34	08.03.10	F41F	B	0,329
G309-17	15.09.09	F39X	A	0,358	G309-35	08.03.10	F41F	B	0,334
G309-18	16.10.09	F39X	B	0,375	G309-36	08.03.10	F41F	B	0,343

Tab. 4.7: Gestein G309 – Extremwerte der Einzelmessergebnisse

	<i>Prüfwert [-]</i>	<i>Probennummer</i>	<i>Hersteller</i>	<i>Prüfer</i>
Max-Wert	0,375	G309-03	Labor A	Labor A
Min-Wert	0,322	G309-31	Labor B	Labor B
Spannweite w (max – min)	0,053			
Mittelwert (01 – 36)	0,355			
Median (01 – 36)	0,357			

In Abb. 4-8 sind die ermittelten Einzelmessergebnisse mit Darstellung des zugehörigen Kontrollwertes auf der Glasplatte gereiht nach dem Prüfdatum dargestellt. Blau gekennzeichnete Proben wurden vom Labor A und gelb gekennzeichnete Proben vom Labor B geprüft. Bis inklusive der Probe G309-18 wurde der Prüf gummisatz F39X verwendet. Ab dann kam der Prüf gummisatz F41F zum Einsatz. In Abb. 4-8 ist der Prüf gummiwechsel bei der Probe G309-19 rot gekennzeichnet.

Wie aus der Abb. 4-8 gut erkennbar ist, steigt der Prüf gummi kontrollwert auf der Glasplatte mit steigender Anzahl der durchgeführten Prüfungen an. Im Neuzustand – vor Prüfung der Probe G309-01 – beträgt der Kontrollwert für den Prüf gummisatz F39X 0,108 [-] und steigt nach einer Sandplattenprüfung bereits auf 0,124 [-] an. Vor der letzten Verwendung, der Prü-

fang der Probe G309-18, betrug der Kontrollwert auf der Glasplatte bereits 0,150 [-]. Der zweite verwendete Prüf gummisatz F41F wies vor Prüfung der Probe G309-19 einen Kontrollwert von 0,123 [-] auf. Bis zur Probe G309-25 wurde ein Anstieg des Kontrollwertes auf bis zu 0,142 [-] festgestellt. Ab dann sank der Kontrollwert auf der Glasplatte bis zur Prüfung der Probe G309-36 auf einen Reibwert von 0,123 [-], also jenem Wert, der bereits vor Prüfung der ersten Probe festgestellt wurde.

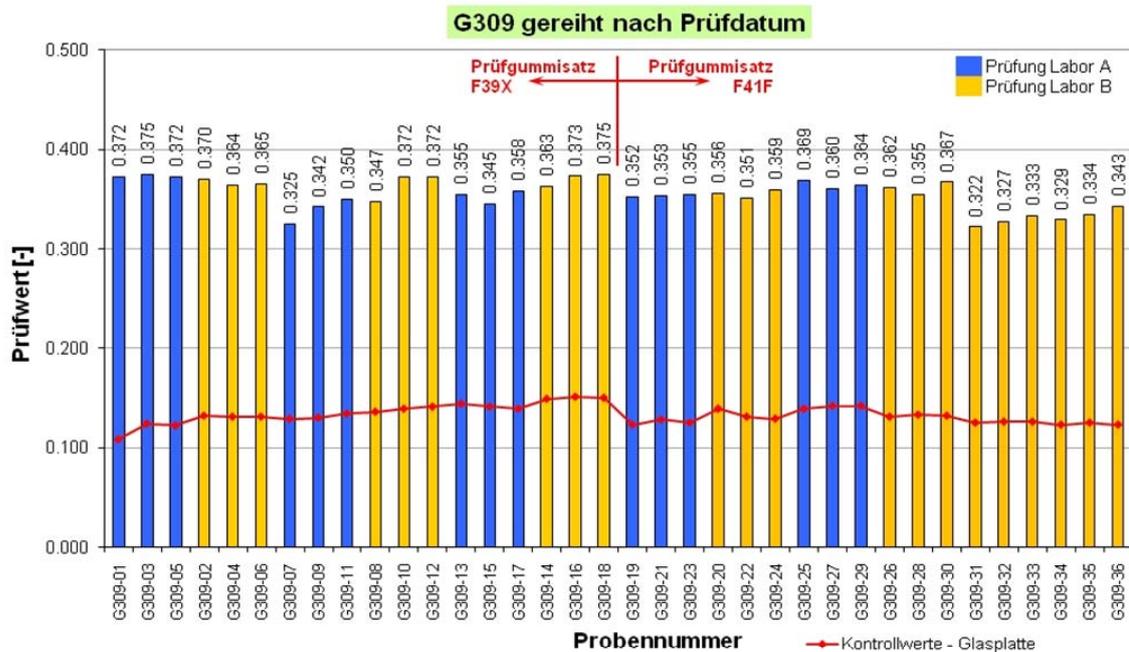


Abb. 4-8: Einzelmessergebnisse Gestein G309 gereiht nach Prüfdatum

Betrachtet man die den Proben G309-31 bis G309-36 zugehörigen Prüf werte, so sieht man, dass sich diese im Vergleich zu den vorherigen Prüfungen auf einem niedrigeren Niveau einpendeln. Es liegt deshalb die Vermutung nahe, dass die Qualität des Prüf gummisatzes hier einen Einfluss auf den resultierenden PWS hat.

Ausgewertet nach dem Prüfdatum beträgt die mittlere Standardabweichung (σ_{mittel}) des Prüf ergebnisses von drei Einzelmessproben, die im selben Prüflabor unmittelbar hintereinander geprüft worden sind (wie zum Beispiel die Proben G309-01, G309-03 und G309-05) 0,0062 [-]. Der Median aller ermittelten Standardabweichungen liegt bei 0,0058 [-]. Die maximale Standardabweichung (σ_{max}) von hintereinander geprüften Proben beträgt 0,0144 [-], die minimale Standardabweichung (σ_{min}) beträgt 0,0015 [-]. Die vorhandene maximale Spannweite zwischen drei Einzelmessproben liegt bei 0,025 [-] und die minimale Spannweite beträgt 0,003 [-].

Berechnet man den Mittelwert von drei hintereinander in einem Labor ermittelten Einzelmessergebnissen – also den PWS eines Sandes – so ergibt sich für den höchsten Polierwert der Gesteinskörnung G309 ein Wert von 0,373 [-]. Dieser PWS_{max} wurde vom Labor A bei der ersten Prüfserie mit neuem Prüf gummisatz F39X bestimmt. Der niedrigste Polierwert des Sandes G309 beträgt 0,327 [-]. Dieser PWS_{min} wurde vom Labor B bei der vom Labor B hergestellten 11. Prüfserie mit dem Prüf gummisatz F41F ermittelt. Es ergibt sich somit eine Differenz zwischen minimalem und maximalem PWS von 0,046 [-]. Der mittlere PWS, berechnet aus allen 12 Prüfserien, beträgt 0,355 [-], der Median liegt bei 0,358 [-].

In Abb. 4-9 sind die ermittelten Einzelmessergebnisse der Gesteinskörnung G309 gereiht nach der Herstellungsnummer der Einzelproben mit Kennzeichnung des zugehörigen Kontrollwertes auf der Glasplatte dargestellt.

Ausgewertet nach der Herstellungsnummer beträgt die mittlere Standardabweichung (σ_{mittel}) des Prüfergebnisses von drei hintereinander, in einem Herstellungsdurchgang hergestellten Einzelmessproben (eine „3er Serie“), die von zwei verschiedenen Labors geprüft worden sind (zum Beispiel die Proben G309-01 und G309-03 geprüft vom Labor A sowie die Probe G309-02 geprüft vom Labor B) 0,0066 [-]. Der Median aller so berechneten Standardabweichungen liegt bei 0,0059 [-]. Die maximale Standardabweichung (σ_{max}) von drei Proben einer Herstellungsserie beträgt 0,0127 [-], die minimale Standardabweichung (σ_{min}) beträgt 0,0021 [-]. Die vorhandene maximale Spannweite zwischen drei Einzelmessproben liegt bei 0,022 [-] und die minimale Spannweite beträgt 0,004 [-].

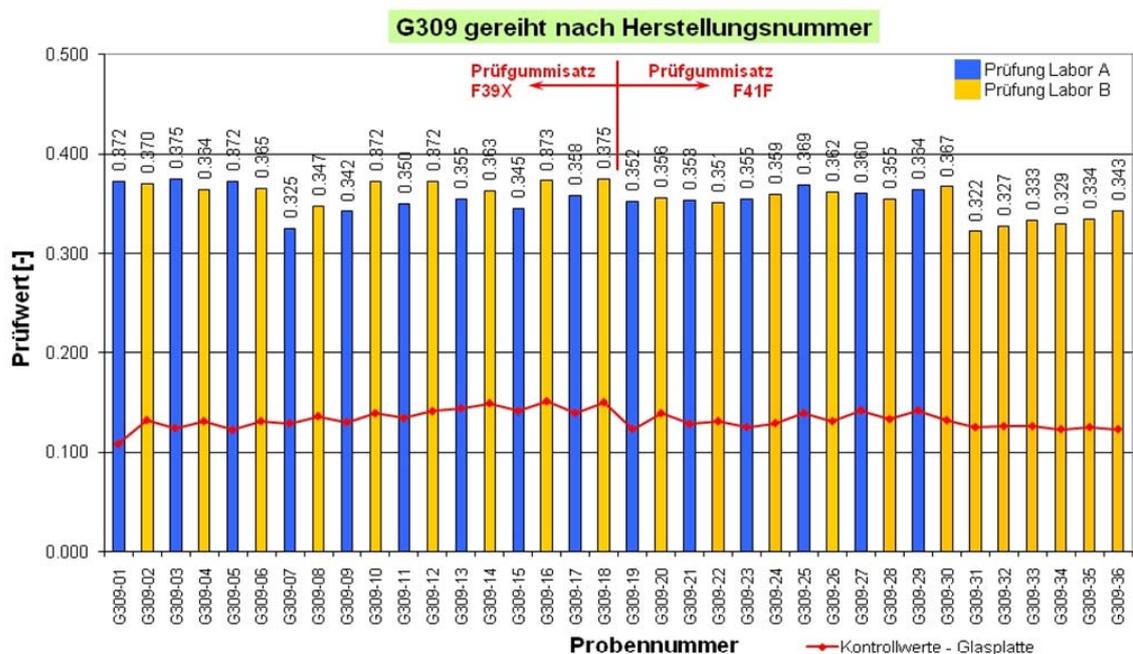


Abb. 4-9: Einzelmessergebnisse Gestein G309 gereiht nach Probennummer

Berechnet man den Mittelwert – den PWS – der Prüfwerte von drei hintereinander in einem Labor, in einem Durchgang hergestellten Einzelmessproben, so ergibt sich für den höchsten Polierwert der Gesteinskörnung G309 ein Wert von 0,372 [-]. Dieser PWS_{max} wurde bei der ersten „3er Serie“, bei der das Labor A zwei Einzelproben und das Labor B eine Einzelprobe prüfte, mit dem Prüfungsmitz F39X ermittelt. Der niedrigste Polierwert des Sandes G309 beträgt 0,327 [-]. Dieser PWS_{min} wurde vom Labor B bei der vom Labor B hergestellten 11. Prüfserie mit dem Prüfungsmitz F41F ermittelt. Es ergibt sich somit eine Differenz zwischen minimalem und maximalem PWS von 0,045 [-]. Der mittlere PWS, berechnet aus allen 12 Prüfserien, beträgt 0,360 [-], der Median liegt bei 0,359 [-].

In Tab. 4.8 sowie Tab. 4.9 sind die wesentlichen Kennwerte für die zwei unterschiedlichen Betrachtungsweisen zusammengefasst.

Aus Tab. 4.8 wird ersichtlich, dass die maximal vorhandene Standardabweichung zwischen drei Einzelmessproben bei der Auswertung nach dem Prüfdatum mit 0,0144 [-] geringfügig höher ist als jene bei der Auswertung nach den in einem Fertigungsprozess hergestellten Proben. Die mittlere Standardabweichung ist hingegen geringfügig kleiner. Aufgrund der sehr

ähnlichen Prüfstreuungen bei beiden Zusammenstellungen, ist der Einfluss von unterschiedlichen Prüfmaschinen, unterschiedlichen Umgebungsbedingungen und unterschiedlichen Zeitabständen zwischen den Prüfungen auf das Prüfergebnis beim Sand G309 sehr gering.

Tab. 4.8: Zusammenstellung der Standardabweichungen und der Spannweiten für die Einzelmessergebnisse der Gesteinskörnung G309 getrennt nach Betrachtungsweise

<i>Bezogen auf</i>	<i>Standardabweichungen von drei Einzelmessergebnissen</i>				<i>Spannweite von drei Einzelmessergebnissen</i>	
	σ_{\max}	σ_{\min}	σ_{mittel}	σ_{Median}	w_{\max}	w_{\min}
<i>Prüfdatum/Labor</i>	0,0144	0,0015	0,0062	0,0058	0,025	0,003
<i>Probennummer</i>	0,0127	0,0021	0,0066	0,0059	0,022	0,004

Bei der Betrachtung der berechneten PWS in Tab. 4.9 wird deutlich, dass sich die Maximal- und die Minimalwerte nur unwesentlich voneinander unterscheiden. Bei der Berechnung des PWS-Mittelwertes wurde ein Unterschied von 0,005 [-] festgestellt. Auch hier zeigt sich, dass unterschiedliche Prüfmaschinen einen nur sehr geringen Einfluss auf den resultierenden PWS haben. In Tab. 4.9 ist die berechnete Standardabweichung als „Stabw“ abgekürzt.

Tab. 4.9: Zusammenstellung der Kennwerte für den PWS der Gesteinskörnung G309 getrennt nach Betrachtungsweise

<i>Bezogen auf</i>	<i>PWS [-] aus drei Einzelmessergebnissen</i>				<i>Spannweite</i>	<i>Stabw</i>
	Max	Min	Mittel	Median	w	σ
<i>Prüfdatum/Labor</i>	0,373	0,327	0,355	0,358	0,046	0,0145
<i>Probennummer</i>	0,372	0,327	0,360	0,359	0,045	0,0144

4.3.5.2 Gestein GTPA – Einzelprüfwerte

In Tab. 4.10 sind alle ermittelten Einzelmessergebnisse der Gesteinskörnung GTPA mit Angabe des Prüfdatums, des ausführenden Prüflabors sowie dem verwendeten Prüf gummisatz angeführt.

Tab. 4.10: Einzelmessergebnisse der Gesteinskörnung GTPA

<i>Nummer</i>	<i>Datum</i>	<i>Gummi</i>	<i>Labor</i>	<i>PWS</i>	<i>Nummer</i>	<i>Datum</i>	<i>Gummi</i>	<i>Labor</i>	<i>PWS</i>
GTPA-01	09.09.09	F42E	A	0,342	GTPA-19	07.12.09	F42E	A	0,291
GTPA-02	08.09.09	F42E	B	0,232	GTPA-20	03.11.09	F42E	B	0,297
GTPA-03	09.09.09	F42E	A	0,301	GTPA-21	07.12.09	F42E	A	0,295
GTPA-04	08.09.09	F42E	B	0,269	GTPA-22	03.11.09	F42E	B	0,286
GTPA-05	09.09.09	F42E	A	0,297	GTPA-23	07.12.09	F42E	A	0,297
GTPA-06	08.09.09	F42E	B	0,250	GTPA-24	03.11.09	F42E	B	0,292
GTPA-07	14.09.09	F42E	A	0,276	GTPA-25	17.12.09	F42E	A	0,258
GTPA-08	14.09.09	F42E	B	0,289	GTPA-26	17.12.09	F42E	B	0,310
GTPA-09	14.09.09	F42E	A	0,278	GTPA-27	17.12.09	F42E	A	0,270
GTPA-10	14.09.09	F42E	B	0,280	GTPA-28	17.12.09	F42E	B	0,336
GTPA-11	14.09.09	F42E	A	0,280	GTPA-29	17.12.09	F42E	A	0,278
GTPA-12	14.09.09	F42E	B	0,282	GTPA-30	17.12.09	F42E	B	0,313
GTPA-13	13.10.09	F42E	A	0,305	GTPA-31	04.03.10	F42W	A	0,225
GTPA-14	28.09.09	F42E	B	0,275	GTPA-32	04.03.10	F42W	A	0,247
GTPA-15	13.10.09	F42E	A	0,290	GTPA-33	04.03.10	F42W	A	0,255
GTPA-16	28.09.09	F42E	B	0,269	GTPA-34	05.03.10	F42W	A	0,263
GTPA-17	14.10.09	F42E	A	0,277	GTPA-35	05.03.10	F42W	A	0,263
GTPA-18	28.09.09	F42E	B	0,264	GTPA-36	05.03.10	F42W	A	0,268

Das höchste Einzelmessergebnis mit 0,342 [-] wurde vom Labor A bei der Probennummer GTPA-01 mit dem Prüf gummisatz F42E bestimmt. Hergestellt wurde diese Einzelmessprobe vom Labor B. Das niedrigste Einzelmessergebnis mit 0,225 [-] trat bei der vom Labor A hergestellten Probennummer GTPA-31 auf und wurde auch vom Labor A mit dem Prüf gummisatz F42W bestimmt. Die maximale Spannweite (w_{\max}) zwischen den Einzelmessergebnissen beträgt somit 0,117 [-]. Der Mittelwert aus allen 36 Einzelmessergebnissen beträgt 0,281 [-], der Median weicht nur geringfügig ab und liegt bei 0,279 [-]. Die Ergebnisse sind in Tab. 4.11 zusammengestellt.

Tab. 4.11: Gestein GTPA – Extremwerte der Einzelmessergebnisse

	<i>Prüfwert [-]</i>	<i>Probennummer</i>	<i>Hersteller</i>	<i>Prüfer</i>
Max-Wert	0,342	G309-01	Labor B	Labor A
Min-Wert	0,225	G309-31	Labor A	Labor A
Spannweite w (max – min)	0,117			
Mittelwert (01 – 36)	0,281			
Median (01 – 36)	0,279			

In Abb. 4-10 sind die ermittelten Einzelmessergebnisse mit Darstellung des zugehörigen Kontrollwertes auf der Glasplatte gereiht nach dem Prüfdatum dargestellt. Blau gekennzeichnete Proben wurden vom Labor A und gelb gekennzeichnete Proben vom Labor B geprüft. Bis inklusive der Probe GTPA-29 wurde der Prüf gummisatz F42E verwendet. Ab dann kam der Prüf gummisatz F42W zum Einsatz. In Abb. 4-10 ist der Prüf gummiwechsel bei der Probe GTPA-31 rot gekennzeichnet.

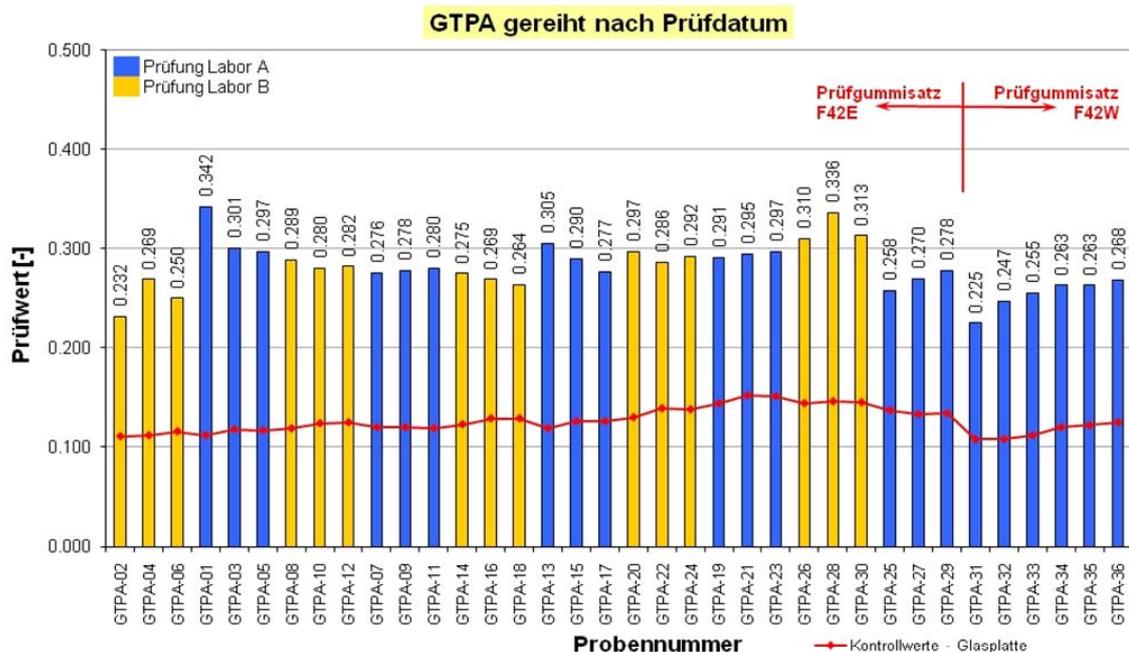


Abb. 4-10: Einzelmessergebnisse Gestein GTPA gereiht nach Prüfdatum

Aus Abb. 4-10 ersichtlich, steigt der Prüf gummi kontrollwert auf der Glasplatte mit steigender Anzahl der durchgeführten Prüfungen an. Im Neuzustand – vor Prüfung der Probe GTPA-01 – beträgt der Kontrollwert für den Prüf gummisatz F42E 0,112 [-] und steigt bis zur Einzelmessprobe GTPA-21 auf 0,152 [-] an, ohne starke Abnutzungserscheinungen aufzuweisen. Ab dann wurde auf der Glasplatte eine Abnahme des Kontrollwertes festgestellt. Vor der letzten Verwendung, der Prüfung der Probe GTPA-29, betrug der Kontrollwert auf der Glasplatte lediglich 0,134 [-]. Der zweite verwendete Prüf gummisatz F42W wies vor Prüfung der Probe GTPA-31 einen Kontrollwert von 0,108 [-] auf. Bis zur Probe GTPA-36 stieg der Kontrollwert wiederum auf 0,125 [-] an.

Innerhalb der ersten sechs Prüfungen stieg der Kontrollwert des neuen Prüf gummisatzes F42E ebenso wie die Kontrollwerte des Prüf gummisatzes F42W bei den letzten sechs Einzelproben GTPA-31 bis GTPA-36 annähernd gleichmäßig an. Bei der 2. Prüferie wurden jedoch wesentlich höhere Prüf werte als bei der ersten Prüferie festgestellt. Dass die Qualität bzw. der Zustand des Prüf gummisatzes für diesen Unterschied im Reibwert verantwortlich ist, erscheint aufgrund der nachfolgenden Prüf- und Kontrollwerte als nicht zutreffend.

Ausgewertet nach dem Prüf datum beträgt die mittlere Standardabweichung (σ_{mittel}) des Prüfergebnisses von drei Einzelmessproben, die im selben Prüflabor unmittelbar hintereinander geprüft worden sind (wie zum Beispiel die Proben GTPA-02, GTPA-04 und GTPA-06) 0,0101 [-]. Der Median aller ermittelten Standardabweichungen liegt bei 0,0078 [-]. Die maximale Standardabweichung (σ_{max}) von hintereinander geprüften Proben beträgt 0,0249 [-], die minimale Standardabweichung (σ_{min}) beträgt 0,0020 [-]. Die vorhandene maximale Spann-

weite zwischen drei Einzelmessproben beträgt 0,045 [-], die minimale Spannweite beträgt 0,004 [-].

Berechnet man den Mittelwert von drei hintereinander in einem Labor ermittelten Einzelmessergebnissen – also den PWS eines Sandes – so ergibt sich für den höchsten Polierwert der Gesteinskörnung GTPA ein Wert von 0,320 [-]. Dieser PWS_{max} wurde vom Labor B bei der 9. Prüferie mit dem Prüfgummisatz F42E bestimmt. Der niedrigste Polierwert des Sandes GTPA beträgt 0,242 [-]. Dieser PWS_{min} wurde vom Labor A bei der ebenso vom Labor A hergestellten 11. Prüferie mit dem neuen Prüfgummisatz F42W ermittelt. Es ergibt sich somit eine Differenz zwischen minimalem und maximalem PWS von 0,078 [-]. Der mittlere PWS, berechnet aus allen 12 Prüferien, beträgt ebenso wie der zugehörige Median 0,281 [-].

In Abb. 4-11 sind die ermittelten Einzelmessergebnisse der Gesteinskörnung GTPA gereiht nach der Herstellungsnummer der Einzelproben mit Kennzeichnung des zugehörigen Kontrollwertes auf der Glasplatte dargestellt.

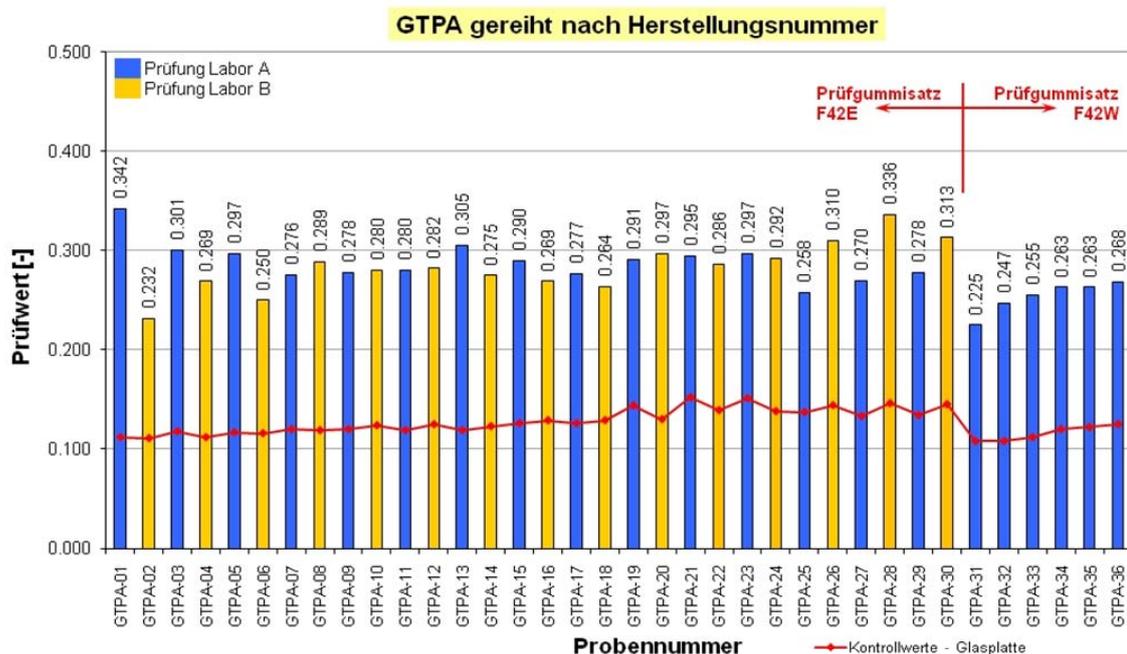


Abb. 4-11: Einzelmessergebnisse Gestein GTPA gereiht nach Probennummer

Ausgewertet nach der Herstellungsnummer beträgt die mittlere Standardabweichung (σ_{mittel}) des Prüfergebnisses von drei hintereinander, in einem Herstellungsdurchgang hergestellten Einzelmessproben (also eine „3er Serie“), die von zwei verschiedenen Labors geprüft worden sind (zum Beispiel die Proben GTPA-01 und GTPA-03 geprüft vom Labor A sowie die Probe GTPA geprüft vom Labor B) 0,0160 [-]. Der Median aller so berechneten Standardabweichungen liegt bei 0,0110 [-]. Die maximale Standardabweichung (σ_{max}) von drei Proben einer Herstellungsserie beträgt 0,0556 [-], die minimale Standardabweichung (σ_{min}) beträgt 0,0012 [-]. Die vorhandene maximale Spannweite zwischen drei Einzelmessproben liegt bei 0,110 [-] und die minimale Spannweite beträgt 0,002 [-].

Berechnet man den Mittelwert – den PWS – der Prüfwerte von drei hintereinander in einem Labor, in einem Durchgang hergestellten Einzelmessproben, so ergibt sich für den höchsten Polierwert der Gesteinskörnung GTPA ein Wert von 0,309 [-]. Dieser PWS_{max} wurde bei der zehnten „3er Serie“, bei der das Labor B zwei Einzelproben und das Labor A eine Einzelprobe prüfte, mit dem Prüfgummisatz F42E ermittelt. Der niedrigste Polierwert des

Sandes GTPA beträgt 0,242 [-]. Dieser PWS_{\min} wurde vom Labor A bei der vom Labor A hergestellten 11. Prüfsreihe mit dem neuen Prüfummisatz F42W ermittelt. Es ergibt sich somit eine Differenz zwischen minimalen und maximalem PWS von 0,067 [-]. Der mittlere PWS, berechnet aus allen 12 Prüfsreihen, beträgt ebenso wie der Median 0,281 [-].

In Tab. 4.12 sowie Tab. 4.13 sind die wesentlichen Kennwerte für die zwei unterschiedlichen Betrachtungsweisen zusammengefasst.

Tab. 4.12: Zusammenstellung der Standardabweichungen und der Spannweiten für die Einzelmessergebnisse der Gesteinskörnung GTPA getrennt nach Betrachtungsweise

Bezogen auf	Standardabweichungen von drei Einzelmessergebnissen				Spannweite von drei Einzelmessergebnissen	
	σ_{\max}	σ_{\min}	σ_{mittel}	σ_{Median}	w_{\max}	w_{\min}
Prüfdatum/Labor	0,0249	0,0020	0,0101	0,0078	0,045	0,004
Probennummer	0,0556	0,0012	0,0160	0,0110	0,110	0,002

Aus Tab. 4.12 wird ersichtlich, dass die maximal vorhandene Standardabweichung zwischen drei Einzelmessproben bei der Auswertung nach den in einem Fertigungsprozess hergestellten Proben mit 0,0556 [-] doppelt so hoch ist als die maximale Standardabweichung bei der Auswertung nach der Herstellungsnummer. Der Median der Standardabweichungen ($\sigma_{\text{Median}} = 0,0110$ [-]) für die Auswertung nach der Probennummer weicht aufgrund der hohen Spannweite der drei Einzelmessergebnisse der ersten und zweiten „3er Serie“ wesentlich von der mittleren Standardabweichung ($\sigma_{\text{mittel}} = 0,0160$ [-]) ab. Dies ist ein Indiz dafür, dass bei der Prüfung der ersten sowie zweiten „3er Serie“ unabhängig von der Probekörperherstellung in den beiden Prüflabors, Einflüsse während der Prüfdurchführung für die Abweichungen verantwortlich waren. Dies können äußere Einflüsse wie z.B. unterschiedliche Raumtemperaturen oder aber auch Unterschiede in der Prüfdurchführung wie z.B. Durchmischung des Wasser-Quarzmehl-Gemisches oder in der aufgetragenen Polierwirkung sowie ein Zusammenwirken mehrerer Faktoren sein.

Tab. 4.13: Zusammenstellung der Kennwerte für den PWS der Gesteinskörnung GTPA getrennt nach Betrachtungsweise

Bezogen auf	PWS [-] aus drei Einzelmessergebnissen				Spannweite	Stabw
	Max	Min	Mittel	Median	w	σ
Prüfdatum/Labor	0,320	0,242	0,281	0,281	0,078	0,0232
Probennummer	0,309	0,242	0,281	0,281	0,067	0,0171

Bei der Betrachtung der berechneten PWS in Tab. 4.13 wird deutlich, dass sich für beide Betrachtungsweisen derselbe mittlere Polierwert einstellt. Dieser ist zugleich ident mit dem Median. Lediglich der maximale PWS ist bei der Auswertung nach Prüflabor mit 0,320 [-] geringfügig höher als bei der Auswertung nach den Probennummern. Die Spannweite zwischen dem maximalen und minimalen PWS ist bei der Auswertung nach Prüflabor mit 0,078 [-] um 0,011 PWS-Einheiten größer als bei der Auswertung nach Probennummer.

Im Vergleich zum Gestein G309 ist die vorhandene Prüfstreuung beim Gestein GTPA um ein vielfaches höher. Dies kann im Zusammenhang mit dem niedrigeren Reibwertniveau oder aber auch mit physikalischen und chemischen Gesteinseigenschaften stehen.

4.3.6 Präzisionswerte nach DIN ISO 5725-2

In diesem Kapitel erfolgt die Angabe der Wiederhol- und Vergleichspräzision der im Ringversuch ermittelten Ergebnisse unter Anwendung der DIN ISO 5725-2:2002. Zusätzlich werden die Ergebnisse der numerischen und grafischen Ausreißertests wiedergegeben.

4.3.6.1 Wiederholstandardabweichung

Aus den Einzelmessergebnissen des Ringversuchs sind in Tab. 4.14 gemäß den Anleitungen des Anhang B die Mittelwerte und die Standardabweichungen zusammengefasst.

Tab. 4.14: Zusammenstellung der Prüfwerte für die Bestimmung der Wiederholstandardabweichung gemäß DIN ISO 5725-2

<i>Labor</i>	<i>Nr.(p)</i>	<i>Einzelwert</i>		<i>Mittelwert (PWS)</i>		<i>Standardabweichung (s)</i>	
		<i>G309</i>	<i>GTPA</i>	<i>G309</i>	<i>GTPA</i>	<i>G309</i>	<i>GTPA</i>
Labor A	1	0,372	0,342	0,373	0,313	0,0017	0,0249
		0,375	0,301				
		0,372	0,297				
	2	0,325	0,276	0,339	0,278	0,0128	0,0020
		0,342	0,278				
		0,350	0,280				
	3	0,355	0,305	0,353	0,291	0,0068	0,0140
		0,345	0,290				
		0,358	0,277				
	4	0,352	0,291	0,353	0,294	0,0015	0,0031
		0,353	0,295				
		0,355	0,297				
	5	0,369	0,258	0,364	0,269	0,0045	0,0101
		0,360	0,270				
		0,364	0,278				
Labor B	6	0,370	0,232	0,366	0,250	0,0032	0,0185
		0,364	0,269				
		0,365	0,250				
	7	0,347	0,289	0,364	0,284	0,0144	0,0047
		0,372	0,280				
		0,372	0,282				
	8	0,363	0,275	0,370	0,269	0,0064	0,0055
		0,373	0,269				
		0,375	0,264				
	9	0,356	0,297	0,355	0,292	0,0040	0,0055
		0,351	0,286				
		0,359	0,292				
	10	0,362	0,310	0,361	0,320	0,0060	0,0142
		0,355	0,336				
		0,367	0,313				

Die Ergebnisse der durchgeführten numerischen Ausreißertests für die Bestimmung der Wiederholstandardabweichung nach DIN ISO 5725-2 sind im Anhang C, Abschnitt C.1 zusammengefasst.

Da nach Anwendung der Ausreißertests alle 60 Prüfergebnisse für die Auswertung herangezogen werden dürfen, ergeben sich die in Tab. 4.15 angeführten Mittelwerte für den PWS.

Tab. 4.15: PWS Mittelwerte aus der Bestimmung der Wiederholstandardabweichung aufgelistet je Prüflabor

Gestein	Mittelwert [-]			Gesamtmittelwert m
	Labor A	Labor B	Differenz (A - B)	
G309	0,356	0,363	- 0,007	0,360
GTPA	0,289	0,283	+ 0,006	0,286

Labor A ermittelte für das Material G309 einen Mittelwert für die Polierresistenz von 0,356 [-], das Labor B 0,363 [-]. Der Gesamtmittelwert liegt bei 0,360 [-]. Für das Gestein GTPA wurde vom Labor A ein mittlerer PWS von 0,289 [-] und vom Labor B ein mittlerer PWS von 0,283 [-] ermittelt. Der Gesamtmittelwert liegt bei 0,286 [-]. Die absolute Differenz zwischen den beiden Labors liegt im Bereich von $\pm 0,007$ [-].

In Abb. 4-12 sind für die Gesteinskörnungen G309 und GTPA alle im Zuge der Bestimmung der Wiederholstandardabweichung ermittelten Messergebnisse mit Kennzeichnung der arithmetischen Mittelwerte je Gestein und Labor sowie mit Kennzeichnung des Gesamtmittelwertes der beiden Merkmalniveaus dargestellt. Dreieckige Datenpunkte markieren die Einzelprüfwerte des Gesteins GTPA. Rautenförmige Datenpunkte stellen die 30 Einzelprüfwerte des Gesteins G309 dar. Der Gesamtmittelwert für ein Merkmalniveau ist in Form einer roten, strichpunktierten Linie abgebildet. Blaue Linien kennzeichnen die im Labor A ermittelten Mittelwerte für die beiden Merkmalniveaus G309 und GTPA. Orange Linien stellen die Mittelwerte vom Labor B dar.

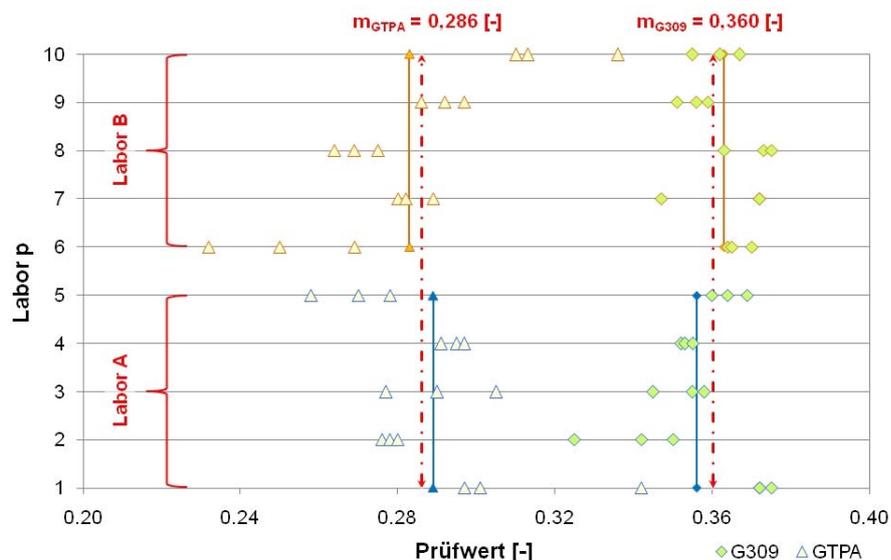


Abb. 4-12: Darstellung der Einzelmessergebnisse mit Kennzeichnung der arithmetischen Mittelwerte

Zur Darstellung der Streuung der Prüfergebnisse einer „3er Serie“ sind in Abb. 4-13 die Bandbreiten der ermittelten PWS für die beiden Gesteine getrennt nach Labor in Form eines

Box-Plottes dargestellt. Die vertikale Ausdehnung einer Box entspricht der Verteilung der Mittelwerte einer „3er Prüferie“. Für das Gestein GTPA wurde im Labor B die höchste Prüf-streuung ermittelt. Wohingegen sich für das Gestein G309 im Labor B die niedrigste Prüf-streuung einstellte. Die Streuung der Prüfwerte für die beiden Merkmalniveaus G309 und GTPA ist im Labor A annähernd ident.

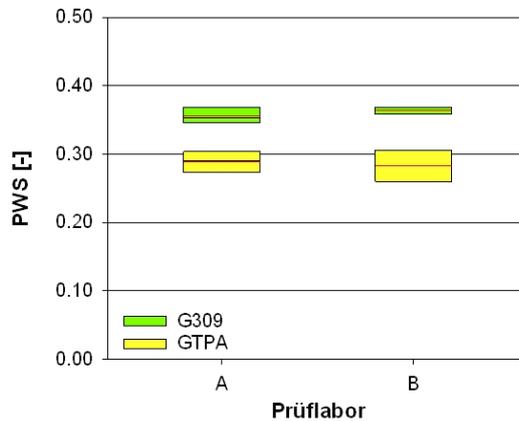


Abb. 4-13: Vergleich der Ergebnisse aus der Bestimmung der Wiederholstandardabweichung mittels Box-Plot

Für das Gestein G309 errechnet sich gemäß DIN ISO 5725-2 eine geschätzte mittlere Wiederholstandardabweichung (s_r) von 0,007 [-] und für das Gestein GTPA ein (s_r) von 0,012 [-]. Im Mittel beträgt die Wiederholstandardabweichung für beide Merkmalniveaus $s_r = 0,010$ [-], siehe Zusammenstellung in Tab. 4.16.

Tab. 4.16: Wiederholstandardabweichung gemäß DIN ISO 5725-2:2002

	G309	GTPA	Mittelwert
Merkmalniveau m [-]	0,36	0,29	----
s_r [-]	0,007	0,012	0,010

4.3.6.2 Vergleichsstandardabweichung

Für die Bestimmung der Vergleichsstandardabweichung wurden für das Material G309 die Proben mit der fortlaufenden Nummer 1,3,5,7,9,11 und 31 bis 36 verwendet. Für das Material GTPA wurden die Proben mit der fortlaufenden Nummer 2,4,6,8,10,12 und 31 bis 36 verwendet. Von jedem Labor wurden je Material somit zwei „3er Serien“ geprüft. Für die Auswertung gemäß DIN ISO 5725-2:2002 beträgt die Anzahl der Labors (p) somit 4.

Aus den Einzelmessergebnissen des Ringversuchs sind in Tab. 4.17 gemäß den Anleitungen des Anhang B die Mittelwerte und die Standardabweichungen zusammengefasst.

Tab. 4.17: Zusammenstellung der Prüfwerte für die Bestimmung der Vergleichsstandardabweichung gemäß DIN ISO 5725-2

Labor	Nr. (p)	Einzelwert		Mittelwert (PWS)		Standardabweichung (s)	
		G309	GTPA	G309	GTPA	G309	GTPA
Labor A	1	0,372	0,225	0,373	0,242	0,0017	0,0155
		0,375	0,247				
		0,372	0,255				
	2	0,325	0,263	0,339	0,265	0,0128	0,0029
		0,342	0,263				
Labor B	3	0,350	0,268	0,327	0,250	0,0055	0,0185
		0,322	0,232				
		0,327	0,269				
	4	0,333	0,250	0,335	0,284	0,0071	0,0047
		0,329	0,289				
		0,334	0,280				
		0,343	0,282				

Die Ergebnisse der durchgeführten numerischen Ausreißertests für die Bestimmung der Vergleichsstandardabweichung nach DIN ISO 5725-2 sind im Anhang C, Abschnitt C.1 zusammengefasst.

Da nach Anwendung der Ausreißertests alle 24 Prüfergebnisse für die Auswertung herangezogen werden dürfen, ergeben sich die in Tab. 4.18 angeführten Mittelwerte für den PWS.

Tab. 4.18: PWS Mittelwerte aus der Bestimmung der Vergleichsstandardabweichung aufgelistet je Prüflabor

Gestein	Labor A	Labor B	Mittelwert [-]	
			Gesamtmittelwert m	Differenz zur 1. Prüfphase
G309	0,356	0,331	0,344	- 0,016
GTPA	0,254	0,283	0,260	- 0,026

Labor A ermittelte im Zuge der 2. Prüfphase für das Material GTPA einen Mittelwert für die Polierresistenz von 0,254 [-]. Der Gesamtmittelwert (m) beträgt in dieser Prüfphase 0,260 [-] und ist um 0,026 PWS-Einheiten niedriger als in der 1. Prüfphase. Für das Gestein G309 wurde vom Labor B ein mittlerer PWS von 0,344 [-] bestimmt, wodurch sich ein Gesamtmittelwert (m) von 0,344 [-] errechnet. Dieser ist um 0,016 PWS-Einheiten niedriger als in der 1. Prüfphase. Somit wurden für beide Gesteinskörnungen in der 2. Prüfphase niedrigere

Prüfergebnisse als in der drei Monate zuvor beendeten 1. Prüfphase ermittelt. Die Differenz der Mittelwerte liegt jedoch innerhalb des möglichen Streubereiches, welcher bereits in der 1. Prüfphase ermittelt wurde. Die Abweichungen der Prüfwerte sind somit für dieses Prüfverfahren bzw. für die gegenwärtig vereinheitlichte Prüfdurchführung charakteristisch.

Für das Gestein G309 errechnet sich gemäß DIN ISO 5725-2 eine geschätzte mittlere Vergleichsstandardabweichung (s_R) von 0,020 [-] und für das Gestein GTPA ein (s_R) von 0,030 [-]. Im Mittel beträgt die Vergleichsstandardabweichung für beide Merkmalniveaus $s_R = 0,025$ [-], siehe Zusammenstellung in Tab. 4.19.

Tab. 4.19: Vergleichsstandardabweichung gemäß DIN ISO 5725:2002

	<i>G309</i>	<i>GTPA</i>	<i>Mittelwert</i>
<i>Merkmalniveau m [-]</i>	0,34	0,26	----
s_R [-]	0,020	0,030	0,025

Für das Gestein GTPA wurde gemäß DIN ISO 5725-2:2002 sowohl in der 1. als auch in der 2. Prüfphase eine schlechtere Präzision als für das Gestein G309 ermittelt. Dies lässt vermuten, dass zusätzlich zu den aus dem Prüfverfahren bzw. aus der Prüfdurchführung herrührenden Einflussparametern auf die Präzision auch gesteinspezifische Faktoren hinzukommen. Ähnlich den aus Affinitätsuntersuchungen zwischen Gestein und Bitumen bekannten Zusammenhängen besteht die Möglichkeit, dass durch den pH-Wert der Gesteinskörnung das Haftvermögen zwischen Gestein und Holzplatte beeinträchtigt wird. Zusätzlich erscheint es naheliegend, dass die Gleichförmigkeit der Sandkörnung hinsichtlich Kornform, Sieblinie und Bruchflächigkeit die Prüfstreuung wesentlich beeinflusst.

4.3.7 Präzisionswerte nach DIN ISO 5725-5

In diesem Kapitel erfolgt die Angabe der Wiederhol- und Vergleichspräzision der im Ringversuch ermittelten Ergebnisse unter Anwendung der DIN ISO 5725-5:2002.

Im Gegensatz zur Auswertemethode nach DIN ISO 5725-2:2002 ermöglicht das in der DIN ISO 5725-5 angeführte Auswerteverfahren eine Abschätzung der Standardabweichung zwischen mehreren Proben eines heterogenen Materials. Diese Auswertemethode ermöglicht somit auch die Abschätzung des Fehlers, der durch die Probenherstellung entsteht, da in der Auswertung eine von einem Laboranten hergestellte „3er Serie“ von Einzelmessproben als eine Probe (t) gewertet wird. Die geschätzte Standardabweichung zwischen Proben wird als (s_H) bezeichnet.

4.3.7.1 Wiederholstandardabweichung

Die in der 1. Prüfphase des Ringversuchs ermittelten Einzelmessergebnisse sind in Tab. 4.20 sowie in Tab. 4.21 gemäß den Anleitungen des Anhang B, Abschnitt B.2 zusammengefasst. In diesen Tabellen werden die von einem Labor hintereinander geprüften drei Einzelmessproben als Probe (t) bezeichnet. Für jede Probe (t) wird einerseits der Mittelwert aus den drei Einzelmessproben – also der PWS – berechnet, andererseits die vorhandene Spannweite zwischen dem maximalen und minimalen Ermittlungsergebnis (k) angegeben. Zusätzlich wird für jedes am Ringversuch teilnehmende Prüflabor (i) der durchschnittliche PWS der fünf Proben (t) sowie die maximale Spannweite zwischen dem PWS der fünf Proben (w_{PWS}) angegeben.

Auf die in der Tab. 4.20 und Tab. 4.21 zusammengestellten Einzelprüfergebnisse wurde zur Überprüfung auf Ausreißer als erstes der Cochran-Test auf die vorhandenen Spannweiten zwischen den Ermittlungsergebnissen ($w(k)$) angewendet. Anschließend wurde der Cochran-Test auf die Spannweiten zwischen den Proben ($w(PWS)$) angewandt. Details zur Überprüfung und den verwendeten Eingangswerten für die Bestimmung des kritischen Wertes sind im Anhang C, Abschnitt C.2 angeführt.

Die Eingangswerte für die Bestimmung des kritischen Wertes ermitteln sich aus der Anzahl der Proben (t) je Prüflabor multipliziert mit der Anzahl der am Ringversuch teilnehmenden Prüflabors (p), sowie der Anzahl an Einzelmessproben (n) je Probe (t). Der kritische Wert C für das Signifikanzniveau von 5 % beträgt 0,445 [-].

Tab. 4.20: Zusammenstellung der Prüfwerte für die Bestimmung der Wiederholstandardabweichung gemäß DIN ISO 5725-5 für das Gestein G309

<i>Labor</i>	<i>Probe (t)</i>	<i>G309</i>			<i>Mittelwerte</i>		<i>Spannweiten</i>	
		<i>Ermittlungsergebnisse (k)</i>			<i>PWS (k)</i>	\emptyset <i>PWS</i>	<i>w (k)</i>	<i>w (PWS)</i>
Labor A	1	0,372	0,375	0,372	0,373		0,003	
	2	0,325	0,342	0,350	0,339		0,025	
	3	0,355	0,345	0,358	0,353	0,356	0,013	0,034
	4	0,352	0,353	0,355	0,353		0,003	
	5	0,369	0,360	0,364	0,364		0,009	
Labor B	1	0,370	0,364	0,365	0,366		0,006	
	2	0,347	0,372	0,372	0,364		0,025	
	3	0,363	0,373	0,375	0,370	0,363	0,012	0,015
	4	0,356	0,351	0,359	0,355		0,008	
	5	0,362	0,355	0,367	0,361		0,012	

Tab. 4.21: Zusammenstellung der Prüfwerte für die Bestimmung der Wiederholstandardabweichung gemäß DIN ISO 5725-5 für das Gestein GTPA

<i>Labor</i>	<i>Probe (t)</i>	<i>GTPA</i>			<i>Mittelwerte</i>		<i>Spannweiten</i>	
		<i>Ermittlungsergebnisse (k)</i>			<i>PWS (k)</i>	\emptyset <i>PWS</i>	<i>w (k)</i>	<i>w (PWS)</i>
Labor A	1	0,342	0,301	0,297	0,313		0,045	
	2	0,276	0,278	0,280	0,278		0,004	
	3	0,305	0,290	0,277	0,291	0,289	0,028	0,045
	4	0,291	0,295	0,297	0,294		0,006	
	5	0,258	0,270	0,278	0,269		0,020	
Labor B	1	0,232	0,269	0,250	0,250		0,037	
	2	0,289	0,280	0,282	0,284		0,009	
	3	0,275	0,269	0,264	0,269	0,283	0,011	0,069
	4	0,297	0,286	0,292	0,292		0,011	
	5	0,310	0,336	0,313	0,320		0,026	

Keines der Labors (p) zeigt eine konstante, auffallend hohe Streuung der Einzelergebnisse (k) bzw. der Proben (t). Somit wurden alle in der Tab. 4.20 sowie Tab. 4.21 angeführten Einzelmessergebnisse für die Auswertung herangezogen.

Für die unter Wiederholbedingungen ermittelten Prüfergebnisse sind für jedes Merkmalniveau die berechneten Standardabweichungen (s_H) und (s_r) sowie die Mittelwerte in Tab. 4.22 zusammengefasst.

Tab. 4.22: Ermittelte Standardabweichungen unter Wiederholbedingungen gemäß DIN ISO 5725-5

Statistikwert (<i>s</i>)	G309	GTPA	Mittelwert
Standardabweichung zwischen den Proben (s_H)	0,0090	0,0207	0,015
Wiederholstandardabweichung (s_r)	0,0079	0,0125	0,010

Die gemäß DIN ISO 5725-5 ermittelte mittlere Standardabweichung unter Wiederholbedingungen (s_r) beträgt 0,010 PWS-Einheiten. Diese Standardabweichung beschreibt die Reproduzierbarkeit von Prüfergebnisse innerhalb eines Labors, beschreibt jedoch nicht explizit die für heterogenes Material charakteristische Schwankung zwischen verschiedenen Proben, da sie auf dem grundlegenden Auswerteverfahren gemäß DIN ISO 5725-2 beruht. Die gemäß DIN ISO 5725-5 berechnete Streuung zwischen Proben – beschrieben durch (s_H) – beträgt unter Wiederholbedingungen im Mittel 0,015 PWS-Einheiten. Da die Schwankung zwischen den Proben die Schwankung von Prüfergebnissen innerhalb eines Labors übersteigt und somit eine schlechtere Präzision zur Folge hat, ist (s_H) für die tatsächlich mögliche Streuung des PWS unter Wiederholbedingungen anzusetzen.

4.3.7.2 Vergleichsstandardabweichung

Die in der 2. Prüfphase des Ringversuchs zur Bestimmung der Vergleichsstandardabweichung verwendeten zwölf Einzelmessergebnisse je Merkmalniveau sind in Tab. 4.23 sowie in Tab. 4.24 gemäß den Anleitungen des Anhang B, Abschnitt B.2 zusammengefasst.

Tab. 4.23: Zusammenstellung der Prüfwerte für die Bestimmung der Vergleichsstandardabweichung gemäß DIN ISO 5725-5 für das Gestein G309

Labor	Probe (t)	G309			Mittelwerte		Spannweiten	
		Ermittlungsergebnisse (k)			PWS (k)	Ø PWS	w (k)	w (PWS)
Labor A	1	0,372	0,375	0,372	0,373	0,356	0,003	0,034
	2	0,325	0,342	0,350			0,339		0,025
Labor B	1	0,322	0,327	0,333	0,327	0,331	0,011	0,008
	2	0,329	0,334	0,343			0,335		0,014

Tab. 4.24: Zusammenstellung der Prüfwerte für die Bestimmung der Vergleichsstandardabweichung gemäß DIN ISO 5725-5 für das Gestein GTPA

Labor	Probe (t)	GTPA			Mittelwerte		Spannweiten	
		Ermittlungsergebnisse (k)			PWS (k)	Ø PWS	w (k)	w (PWS)
Labor A	1	0,225	0,247	0,255	0,242	0,254	0,030	0,023
	2	0,263	0,263	0,268			0,265		0,005
Labor B	1	0,232	0,269	0,250	0,250	0,267	0,037	0,034
	2	0,289	0,280	0,282			0,284		0,009

Auf die in der Tab. 4.23 und Tab. 4.24 zusammengestellten Einzelprüfergebnisse wurde zur Überprüfung auf Ausreißer als erstes der Cochran-Test auf die vorhandenen Spannweiten zwischen den Ermittlungsergebnissen ($w(k)$) angewendet. Anschließend wurde der Cochran-Test auf die Spannweiten zwischen den Proben ($w(PWS)$) angewandt. Details zur Überprüfung und zu den verwendeten Eingangswerten für die Bestimmung des kritischen Wertes sind im Anhang C, Abschnitt C.2 angeführt.

Auch diese Ausreißertests ergaben für keines der zwei Labors (p) eine konstante, auffallend hohe Streuung der Einzelergebnisse (k) bzw. der Proben (t).

Für die unter Vergleichsbedingungen ermittelten Prüfergebnisse sind für jedes Merkmalniveau die berechneten Standardabweichungen (s_H), (s_L) und (s_R) sowie die Mittelwerte in Tab. 4.25 zusammengefasst.

Tab. 4.25: Ermittelte Standardabweichungen unter Vergleichsbedingungen gemäß DIN ISO 5725-5

Statistikwert (s)	G309	GTPA	Mittelwert
Standardabweichung zwischen den Proben (s_H)	0,0169	0,0187	0,0178
Standardabweichung zwischen den Labors (s_L)	0,0101	0,0086	0,0094
Vergleichsstandardabweichung (s_R)	0,0128	0,0124	0,0126

Die gemäß DIN ISO 5725-5 ermittelte mittlere Standardabweichung unter Vergleichsbedingungen (s_R) beträgt 0,013 PWS-Einheiten. Diese Standardabweichung beschreibt die Reproduzierbarkeit von Prüfergebnissen zwischen mehreren Labors, berücksichtigt jedoch nicht explizit die, für heterogenes Material charakteristische, Schwankung zwischen verschiedenen Proben, da sie auf dem grundlegenden Auswerteverfahren gemäß DIN ISO 5725-2 beruht. Die gemäß DIN ISO 5725-5 berechnete Streuung zwischen Proben – beschrieben durch (s_H) – beträgt unter Vergleichsbedingungen im Mittel 0,018 PWS-Einheiten. Da die Schwankung zwischen den Proben die Schwankung von Prüfergebnissen zwischen Labors übersteigt und somit eine schlechtere Präzision zur Folge hat, ist (s_H) für die tatsächlich mögliche Streuung des PWS unter Vergleichsbedingungen anzusetzen.

4.3.8 Zusammenfassung der Auswertemethoden

Die gemäß dem Kapitel 4.3.4 durchgeführten Auswertungen der Ergebnisse des Ringversuchs ergaben die in Tab. 4.26 angeführten Ergebnisse für die Wiederhol- und die Vergleichsstandardabweichung.

Tab. 4.26: Standardabweichungen ermittelt nach DIN ISO 5725-2 und DIN ISO 5725-5

Statistikwert (s)	DIN ISO 5725-2	DIN ISO 5725-5 ¹⁾
Wiederholstandardabweichung (s_r)	0,010 [-]	0,015 [-]
Vergleichsstandardabweichung (s_R)	0,025 [-]	0,018 [-]

¹⁾ Als kritische Standardabweichung für die Wiederhol- und Vergleichbarkeit des Prüfergebnisses eines Sandes werden hier die Standardabweichungen zwischen den Proben angeführt.

Die nach DIN ISO 5725-2 ermittelten Schätzwerte für die Standardabweichung beruhen auf dem grundlegenden statistischen Auswerteverfahren und somit auf der Annahme, dass für den Ringversuch vollkommen idente Materialproben zur Verfügung gestellt werden. Die Herstellung der Probekörper ist im Grunde der Genauigkeit des Prüfverfahrens zuzurechnen. Bei

einem heterogenen Material wie z.B. Sand ist es jedoch unmöglich, immer dieselbe, das ganze Mineralspektrum abdeckende, repräsentative Probe für die Herstellung der Probekörper zu verwenden. Das grundlegende Verfahren nach DIN ISO 5725-2 führt dazu, dass für die Wiederholstandardabweichung geringere Schätzwerte, für die Vergleichsstandardabweichung jedoch aufgrund der Schwankung (der tatsächlichen Werte) zwischen den Proben größere Schätzwerte ermittelt werden. Dies wird durch die in Tab. 4.26 angeführten Schätzwerte für die Wiederhol- und Vergleichsstandardabweichungen bestätigt. Da die Präzision des Verfahrens somit wesentlich von der Homogenität des Prüfmaterials abhängig ist, sind die nach DIN ISO 5725-5 ermittelten Schätzwerte für die Wiederhol- und Vergleichsstandardabweichung gegenüber den nach DIN ISO 5725-2 ermittelten Schätzwerten zu bevorzugen.

4.3.9 Anwendung der Präzisionswerte in der Praxis

In der ISO 5725-2 sowie in der ISO 5725-5 lag die Aufmerksamkeit auf dem Schätzen der Standardabweichung unter Wiederhol- und Vergleichsbedingungen. Normale Laborpraxis verlangt jedoch eine schnelle Prüfung der Verwertbarkeit von Prüfergebnissen. Der 6. Teil der DIN ISO 5725 gibt Anleitungen in welcher Art und Weise die ermittelten Präzisionswerte unter Wiederhol- und Vergleichsbedingungen in der Praxis angewendet werden können. Die wesentlichen Schritte zur Festlegung von Wiederhol- und Vergleichsgrenzen sowie von kritischen Spannweiten zwischen Einzelmessergebnissen bzw. Einzelmesswerten für die Anwendung in der Praxis werden in diesem Kapitel angeführt.

Bei der Festlegung von kritischen Grenzwerten bzw. Präzisionswerten muss generell unterschieden werden, für welchen Zweck sie benötigt werden. Werden z.B. in einem Labor für die Ermittlung eines Prüfergebnisses mehrere Einzelmessproben benötigt, so ist es von großer Bedeutung sofort die Verträglichkeit der ermittelten Einzelmesswerte bestimmen zu können. Für diesen Zweck ist es sinnvoll, als eine Art schnelle Kontrollmethode, ein Maß ähnlich einer kritischen Differenz für die Zulässigkeit von Einzelmesswerten festzulegen.

Die Festlegung einer kritischen Differenz für Einzelmesswerte, welche unter Wiederholbedingungen gewonnen werden und mit denen in weiterer Folge das Prüfergebnis berechnet wird, ist abhängig von der Wiederholbarkeit dieser Einzelmesswerte im Zuge der Prüfdurchführung. Für die in diesem Ringversuch ermittelten Einzelmesswerte wurde in Abschnitt 4.3.6.1 die geschätzte Wiederholstandardabweichung (s_r) gemäß DIN ISO 5725-2 berechnet, siehe Tab. 4.16. Ausgehend von den zur Verfügung stehenden zwei Merkmalniveaus wurde eine mittlere Wiederholstandardabweichung von 0,010 [-] ermittelt. Dieser Wert ist ident mit der geschätzten Wiederholstandardabweichung (s_r) gemäß Abschnitt 4.3.7.1 (Tab. 4.22), von welcher die Streuung zwischen Proben (s_H) herausgerechnet wurde.

Zur Überprüfung der Annehmbarkeit von unter Wiederholbedingungen gewonnen Einzelmesswerten berechnet sich die kritische Spannweite nach (4.2).

$$CR_{0,95}(n) = f(n) \cdot s_r \quad (4.2)$$

$CR_{0,95}(n)$ kritische Spannweite zwischen (n) Einzelmesswerten
 $f(n)$ 95 %-Quantil der Verteilung von $(x_{max} - x_{min})/s$, wobei x_{max} und x_{min} die Extremwerte in einer Stichprobe des Umfangs (n) aus einer Normalverteilung mit Standardabweichung (σ) sind.
 s_rgeschätzte Wiederholstandardabweichung zwischen Einzelmesswerten

In Abb. 4-14 ist das im Folgenden angewendete Schema der Prüfung auf Annehmbarkeit der im Zuge der Bestimmung des PWS ermittelten Einzelmesswerte dargestellt.

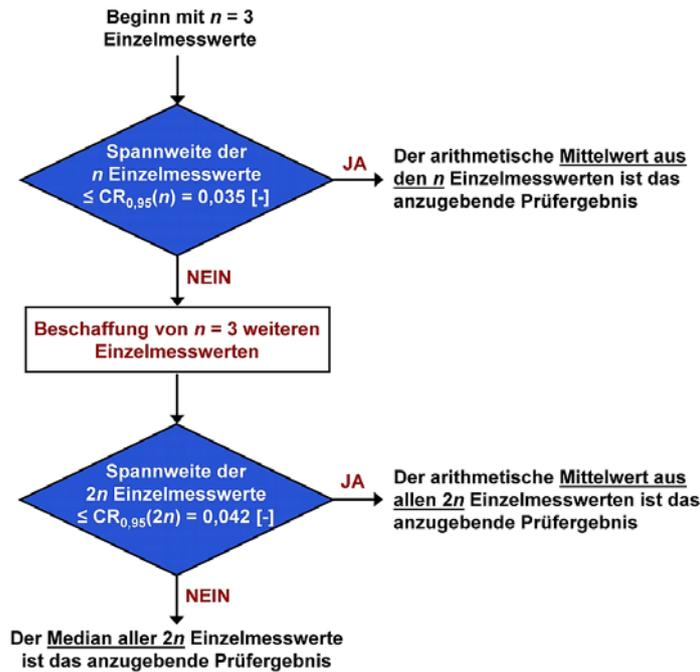


Abb. 4-14: Verfahren zur Prüfung der Annehmbarkeit von Einzelmesswerten, gewonnen unter Wiederholbedingungen, bei anfangs n Einzelmesswerten

Gemäß dem in Abb. 4-14 dargestellten Ablaufschema wird von den $n = 3$ Einzelmesswerten die Spannweite zwischen maximalem und minimalem Ermittlungsergebnis berechnet. Diese ist der nach (4.3) berechneten, kritischen Spannweite für 3 Einzelmesswerte gegenüberzustellen.

$$CR_{0,95}(3) = f(3) \cdot s_r = 3,3 \cdot 0,0105 = 0,035 [-] \quad (4.3)$$

$f(3)$*Faktor für die kritische Spannweite von drei Einzelmesswerten gemäß der Tabelle 1 der DIN ISO 5725-6:2002*

Ist die vorhandene maximale Spannweite zwischen den (n) Einzelmesswerten \leq der kritischen Spannweite $CR_{0,95}$ von 0,035 [-], so errechnet sich das Prüfergebnis bzw. der Prüfwert PWS als der Mittelwert aus den (n) Einzelmesswerten.

Wird der kritische Wert von 0,035 [-] überschritten, so sind (n) weitere Einzelmesswerte zu gewinnen. Dazu sind mit demselben Gestein unter Wiederholbedingungen drei weitere Proben herzustellen und zu prüfen. Von den nun insgesamt $2n = 6$ Einzelmesswerten ist in weiterer Folge wiederum die vorhandene maximale Spannweite zu berechnen und der nach (4.4) berechneten, kritischen Spannweite für 6 Einzelmesswerten gegenüberzustellen.

$$CR_{0,95}(6) = f(6) \cdot s_r = 4,0 \cdot 0,0105 = 0,042 [-] \quad (4.4)$$

$f(6)$*Faktor für die kritische Spannweite von sechs Einzelmesswerten gemäß der Tabelle 1 der DIN ISO 5725-6:2002*

Ist die vorhandene maximale Spannweite zwischen den ($2n$) Einzelmesswerten \leq der kritischen Spannweite $CR_{0,95}$ von 0,042 [-] so errechnet sich das Prüfergebnis bzw. der Prüfwert PWS als der Mittelwert aus den ($2n$) Einzelmesswerten.

Wird der kritische Wert von 0,042 [-] aufgrund eines Fastausreißers⁶⁰ oder Ausreißers neuerlich überschritten, so ist als Prüfergebnis der Median aller (2n) Einzelmesswerte anzugeben. Die Angabe des Medianwerts entschärft den Einfluss von Ausreißern auf den Mittelwert und somit auf das Endergebnis, wodurch das Prüfergebnis näher dem wahren Wert liegt.

Zur Überprüfung ob ein Prüfergebnis, in diesem Fall also der aus drei Einzelmesswerten berechnete PWS, innerhalb der Prüftoleranz liegt, oder ob das Prüfergebnis aufgrund des Probenmaterials vom üblichen Niveau abweicht, ist es notwendig, Grenzen für die Wiederhol- und Vergleichspräzision des Prüfverfahrens festzulegen. Diese werden bezeichnet als Wiederholgrenze (r) und Vergleichsgrenze (R). Die Berechnungsmethode der Wiederhol- und Vergleichsgrenze ist allgemein in der Norm DIN 55350-13 [DIN, 1987] sowie für Gesteinskörnungen in der ÖNORM 932-6 [ON, 1999] erläutert. Im Folgenden wird die Ermittlung der Präzisionsgrenzen kurz erläutert.

Gemäß DIN 55350-13:1987 ist die Wiederholgrenze (Englisch: repeatability limit), früher auch Wiederholbarkeit genannt, der kritische Wiederholdifferenzbetrag für zwei Prüfergebnisse und für eine vorgegebene Wahrscheinlichkeit von 95 %. Dabei ist der kritische Wiederholdifferenzbetrag jener Betrag, unter dem oder höchstens gleich dem der Absolutwert der Differenz zwischen zwei unter Wiederholbedingungen gewonnenen Prüfergebnissen liegt, von denen jedes eine Serie von Einzelwerten repräsentiert. Das heißt die Wiederholgrenze gibt eine absolute Differenz zwischen zwei unter Wiederholbedingungen gewonnenen Prüfergebnissen wider, wobei ein Prüfergebnis aus einer größeren Anzahl von Einzelmesswerten (n) ermittelt worden sein kann. Als Basis für die Ermittlung der Wiederholgrenze dient die unter Wiederholbedingungen ermittelte Wiederholstandardabweichung (s_r).

Für die Vergleichsgrenze (Englisch: reproducibility limit), früher auch Vergleichbarkeit genannt, gilt dieselbe zuvor angeführte Definition, jedoch ist die Ermittlung der Prüfergebnisse und somit der Vergleichsstandardabweichung unter Vergleichsbedingungen durchzuführen.

Unter der Annahme, dass die für die Schätzung der Standardabweichungen verwendeten Prüfergebnisse einer Normalverteilung unterliegen, berechnen sich diese Grenzen nach Gleichung (4.5):

$$r, R = 1,96 \cdot \sigma_{r,R} \cdot \sqrt{n} \quad (4.5)$$

r, R.....Wiederhol- bzw. Vergleichsgrenze

$\sigma_{r,R}$gem. DIN ISO 5725-5 geschätzte Standardabweichungen (s_r) bzw. (s_R)

n.....Anzahl der Schätzwerte; hier ist das das Prüfergebnis (PWS), welches unter Wiederhol- bzw. Vergleichsbedingungen ermittelt wurde. $n = 2$ für die Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichsgrenze

Mit $s_r = 0,015$ [-] und $s_R = 0,018$ [-] gemäß Tab. 4.26 errechnen sich nach (4.5) folgende Werte für die Wiederhol- bzw. Vergleichsgrenze:

- Wiederholgrenze: **r = 0,04** [-]
- Vergleichsgrenze: **R = 0,05** [-]

⁶⁰ Ein Fastausreißer liegt vor, wenn die mithilfe der numerischen Ausreißertests ermittelte Prüfgröße nach Grubbs (Gp) bzw. nach Cochran (C) größer als die Grenze des kritischen Signifikanzniveaus von 5 %, jedoch kleiner oder gleich der Grenze des kritischen Signifikanzniveaus von 1 % ist. Wird die Grenze für das Signifikanzniveau von 1 % überschritten, so handelt es sich bei dem untersuchten Wert eines Parameters eines Merkmalniveaus um einen statistischen Ausreißer, welcher von der weiteren Auswertung zu eliminieren ist.

4.3.10 Absolute Messabweichung zwischen den zwei Prüfmaschinen

Zur Feststellung der absoluten Prüfabweichung der beiden im Labor A und im Labor B installierten Prüfmaschinen, sowie zur Kontrolle der Gleichwertigkeit der vom Hersteller ausgelieferten Kontrolloberfläche aus Glas, wurden im Rahmen des Ringversuchs in der 3. Prüfphase mit insgesamt sechs verschiedenen Prüfgummisätzen Vergleichsmessungen durchgeführt. Als Testoberflächen dienten die in Abschnitt 4.3.2.2 beschriebenen Kontrolloberflächen. Von der Glasplatte standen insgesamt zwei Exemplare zur Verfügung. Da es sich bei der Riffelplatte um einen Prototypen handelt, stand nur ein Exemplar zur Verfügung. Dadurch ist es derzeit noch nicht möglich, eine Aussage über die Reproduzierbarkeit der Eigenschaften bzw. Oberflächencharakteristika der Riffelplatte zu tätigen.

Von den sechs Prüfgummisätzen befanden sich vier (F40A, F42Z, F44R und F44A) im Neuzustand und zwei (F39W und F39T) wurden vor Durchführung des Ringversuchs bereits für die Bestimmung des PWS von Sanden verwendet.

4.3.10.1 Vergleichbarkeit zweier Glaskontrollplatten

Im ersten Prüfschritt wurde mit dem Prüfgummisatz F40A die Vergleichbarkeit der zwei zur Verfügung stehenden Glaskontrolloberflächen untersucht. Dabei wurden mit der im Labor B installierten Prüfmaschine unmittelbar hintereinander sechs Kontrollmessungen je Glaskontrollplatte durchgeführt. Die dabei ermittelte Differenz des mittleren Reibwerts der beiden Platten beträgt 0,001 PWS-Einheiten, siehe Tab. 4.27.

Tab. 4.27: Ergebnisse aus dem Vergleich der Glaskontrollplatten (mit der Prüfmaschine im Labor B)

	<i>Glasplatte Labor A</i>	<i>Glasplatte Labor B</i>
<i>Anzahl der Kontrollmessungen mit Prüfgummisatz F40A (n)</i>	6	6
<i>Mittlerer Prüfwert [-]</i>	0,114	0,115
<i>Standardabweichung [-]</i>	0,00018	0,00012
<i>Differenz zwischen den Kontrolloberflächen [-]</i>	0,001	

4.3.10.2 Messabweichung auf der Glaskontrollplatte

Im zweiten Prüfschritt wurden mit den restlichen sechs Prüfgummisätzen von beiden Labors auf ihren eigenen Glasplatten Kontrollmessungen durchgeführt. Das Labor A führte mit den sechs Prüfgummisätzen insgesamt 70 Kontrollmessungen durch und das Labor B führte insgesamt 61 Kontrollmessungen durch. Im Zuge dieser Vergleichsmessungen wurde neben dem gemessenen Reibwert auch die Temperatur des Prüfwassers, welches während des Versuchs zugeführt wird, aufgezeichnet. Dadurch kann zusätzlich der Einfluss der Prüfwassertemperatur auf das Endergebnis untersucht werden. In Abb. 4-15 (a) sind alle auf den beiden Prüfmaschinen und Glaskontrollplatten ermittelten Kontrollwerte mit Kennzeichnung des Mittelwertes dargestellt.

Im Labor B beträgt das mittlere Reibwertniveau aus allen durchgeführten Kontrollmessungen 0,116 [-], im Labor B hingegen 0,108 [-]. Dasselbe Ergebnis wurde bei der alleinigen Auswertung für den Prüfgummisatz F42Z ermittelt. Von beiden Labors wurden mit diesem Prüfgummisatz jeweils ca. 20 Kontrollmessungen durchgeführt, wobei nach jeweils fünf Kontrollmessungen der Prüfgummi zwischen den beiden Prüflabors ausgetauscht wurde. Im Labor B wurde bei den Vergleichsmessungen mit dem Prüfgummisatz F42Z eine gegenüber dem Labor A geringere Streuung der Prüfergebnisse festgestellt. In Abb. 4-15 (b) sind die insgesamt ca. 40 Messwerte bestimmt mit dem Prüfgummisatz F42Z dargestellt.

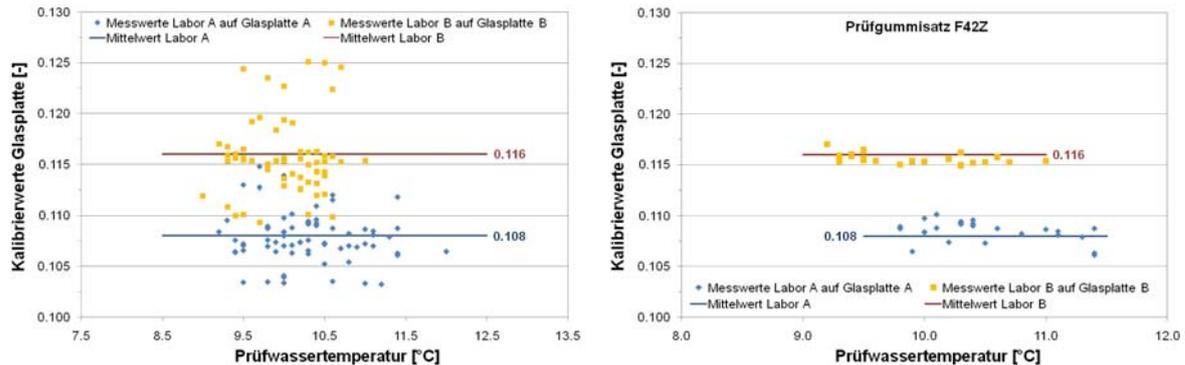


Abb. 4-15: (a) Zusammenstellung aller auf der Glaskontrollplatte ermittelten Reibwerte; (b) Reibwerte auf der Glaskontrollplatte mit dem Prüf gummisatz F42Z

In Tab. 4.28 sowie in Tab. 4.29 werden die Prüfergebnisse mit Angabe der maximalen und minimalen Reibwerte sowie des vorhandenen Prüf wassertemperaturbereichs zusammengefasst. Die zwei Prüfmaschinen weisen somit auf dem Reibwertniveau von ca. 0,110 [-] eine mittlere Differenz von 0,008 [-] auf. Dies entspricht ca. 7 % des Messniveaus. Diese Messwertabweichung kann z.B. aus einem unterschiedlichen Prüfkopfgewicht oder aus einer unterschiedlichen Kalibrierung des Drehmomentaufnehmers stammen.

Aus Abb. 4-15 (b) wird ersichtlich, dass eine Schwankung der Prüf wassertemperatur im Bereich von 9,0 bis 11,5 °C keinen statistisch nachweisbaren Einfluss auf das Prüfergebnis hat. Sowohl bei 11,5 als auch bei 9,0 °C wurden dieselben Abweichungen vom Mittelwert festgestellt.

Tab. 4.28: Reibwerte auf der Glaskontrollplatte ermittelt mit sechs Prüf gummisätzen

	Labor A	Labor B
Anzahl der Kontrollmessungen (n)	70	61
Prüfwert max. [-]	0,115	0,125
Prüfwert min. [-]	0,103	0,109
Mittlerer Prüfwert [-]	0,108	0,116
Differenz zwischen den Prüfmaschinen [-]		0,008
Bereich der Prüf wassertemperatur [°C]	9,2 – 12,0	9,0 – 11,0

Tab. 4.29: Reibwerte auf der Glaskontrollplatte ermittelt mit dem Prüf gummisatz F42Z

	Labor A	Labor B
Anzahl der Kontrollmessungen (n)	21	20
Prüfwert max. [-]	0,110	0,117
Prüfwert min. [-]	0,106	0,115
Mittlerer Prüfwert [-]	0,108	0,116
Differenz zwischen den Prüfmaschinen [-]		0,008
Bereich der Prüf wassertemperatur [°C]	9,8 – 11,4	9,2 – 11,0

4.3.10.3 Messabweichung auf der Riffelplatte

Im dritten Prüfschritt wurden mit den fünf Prüf gummisätzen F42Z, F44R, F44A, F39W und F39T auf der Riffelplatte Vergleichsmessungen mit beiden Prüfmaschinen durchgeführt. Das Prüfprogramm sah vor, dass von einem Labor mit jedem Prüf gummisatz zwei Prüfungen auf der Glaskontrollplatte und anschließend eine Prüfung auf der Riffelplatte durchzuführen waren, bevor die fünf Prüf gummisätze gemeinsam mit der Riffelplatte an das andere Labor zur weiteren Verwendung übergeben wurden. Die meisten Prüfungen wurden mit den zwei neuen Prüf gummisätzen F42Z und F44R durchgeführt. Mit den restlichen drei Prüf gummisätzen wurde je Labor zumindest eine Riffelplattenprüfung durchgeführt. In Tab. 4.30 sind alle durchgeführten Messungen auf der Riffelplatte getrennt für jedes Labor und jeden Prüf gummisatz mit Angabe des Mittelwertes sowie der absoluten Differenz zwischen den beiden Labors angeführt.

Tab. 4.30: Reibwerte der fünf Prüf gummisätze auf der Riffelplatte

Prüf gummi- satz	Labor	Einzelprüfwerte auf der Riffelplatte [-]						Mittel- wert [-]	Differenz [-]
F42Z	A	0,316	0,319	0,320	0,321	0,320	0,317	0,319	0,003
	B	0,321	0,325	0,320	0,319	0,324		0,322	
neue F44R	A	0,306	0,304	0,310	0,310			0,308	0,008
	B	0,311	0,315	0,319				0,315	
F44A	A	0,312	0,314					0,313	0,003
	B	0,316						-----	
gebrauchte F39T	A	0,287						-----	0,006
	B	0,297	0,289					0,293	
F39W	A	0,281						-----	0,008
	B	0,289						-----	
Mittelwert =								0,304	0,006
Standardabweichung =								0,0152	0,0025

Auch bei den Vergleichstests auf der Riffelplatte wurde festgestellt, dass die Prüfwerte vom Labor B geringfügig höher liegen als die Prüfwerte vom Labor A. Die mittlere absolute Differenz auf der Riffelplatte beträgt 0,006 [-]. Mit den zwei Prüf gummisätzen F42Z und F44A betrug die absolute Messwertabweichung zwischen den beiden Prüfmaschinen nur 0,003 [-]. Die maximale Abweichung von 0,008 [-] wurde mit den Prüf gummis F44R und F39W erzielt. Der Mittelwert aus allen durchgeführten Prüfungen mit den fünf verschiedenen Prüf gummisätzen liegt bei 0,304 [-]. Auffallend hoch ist die zugehörige Standardabweichung zwischen den Prüf gummisätzen, welche 0,0152 [-] beträgt. Diese Standardabweichung ist ein Indiz dafür, dass dem Prüf gummisatz bei der Prüfdurchführung aufgrund seines Einflusspotentials auf das Prüfergebnis eine große Bedeutung zukommt. Die hohe Standardabweichung ist vor allem begründet in den niedrigen Prüfwerten, welche mit den beiden gebrauchten Prüf gummisätzen F39T und F39W erzielt wurden. Die berechneten Mittelwerte im Bereich von 0,280 bis 0,290 [-] liegen um ca. 0,020 Einheiten unter dem Niveau neuer Prüf gummisätze. Die in beiden Labors mit den verschiedenen Prüf gummisätzen bestimmten Prüfwerte auf der Riffelplatte variieren zwischen 0,287 und 0,322 [-], was einer absoluten Differenz von 0,035 [-] entspricht.

4.3.10.4 Korrelation zwischen Glas- und Riffelplatte

Zur Feststellung einer Korrelation zwischen den Prüfwerten auf der Glas- und der Riffelplatte wurden vor jeder Prüfung auf der Riffelplatte zwei Messungen auf der Glaskontrollplatte durchgeführt. Aus diesen zwei Messergebnissen auf der Glasplatte wurde in weiterer Folge der Mittelwert gebildet, welcher in Bezug zu den Mittelwerten der darauf folgenden Riffelplattenprüfung gesetzt wurde.

In Abb. 4-16 (a) sind die korrespondierenden Daten aller fünf Prüf gummisätze dargestellt. Generell liegen die Prüfwerte auf der Glasplatte im Bereich zwischen 0,105 und 0,115 [-] und auf der Riffelplatte im Bereich zwischen 0,305 und 0,325 [-]. Eine Ausnahme stellen jedoch die durch insgesamt fünf Datenpunkte abgebildeten zwei gebrauchten Prüf gummisätze F39T und F39W dar. Diese weisen in beiden Prüflabors auf der Glaskontrollplatte einen erhöhten Prüfwert auf, wohingegen der anschließende Prüfwert auf der Riffelplatte um ca. 0,02 [-] niedriger liegt als bei den neuen Prüf gummisätzen. Hierbei handelt es sich um eine sehr wesentliche Feststellung, da gezeigt wird, dass vom Verhalten im niedrigen Reibwertebereich nicht automatisch auf einen anderen Reibwertebereich geschlossen werden kann. Dieses besondere Verhalten von gebrauchten Prüf gummisätzen kann auf den bei Kunststoffen möglichen Memory-Effekt⁶¹ oder auch auf die durch die Prüfung von Sandoberflächen veränderte Oberflächencharakteristik zurückzuführen sein.

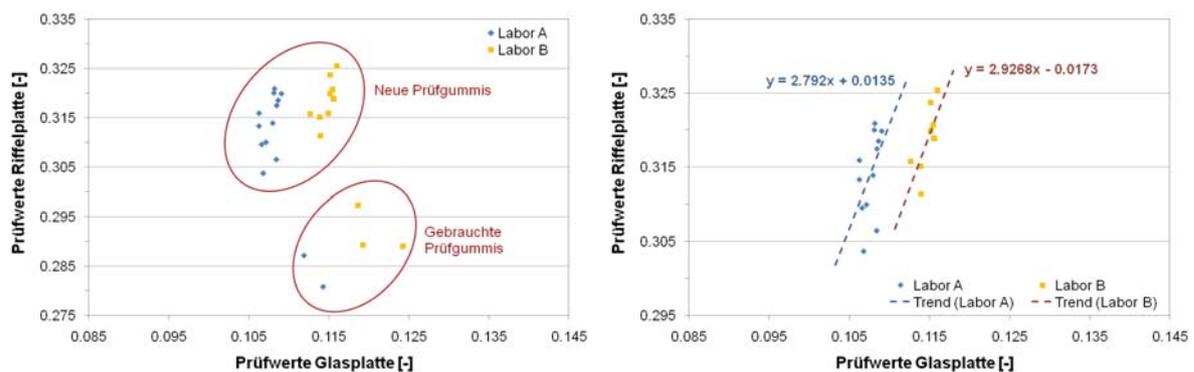


Abb. 4-16: (a) Zusammenhang zwischen Glas- und Riffelplatte inklusive der zwei gebrauchten Prüf gummisätze; (b) Zusammenhang ohne die zwei gebrauchten Prüf gummisätze

In Abb. 4-16 (b) werden nur die auf der Glas- und der Riffelplatte ermittelten Prüfwerte von neuen Prüf gummisätzen einander gegenübergestellt. Darin wird ein genereller Trend ersichtlich, der auf eine Zunahme des Prüfwertes auf der Riffelplatte bei einem erhöhten Prüfwert auf der Glasplatte hinweist. Die Zunahme des Prüfwertes auf der Riffelplatte gegenüber dem Prüfwert auf der Glasplatte ist bei beiden Prüflabors nachweisbar. Die Steigung der Geradengleichung beträgt dabei bei beiden Labors annähernd 3,0.

⁶¹ Auch Rückerinnerungsvermögen von Formgedächtnis-Polymeren genannt. Tritt bei verstreckten Thermoplasten auf. Das sind Kunststoffe, deren Moleküle eine Ver Streckung aufgezwungen worden ist, um eine angestrebte Form anzunehmen. Dieser Effekt kann bei der Wehner/Schulze Prüfung aufgrund folgender Überlegung von Bedeutung sein:

Werden neue Prüf gummi für eine Prüfung verwendet, so entsteht während des Abbremsvorganges Hitze, welche zu einer bleibenden, der Prüf oberfläche entsprechenden, spezifischen Verformung des Prüf gummi führt. Wird dieser Prüf gummi in weiterer Folge für die Prüfung auf einer anders texturierten Oberfläche verwendet, so reagiert ein gebrauchter Prüf gummi anders als neue Prüf gummi, da dem gebrauchten Prüf gummi bereits eine konkrete Oberflächen texture eingeschrieben worden ist und er nur bei Vorhandensein dieser Oberfläche gleichwertiges Verhalten – in diesem Fall einen gut wiederholbaren Prüfwert – zeigt.

4.3.10.5 Zusammenfassung der absoluten Messabweichungen

Aufgrund der im Ringversuch durchgeführten Messungen kann für vier verschiedene Reibwertniveaus die absolute Messabweichung zwischen den zwei Prüfmaschinen bestimmt werden. Im Abschnitt 4.3.6.1 wurde im Rahmen der Bestimmung der Wiederholstandardabweichung gemäß DIN ISO 5725-2 von den zwei untersuchten Merkmalniveaus (Gestein G309 und Gestein GTPA) für jedes Labor anhand der vorhandenen 15 Einzelmessproben ein Mittelwert berechnet. Dieser Mittelwert kann für eine Beurteilung der Messabweichung zwischen den beiden Prüfmaschinen herangezogen werden, da diesen Ergebnissen dieselbe Grundgesamtheit an Proben sowie dieselben Prüfbedingungen zugrunde lagen. Lediglich der Zeitpunkt der Messung sowie die Prüfmaschine bzw. deren Kalibrierung waren unterschiedlich.

Für das Gestein G309 wurde vom Labor A ein Mittelwert von 0,356 [-] und vom Labor B ein um 0,007 Einheiten höherer Mittelwert von 0,363 [-] ermittelt. Beim Gestein GTPA wurde im Labor A ein Mittelwert von 0,289 [-] und im Labor B ein um 0,006 Einheiten niedrigerer Mittelwert von 0,283 [-] bestimmt. Auf der Glaskontrollplatte wurde vom Labor A anhand der Prüfwerte von sechs neuen Prüfummisätzen ein mittleres Reibwertniveau von 0,108 [-] ermittelt. Das mittlere Reibwertniveau auf der im Labor B verwendeten Glasplatte mit neuen Prüfummisätzen liegt hingegen bei 0,116 [-] und ist somit um 0,008 Einheiten höher. Bei den Vergleichen auf der Riffelplatte wurde im Labor A ein mittleres Niveau von 0,301 [-] und im Labor B ein mittleres Niveau von 0,307 [-] gemessen. Also auch hier wurde für das Labor B ein höherer Messwert unter vergleichbaren Bedingungen festgestellt. In Tab. 4.31 sind die berechneten Mittelwerte mit Angabe der dem Mittelwert zugrunde liegenden Anzahl von Einzelmesswerten (n) zusammengefasst dargestellt.

Tab. 4.31: Reibwerte der fünf Prüfummisätze auf der Riffelplatte

	<i>G309</i>		<i>GTPA</i>		<i>Glasplatte</i>		<i>Riffelplatte</i>	
	<i>n</i>	<i>MW [-]</i>	<i>n</i>	<i>MW [-]</i>	<i>n</i>	<i>MW [-]</i>	<i>n</i>	<i>MW [-]</i>
<i>Labor A</i>	15	0,356	15	0,289	21	0,108	14	0,301
<i>Labor B</i>	15	0,363	15	0,283	20	0,116	12	0,307
<i>Differenz (B – A)</i>		+ 0,007		- 0,006		+ 0,008		+ 0,006

Bis auf das Gestein GTPA zeigt sich auf allen Reibwertniveaus, dass im Labor B tendenziell höhere Messwerte ermittelt werden. Bei den Prüfwerten für die Gesteine G309 und GTPA sind zusätzliche Einflüsse durch die Polierbeanspruchung sowie durch die zum Teil unterschiedlichen Probenplatten gegeben. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass die beim Gestein GTPA ermittelte „negative“ Differenz zwischen Prüfwerten des Labor A verglichen mit dem Labor B von der Prüfstreuung überdeckt wird. Zieht man nur die Prüfwerte des Gesteins G309 sowie die Prüfwerte ermittelt auf der Glas- und Riffelplatte für eine Analyse der Messabweichung zwischen den beiden Prüfmaschinen heran, so ergibt sich ein mittlerer Wert von + 0,007 Einheiten. Bezogen auf ein Messwertniveau von 0,50 [-], wie es bei polierresistenten Sanden erreicht wird, sind das lediglich 1,4 %.

Aus diesen Ergebnissen kann geschlossen werden, dass die beiden Prüfmaschinen Ergebnisse auf einem sehr ähnlichen Niveau liefern, wobei die geringe Messabweichung von 0,007 Einheiten im Vergleich zur vorhandenen Prüfstreuung bei der Bestimmung des PWS von Sand, welche aus der Heterogenität des Prüfmaterials resultiert, einen vernachlässigbar kleinen bzw. durch einen Korrekturfaktor berücksichtigbaren Einfluss hat.

4.4 Einflussfaktoren auf den PWS von Sand

Vom Abbau des Gesteins im Steinbruch oder in der Kiesgrube bis zur Bestimmung des Polierwertes eines Sandes liegen viele Bearbeitungsschritte. Zusätzlich tragen verschiedenste Umgebungsbedingungen während der Polierwertbestimmung, welche zum Teil einen erheblichen Einfluss haben können, zum Prüfergebnis bei. In diesem Kapitel werden die verschiedenen Einflussfaktoren auf das Prüfergebnis erläutert sowie ausgewählte Faktoren im Detail untersucht und analysiert. In Abb. 4-17 sind alle wesentlichen, auf den PWS einwirkenden Faktoren aufgelistet.

Die verschiedenen Einflüsse auf den Polierwert PWS lassen sich grob in drei Kategorien einteilen:

- Materialgewinnung
- Prüfvorbereitung
- Prüfdurchführung

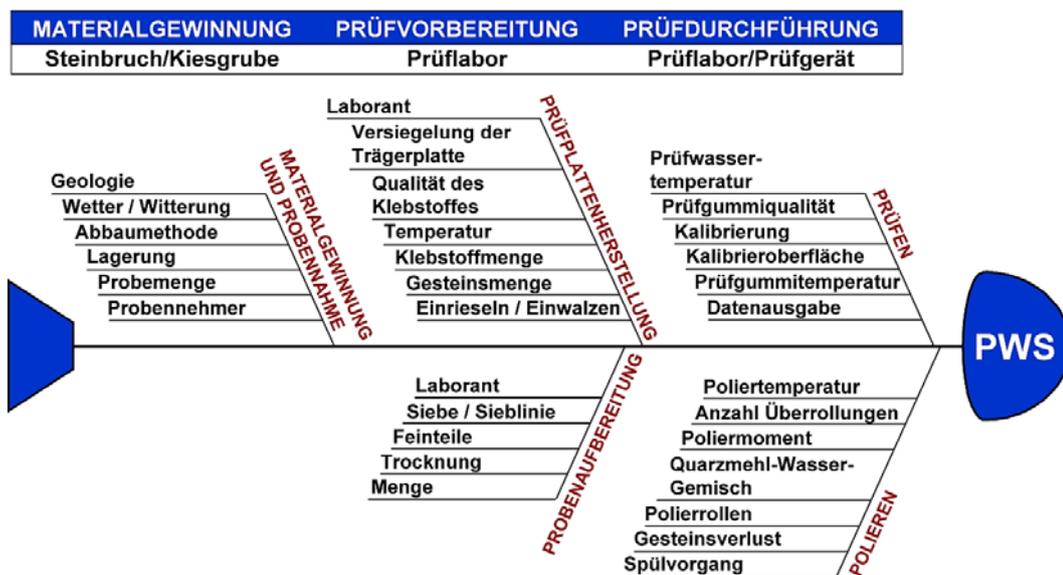


Abb. 4-17: Einflussfaktoren auf den Polierwert Wehner/Schulze (PWS) von Sand

4.4.1 Materialgewinnung

Die Materialgewinnung und die Probenahme erfolgen in der Regel im Steinbruch, in der Schotter-, Kies- oder Sandgrube. Mit Hinblick auf einen nachhaltigen Umgang mit den vorhandenen natürlichen Ressourcen wird in Zukunft auch dem Thema Recycling von Mineralstoffen eine immer größere Bedeutung beigemessen werden. Bei sorgsamer Aufbereitung der Gesteinskörnungen können rezyklierte Gesteinskörnungen sowohl in Trag- als auch in Deckschichten verwendet werden. Wobei die Richtlinien in Österreich derzeit lediglich einen Einsatz in Tragschichten zulassen.

Alle in die Kategorie Materialgewinnung fallenden Einflussfaktoren wie die Geologie, das Wetter bzw. die klimatischen Bedingungen, die Abbau- bzw. Aufbereitungsmethode, die La-

gerung, die Entnahme der Laboratoriumsprobe⁶², etc. werden vom Besitzer bzw. Betreiber der Lagerstätte beeinflusst und können daher im Rahmen der gegenständlichen Arbeit nicht untersucht bzw. quantifiziert werden.

Die vorhandene Geologie hat einen wesentlichen Einfluss auf die Wiederholbarkeit des PWS, denn vor allem in Steinbrüchen ist Inhomogenität in der Geologie der Regelfall. Das bedeutet, dass es in Abhängigkeit des Abbauortes innerhalb des Steinbruches zu unterschiedlichen Prüfergebnissen kommen kann. Aber auch in Kiesgruben, kann sich in Abhängigkeit der Abbautiefe, die mineralogische Zusammensetzung der vorhandenen Gesteinskörnungen und somit der PWS zum Teil wesentlich voneinander unterscheiden.

Neben der Geologie haben auch die klimatischen Bedingungen, insbesondere Frost-Tau-Perioden einen Einfluss auf die Qualität bzw. Güte des Gesteins.

Unter dem Begriff Abbaumethode wird in Abb. 4-17 einerseits das Lösen des Gesteins, andererseits aber auch die Art der Gesteinsaufbereitung zusammengefasst. Das Lösen im Steinbruch durch Sprengen unterscheidet sich wesentlich vom Lösen in der Kiesgrube, in welcher man zumeist mit Baggern oder Schürfkübeln das Auslangen findet. Durch die Wahl der Aufbereitungsmethode und hierbei insbesondere der Wahl der Zerkleinerungsanlagen⁶³, lässt sich die Kornform, die Bruchflächenqualität und in weiterer Folge die Polierresistenz von Gesteinskörnungen beeinflussen.

Nach der Gesteinsaufbereitung mit angeschlossener Klassierung in unterschiedliche Korngruppen sind die Gesteinskörnungen zu lagern. Dabei können die Gesteinskörnungen unter anderem offen auf der Halde der Witterung ausgesetzt oder in eingehausten Lagerflächen gelagert werden.

Zur Erlangung der CE-Kennzeichnung für die in der Lagerstätte produzierten Gesteinskörnungen müssen die in den österreichischen Umsetzungsnormen ÖNORM B 3130 und ÖNORM B 3131 [ON, 2010] deklarierten Gesteinseigenschaften geprüft werden. Dazu ist durch einen Probennehmer eine charakteristische Probe aus den produzierten Gesteinskörnungen zu ziehen. Die Entnahme der Probe hat bei aufbereiteten Körnungen aus fließendem und ruhendem Gut gemäß den Festlegungen in der ÖNORM EN 932-1 [ON, 1997] zu erfolgen. Dabei werden in der Regel Einzel- oder Sammelproben entnommen, homogenisiert und normgerecht zu Laborproben eingengt.

4.4.2 Prüfvorbereitung

Die Prüfvorbereitung erfolgt im Labor und umfasst bei der PWS Bestimmung zwei wesentliche Arbeitsschritte:

- Probenaufbereitung
- Prüfplattenherstellung.

⁶² Unter einer Laboratoriumsprobe versteht man eine eingengte, gemäß ÖNORM EN 932-1 entnommene Sammelprobe, welche für Untersuchungen in einem Prüflabor bestimmt ist. Für ein Größtkorn D von 2 mm hat die Laboratoriumsprobe aus einer Sammelprobe von ca. 24 kg entnommen zu werden.

⁶³ Diese dienen dazu große Gesteinsblöcke mit möglichst niedrigem Energieaufwand und geringem Verschleiß in kleinere Fraktionen aufzubrechen bei gleichzeitiger Sicherstellung einer hohen Bruchqualität. Zu den gebräuchlichsten Brechertypen zählen der Backenbrecher, der Kreiselbrecher, der Vertikalbrecher sowie die Prallmühle. Diese Brechertypen sind je nach Anforderung in den verschiedensten Ausführungen erhältlich.

a) Probenaufbereitung

Bei der Probenaufbereitung wird die in das Labor gelieferte Laboratoriumsprobe, in der Regel die Korngruppe 0/2, mittels Probenteilung zu einer Teilprobe eingeengt. Dabei ist auf darauf zu achten, einen mineralogisch repräsentativen Querschnitt der Ausgangskörnung sicherzustellen. Vor allem bei stark inhomogenem Material kann durch eine unsachgemäße Probenteilung im Labor das Prüfergebnis nachhaltig beeinflusst werden.

Aus der eingeengten Teilprobe wird anschließend die Sandfraktion 0,2/0,4 mm ausgesiebt und so lange gewaschen, bis alle Feinteile entfernt worden sind. Werden die Siebung und das Waschen aufgrund fehlerhafter Siebe und zu kurzer Waschzeit nicht ordentlich ausgeführt, so werden einerseits zusätzliche Korngrößen mitgeprüft und andererseits bleiben Feinteile am Prüfgut haften, welche das Prüfergebnis verfälschen können. Dieser Arbeitsschritt ist also sehr stark von der Sorgfalt des ausführenden Laboranten geprägt.

Vor der weiteren Verwendung ist die ausgesiebte und gewaschene Sandfraktion 0,2/0,4 mm zu trocknen. Insgesamt sind ca. 600 g aufzubereiten. Die so erhaltene Gesteinsmenge wird in der Regel als Messprobe bezeichnet.

b) Prüfplattenherstellung

Die Herstellung der Sandprobekörper wurde bereits im Abschnitt 3.1.3.1 ausführlich erläutert. Wie die Probenaufbereitung wird auch die Qualität der Prüfplattenherstellung vom Laboranten stark beeinflusst.

Zu den wesentlichen Einflussfaktoren gehören in diesem Zusammenhang das Versiegeln der Holzträgerplatten sowie die Einriesel- und Einwalzvorgänge während des Beklebens der Holzträgerplatten mit Sand. Wird eine Holzträgerplatte nur mangelhaft versiegelt, so kann die Sandoberfläche den Belastungen während der anschließenden Polierprüfung nicht widerstehen und wird zerstört. Die nicht vollständig mit Sand beklebte Prüffläche verfälscht wiederum das Prüfergebnis. Wird beim Aufbringen des Sandes auf die mit Klebstoff bestrichene Holzträgerplatte das Einwalzen mit einer Gummirolle unsachgemäß ausgeführt, so kann Klebstoff an die Oberfläche dringen. Dies führt dazu, dass keine repräsentative Gesteinsoberfläche für die anschließende Prüfung zur Verfügung steht.

Zusätzlich können noch die Qualität des verwendeten Klebstoffes, die Temperatur während der Prüfkörperherstellung sowie die aufgebrachte Klebstoff- und Gesteinsmenge als potentielle Einflussfaktoren auf das Prüfergebnis identifiziert werden. Wird nur eine sehr geringe Menge an Klebstoff auf die Holzträgerplatte aufgebracht, so wird das Haftverhalten zwischen Sandkorn und Holzträgerplatte reduziert. Dies kann zu einem hohen Gesteinsverlust während der Polierprüfung führen. Beim Aufbringen von zu viel Klebstoff entsteht eine dicke Klebstoff-Sand-Schicht auf der Holzträgerplatte. Durch die Beanspruchung während des Polierens können auch in diesem Fall Kornausbrüche entstehen, welche eine höhere Rautiefe der Probenoberfläche und somit ein höheres Drainagevermögen zur Folge haben. Solche Probenoberflächen führen zu verfälschten Ergebnissen für den Polierwert von Sand.

4.4.3 Prüfdurchführung

Die eigentliche Prüfdurchführung erfolgt großteils automatisiert mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze. Die Prüfdurchführung wurde in Kapitel 3.1.4 bereits ausführlich beschrieben. Die bei der Bestimmung des PWS zu beachtenden Einflussfaktoren werden hier im Sinne der Vollständigkeit jedoch nochmals angeführt.

Die Bestimmung des PWS mit der Prüfanlage unterteilt sich in zwei Arbeitsschritte:

- Polieren
- Prüfen

a) Polieren

Beim Poliervorgang wird die Probenoberfläche unter Zugabe eines Poliermittels durch drei konische Gummirollen beansprucht. Das Poliermittel besteht aus einem Quarzmehl-Wasser-Gemisch, dessen Mischungsverhältnis 1:0,06 kg beträgt. Ein in den Quarzmehl-Wasser-Behälter integriertes Rührwerk sorgt für die Aufrechterhaltung der konstanten Durchmischung. Die Zufuhr des Quarzmehl-Wasser-Gemisches ist mit $(5 \pm 0,5)$ l/min geregelt. Eine Änderung des Mischungsverhältnisses bzw. eine Erhöhung der Zufuhr rate hat eine erhöhte Polierwirkung zur Folge. Deswegen ist einerseits das Quarzmehl-Wasser-Gemisch in regelmäßigen Intervallen zu erneuern, andererseits wird die konstante Zufuhr rate durch eine regelbare Pumpleistung sichergestellt.

Die verwendeten Polierrollen unterliegen in Abhängigkeit der Oberflächenrauigkeit einem Verschleiß. Dieser äußert sich in einer Wulstbildung an den Kanten der Querrillen, im Ablösen von kleinen bis mittelgroßen Gummiteilen und zum Teil auch im Entstehen einer klebrigen Gummioberfläche. Eine exakte Definition bzw. Messmethode, um festzustellen wann die Gummirollen bzw. die Polierrollenlager abgenutzt sind, gibt es derzeit noch nicht. Jedenfalls sind Gummirollen auszutauschen, wenn sie eine der zuvor genannten Eigenschaften aufweisen. Zur Sicherstellung der Lagerreibung wird das zugeführte Quarzmehl-Wassergemisch auf (20 ± 2) °C temperiert, wodurch die Polierrollenlager gekühlt werden.

Im Zuge des Poliervorgangs laufen die Polierrollen mit einem geringen Schlupf über die Probenoberfläche und werden mit einer definierten Kraft gegen diese gedrückt. Während dieses Poliervorganges wird laufend das einwirkende Poliermoment aufgezeichnet. Dadurch ist es möglich die aufgebrachte Polierleistung zu quantifizieren und zu kontrollieren. Die Anzahl der Polierüberrollungen beeinflusst die Polierleistung und wird deswegen für alle Einzelmessproben mit 90.000 festgelegt.

b) Prüfen

Das Prüfen erfolgt ebenso wie das Polieren vollautomatisiert. Einen wesentlichen Einflussfaktor auf das Prüfergebnis stellt die Qualität der Prüf gummis dar. Die Prüf gummis werden aus einer speziell in Berlin entwickelten Gummimischung hergestellt, weswegen die Prüf gummis auch als „Berliner Mischung“ bezeichnet werden. Um nur qualitativ hochwertige und intakte Prüf gummis für die Bestimmung des Polierwertes zu verwenden, werden einerseits Kontrollprüfungen auf einer Kalibrieroberfläche durchgeführt, andererseits werden die Prüf gummis im Kühlschrank bei konstanten Verhältnissen gelagert.

Die Temperatur des während dem Prüfvorgang zugeführten Wassers beträgt (10 ± 2) °C. Dadurch wird der Einfluss der Erwärmung des Gummigemisches – durch das Abbremsen auf der Probenoberfläche – auf das Prüfergebnis reduziert.

Zusätzlich hat auch die Auswertemethode, hier insbesondere die Glättung des aufgezeichneten Reibwertverlaufes zwischen 95 und 5 km/h, einen Einfluss auf den Polierwert von Sand.

4.5 Bewertung der Relevanz von Prüfparametern auf den PWS von Sand

In diesem Abschnitt wird die Relevanz bzw. die Bedeutung von Parametern auf das Prüfergebnis – dem PWS – analysiert. Diese Parameter werden vom Laboranten während der Probenherstellung sowie von der Prüfmaschine während der Prüfdurchführung beeinflusst. Dabei wird in der ersten Untersuchungsphase insbesondere auf folgende sieben Faktoren eingegangen:

- Verwendete Klebstoffmenge
- Aufgebrachte Gesteinsmenge
- Polierwassertemperatur
- Poliereinwirkung
- Prüfwert auf der Glaskontrollplatte
- Prüf wassertemperatur
- Gesteinsverlust nach Prüfdurchführung

Der Einfluss einer erhöhten Poliermittelzufuhr wurde bereits im Abschnitt 3.1.2.1 näher betrachtet. Für diese Relevanzbetrachtung wurde sie bei allen Prüfungen konstant gehalten.

4.5.1 Datengrundlage

Bei den am Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich Straßenwesen durchgeführten Polierwertbestimmungen von feinen Gesteinskörnungen wurden für jede Einzelmessprobe Daten über die bei der Probenherstellung verwendete Klebstoffmenge und über die aufgebrachte Gesteinsmenge aufgezeichnet.

Während der Poliersimulation mit der Wehner/Schulze-Prüfmaschine wurden neben der aktuellen Umdrehungsgeschwindigkeit des Polierrollenkopfes zusätzlich Informationen über die vorhandene Polierwassertemperatur und das einwirkende Poliermoment aufgezeichnet. Die Aufzeichnungsrate betrug dabei ca. 1 Hz. Dies entspricht etwa acht ganzen Umdrehungen des Polierrollenkopfes bzw. ca. 25 Überrollungen der konischen Gummirollen. Die Umdrehungsgeschwindigkeit ist nach einer sehr kurzen Beschleunigungsphase in der Regel für die gesamte Polierdauer konstant und liegt bei 500 Umdrehungen pro Minute. Das Poliermoment unterliegt jedoch je nach Art der Prüfoberfläche und dem Alter der verwendeten Polierrollenlager zum Teil erheblichen Schwankungen. In Abb. 4-18 ist links der Verlauf des Poliermoments von neuen und rechts von abgenutzten Polierrollenlagern dargestellt.

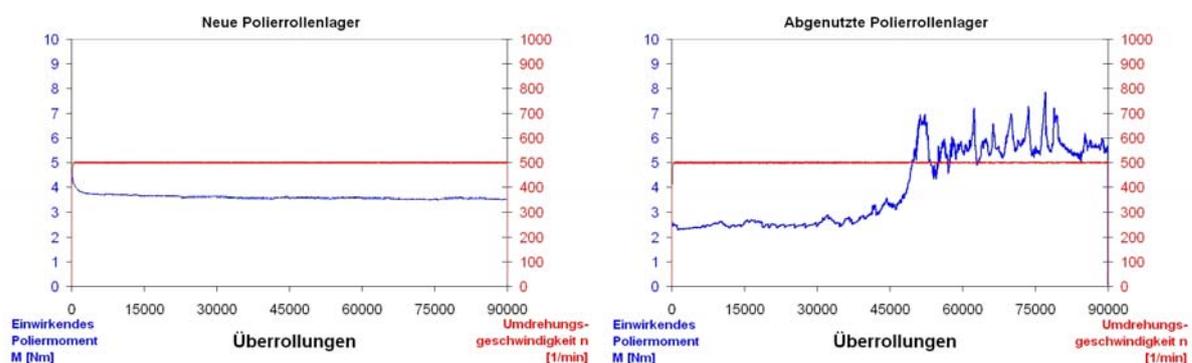


Abb. 4-18: Poliermoment–Überrollungs-Beziehung

Um das einwirkende Poliermoment hinsichtlich ihrer Relevanz auf das Prüfergebnis beurteilen zu können, muss die Poliereinwirkung mathematisch abgebildet werden. Dazu wird die Fläche unter der Momenten-/Überrollungskurve herangezogen. Die Ermittlung dieser erfolgt mittels näherungsweise Integration anhand der Trapezformel. Dazu wird die Funktion $y = f(x)$ im Intervall $[x_0, x_1 = x_0 + h]$ mit $h = 25$ Überrollungen durch ein Polynom 1. Grades an den Stützstellen x_0 und x_1 interpoliert, siehe (4.6).

$$\int_{x_0}^{x_0+h} f(x) dx \approx \frac{h}{2} \cdot (y_0 + y_1) \quad (4.6)$$

y_0*Einwirkendes Poliermoment an der Stelle x_0*

y_1*Einwirkendes Poliermoment an der Stelle x_1*

h*Integrationsschrittweite*

Da das einwirkende Poliermoment mit dem Eintrag von mechanischer Energie gleichzusetzen ist, wird für die gemäß (4.6) berechnete Poliereinwirkung die SI-Einheit Joule [J]⁶⁴ verwendet.

Vor jeder Griffigkeitsprüfung an einer Einzelmessprobe wurde auf der Glaskontrollplatte mit dem für die Prüfung zu verwendenden Prüfummisatz ein Prüfwert ermittelt und aufgezeichnet. Während der nachfolgenden Griffigkeitsmessung an der Einzelmessprobe wurden kontinuierlich die aufgebrachte Temperatur des Prüfwassers sowie der Reibwert aufgezeichnet. Die Aufzeichnungsrate betrug dabei ca. 125 Hz.

Nach Durchführung der Griffigkeitsmessung wurden die Proben bis zur Massenkonstanz getrocknet und anschließend der während der Prüfung entstandene Gesteinsverlust ermittelt und aufgezeichnet.

Für die nachfolgenden Analysen wurden insgesamt 155 Datensätze herangezogen. Die Datensätze sind insgesamt 25 Merkmalniveaus zugeordnet, welche unterschiedliche Gesteine repräsentieren. Von jedem Merkmalniveau wurden mindestens drei Einzelmessproben geprüft, somit standen für die Auswertung von einem Merkmalniveau zumindest drei Datensätze zur Verfügung. Von den beiden im Abschnitt 4.3.2.2 beschriebenen Gesteinsproben wurden vom Gestein G309 insgesamt 39 und vom Gestein GTPA insgesamt 36 Einzelmessproben geprüft (entspricht 39 bzw. 36 Datensätzen für die Auswertung). Eine Zusammenstellung aller aufgezeichneten Daten der 25 Merkmalniveaus ist im Anhang D angeführt.

4.5.2 Datenbereinigung mittels Test auf Ausreißer

Bei der Auswertung der 155 Datensätze wurden für jedes Merkmalniveau die vorhandenen Daten der sieben betrachteten Parameter sowie die Einzelprüfergebnisse innerhalb eines Merkmalniveaus, also der PWS einer Einzelmessprobe, getrennt auf Ausreißer bzw. Fastausreißer untersucht. Eine Ausnahme stellt die Auswertung des Parameters Klebstoffmenge dar. Von diesem Parameter konnten nur 137 Datensätze für die Relevanzanalyse verwendet werden. Für die Überprüfung auf Ausreißer wurde der im Anhang B, Abschnitt B.1 erläuterte Grubbs-Test verwendet, wobei sowohl der kleinste, als auch der größte Wert eines Parameters eines Merkmalniveaus auf seine Korrektheit hin untersucht wurde. Die Suche nach Ausreißern erfordert in der Regel das Vorhandensein eines großen Stichprobenumfangs. Sind für den Ausreißertest lediglich drei Werte vorhanden, so wird mit dem Grubbs-Test bei Vorhan-

⁶⁴ 1 Joule (J) = 1 Newtonmeter (Nm)

densein von zwei gleich großen Werten und einem nur geringfügig abweichenden Wert, letzterer als Ausreißer oder Fastausreißer detektiert. So wurden zum Beispiel bei drei Einzelmessproben eines Merkmalniveaus für die aufgebrauchte Klebstoffmenge folgende drei Werte aufgezeichnet: 8,70; 8,70 und 8,10 g. Letzterer Wert wird mit dem Grubbs-Test als Ausreißer detektiert. Insgesamt sind ca. 27 g Klebstoff auf drei Einzelmessproben zu verteilen. Berücksichtigt man die Verluste, die beim Auftragen auf die Holzplatten entstehen (zum Beispiel Klebstoffrückstand im Anrührbehälter und am Pinsel), so können im Mittel ca. 8,50 g Klebstoff auf eine Holzträgerplatte aufgebracht werden. Da beim Aufbringen des Klebstoffes auf die Holzträgerplatte in der Regel nach optischer Abwägung vorgegangen wird, liegt der Wert 8,10 jedenfalls innerhalb der vorhandenen Streubreite und ist nicht als Ausreißer zu werten. Um dennoch aus drei vorhandenen Daten eines Merkmalniveaus kritische Klebstoffmengen zu identifizieren und von der weiteren Relevanzbetrachtung ausschließen zu können, werden die vorhandenen Daten der Klebstoffmenge, der Polier- und Prüfwassertemperatur sowie der einwirkenden Polierbeanspruchung zusätzlich in Bezug zum gesamten Datenkollektiv, also aller 155 Datensätze, gesetzt. Dafür werden der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Unter der Voraussetzung, dass kleinere Abweichungen vom Mittelwert häufiger als größere Abweichungen sind, die Abweichungen zu beiden Seiten des Mittelwerts ungefähr gleich verteilt sind und zumindest ca. 100 Daten erhoben wurden, gibt die Standardabweichung eine klare Auskunft über die Datenverteilung:

- 68% der Daten befinden sich im Intervall Mittelwert plus/minus einfache Standardabweichung,
- 95% der Daten befinden sich im Intervall Mittelwert plus/minus zweifache Standardabweichung,
- 99% der Daten befinden sich im Intervall Mittelwert plus/minus dreifache Standardabweichung.

Liegt ein Datenwert außerhalb der zweifachen Standardabweichung vom Mittelwert, so wird dieser Wert als Fastausreißer gekennzeichnet. Liegt ein Datenwert außerhalb der dreifachen Standardabweichung vom Mittelwert, so wird dieser Wert als Ausreißer gekennzeichnet.

Die nach diesem Verfahren für die Klebstoffmenge, die Polier- und Prüfwassertemperatur sowie die Poliereinwirkung berechneten Mittelwerte, zugehörigen Standardabweichungen sowie die Anzahl der Ausreißer und Fastausreißer sind in Tab. 4.32 angeführt.

Tab. 4.32: Ausreißer basierend auf einem Datenkollektiv aus 155 Einzelmessproben

<i>Parameter</i>	<i>Mittelwert</i>	<i>Standard- abweichung</i>	<i>Anzahl</i>	
			<i>Fastausreißer</i>	<i>Ausreißer</i>
Klebstoffmenge [g]	8,5	0,9	6	0
Polierwassertemperatur [°C]	19,7	0,7	1	6
Poliereinwirkung [kJ]	330,9	70,4	1	2
Kontrollwert – Glasplatte [-]	0,123	0,012	5	0
Prüfwassertemperatur [°C]	10,5	1,5	0	4

Bei der aufgebrauchten Klebstoffmenge konnte kein statistisch gesicherter Ausreißer festgestellt werden. Von sechs Einzelmessproben wurde die aufgebrauchte Klebstoffmenge als Fastausreißer identifiziert. Die mittlere Polierwassertemperatur liegt bei 19,7 °C, die zugehörige Standardabweichung beträgt 0,7 °C. Insgesamt wurden sechs Ausreißer und ein Fastausreißer identifiziert. Die als Ausreißer festgestellten Werte rühren von der Neubefüllung des Quarz-

mehl-Wasserbehälters her. Erst nach längerer Polierdauer erwärmt sich das frische Polierwasser auf Zimmertemperatur, was eine Senkung der mittleren Polierwassertemperatur zur Folge hat. Die nach Formel (4.6) berechnete Poliereinwirkung beträgt im Mittel 330,9 kJ. Die zugehörige Standardabweichung beträgt 70,4 kJ. Insgesamt wurden zwei Ausreißer und ein Fastausreißer identifiziert. Neue Prüfgunnmissätze weisen auf der Glasplatte einen Kontrollwert in der Regel zwischen 0,100 und 0,110 [-] auf. Bereits nach der Prüfung einer Sandprobe steigt der Kontrollwert an. Im Mittel beträgt der Kontrollwert der 25 verschiedenen Prüfgunnmissätze 0,123 [-]. Die zugehörige Standardabweichung beträgt 0,012 [-]. Insgesamt wurden fünf Fastausreißer detektiert. Die mittlere Prüfwassertemperatur beträgt 10,5 °C mit einer Standardabweichung von 1,5 °C. Insgesamt wurden beim Parameter Prüfwassertemperatur vier Ausreißer festgestellt.

Für die aufgebrauchte Gesteinsmenge sowie den nachfolgenden Gesteinsverlust kann die statistische Auswertung nicht mit dem gesamten Datenkollektiv durchgeführt werden, da die untersuchten Gesteine unterschiedliche Rohdichten besitzen. Lediglich bei den zwei im Ringversuch verwendeten Gesteinskörnungen (beschrieben in Kapitel 4.3) lässt sich eine statistische Auswertung anhand der 39 bzw. 36 Datensätze durchführen. Die mittlere aufgeklebte Gesteinsmenge beträgt bei beiden Sanden ca. 42 g. Die zugehörige Standardabweichung liegt bei ca. 4,8 g. Beim Gestein G309 wurden insgesamt zwei Ausreißer, bei denen die aufgeklebte Gesteinsmenge mehr als 55 g beträgt, festgestellt.

Alle festgestellten Ausreißer wurden für die weiterführende Auswertung eliminiert. Fastausreißer wurden hingegen für die statistische Relevanzanalyse herangezogen.

4.5.3 Test auf Unabhängigkeit

Nach Identifikation und Bereinigung von Ausreißern wurde ein Test auf Unabhängigkeit durchgeführt. Dabei wird untersucht, ob zwischen dem ermittelten PWS einer Gesteinskörnung und einem der Einflussfaktoren Klebstoff- und Gesteinsmenge, Gesteinsverlust, Polier- und Prüfwassertemperatur, Poliereinwirkung sowie Kontrollwert auf der Glasplatte eine Abhängigkeit besteht bzw. ob der PWS von den genannten Einflussfaktoren unabhängig ist [BRONSTEIN et al., 2001]. Der Test auf Unabhängigkeit erfolgt mittels einer Korrelationsanalyse und nachfolgendem statistischen Hypothesentest zur Prüfung der Signifikanz des vermuteten Zusammenhangs zwischen zwei Merkmalen. Das heißt bei der einfachen Korrelationsanalyse wird untersucht ob der PWS von einem der betrachteten Einflussfaktoren abhängig ist. Zusätzlich kann untersucht werden, ob die Einflussfaktoren untereinander unabhängig sind, oder ob sich zum Beispiel zwischen der Klebstoff- und der aufgebrauchten Gesteinsmenge eine Abhängigkeit einstellt. Details der Prüfung auf Unabhängigkeit sind im Anhang D, Abschnitt D.2 angeführt.

Vom PWS völlig unabhängig sind die aufgebrauchte Klebstoff- und Gesteinsmenge. Die meisten Abhängigkeiten konnten zwischen dem Gesteinsverlust und PWS sowie zwischen dem Kontrollwert auf der Glasplatte und dem PWS gefunden werden. Für die Poliereinwirkung konnte nur bei insgesamt drei Merkmalniveaus ein Zusammenhang mit dem PWS festgestellt werden. Ebenso viele Abhängigkeiten wurden zwischen dem PWS und der Polierwassertemperatur identifiziert.

Da sich anhand der Unabhängigkeitstests keine eindeutigen Abhängigkeiten zwischen dem PWS und einem der untersuchten Parameter feststellen ließen, wurden für Merkmalniveaus mit mehreren Messergebnissen – dazu zählen G283 mit $n = 6$, G309 mit $n = 39$ und GTPA mit $n = 36$ – die empirischen Korrelationskoeffizienten zwischen den sieben Einflussfaktoren

und dem PWS berechnet und in Kreuztabellen zusammengefasst, siehe Anhang D, Abschnitt D.2.

Beispielhaft ist die Tab. 4.33 für das Gestein G283 angeführt.

Tab. 4.33: Kreuztabelle der Korrelationskoeffizienten für das Gestein G283

	PWS [-]	Klebstoffmenge [g]	Gesteinsmenge [g]	Gesteinsverlust [g]	Prüfwassertemperatur [°C]	Polierwassertemperatur [°C]	Poliereinwirkung [kJ]	Kontrollwert [-]
PWS [-]	-----	0,25	-0,79	-0,86	0,17	-0,46	-0,92	0,40
Klebstoffmenge [g]		-----	0,27	-0,39	0,27	-0,45	-0,42	-0,57
Gesteinsmenge [g]			-----	0,61	0,18	0,02	0,59	-0,85
Gesteinsverlust [g]				-----	-0,09	0,18	0,96	-0,30
Prüfwassertemperatur [°C]					-----	-0,80	-0,08	-0,16
Polierwassertemperatur [°C]						-----	0,31	0,25
Poliereinwirkung [kJ]				---,---			-----	-0,18
Kontrollwert [-]								-----

Anhand der Kreuztabelle konnten folgende generelle Zusammenhänge, die für alle drei Gesteine Gültigkeit besitzen, festgestellt werden:

- Da (r_{xy}) für $y = \text{PWS}$ und $x = \text{Gesteinsmenge}$ in allen drei Fällen ein negatives Vorzeichen besitzt, heißt das, dass eine Vergrößerung der Gesteinsmenge einen niedrigeren PWS zur Folge hat. Dieser Zusammenhang ist logisch nachvollziehbar. Je höher die aufgebrauchte Gesteinsmenge bei etwa gleichbleibender Klebstoffmenge ist, desto dichter muss die Lagerung der Gesteinskörner sein. Dadurch entsteht wiederum eine „geschlossene“ Oberfläche. Diese Oberfläche erschwert das Abfließen des Wassers zwischen den Körnern, wodurch während des Prüfvorganges ein dickerer Wasserfilm auf der Probenoberfläche verbleibt und sich in weiterer Folge der Reibwert verringert. Stark ausgeprägt ist dieser Zusammenhang jedoch nur beim Gestein G283 mit $r_{xy} = -0,79$.
- Ein erhöhter Kontrollwert hat einen größeren PWS zur Folge, wobei der größte Korrelationskoeffizient (r_{xy}) beim Gestein GTPA mit $r_{xy} = 0,47$ auftritt. Aufgrund des niedrigen Korrelationskoeffizienten lässt sich hier jedoch keine generelle Gültigkeit ableiten.
- Je geringer die aufgebrauchte Klebstoffmenge ist, desto höher ist der aus der Prüfung resultierende Gesteinsverlust. Dieser Zusammenhang war beim Gestein GTPA jedoch nur in sehr geringem Ausmaß feststellbar.
- Je höher die Polierwassertemperatur, desto höher wird der Gesteinsverlust, wobei der größte Korrelationskoeffizient (r_{xy}) beim Gestein GTPA mit $r_{xy} = 0,30$ auftritt.

Außer diesen Zusammenhängen wäre aufgrund des Prüfablaufes weiters zu vermuten, dass mit höherer Poliereinwirkung einerseits der Gesteinsverlust größer werden müsste, andererseits sich der PWS verringern müsste. Des Weiteren wäre eine Beziehung zwischen der auf-

gebrachten Gesteinsmenge und dem aus der Prüfung resultierenden Gesteinsverlust naheliegend. Diese generellen Zusammenhänge konnten jedoch aufgrund der vorhandenen Daten nicht bestätigt werden.

4.5.4 Regressionsanalyse

Mithilfe einer Regressionsanalyse wird in weiterer Folge die Form der Abhängigkeit zwischen zwei bzw. mehreren Parametern sowie die statistische Signifikanz untersucht.

Der einfachste Fall ist das Vorhandensein eines eindimensionalen linearen Zusammenhanges. Man spricht dann von einer eindimensionalen linearen Regression. Dieser Fall wurde bereits in Kapitel 4.5.3 im Zuge der Ermittlung des empirischen Korrelationskoeffizienten (r_{xy}) behandelt.

Bei der multiplen linearen Regression wird angenommen, dass zwischen mehreren unabhängigen Variablen (x_i) – dazu zählen z.B. die aufgebrauchte Gesteinsmenge, die Poliereinwirkung, die Prüfwassertemperatur, etc. – und der von diesen Variablen abhängigen Variablen (y), die das Prüfergebnis (PWS) einer Einzelmessprobe repräsentiert, eine lineare Beziehung besteht.

Die mathematische Dokumentation der Durchführung der Regressionsanalysen ist im Anhang D, Abschnitt D.3 ausführlich behandelt. Im Folgenden werden ausschließlich die Ergebnisse der durchgeführten multiplen linearen Regression beschrieben.

Für das Gestein G309 ergab die multiple lineare Regression nur zwischen der während der Poliersimulation vorhandenen Polierwassertemperatur und dem PWS einen Zusammenhang. Die Signifikanz aller anderen Regressionskoeffizienten überschreitet den kritischen t-Wert ($t_{krit} = 2,08$) nicht. Die Güte der Regression liegt lediglich bei $R^2 = 0,39$. Da auch der nachfolgende F-Test zur Analyse der statistischen Wahrscheinlichkeit negativ ausfällt, ist das ermittelte Regressionsmodell für das Gestein G309 sowie der Zusammenhang zwischen Polierwassertemperatur und PWS als zufällig anzusehen.

Bei der Anwendung der multiplen linearen Regression für die 28 ausreißerbereinigten Einzelmesswerte des Gesteins GTPA wurde ein Zusammenhang zwischen der Poliereinwirkung und dem PWS sowie zwischen dem Kontrollwert und dem PWS festgestellt. Die Signifikanz der Regressionskoeffizienten dieser beiden unabhängigen Variablen (x) übersteigt jedoch den kritischen Wert ($t_{krit} = 2,08$) nur geringfügig. Für alle anderen ermittelten Regressionskoeffizienten konnte keine Signifikanz festgestellt werden. Die Güte der Regression (R^2) beträgt 0,52. Der nachfolgende F-Test zeigt, dass das Regressionsmodell nicht zufällig ist. Im Gegensatz zum Ergebnis der RGP-Analyse beim Gestein G309, in der ein Zusammenhang zwischen Polierwassertemperatur und PWS gefunden wurde, ist es auch plausibler, dass die Poliereinwirkung – sprich die Polierbeanspruchung – sowie der Kontrollwert des verwendeten Prüfgummisatzes auf der Glaskontrollplatte im Zusammenhang mit dem resultierenden PWS stehen. Jedenfalls sind die gefundenen Zusammenhänge nicht eindeutig, was durch das niedrige Bestimmtheitsmaß (R^2) des Regressionsmodells statistisch beschrieben wird.

4.5.5 Zusammenfassung der Relevanzanalyse

Mit Hilfe des Unabhängigkeitstests konnten bei der eindimensionalen Regressionsanalyse an einem Datenkollektiv von 25 verschiedenen Merkmalniveaus – bestehend aus insgesamt 155 Einzelmesswerten – folgende Anzahl an Abhängigkeiten des PWS festgestellt werden:

- Gesteinsverlust und Kontrollwert je 4-Mal
- Polierwassertemperatur und Poliereinwirkung je 3-Mal
- Prüfwassertemperatur 1-Mal
- Klebstoff- und Gesteinsmenge 0-Mal

Bei 25 möglichen Abhängigkeiten sind die vier ermittelten Zusammenhänge zwischen Gesteinsverlust und PWS sowie Kontrollwert und PWS als zufällig anzusehen.

Auch die genauere Analyse der Zusammenhänge zwischen den Variablen (x) von drei Merkmalniveaus lässt mit teils nur sehr geringer Aussagekraft lediglich folgende zwei Schlussfolgerungen zu:

- Mit zunehmender Gesteinsmenge sinkt der PWS
- Ein höherer Kontrollwert hat einen höheren PWS zur Folge

Da einige vermutete Zusammenhänge zwischen dem PWS und den Variablen (x) aufgrund einer multiplen linearen Regression nicht nachgewiesen werden konnten (wie z.B. Abhängigkeit des PWS von der Poliereinwirkung) scheinen andere, heterogene Eigenschaften des Prüfmaterials zur im Kapitel 4.3 eruierten, relativ hohen Prüfgenauigkeit beizutragen. Ein weiterer Aspekt, der bisher noch nicht näher untersucht wurde, ist der Einfluss der verwendeten Prüfgummisätze auf das Prüfergebnis. Deshalb folgt im nächsten Abschnitt eine detaillierte Betrachtung der für die Prüfung verwendeten Prüfgummisätze.

4.6 Einfluss der Prüfummis auf den PWS von Sand

Wie bereits im Abschnitt 3.6.2.4 erläutert, kommt den verwendeten Prüfummis bei der Bestimmung des PWS eine besondere Bedeutung zu. In diesem Abschnitt werden einerseits relevante Gummieigenschaften näher erläutert, andererseits werden die für die Reibwertbestimmung benötigten Prüfummis hinsichtlich ihrer Qualität und ihrer Formbeständigkeit beurteilt.

4.6.1 Allgemeine Gummieigenschaften

Unter dem Sammelbegriff Gummi versteht man all jene Werkstoffe, die aus vulkanisiertem Kautschuk bestehen. Bei der Vulkanisierung wird dem Kautschuk unter Druck und Hitze Schwefel zugegeben, wodurch der in der Regel sehr elastische Gummi entsteht. Kautschuk wurde vorwiegend aus dem Milchsaft des ursprünglich in Südamerika beheimateten Kautschukbaumes gewonnen. Dieser pflanzliche Kautschuk wird deshalb auch als Naturkautschuk bezeichnet. Aufgrund des großen Bedarfs wird Kautschuk mittlerweile jedoch vorwiegend synthetisch hergestellt. Synthetischer Kautschuk besteht zumeist aus Styrol, Butadien und Schwefel. Für spezielle Anforderungen, wie z.B. Chemikalien- und Alterungsbeständigkeit, werden dem Kautschuk noch verschiedenste Zusätze zugegeben.

Zu den wesentlichsten Gummieigenschaften zählen:

- Härte – Shore A
- Abriebs- bzw. Verschleißfestigkeit
- Elastizität

4.6.1.1 Shorehärte

Das Verfahren zur Bestimmung der Shorehärte von Elastomeren, Gummi und Kunststoffen wurde vom amerikanischen Ingenieur Albert F. Shore Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelt. Ähnlich der für metallische Werkstoffe konzipierten Härteprüfung nach Brinell⁶⁵ wird für die Bestimmung der Härte von Kunststoffen eine Penetrationsprüfung durchgeführt. Dabei wird ein federbelasteter Stift aus gehärtetem Stahl in das zu prüfende Material gedrückt. Die Eindringtiefe ist ein Maß für die Shorehärte, wobei eine Eindringtiefe von 2,5 mm einer Shorehärte von 0 [-] und eine Eindringtiefe von 0,0 mm einer Shorehärte von 100 [-] entspricht. Grundsätzlich unterscheidet man zwei verschiedene Shorehärten. Diese sind:

Shore A: Für die Härteprüfung von weichem Gummi, Naturkautschuk und sehr weichen Kunststoffen. Hierbei erfolgt die Penetration mit einer federbelasteten *Kegelstumpfnadel* mit einem Durchmesser von 0,79 mm und einem Öffnungswinkel des Kegelstumpfes von 35° bei einem Anpressdruck von 12,5 N. Nach einer Anpressdauer von 3 s ist der am Prüfgerät angezeigte Wert abzulesen. Bei Gummi mit deutlichen Fließeigenschaften kann die Haltezeit auch auf 15 s verlängert werden. Bei der längeren Haltezeit wird bedingt durch die Relaxation des Gummis der angezeigte Wert für die Shorehärte in der Regel abnehmen.

Shore D: Für die Härteprüfung von Hartgummi, Plexiglas und steifen Kunststoffen. Hierbei dringt eine federbelastete *kugelförmige* Spitze, welche in einem 30°-

⁶⁵ Johan August Brinell (1849 – 1925), schwedischer Ingenieur

Winkel zusammenläuft und deren kugelige Spitze einen Radius von 0,1 mm aufweist, bei einem Anpressdruck von 50,0 N in die Materialprobe ein.

Eine Härte von Shore A = 50 entspricht in etwa einer Härte von Shore D = 12. Eine Härte von Shore A = 65 entspricht in etwa der Härte Shore D = 16. Bei der Bestimmung der Shorehärte spielt die Temperatur eine größere Rolle, als bei der Härtebestimmung metallischer Werkstoffe. Zumal kein linearer Zusammenhang zwischen der vorhandenen Temperatur und der dabei gemessenen Shorehärte existiert. Deshalb hat die Solltemperatur während der Bestimmung der Shorehärte (23 ± 2) °C zu betragen. Die Dicke des zu prüfenden Gummis sollte mindestens 6 mm betragen.

Das Messen der Härte von Kautschuk und Kunststoffen ist in der DIN 53505 [DIN, 2000] geregelt. Gemäß DIN 7868-1 [DIN, 1982] beträgt die Toleranz einer Shorehärte Bestimmung in der Regel ± 5 Shore A bzw. ± 5 Shore D.

Da die Shorehärte ein Maß für die potentielle Eindringtiefe von Profilsitzen einer Fahrbahn- oder Probenoberfläche in den Gummi ist, kommt ihr hinsichtlich des maximal aktivierbaren Reibungswiderstandes in der Kontaktfläche Fahrbahnoberfläche/Gummi eine besonders große Bedeutung. Je tiefer die Profilsitzen in den Gummi eindringen können, desto größer wird die Kontaktfläche. Bei der Interaktion zwischen einem herkömmlichen PKW-Reifen und der Straßenoberfläche umfasst diese Kontaktfläche – selbst bei trockener Straße – lediglich einen Bruchteil (ca. 20 %) der nominellen Kontaktfläche. Das heißt, der Reifen stützt sich mit seinen Stollen nur auf den Profilsitzen ab und sinkt, je nach Shorehärte, Oberflächentopographie, Fahrgeschwindigkeit und Außentemperatur, mehr oder weniger stark in die Straßentextur ein. Bei der Autoreifen/Fahrbahn-Interaktion liegt laut BACHMANN [1998] die mittlere Eindringtiefe in der Größenordnung von 0,5 bis 1,5 mm.

In Abb. 4-19 ist eine berechnete Eindringtiefe-Geschwindigkeitsbeziehung dargestellt. Die Eindringtiefe variiert in dem gezeigten Diagramm für Geschwindigkeiten zwischen 0 und 100 km/h zwischen 1,08 und 0,89 mm. Deutlich erkennbar, reduziert sich die Eindringtiefe mit zunehmender Geschwindigkeit. Das ist auch eine in Fahrversuchen von BACHMANN [1998] nachgewiesene und verständliche Tatsache, wenn man bedenkt, dass der Gummi mit höherer Anregungsfrequenz steifer wird und von daher den Texturausprägungen mehr Verformungswiderstand entgegensetzt. Bei hohen Geschwindigkeiten erhöht sich also die Anregungsfrequenz des Gummielementes, d. h. für die Profilsitzen einer Fahrbahn verbleibt weniger Zeit, um in den Gummikörper eindringen zu können.

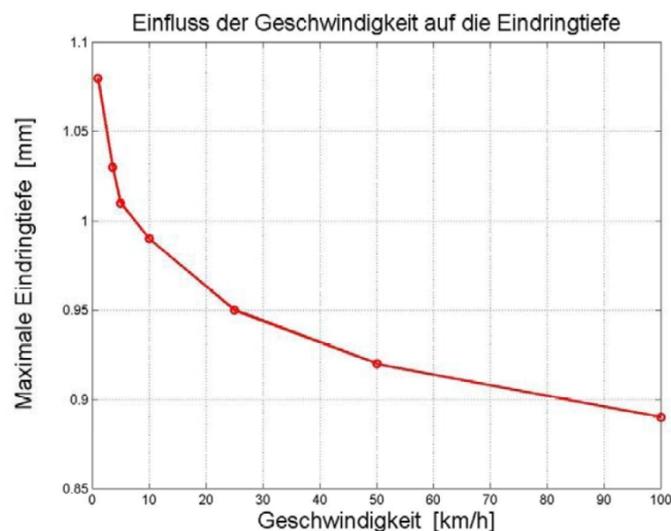


Abb. 4-19: Eindringtiefe-Geschwindigkeits-Beziehung [STEINAUER et al., 2008]

Neben der Geschwindigkeit ist die Eindringtiefe auch wesentlich von der Profilierung des Gummielementes und von der Gestalt der Fahrbahnoberfläche abhängig. Hinsichtlich der Oberflächentopographie unterscheidet man grundsätzlich zwischen einer geschlossenen oder konkaven Oberfläche und einer offenen oder konvexen Oberfläche, siehe Abb. 4-20. In der Praxis findet man jedoch häufig Oberflächenmischtypen vor, die abschnittsweise z.B. eine konvexe, ansonsten grundsätzlich eine konkave Oberfläche aufweisen.

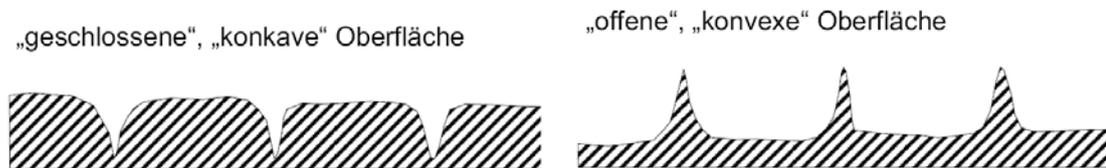


Abb. 4-20: Oberflächentypen [STEINAUER et al., 2008]

Beim Verfahren nach Wehner/Schulze reiben die Gummikörper mit einem annähernd konstanten Anpressdruck über die Prüfoberfläche. In Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit, die zu Beginn der Prüfung 100 km/h beträgt, der Shorehärte des verwendeten Prüfgrundgummi sowie der Topographie der Prüfoberfläche wird das Gummielement in Schwingung versetzt. Die mögliche Schwingungsanregung beeinflusst die Eindringtiefe, da bei höherer Anregung den Profilsitzen der Prüfoberfläche ein höherer Verformungswiderstand entgegengesetzt wird. In Abb. 4-21 ist ein für das Verfahren nach Wehner/Schulze verwendete Prüfgrundgummielement in Interaktion mit einer Sandoberfläche schematisch dargestellt.

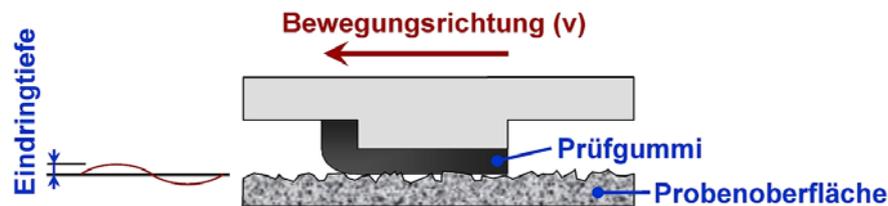


Abb. 4-21: Modellbild zur Gummieindringtiefe

4.6.1.2 Abriebsfestigkeit

Die zweite wesentliche Gummieigenschaft ist die Abriebsfestigkeit. Die Abriebsfestigkeit bezeichnet die Widerstandsfähigkeit von festen Oberflächen gegenüber mechanischer Beanspruchung, insbesondere gegenüber Reibung. Sie wird beeinflusst durch den dem Kautschuk beigemengten Schwefel-, Ruß- und Sauerstoffanteil. Zusätzlich kommen noch andere Additive zur Beeinflussung der Abriebsfestigkeit zur Anwendung.

Die Abriebsfestigkeit von Gummi wird nach DIN ISO 4649 [DIN, 2006] bestimmt. Dabei gleitet ein Gummistück mit einer Dicke von $(16 \pm 0,2)$ mm und einer Mindeststärke von 6 mm über einen Schmirgelbogen mit festgelegter Angriffsschärfe unter einem festgelegten Anpressdruck über einen vorgegebenen Weg. Der Gummiprobekörper darf während des Prüflaufs nicht rotieren. Der Schmirgelbogen ist auf eine zylindrische Trommel gespannt, gegen die der Probekörper mit einer der beiden Stirnflächen gedrückt und an der Trommel entlang geführt wird. Unter den gleichen Bedingungen wird ein Referenz-Elastomer geprüft. Die Masseverluste werden bestimmt und miteinander verglichen. Dies geschieht entweder über den relativen Volumenverlust (angegeben in mm^3) oder über den Abriebswiderstandsindex ARI (angegeben in %).

Die üblichen Werte für die Abriebsfestigkeit liegen bei 70 mm³ (sehr gut) bis 600 mm³ (unbefriedigend). Generell steigt die Abriebsfestigkeit mit zunehmender Härte; weichere Gummisorten haben also eine schlechtere Abriebsfestigkeit als härtere Typen. Bei härteren Gummisorten dringt wie bereits erwähnt der Reibpartner weniger tief in den Gummi ein als bei weichen Gummimischungen, jedoch entstehen dann bei gleicher Anpresskraft an den wenigen Kontaktflächen höhere Flächenpressungen. Dies kann bei manchen Gummimischungen in der verringerten Kontaktfläche in weiterer Folge zu erhöhtem Abrieb führen. Die Abriebsfestigkeit ist neben der Härte also auch sehr stark von den Zusatzstoffen im Gummi abhängig.

Bei der Reibwertbestimmung mit dem Prüfgerät nach Wehner/Schulze sind die verwendeten Prüf gummi sätze einer sehr hohen Abriebsbeanspruchung ausgesetzt, weswegen eine ausreichend hohe Abriebsfestigkeit gegeben sein muss. Vor allem bei größeren Gleitreibungswerten ($> 0,60$ [-]) bilden sich an den Enden der Prüf gummi sätze Abriebskeile, siehe Abb. 4-22.

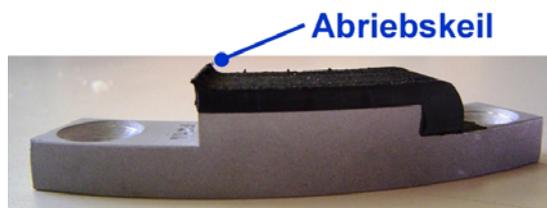


Abb. 4-22: Prüf gummi mit starker Abriebskeilbildung

Vorhandene Abriebskeile können bei weiterer Verwendung zu einer Verfälschung des Messergebnisses führen. Entstehender starker Abrieb kann jedoch auch bereits bei der Prüfung einer Probe einen Einfluss auf das Prüfergebnis haben. Während der Reibwertbestimmung werden die Prüf gummi sätze auf eine Umlaufgeschwindigkeit von 100 km/h beschleunigt und dann auf der Prüfkörperoberfläche abgebremst. Je nach Rauigkeit der Sandoberfläche und somit des sich einstellenden Reibwertverlaufs beträgt die benötigte Länge für den Abbremsvorgang zwischen ca. 25 und 60 m. Dies entspricht zwischen 44 und 105 Umdrehungen des Prüfkopfes. Somit wird jede Stelle der Messoberfläche zwischen 132 und 315-Mal von den Prüf gummi sätzen überstrichen. Wird für die Griffigkeitsmessung nun ein wenig verschleißfester Gummi verwendet, reibt sich der Gummi auf der Oberfläche ab, sodass der nachfolgende Prüf gummi quasi über die Gummireste des vorherigen Prüf gummi gleitet.

Neben der Abriebskeilbildung und dem „Verlegen“ der Prüf spur mit Gummiresten haben Gummis mit niedriger Verschleißfestigkeit zusätzlich die negative Eigenschaft, dass sie von der Prüfoberfläche sehr stark strukturiert werden. Konkret äußert sich das im Entstehen von Rillen, welche sich über die ganze Länge des Prüf gummi erstrecken.

4.6.1.3 Elastizität

Eine dritte wesentliche Gummieigenschaft ist die Elastizität. Bei der Vulkanisation werden Kautschuk, Schwefel und andere Additive erhitzt. Bei diesem Prozess wird der sehr plastische Kautschuk mit den Zusätzen, hier insbesondere mit dem Schwefel, vermennt, wodurch der Kautschuk in den elastischen Zustand übergeführt wird. Für die Bestimmung des Elastizitätsmoduls wird auch bei Elastomeren ein Zugversuch durchgeführt. Der Zugversuch erfolgt gemäß der DIN 53504 [DIN, 2009]. Die Zugfestigkeit von Gummi ist wesentlich niedriger als bei festen Werkstoffen. Sie liegt in der Regel zwischen 5 und 20 N/mm². Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Gummi ist eine gekrümmte Linie, weswegen sich im Gegensatz zu festen Werkstoffen wie z.B. Stahl kein allgemein gültiger Wert für den E-Modul angeben lässt. Um dennoch die Elastizität beschreiben zu können, wird in der Regel der Spannungswert bei 300 % Dehnung angegeben (Spannungswert 300 % = σ_{300}).

4.6.2 Wichtige Gummiarten

In diesem Kapitel werden die für die Anwendung im KFZ-Sektor relevanten Gummiarten kurz erläutert. Zu den wesentlichsten Gummiarten gehören – aus MAROTECH [2010]:

- **NR**, besteht vorwiegend aus Naturkautschuk oder auch Natural Rubber und Polysopren. Dieser Gummi zeichnet sich durch sehr gute mechanische Eigenschaften aus. So besitzt er eine hohe Festigkeit, hohe Bruchdehnung, eine sehr hohe Stoßelastizität sowie eine sehr gute Abriebsfestigkeit. Er weist jedoch keine Beständigkeit gegenüber Mineralölen und Fetten sowie eine unbefriedigende UV- und Alterungsbeständigkeit auf. Diese Gummiart findet Anwendung in LKW-Reifen, hochfesten, dünnwandigen Artikeln, etc. Da Naturkautschuk eine sehr geringe innere Reibung und dadurch eine sehr niedrige Wärmeentwicklung während des Durchknetens aufweist, findet NR auch Anwendung in Flugzeugreifen.
- **SBR**, Buna-Styrol-Butadien. Dabei handelt es sich um einen synthetisch hergestellten Kautschuk, dessen Hauptanwendung im PKW-Reifensektor liegt. In vielen Fällen wird SBR mit NR verschnitten. SBR zeichnet sich durch eine noch bessere Abriebsfestigkeit als NR aus und besitzt eine verbesserte Alterungsbeständigkeit. SBR ist jedoch weniger elastisch als Naturkautschuk. Auch SBR weist gegenüber Mineralölen- und Fetten keine Beständigkeit auf.
- **IIR**, Butylkautschuk Isobutylene-Isoprene. Dieser Werkstoff wird überall dort verwendet, wo es auf eine gute Hitze- und Alterungsbeständigkeit ankommt, wie z.B. bei Autoschläuchen oder bei Innenlagen von schlauchlosen Reifen. Dieser Gummi weist eine gute Beständigkeit gegen Säuren und Alkalien sowie eine sehr gute Wetter- und Ozonbeständigkeit auf. Jedoch ist die Elastizität sehr gering und wie NR und SBR ist keine Beständigkeit gegenüber Öle und Fette gegeben.
- **NBR**, Nitrilkautschuk, Perbunan, Acrylnitril-Butadien. Wird vorwiegend für Dichtungen, Membrane und Schläuche verwendet. NBR weist einen guten Abriebswiderstand und eine hohe Temperaturbeständigkeit auf. Weiters ist NBR sehr gut beständig gegen Kraftstoffe, Mineralöle und Schmierfette. Die Elastizität von NBR ist geringer als jene von NR. Der große Vorteil von NBR liegt in den geringen Produktionskosten.

In Tab. 4.34 werden für die angeführten Gummiarten der Härtebereich (Shore A), die Zugfestigkeit in N/mm^2 , die Bruchdehnung in % sowie die Abriebsfestigkeit und die Elastizität relativ zueinander angegeben.

Tab. 4.34: Durchschnittliche Eigenschaften verschiedener Elastomere im Vergleich

<i>Eigenschaft</i>	<i>Internationales Kurzzeichen für Gummi</i>			
	<i>NR</i>	<i>SBR</i>	<i>IIR</i>	<i>NBR</i>
Härtebereich Shore A	35-95	40-95	40-85	30-95
Zugfestigkeit [N/mm^2]	30	25	20	25
Bruchdehnung [%]	800	450	700	500
Abriebsfestigkeit	++	++	0	+
Elastizität	++	+	-	+
Legende:	++ = sehr gut	+ = gut	0 = mäßig	- = schlecht

Wie aus Tab. 4.34 ersichtlich wird, ist es durch spezielle Mischungen möglich Gummis für jeden Anwendungsbereich zu erzeugen. So werden auch spezielle Gummimischungen für die Raumfahrtindustrie erzeugt, die eine sehr hohe Hitze- und UV-Resistenz besitzen.

4.6.3 Gummimischung für das Wehner/Schulze-Verfahren

Bereits bei dem in Berlin entwickelten Prototypen der Wehner/Schulze-Prüfanlage wurde eine eigens für die Prüfanlage konzipierte Gummimischung verwendet. Diese wurde unter dem Namen „Berliner Mischung“ bekannt und fand sowohl an der TU Berlin als auch bei der BASt Anwendung. Einhergehend mit der Neukonzeption der Wehner/Schulze-Prüfanlage wurde von der Fa. BPS-Wennigsen die Form der Prüfummis anhand von Vorlagen der TU Berlin für das neue Prüfgerät abgeformt. Dadurch wurde gewährleistet, dass die Größe der Prüfummis und somit die gesamte Kontaktfläche zwischen Prüfummis und zu prüfender Oberfläche sowohl bei den Prüfgeräten alter und neuer Bauart ident sind.

4.6.3.1 Prüfummis der Fa. BPS-Wennigsen

Die für die Wehner/Schulze-Prüfung verwendeten Gummikörper gemäß „Berliner Mischung“ weisen eine Shorehärte von Shore A = 65 ± 5 auf und sind auf Verschleißfestigkeit optimiert. Über die genauen Abriebseigenschaften gibt der Produzent der Prüfummikörper bisher jedoch keine Auskunft. Die Abmessungen der Prüfummis wurden bereits im Abschnitt 3.1.2.2 ausführlich dargestellt.

Ein grundsätzliches Problem bei der Original-Gummimischung aus Berlin ist die Abnutzung der Prüfummis auf rauen Oberflächen. Obwohl die Gummimischung laut Herstellerangaben auf Verschleißfestigkeit optimiert wurde, weisen Prüfummis nach der Prüfung von rauen Sandproben bereits nach wenigen Prüfungen starken Abriebsverlust auf. Dadurch können die auf der Glaskontrollplatte vorgegebenen Grenzwerte nicht mehr eingehalten werden und der Prüfummisatz muss bei der Prüfung eines anderen Gesteins gegen einen neuen getauscht werden.

Da die Kosten für einen neuen Prüfummisatz sehr hoch sind – der Stückpreis liegt bei ca. 150 € exkl. USt – fallen somit für die Bestimmung des Polierwertes von Sand sehr hohe Fixkosten an. Noch größer wird das Abnutzungs- und somit das Kostenproblem bei profilierten Oberflächen. Werden z.B. auf einer Fahrbahnoberfläche mit dem „Grooving-Verfahren“⁶⁶ Rillen in regelmäßigen Abständen eingefräst, so erzeugen diese Oberflächen in Interaktion mit einem Gummireifen in der Regel einen sehr hohen Reibwert. Dieses Verfahren findet z. B. auf den Runways von Flughäfen aber auch abschnittsweise auf Autobahnen mit einer Betondecke Anwendung.

4.6.3.2 Alternative Gummimischungen bzw. Prüfummisätze

Zu internen Versuchszwecken wurden von der Fa. BPS-Wennigsen in den Jahren 2000/2001 für eigene Experimente andere Gummimischungen getestet, welche billiger in der Herstellung waren. Jedoch waren die Resultate nicht zufriedenstellend, weswegen wieder auf die Originalmischung zurückgegangen wurde. Zusätzlich hat die Fa. BPS-Wennigsen für das LCPC⁶⁷ in Frankreich zu Testzwecken sechs verschiedene Gummimischungen erzeugt, über deren Tauglichkeit jedoch keine Ergebnisse vorliegen.

An der TU München wurde in den Jahren 2002 bis 2005 eine umfangreiche Reihenuntersuchung zur Beurteilung der Griffigkeitsentwicklung von Betonoberflächen durchgeführt [WENZL et al., 2005]. Dabei wurde unter anderem festgestellt, dass die von der

⁶⁶ Beim Grooving-Verfahren werden mit einer Diamantsäge parallele Rillen in die Oberfläche eingeschnitten, wodurch einerseits auf der Fläche vorhandenes Wasser schnell abfließen kann, andererseits durch die reduzierte Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn höhere Kontaktdrücke entstehen.

⁶⁷ Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Französische Organisation für angewandte Forschung und Entwicklung. www.lcpc.fr

Fa. BPS-Wennigsen hergestellten Prüfummisätze auf den rauen Betonoberflächen sehr schnell abgenutzt werden. Zur Reduzierung der Prüfkosten führte deswegen auch die TU München Untersuchungen mit anderen Prüfummimischungen durch. Dafür wurden von einem alternativen Gummiersteller basierend auf einer NBR-Mischung Prüfummis mit unterschiedlichen Shorehärten hergestellt. Untersucht wurden unter anderem Prüfummimischungen mit den Härten Shore A = (50 ± 5) , (70 ± 5) , sowie (80 ± 5) . Wie bereits in Kapitel 4.6.2 erläutert, sind NBR-Gummimischungen relativ billig in der Herstellung. Diese Gummimischung wird in der Industrie vor allem für Hydraulikdichtungen verwendet. Ein wesentlicher Nachteil der NBR-Gummimischung ist ihre niedrigere Verschleißfestigkeit gegenüber SBR- und NR-Gummimischungen. Dies führt dazu, dass Prüfummis aus NBR bei derselben Shorehärte wie die Prüfummis nach „Berliner Mischung“ einen höheren Verschleiß aufweisen. Um dies zu kompensieren bzw. um die Prüfummis gegenüber Verschleiß zu optimieren, wurden auch härtere Mischungen mit Shore A = (70 ± 5) bzw. Shore A = (80 ± 5) untersucht.

In der Arbeit von WÖRNER [2006], wurde festgestellt, dass mit Prüfummis der Shorehärte Shore A = (70 ± 5) bzw. Shore A = (80 ± 5) auch die Prüfung von rauerer Oberflächen, wie z. B. Sandfraktionen 0,71/1,0 mm, möglich wird. Da mit einer härteren Gummimischung jedoch auch ein grundsätzlich anderes Reibverhalten als mit der „Berliner Mischung“ zu erwarten ist, können mit unterschiedlichen Prüfummis ermittelte Ergebnisse nicht ohne genauere Korrelationsuntersuchungen miteinander verglichen werden.

Die in München entwickelten Nachbauten unterscheiden sich gegenüber dem Prüfummi der Fa. BPS-Wennigsen jedoch nicht nur hinsichtlich der unterschiedlichen Gummimischung und der Shorehärte, sondern auch in den Abmessungen gibt es geringfügige Abweichungen. Der Prüfummimachbau weist dabei im Gegensatz zum „Original“ bedingt durch eine andere Form der Abschrägung am Gummianfang eine um ca. 30 mm^2 kleinere Oberfläche auf. Dies entspricht einer um ca. 7 % reduzierten Gummioberfläche. Dadurch entstehen auch andere Kontaktdrücke und in weiterer Folge andere Spitzenkontaktdrücke. Dies hat wiederum einen direkten Einfluss auf den Abrieb bzw. den Verschleiß sowie auf das Reibverhalten. In Abb. 4-23 sind sowohl ein Prüfummi nach dem Originalmuster als auch ein nachgebauter Prüfummi dargestellt.

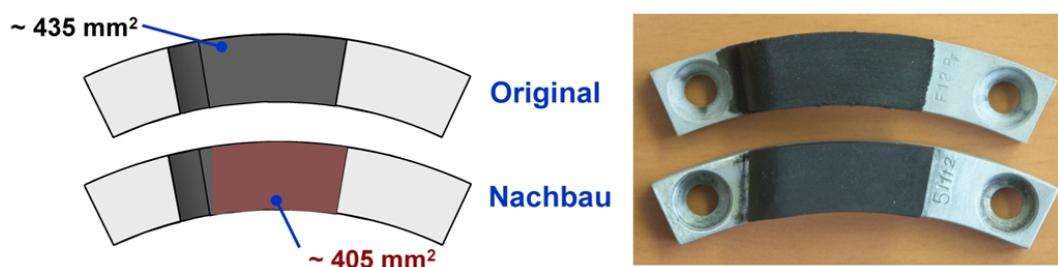


Abb. 4-23: Vergleich zweier Prüfummitypen; Prüfummi der Fa. BPS-Wennigsen (oben), nachgebauter Prüfummi (unten)

Da auch in der Arbeit von WÖRNER [2006] festgehalten wurde, dass unterschiedliche Härten der Prüfummimischung womöglich zu unterschiedlichen Polierwerten führen können, ist es für die Reproduzierbarkeit bzw. Vergleichbarkeit des Prüfverfahrens nach Wehner/Schulze von großer Bedeutung, dass nur mit einer einheitlichen Gummimischung gearbeitet wird.

Aufgrund der hohen Anschaffungskosten für Prüfummis nach der „Berliner Mischung“ ist jedoch die Anwendung dieser Gummimischung in jedem Fall zu hinterfragen. Vor allem in Anbetracht der Tatsache, dass durch die Neukonzeption der Prüfmaschine der mit einer alten

Wehner/Schulze-Prüfanlage erarbeitete Erfahrungshintergrund evt. keine Gültigkeit mehr hat. Kann eine Gummimischung gefunden werden, die einerseits billig in der Anschaffung ist, andererseits eine hohe Verschleißfestigkeit aufweist, so wäre eine Umstellung auf eine andere Gummimischung zur Reduzierung der Prüfkosten in jedem Fall anzuraten.

Am Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich Straßenwesen wurden bisher lediglich Prüf gummi gemäß der „Berliner Mischung“ verwendet. Da diese anfangs noch Qualitätsmängel aufwiesen, wurde nach einer Möglichkeit gesucht, fehlerhafte Prüf gummi bereits vor Verwendung für die Sandpolierwertbestimmung zu identifizieren. Dies führte zur Konzeption der Riffelplatte, siehe Abschnitt 4.3.2.2. Mit dieser Art von Kontrollplatte wurden seit dem Sommer 2010 alle vom Hersteller an das Institut gelieferten Prüf gummiätze hinsichtlich ihres Kontrollwertes auf höherem Reibwertniveau untersucht.

4.6.4 Qualität neuer Prüf gummi nach der „Berliner Mischung“

Im Juni, September und November 2010 wurden dem Labor des Instituts für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich Straßenwesen von der Fa. BPS-Wennigsen neue Prüf gummiätze nach der „Berliner Mischung“ zugesandt. Jeder Prüf gummiatz hat eine spezifische Herstellungsnummer, welche in der Regel mit dem Buchstaben F beginnt. Diese Prüf gummi wurden nach Erhalt im Kühlschrank, kühl und lichtgeschützt gelagert und zwei Tage vor der Funktionskontrolle neben der Prüfmaschine auf Raumtemperatur temperiert. Bei der Funktionskontrolle wurden mit jedem Prüf gummiatz zuerst zwei Reibwertbestimmungen auf der Glaskontrollplatte und direkt im Anschluss eine Reibwertbestimmung auf der in Abschnitt 4.3.2.2 beschriebenen Riffelplatte durchgeführt. Insgesamt wurden 26 Prüf gummiätze nach diesem Prüf schema einer Funktionskontrolle unterzogen.

Für die Auswertung wurde aus den beiden Einzelmesswerten auf der Glaskontrollplatte ein Mittelwert gebildet. In Tab. 4.35 sind die bestimmten Reibwerte in chronologischer Prüfreihefolge mit Angabe der Prüf gummiatznummer zusammengestellt.

Tab. 4.35: Reibwerte von 26 neuen Prüf gummiätzen auf der Glaskontroll- und der Riffelplatte

<i>Laufende Nummer</i>	<i>Bezeichnung Prüf gummi</i>	<i>Reibwert Glasplatte</i>	<i>Reibwert Riffelplatte</i>	<i>Laufende Nummer</i>	<i>Bezeichnung Prüf gummi</i>	<i>Reibwert Glasplatte</i>	<i>Reibwert Riffelplatte</i>
1	F48K	0.106	0.300	14	F48G	0.108	0.296
2	F48H	0.108	0.291	15	F47E	0.108	0.312
3	F48J	0.109	0.302	16	F47D	0.110	0.311
4	F47F	0.114	0.306	17	F50C	0.107	0.298
5	F48L	0.104	0.293	18	F50D	0.108	0.298
6	F48M	0.104	0.293	19	F50E	0.109	0.300
7	F48N	0.105	0.299	20	F50F	0.109	0.296
8	F42V	0.108	0.297	21	F50G	0.109	0.293
9	F42Z	0.108	0.301	22	F50H	0.107	0.295
10	F24B	0.109	0.297	23	F50J	0.106	0.293
11	F24G	0.107	0.292	24	F50K	0.107	0.300
12	F24J	0.108	0.295	25	F50L	0.107	0.296
13	F48F	0.108	0.297	26	F50M	0.106	0.294

Mit den 26 untersuchten Prüf gummisätzen wurde auf der Riffelplatte ein mittlerer Kontrollwert von 0,298 [-] nachgewiesen. Der höchste Kontrollwert auf der Riffelplatte mit 0,312 [-] wurde mit dem Prüf gummisatz F47E, der niedrigste Kontrollwert (0,291 [-]) mit dem Prüf gummisatz F48H ermittelt. Das entspricht einer vorhandenen Spannweite zwischen Minimum und Maximum von 0,021 [-]. Die vorhandene Standardabweichung, also ein Maß für die Streuung der Prüf gummiqualität, beträgt auf diesem Niveau 0,005 [-], also ca. 1/3 der in Kapitel 4.3.7 ermittelten Prüf streuung bei der Bestimmung des Polierwertes von Sand. In Abb. 4-24 links sind die ermittelten Prüf daten auf der Riffelplatte mit Kennzeichnung des mittleren Prüf niveaus dargestellt. Zusätzlich werden basierend auf der einfachen Standardabweichung die Grenzen für die Streuung der Qualität bzw. des Prüf niveaus von neuen Prüf gummisätzen gekennzeichnet.

Auf der Glaskontrollplatte wurde mit den 26 Prüf gummisätzen ein mittlerer Reibwert von 0,108 [-] festgestellt. Der höchste Kontrollwert auf der Glasplatte mit 0,114 [-] wurde mit dem Prüf gummisatz F47F, der niedrigste Kontrollwert mit 0,104 [-] wurde zweimal und zwar mit den beiden Prüf gummisätzen F48L und F48M erhalten. Der mit diesen beiden Prüf gummisätzen auf der Riffelplatte ermittelte Reibwert betrug in beiden Fällen 0,293 [-]. Die Spannweite zwischen maximalem und minimalem Kontrollwert auf der Glasplatte beträgt 0,010 [-]. Die vorhandene einfache Standardabweichung auf der Glaskontrollplatte liegt für die untersuchten 26 Prüf gummisätze bei 0,002 [-].

Eine Zusammenstellung der ermittelten Extremwerte sowie der betroffenen Prüf gummisätze ist in Tab. 4.36 angeführt.

Tab. 4.36: Zusammenstellung der ausgewerteten Reibwerte auf den zwei Kontrollflächen

Kontrollfläche	Maximalwert		Minimalwert		Mittelwert [-]	Standardabweichung [-]
	[-]	Bezeichnung	[-]	Bezeichnung		
Glasplatte	0,114	F47F	0,104	F48L, F48M	0,108	0,002
Riffelplatte	0,312	F47E	0,291	F47F	0,298	0,005

In Abb. 4-24 rechts sind für jeden Prüf gummisatz die ermittelten Kontrollwerte auf der Glas- und der Riffelplatte einander gegenübergestellt.

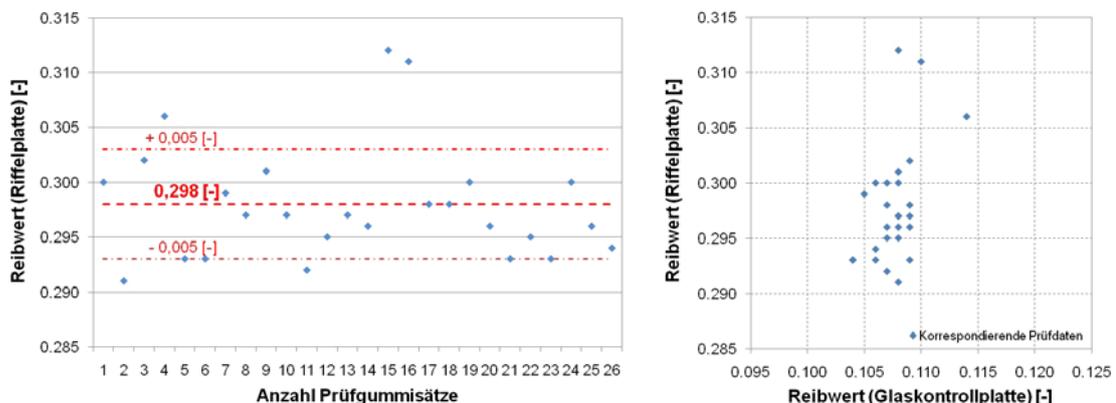


Abb. 4-24: Reibwerte auf der Riffelplatte (links); Vergleich der Reibwerte ermittelt auf der Riffel- und auf der Glaskontrollplatte

Aus Abb. 4-24 rechts wird ersichtlich, dass in der Regel ein mit neuen Prüf gummi auf der Glasplatte ermittelter erhöhter Reibwert auch einen erhöhten Wert auf der Riffelplatte zur Folge hat. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den beiden Kontrollplatten besteht je-

doch nicht. Es ist aber davon auszugehen, dass vorhandene Abweichungen auf dem niedrigen Niveau der Glasplatte sich bei einem höheren Prüfniveau stärker durchschlagen. Somit stellt die Qualität der verwendeten Prüfummisätze hinsichtlich der Streuung des Endergebnisses keinen zu vernachlässigenden Faktor dar.

4.6.5 Überlegungen zur Einführung eines Korrekturfaktors für die Prüfummiqualität

Wird mit einem neuen Prüfummisatz eine Polierwertbestimmung auf einer Sandprobe durchgeführt, so erhöht sich bereits nach einer Prüfung der auf der Glasplatte zu bestimmende Kontrollwert. Der Anstieg des Kontrollwertes ist auf die Aufrauung des Prüfummis bzw. auf den Gummiverschleiß durch das harte Gestein zurückzuführen.

Der Anstieg des Kontrollwertes auf der Glasplatte hat in Deutschland bereits zu der Überlegung geführt, einen Korrekturfaktor für die Ermittlung des PWS einzuführen. Gemäß der RVS 11.06.23 [FSV, 2005] ermittelt sich der PWS eines Sandes aus dem Mittelwert von zwei Einzelmessproben. Der Korrekturfaktor soll dabei auf der Abweichung des Kontrollwertes eines gebrauchten Prüfummisatzes vom Kontrollwert eines neuen Prüfummisatzes auf einer Glaskontrollplatte basieren. Dafür wird vor und nach der Prüfung einer Einzelmessprobe mit demselben Prüfummisatz je ein Kontrollwert auf einer Glasplatte bestimmt. Diese Werte werden als μ_{k1} und μ_{k2} bezeichnet und dürfen um nicht mehr als 10 % voneinander abweichen. Ist diese Bedingung erfüllt wird aus den zwei Kontrollwerten ein Mittelwert gebildet und als μ_{km} bezeichnet. Der an der Einzelmessprobe ermittelte Reibwert bei 60 km/h wird als μ_m bezeichnet. Der Reibwert ist dann um den mittleren Kontrollwert μ_{km} zu korrigieren und um einen konstanten Faktor, dem angenommen durchschnittlichen Reibwertniveau neuer Prüfummis auf der Glaskontrollplatte, von 0,1 [-] zu erhöhen. Der für die weitere Auswertung zu verwendende Prüfwert der Einzelmessprobe berechnet sich demzufolge nach (4.7).

$$\mu_{PWS(x)} = \mu_{m(x)} - \mu_{km(x)} + 0,1 \quad (4.7)$$

$\mu_{km(x)}$Mittlerer Kontrollwert der Einzelmessprobe (x). Berechnet aus dem Kontrollwert vor (μ_{k1}) und nach (μ_{k2}) der Prüfung der Einzelmessprobe (x)

$\mu_{m(x)}$Prüfwert der Einzelmessprobe (x) bestimmt bei 60 km/h

$\mu_{PWS(x)}$...Korrigierter Prüfwert der Einzelmessprobe (x)

Zur Erläuterung soll folgendes Beispiel dienen:

Von dem Sand G123 soll anhand von zwei Einzelmessproben (G123_01 und G123_02) der PWS bestimmt werden. Verwendet wird hierfür der neue Prüfummisatz F12Z. Dessen Kontrollwert auf der Glasplatte beträgt im Neuzustand $\mu_{k1} = 0,105$ [-]. Der nachfolgend bestimmte Prüfwert der ersten Einzelmessprobe ($\mu_{m(1)}$) liegt bei 0,556 [-]. Da der Prüfummis durch diese Prüfung zwar geringfügig aufgeraut wurde, jedoch keinen Abriebskeil bildete, kann er für die Prüfung der zweiten Einzelmessprobe (G123_02) verwendet werden. Der mit dem benützten Prüfummisatz auf der Glasplatte bestimmte Kontrollwert nach Prüfung von G123_01 (μ_{k2}) beträgt nun 0,115 [-]. Die relative Differenz zwischen μ_{k1} und μ_{k2} ist demnach < 10 %. Beide Kontrollwerte liegen auch innerhalb der vom Prüfmaschinenhersteller (Fa. BPS-Wennigsen) deklarierten Messtoleranz auf der Glasplatte (0,095 – 0,115 [-]).

Da in der Regel unmittelbar nach Prüfung der ersten Einzelmessprobe mit der Prüfung der zweiten Einzelmessprobe begonnen wird, ist der Kontrollwert nach Prüfung der ersten Einzelmessprobe gleichzeitig der Kontrollwert vor Prüfung der zweiten Messprobe, also μ_{k2} der

Einzelmessprobe G123_01 = μ_{k1} von G123_02. Auf der zweiten Einzelmessprobe G123_02 wird anschließend ein Reibwert $\mu_{m(2)} = 0,538$ [-] ermittelt. Der danach ermittelte Kontrollwert μ_{k2} beträgt 0,117 [-].

Die Korrekturfaktoren $\mu_{km(x)}$ der zwei Einzelmessproben ermitteln sich nach

$$\mu_{km(1)} = \frac{0,105 + 0,115}{2} = 0,110 \text{ [-]} ; \mu_{km(2)} = \frac{0,115 + 0,117}{2} = 0,116 \text{ [-]}$$

Die korrigierten Prüfwerte $\mu_{PWS(1)}$ und $\mu_{PWS(2)}$ errechnen sich nach:

$$\mu_{PWS(1)} = 0,556 - 0,110 + 0,1 = 0,546 \text{ [-]} ; \mu_{PWS(2)} = 0,538 - 0,116 + 0,1 = 0,522 \text{ [-]}$$

Die vorhandene Spannweite zwischen $\mu_{PWS(1)}$ und $\mu_{PWS(2)}$ beträgt 0,024 [-] und ist somit kleiner als die maximal zulässige Spannweite von 0,03 [-]. Der Polierwert des Sandes berechnet sich somit als der Mittelwert der beiden korrigierten Prüfwerte $\mu_{PWS(1)}$ und $\mu_{PWS(2)}$, wird auf zwei Nachkommastellen angegeben und beträgt 0,53, siehe auch Tab. 4.37.

Tab. 4.37: Ermittlung des PWS mit Korrekturfaktor

Einzelmessprobe	Kontrollwert Glasplatte [-]			Prüfwert bei 60 km/h [-]		PWS [-]
	Vor (μ_{k1})	Nach (μ_{k2})	Mittel (μ_{km})	Gemessen	Korrigiert μ_{PWS}	
G123_01	0,105	0,115	0,110	0,556	0,546	0,534 → 0,53
G123_02	0,115	0,117	0,116	0,538	0,522	

Im Folgenden wird der Reibwert PWS von Sand gemäß RVS 11.06.23 in der derzeit gültigen Fassung [FSV, 2005] berechnet. Die beiden Kontrollwerte vor Prüfung der Einzelmessprobe liegen innerhalb der maximal zulässigen Abweichung von 10 % des Sollniveaus der Drahtornament-Glasplatte (Sollniveau: 0,095 (-10 %) bis 0,115 (+10 %)). Die Spannweite zwischen den gemessenen Prüfwerten bei 60 km/h der beiden Einzelmessproben G123_01 und G123_02 beträgt 0,018 [-] und liegt somit um 0,012 [-] unter der zulässigen Spannweite von 0,03 [-]. Gemäß der RVS berechnet sich der PWS als der Mittelwert aus den zwei Einzelmessergebnissen. Dieser ist auf zwei Nachkommastellen zu runden. Somit ergibt sich ohne Korrekturfaktor der PWS zu 0,55 [-] und erfüllt die derzeit in Österreich gemäß RVS 08.17.02 [FSV, 2007] gültige Anforderung an den Polierwert von Sand für den Einsatz im Oberbeton, siehe Tab. 4.38.

Tab. 4.38: Ermittlung des PWS ohne Korrekturfaktor – gemäß RVS 11.06.23:2005

Einzelmessprobe	Kontrollwert Glasplatte [-]	Prüfwert bei 60 km/h [-]	PWS [-]
G123_01	0,105	0,556	0,547 → 0,55
G123_02	0,115	0,538	

Anhand dieses Beispiels wird deutlich, dass die Einführung eines Korrekturfaktors für die Berücksichtigung einer schwankenden Prüfgunnqualität und des Effekts der Aufrauung des Prüfgunnis durch die Prüfung von Sandoberflächen zu einem deutlichen Unterschied beim Endergebnis führen kann. In diesem Fall wäre nach der Berechnungsmethode mit Korrekturfaktor der Sand nicht für den Einsatz im hochrangigen Straßennetz geeignet.

Deshalb ist es notwendig, bei einer Änderung der Auswertemethode und Einführung eines Korrekturfaktors für die Prüf gummiqualität einen neuen Bewertungshintergrund für die Polierwertbestimmung zu erstellen.

Zusätzlich sind zur Absicherung der Berechnungsformel gemäß (4.7) folgende Punkte zu beachten:

- (a) Werden mit unterschiedlichen Prüfmaschinen und unterschiedlichen Kontrolloberflächen aus Drahtornamentglas mit demselben Prüf gummisatz dieselben Reibwerte ermittelt?

Im Rahmen dieser Arbeit wurde dieser Punkt im durchgeführten innerösterreichischen Ringversuch untersucht, siehe dazu Abschnitt 4.3.10.1. Dabei wurde festgestellt, dass auf zwei bauartgleichen Kontrollflächen aus Drahtornamentglas mit demselben Prüf gummisatz auf einer Prüfmaschine der Reibwert nur geringfügig um 0,001 [-] abweicht. Die Kontrolloberflächen sind also sehr gut miteinander vergleichbar.

Die Abweichung zwischen mehreren, bauartgleichen Maschinen wurde in Abschnitt 4.3.10.2 zusammenfassend behandelt. Dabei wurde festgestellt, dass die zwei untersuchten Prüfmaschinen eine absolute Messniveauabweichung von im Mittel 0,007 [-] aufweisen. Diese Messniveauabweichung kann in der Formel (4.7) durch einen laborspezifischen Korrekturfaktor berücksichtigt werden. Damit wird gewährleistet, dass die Prüfmaschinen in unterschiedlichen Labors auf demselben Prüfniveau arbeiten. Diese Vorgehensweise wurde im Straßenprüfwesen im Anschluss an einen durchgeführten Ringversuch auch bei anderen Prüfverfahren angewandt.

- (b) Liegt das mittlere Prüfniveau von einer statistisch hinreichend großen Anzahl von verschiedenen Prüf gummisätzen bei 0,100 [-]?

Im Kapitel 4.6.4 wurden von 26 neuen Prüf gummisätzen die Reibwerte auf einer Glaskontrollplatte bestimmt. Der dabei ermittelte mittlere Reibwert von neuen Prüf gummi liegt bei 0,108 [-]. Dieser Wert deckt sich auch mit den Beobachtungen, die im Labor des Forschungsbereichs Straßenwesen der TU Wien in den letzten vier Jahren gemacht worden sind. Demzufolge wäre der in Formel (4.7) angeführte konstante Wert von 0,1 auf 0,108 [-] zu ändern.

- (c) Hat auch auf einer rauen Oberfläche ein benutzter, aufgerauter Prüf gummi im Gegensatz zu einem neuen, glatten Prüf gummi einen erhöhten Reibwert zur Folge?

Diesem Punkt ist größte Aufmerksamkeit zu schenken. Die Formel (4.7) basiert auf der Annahme, dass ein erhöhter Reibwert auf der Glaskontrollplatte (= sehr niedriges Reibwertniveau) ebenfalls auf anderen, raueren Oberflächen einen erhöhten Reibwert zur Folge hat. Im Abschnitt 4.3.10.4 auf Seite 100 wurde bereits erwähnt, dass Gummiprodukte einen Memory-Effekt besitzen, der sie ganz spezifisch prägt. Das heißt, es besteht die Möglichkeit, dass ein glatter Prüf gummi durch eine raue Oberfläche aufgeraut und von dieser dauerhaft geprägt wird. Dadurch werden zwar auf anderen, relativ glatten Oberflächen höhere Reibwerte gemessen, auf Oberflächen mit derselben Texturausprägung hingegen verhält sich der aufgeraute Prüf gummisatz in etwa gleich wie ein neuer Prüf gummisatz.

Eine genauere Betrachtung dieses möglichen Verhaltens wird im folgenden Kapitel durchgeführt.

4.7 Beurteilung der Prüfgummitopographie

In diesem Kapitel werden die Entwicklung der Oberflächentopographie eines Prüfgummi-satzes bei der Bestimmung des Polierwertes von Sand sowie das Vorhandensein eines Zusammenhangs zwischen der Topographie und den resultierenden Reibwerten untersucht. Zur Beschreibung der Topographie muss die Oberfläche der Prüfgummi vermessen und entsprechend von genormten Oberflächenkennwerten beschrieben werden.

4.7.1 Grundlagen der Rauheitsmessung

Die Beschreibung der Oberflächenbeschaffenheit hat ihren Ursprung im Maschinenbau. Für die Ausbildung von Pleuellager und Kolben etc. ist es von besonderer Bedeutung eine möglichst glatte Oberfläche zu erzeugen. Da eine völlig glatte Oberfläche nicht herstellbar ist bzw. in der Natur in der Regel nicht existiert, war es notwendig Parameter bzw. Kennwerte zu definieren die es erlauben, erzeugte Oberflächen hinsichtlich ihrer Eignung und Qualität für diverse Einsatzgebiete zu beschreiben. Aufgrund der historischen Entwicklung der Beschreibung von Oberflächen, sind die derzeit normativ verankerten Oberflächenkennwerte vor allem dazu vorgesehen, Maschinenelemente hinsichtlich ihrer Qualität zu beschreiben.

Wie bereits in Kapitel 2.1.3 kurz angeführt, steht der Begriff Oberflächentextur für die Ausbildung der geometrischen Gestalt von Oberflächen. In der EN ISO 8785 [DIN, 1999] wird die Oberflächentextur folgendermaßen definiert:

„Wiederholte oder zufällige Abweichungen von der geometrischen Oberfläche in dreidimensionaler Topographie der Oberfläche. Die Oberflächentextur beinhaltet Rauheit, Welligkeit, Oberflächencharakter, Oberflächenunvollkommenheiten und Formabweichungen innerhalb eines Teilbereiches der Oberfläche.“

Die Abweichungen einer Oberfläche von der idealen, glatten Oberfläche – auch geometrische Oberfläche genannt – werden gemäß DIN 4760 [DIN, 1982] in sechs Kategorien unterteilt. Diese sechs Kategorien werden auch als Gestaltabweichungen 1. bis 6. Ordnung bezeichnet, siehe Tab. 4.39. Definitionsgemäß spricht man bei Gestaltabweichungen 1. Ordnung von einfachen Formabweichungen wie zum Beispiel einer großflächigen Abweichung von der Horizontalen. Zur Gestaltabweichung 2. Ordnung zählt die Welligkeit einer Oberfläche. Bezug nehmend auf die eingangs in Kapitel 2.1.3 erwähnten Oberflächentexturen einer Straße fällt die Welligkeit in den Bereich der Megatextur. Gestaltabweichungen höherer Ordnung werden in der Regel als Rauheiten bezeichnet, wobei Gestaltabweichungen 3. Ordnung zur Makrotextur und Gestaltabweichungen 4. Ordnung zur Mikrotextur zählen. Gestaltabweichungen 5. und 6. Ordnung beziehen sich auf Gefügestruktur und Gitteraufbau eines Werkstoffes und sind bildlich nicht mehr in einfacher Weise darstellbar. Beschreibungen der Gefügestruktur und des Gitteraufbaus finden vorwiegend in der Material- bzw. Werkstoffwissenschaft Anwendung. Für diese Rauheiten gibt es deshalb auch keine klassischen Oberflächenkennwerte, welche mit relativ einfachen Mitteln erfasst werden können. Hinsichtlich der Haftung eines Reifens auf einer Fahrbahnoberfläche liegt jedoch auch die Vermutung nahe, dass Gestaltabweichungen 5. und 6. Ordnung ihren Beitrag leisten. Weist zum Beispiel die Oberfläche aufgrund der Gefügestruktur viele, im Nanometerbereich kleine vertikale Erhebungen auf, so erhöht sich gemäß der Theorie nach Van-der-Waals⁶⁸ zumindest bei kleinen Ge-

⁶⁸ Johannes Diderik van der Waals (1837 - 1923): niederländischer Physiker

schwindigkeiten die Adhäsionskraft zwischen zwei Molekülen – also auch zwischen Reifen und Fahrbahn.

Tab. 4.39: Ordnungssystem für Gestaltabweichungen [nach DIN 4760, 1982]

<i>Gestaltabweichung (als Profilschnitt überhöht dargestellt)</i>	<i>Beispiele für die Art der Abweichung</i>
1. Ordnung: Formabweichungen 	Geradheits-, Ebenheits-, Rundheitsabweichung, und ähnliches
2. Ordnung: Welligkeit 	Wellen
3. Ordnung: Rauheit 	Rillen
4. Ordnung: Rauheit 	Riefen, Schuppen, Kuppen
5. Ordnung: Rauheit (nicht in einfacher Weise bildlich darstellbar)	Gefügestruktur
6. Ordnung: Rauheit (nicht in einfacher Weise bildlich darstellbar)	Gitteraufbau des Werkstoffes

Bei der Einteilung in die sechs Kategorien ist einerseits zu unterscheiden zwischen Gestaltabweichungen, die nur beim Betrachten der gesamten Oberfläche erkannt werden können (z.B. Schiefe, also Gestaltabweichungen 1. Ordnung) und solchen, die schon an einem Flächenausschnitt erkennbar sind (Gestaltabweichungen 2. bis 5. Ordnung).

Wie bereits erwähnt, ist eine völlig glatte Oberfläche nicht herstellbar bzw. in der Natur in der Regel nicht vorhanden. Eine Oberfläche besteht daher immer aus von sich überlagernden Gestaltabweichungen. Ein Beispiel für eine reale Oberfläche ist in Abb. 4-25 in Form eines Profilschnitts dargestellt.

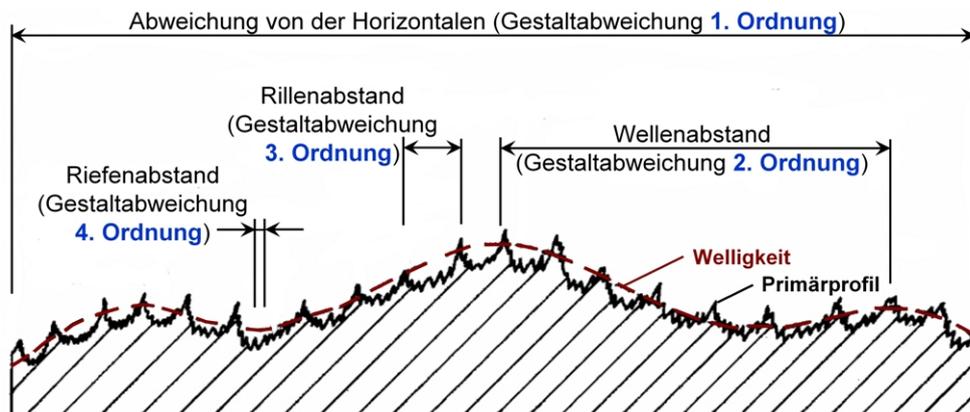


Abb. 4-25: Darstellung der Gestaltabweichungen 1. bis 4. Ordnung (Profilschnitt)

Um nun die in Abb. 4-25 dargestellten Gestaltabweichungen getrennt voneinander charakterisieren zu können, wurden Oberflächenkennwerte definiert und genormt. Die meisten der bisher genormten Oberflächenkennwerte beruhen in ihrer Definition auf einem zweidimensionalen Profilschnitt. Die Aufspaltung einer Oberfläche erfolgt durch Wellen mit unterschiedlichen Wellenlängen. Hierbei nimmt die Wellenlänge mit zunehmender Ordnung der Gestaltabweichung ab. Für die Beschreibung der Gestaltänderung der Prüfummis während der Durchführung einer Polierwertbestimmung an Sand ist die Rauheit besser als die Welligkeit geeignet, da sie auch kurzwellige Topographieunterschiede erfasst. Die Grenze, an der die Welligkeit in Rauheit übergeht, wird durch die Grenzwellenlänge (λ_c) festgelegt.

Zur Trennung der Rauheit von der Welligkeit wird mithilfe eines Profilfilters (in der Regel ein phasenkorrekter, digitaler Gaußfilter gemäß der DIN EN ISO 11562:1998) das ungefilterte Primärprofil (P-Profil) in Rauheit (R-Profil) und Welligkeit (W-Profil) aufgeteilt. Dabei ist das Rauheitsprofil die Abweichung des Primärprofils von der Welligkeit ($R = P - W$). Die Mittellinie im gefilterten Rauheitsprofil ist die Linie, die den langwelligen Profilanteilen entspricht, die durch den Gaußfilter ermittelt und unterdrückt werden [HAAS, 2010].

In Abb. 4-26 ist ein ungefiltertes Profilelement, also das Primärprofil (P-Profil) einer realen Oberfläche mit Kennzeichnung der vorhandenen Welligkeit dargestellt. Aus diesem Profil werden alle Primärparameter – erkennbar durch den vorangestellten Buchstaben P – errechnet.

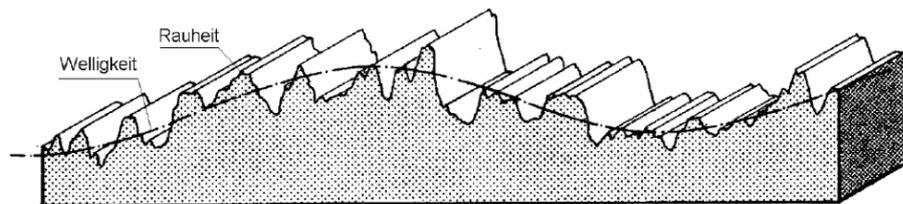


Abb. 4-26: Ungefiltertes Profil einer realen Oberfläche (P-Profil) [MEINKE, 2010]

Das zugehörige, durch Anwendung eines phasenkorrekten, digitalen Gaußfilters ermittelte Rauheitsprofil (R-Profil) mit Kennzeichnung der Mittellinie bzw. Bezugslinie ist in Abb. 4-27 dargestellt. Aus diesem Profil werden alle Rauheitsparameter – erkennbar durch den vorangestellten Buchstaben R – errechnet.

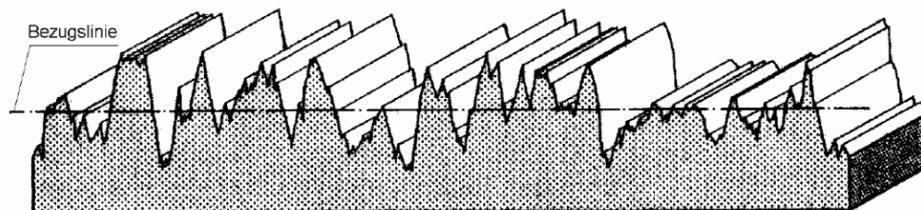


Abb. 4-27: Gefiltertes Rauheitsprofil (R-Profil) [MEINKE, 2010]

Zur Bestimmung der in Abb. 4-27 dargestellten Bezugslinie wird mit Hilfe des Gaußfilters an jedem Punkt das gewichtete arithmetische Mittel der Ordinatenhöhen berechnet. Damit Punkte am Beginn und Ende der Messstrecke ebenfalls richtig gewichtet werden können, muss zum Ein- und Ausschwingen des Filters die Taststrecke (l_T) länger als die Gesamtmessstrecke (l_n) sein. Für die Beschreibung von Oberflächen von Maschinenelementen sind Vor- und Nachlaufstrecken von je einer halben Grenzwellenlänge (λ_c) üblich. Die Zusammenhänge zwischen Grenzwellenlänge, Taststrecke und Messstrecke sind in der EN ISO 4288 [ON, 1998] sowie in der EN ISO 3274 [ON, 1998] ausführlich beschrieben.

4.7.2 Oberflächenkennwerte

Basierend auf der beschriebenen Ableitung des Rauheitsprofils vom erfassten Primärprofil wurde im Rahmen dieser Arbeit diese Vorgehensweise nicht nur in zweidimensionaler, sondern in dreidimensionaler Ausbreitung durchgeführt. Das heißt, durch Anwendung eines phasenkorrekten, digitalen Gaußfilters wurde aus einer vermessenen dreidimensionalen Primärfläche des Prüfgummis eine dreidimensionale Rauheitsfläche ermittelt. Die Filterung erfolgte dabei automatisiert mit der Analysesoftware FRT Mark III⁶⁹ unter Anwendung eines zweidimensionalen Filters gemäß den Vorgaben der EN ISO 11562 [DIN, 1998]. Mit der Analysesoftware können unter anderem folgende Oberflächenkennwerte automatisiert berechnet werden:

- sRp..... Höhe der größten Spitze auf der Einzelmessfläche
- sRv..... Tiefe des größten Tales auf der Einzelmessfläche
- sRz..... Gemittelte Rautiefe auf der Messfläche
- sR_{max}..... Maximale Einzelrautiefe auf der Messfläche
- sRz25..... Gemittelte Rautiefe der Messfläche berechnet aus 25 Teilflächen
- sR_{max}25..... Maximale Einzelrautiefe der Messfläche berechnet aus 25 Teilflächen
- sRa..... Arithmetischer Mittelwert der Flächenordinaten
- sRq..... Quadratischer Mittelwert der Flächenordinaten
- sRk..... Kernrautiefe der Messfläche
- sRpk..... Reduzierte Spitzenhöhe
- sRvk..... Reduzierte Riefentiefe
- sMr1 Kleinster Materialanteil
- sMr2 Größter Materialanteil
- sV0 Ölhaltevolumen

Der in den oben aufgelisteten Oberflächenkennwerten vorangestellte Buchstabe s ist ein Kennzeichen dafür, dass diese Parameter aus den vorhandenen Daten einer dreidimensionalen Oberflächenvermessung berechnet werden. Bis auf das Ölhaltevolumen (sV0) sind alle angeführten Oberflächenkennwerte in der europäischen Normung verankert. Da diese Parameter vorrangig für die Auswertung von Daten, ermittelt mit berührenden Messverfahren (z.B. einem Tastschnittgerät), konzipiert wurden, beziehen sich die in den Normen deklarierten Kennwerte lediglich auf ein Profilelement, also auf ein Element in zweidimensionaler Ausdehnung. In diesem Fall sind die Kennwerte ohne den vorangestellten Buchstaben s anzuführen.

Diese Kennwerte beschreiben eine Oberfläche einerseits in ihrer senkrechten Ausbildung (Amplitudenkenngrößen), andererseits kann eine für die Oberfläche charakteristische Materialanteilkurve beschrieben werden (Abbott'sche-Kurve). Die Charakterisierung einer Oberfläche über Parameter aus der Materialanteilkurve findet vor allem im Maschinenbau mit speziellen Anforderungen an die Reibung und dem Vorhandensein von Riefen Anwendung.

Im Anhang E dieser Arbeit werden die zuvor angeführten Oberflächenkennwerte und ihre Berechnung detailliert beschrieben sowie die dem Kennwert zugrunde liegende Norm angeführt.

⁶⁹ FRT Mark III - V3.9.3 der Firma Fries Research & Technology GmbH. www.frt-gmbh.com. Diese Analysesoftware dient zur automatisierten Auswertung und Darstellung von 2D- und 3D Bilddaten.

4.7.3 Optisches Gerät zur Erfassung der Topographie

Die optische Erfassung der Topographie bzw. der Textur von Oberflächen erfolgte im Rahmen dieser Arbeit mit einem konfokalen Punktsensor. Zur Erfassung der Höhe eines Oberflächenpunktes oszilliert im Sensor ein Objektiv und bildet auf der Oberfläche des Messobjektes eine punktförmige Lichtquelle ab. Das dabei an der Oberfläche reflektierte Licht wird auf einen im Sensor angebrachten Detektor abgeleitet. Nur bei einer bestimmten Objektivlage ergibt sich auf der Oberfläche ein scharfer Messfleck und der Detektor misst eine maximale Intensität des reflektierten Lichtes. Bereits eine kleine Änderung der Objektivlage führt zu einem starken Rückgang der Intensität auf dem Detektor. Bei Erreichen des Maximums wird die Objektivlage und daraus die Höhe des Messobjektes bzw. der Abstand des Messobjektes vom Sensor bestimmt. Das Messprinzip ist in Abb. 4-28 dargestellt.

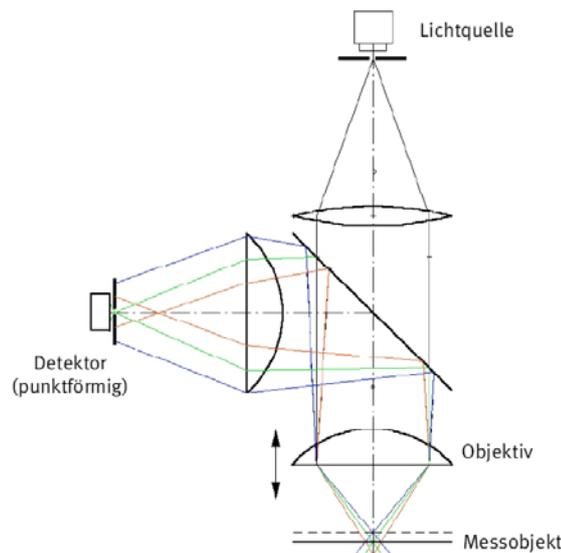


Abb. 4-28: Messprinzip eines konfokalen Punktsensors [FRT, 2010]

Der Vorteil eines konfokalen Punktsensors liegt in seiner sehr hohen Ortsauflösung und der hohen Messgeschwindigkeit selbst bei schwach reflektierenden Oberflächen wie z. B. den hier untersuchten schwarzen Prüf gummi. Der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Sensor hat folgende technische Kenndaten:

- Messbereich in z-Achse: 1 mm
- Messabstand von der Probe: 4 mm
- Messrate: 1000 Hz
- Maximale Auflösung in z-Richtung: 20 nm
- Maximale Auflösung in x-, y-Richtung: 1 μm
- Zulässiger Messwinkel: ca. $(90 \pm 25)^\circ$
- Lichtquelle: Halbleiterlaser, 660 nm, Laserklasse 2

Der Sensor ist auf einem Portalrahmen über einem in x- und y-Richtung verfahrbaren, hochpräzisen Messtisch montiert. Die laterale Anfahr genauigkeit des Messtisches beträgt 0,2 μm . Mit dem in Abb. 4-29 links abgebildeten Messgerät ist es möglich 300 x 300 mm große Flächen abzufahren und die Topographie hochauflösend aufzunehmen. Die maximale Probenhöhe ist mit 100 mm beschränkt. In der Abbildung rechts ist die Erfassung der Topographie eines Prüf gummi im Detail dargestellt. Der rote Messfleck des konfokalen Punktsensors ist in der Abbildung deutlich erkennbar.

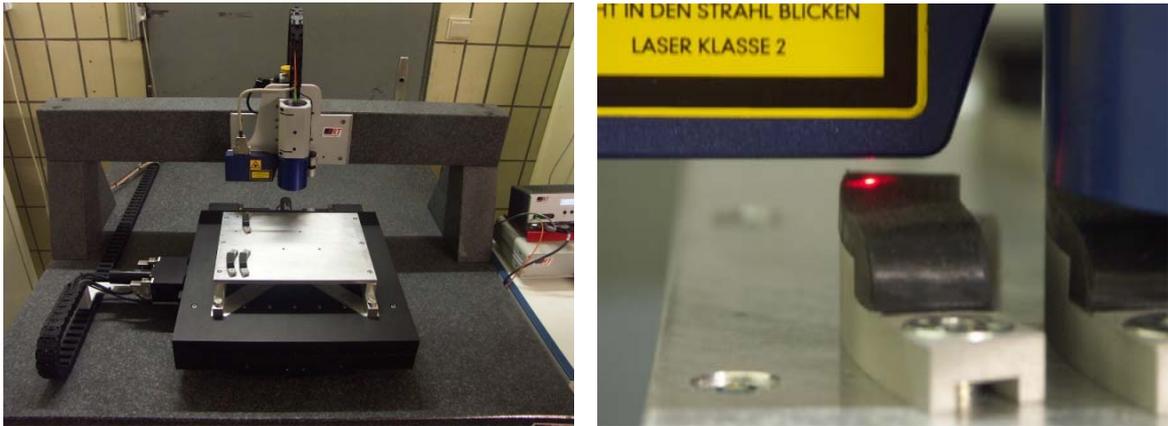


Abb. 4-29: Optisches Messgerät zur Erfassung der Topographie von Oberflächen. Darstellung der gesamten Prüfeinrichtung mit montierter Einspannvorrichtung für die drei Prüf gummi (links); Detailansicht der Vermessung eines Prüf gummi mit dem konfokalen Punktsensor mit einer Wellenlänge des Lichtes von 660 nm (rechts)

Um zu gewährleisten, dass von den Prüf gummi trotz Aus- und Einbauen immer dieselbe Fläche vermessen wird, wurde eine Einspannvorrichtung konstruiert. Dadurch konnten die Prüf gummi nach der Verwendung in der Wehner/Schulze-Prüfanlage wieder lagegenau aufgespannt und durch die im optischen Messsystem gespeicherten Koordinaten exakt angefahren werden. In Abb. 4-30 ist die Anordnung der Messfläche auf dem Prüf gummi schematisch dargestellt.



Abb. 4-30: Anordnung der Prüffläche auf einem Prüf gummi - Maße in [mm]

Die Messfläche mit den Abmessungen 10 x 20 mm beträgt insgesamt 200 mm². Bedingt durch die gewählte laterale Auflösung von 20 µm wurden 502 x 1000 Punkte erfasst. Die 502 erfassten Punkte in x-Richtung waren bedingt durch die Encoder-Auflösung des Sensors.

4.7.4 Untersuchungsprogramm

Die Betrachtung der Änderung der Oberflächentopographie der Prüf gummi während der Durchführung einer Polierwertbestimmung von Sand erfolgte an insgesamt drei unterschiedlichen Sanden (0/2), welche mit G001, G002 und G003 bezeichnet sind. Zwei weisen einen Polierwert über 0,50 [-] und ein Sand einen Polierwert von ca. 0,40 [-] auf. Die Aufbereitung der Sande sowie die Herstellung von je drei Einzelmessproben je Sandkörnung erfolgte gemäß den Festlegungen im Abschnitt 4.3.2.3.

Für die Bestimmung des Polierwertes der drei Gesteinskörnungen – dem (PWS) – wurde je Sand ein eigener Satz Prüf gummi verwendet. Zum Einsatz kamen die drei Prüf gummiätze mit den Herstellernummern F50C, F50D und F50E. Als Kontrolloberfläche wurde sowohl die Platte aus Drahtornamentglas als auch die in Abschnitt 4.3.2.2 beschriebene Riffelplatte verwendet.

Zur Feststellung der Änderung der Topographie wurden in einem ersten Schritt alle drei Prüf gummiätze mit dem in Abschnitt 4.7.3 beschriebenen Messgerät vermessen, dabei die Topographie im Neuzustand ermittelt und als Zustand [0] bezeichnet. Danach wurde eine Prü-

fang auf der Glaskontroll- und auf der Riffelplatte durchgeführt. Die Bestimmung des Reibwertes der ersten Einzelmessprobe erfolgte im Anschluss. Die Prüf gummis wurden dann von der Prüfeinrichtung nach Wehner/Schulze abmontiert, getrocknet und wiederum die Topographie mit dem optischen Gerät erfasst und als Zustand [1] bezeichnet. Dieselbe Prüfroutine wurde mit der zweiten und dritten Einzelmessprobe eines Sandes wiederholt und die Topographiemessungen als Zustand [2] bzw. [3] bezeichnet. Nach dem Erfassen des Zustandes [3] erfolgte noch jeweils eine Griffigkeitsmessung auf der Glaskontroll- und auf der Riffelplatte bevor am Ende ein fünftes Mal die Topographie der Prüf gummis erfasst und als Zustand [4] bezeichnet wurde. Eine Übersicht über das Prüfprogramm ist in Abb. 4-31 dargestellt.

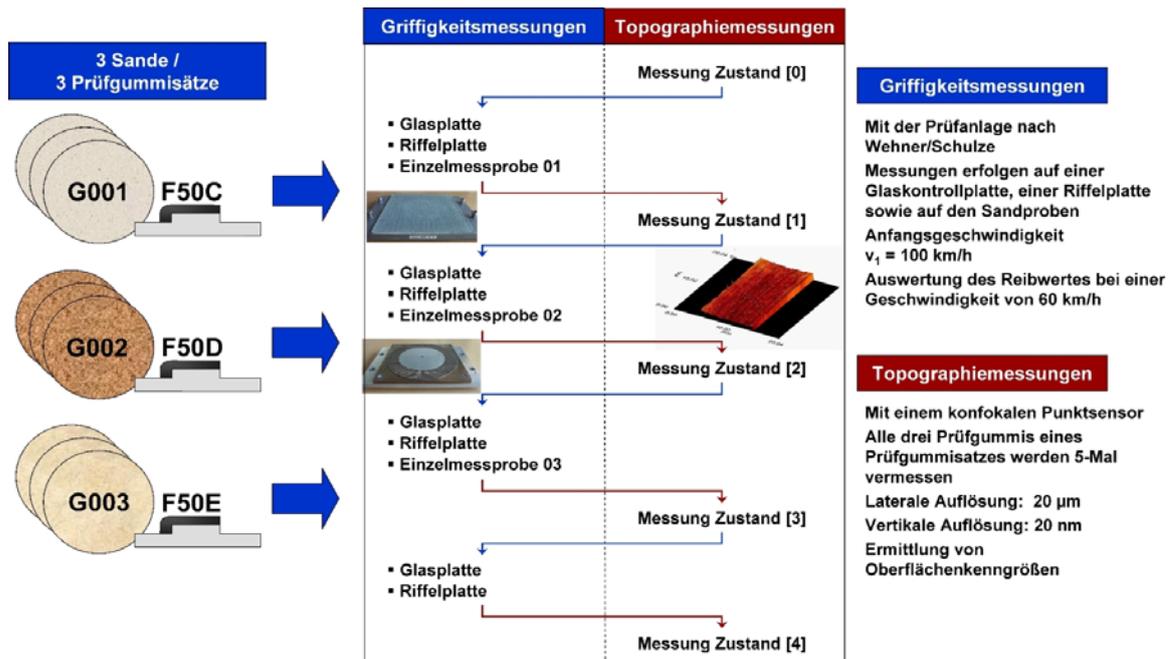


Abb. 4-31: Topographieänderung der Prüf gummis – Prüfprogramm

Zur Beschreibung der Änderung der Prüf gummi oberfläche wurden mit der Auswertesoftware FRT Mark III[©] für jeden Beanspruchungszustand die in Abschnitt 4.7.2 angeführten Oberflächenkenngrößen bezogen auf eine Fläche berechnet.

Die Berechnung dieser Oberflächenkennwerte erfolgte mit einer Rauheitsoberfläche, deren zugrunde liegende Grenzwellenlänge (λ_c) mit $1,43 \text{ mm}$ ermittelt wurde. Die für den Rauheitsfilter notwendige Ein- und Ausschwingphase wurde mit je einer Einzelmessstreckenlänge ($l_r = \lambda_c$) festgelegt. Das heißt, dass von der $10 \times 20 \text{ mm}$ großen Messfläche für die Auswertung effektiv nur $7,14 \times 7,14 = \text{ca. } 60 \text{ mm}^2$ herangezogen wurden.

4.7.5 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden zuerst die Ergebnisse aus der Polierwertbestimmung von Sand angeführt, sowie die mit dem Prüfgerät nach Wehner/Schulze auf den zwei Kontrolloberflächen ermittelten Reibwerte diskutiert. Anschließend erfolgt eine Auswertung Oberflächendaten der Prüf gummisätze, welche mit dem optischen Texturerfassungssystem in den vier Beanspruchungszuständen aufgenommen wurden. Weiters wird eine Analyse der daraus gewonnenen Oberflächenkennwerte hinsichtlich ihrer Signifikanz zur Beschreibung des Polierwertes durchgeführt.

4.7.5.1 Ergebnisse der Wehner/Schulze Prüfungen

Für das Gestein G001 wurde ein PWS von 0,53 [-] ermittelt. Die vorhandene Spannweite zwischen den drei Einzelmessproben beträgt 0,006 [-], wobei bei der ersten Einzelmessprobe mit 0,533 [-] das höchste Einzelmessergebnis erreicht wurde. Der PWS des Gesteins G002 liegt bei 0,56 [-]. Als Spannweite zwischen höchstem und niedrigstem Einzelmessergebnis wurde 0,019 [-] berechnet. Der höchste Einzelmesswert wurde bei der zweiten Einzelmessprobe ermittelt und beträgt 0,565 [-]. Der Polierwert des dritten Sandes ist mit 0,41 [-] wesentlich niedriger als bei den anderen beiden Sanden. Auch die Spannweite zwischen den drei Einzelmessproben ist höher und beträgt 0,033 [-], wobei bei der zweiten Einzelmessprobe mit 0,419 [-] das höchste Einzelmessergebnis erreicht wurde.

In der Tab. 4.40 sind die mit dem Prüfgerät nach Wehner/Schulze ermittelten Reibwerte auf der Glaskontroll- und der Riffelplatte sowie auf den Sandprobekörpern für die drei verwendeten Prüfummisätze in den Beanspruchungszuständen [0] bis [3] zusammengefasst.

Tab. 4.40: Ergebnisse der Wehner/Schulze Messungen mit den drei Prüfummisätzen F50C, F50D und F50E

<i>Prüfummisatznummer</i>	<i>Beanspruchungsstufe der Prüfummisatz</i>	<i>Glaskontrollfläche</i>	<i>Reibwert auf Riffelplatte</i>	<i>Sandplatte</i>
F50C	Zustand [0]	0,107	0,296	0,533
	Zustand [1]	0,136	0,267	0,527
	Zustand [2]	0,134	0,249	0,528
	Zustand [3]	0,136	0,251	-----
F50D	Zustand [0]	0,108	0,296	0,553
	Zustand [1]	0,126	0,254	0,565
	Zustand [2]	0,128	0,247	0,546
	Zustand [3]	0,129	0,244	-----
F50E	Zustand [0]	0,109	0,298	0,413
	Zustand [1]	0,120	0,270	0,419
	Zustand [2]	0,121	0,259	0,386
	Zustand [3]	0,123	0,256	-----

Die verwendeten Prüfummisätze wiesen im Neuzustand auf der Glaskontrollfläche einen Reibwert zwischen 0,107 und 0,109 [-] auf. Nach der Prüfung der ersten Einzelmessprobe wurde bei allen drei Prüfummisätzen ein Anstieg des Kontrollwertes auf der Glaskontrollfläche festgestellt. Am höchsten war dieser Anstieg beim Gestein G001 mit einem PWS von 0,53 [-]. Der Anstieg des Kontrollwertes war besonders zwischen der Beanspruchungsstufe [0] und [1] am deutlichsten ausgeprägt. Beim Prüfummisatz F50C stieg dabei der Glaskontrollwert um 0,029 auf 0,136 [-] an.

Im Beanspruchungszustand [0] lag der Kontrollwert auf der Riffelplatte zwischen 0,296 und 0,298 [-]. Im Gegensatz zum Verhalten auf der Glasplatte wurde mit den gebrauchten Prüfummisätzen in den weiteren Beanspruchungszuständen ein niedrigerer Reibwert als im Neuzustand ermittelt. Die Abnahme des Reibwertniveaus in den höheren Beanspruchungszuständen ist bei Sanden mit einem hohen PWS größer als bei Sanden mit einem niedrigeren Polierwert. Beim Gestein G002 reduzierte sich der Kontrollwert auf der Riffelplatte von 0,296

um 0,052 auf 0,244 [-]. Beim Sand G003 beträgt die Reduktion des Kontrollwertes auf der Riffelplatte hingegen 0,042 [-].

Zwischen der Beanspruchungsstufe [2] und [3] kam es nur mehr zu einer geringfügigen Änderung der Kontrollwerte auf der Glas- und der Riffelplatte, wobei der Kontrollwert auf der Glasoberfläche geringfügig anstieg und auf der Riffelplatte geringfügig abnahm. Nach dem optischen Erfassen der Prüf gummi oberfläche im Beanspruchungszustand [4] erfolgten keine weiteren Reibwertbestimmungen auf den Kontrolloberflächen.

In Abb. 4-32 links werden die ermittelten Reibwerte auf den unterschiedlichen Oberflächen für die drei Beanspruchungszustände [0], [1] und [2] dargestellt. Eine Gegenüberstellung der ermittelten Reibwerte für die drei Beanspruchungszustände auf den beiden Kontrolloberflächen ist in Abb. 4-32 rechts dargestellt. Da sich zwischen den Reibwerten der beiden Oberflächen kein statistisch gesicherter Zusammenhang finden lässt, kann eine Umrechnung zwischen den Oberflächen nicht durchgeführt werden. Dadurch erscheint es auch nicht möglich aufgrund eines erhöhten Reibwertes auf der Glasoberfläche auf einen erhöhten Prüf wert auf einer Sandoberfläche zu schließen.

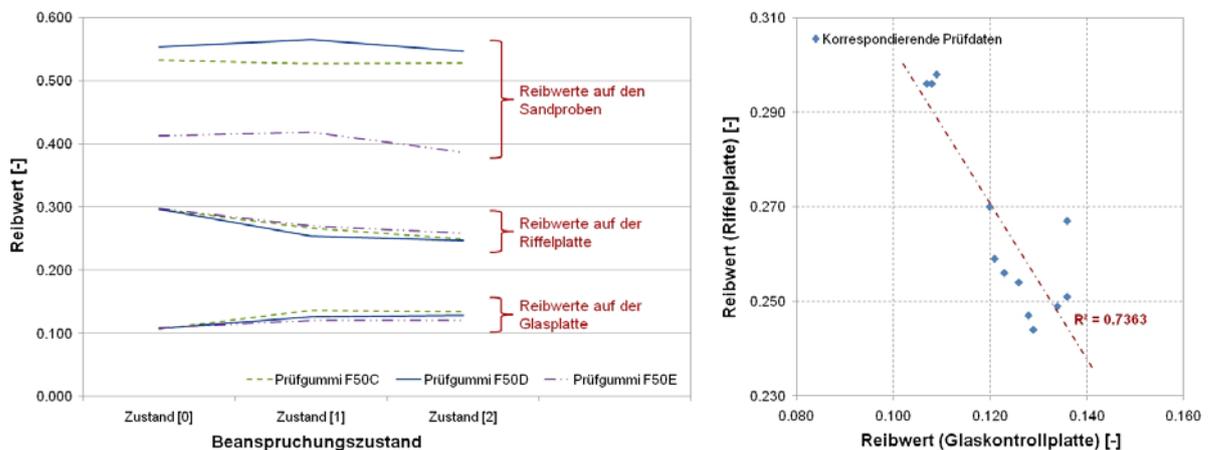


Abb. 4-32: Darstellung der PWS- und Reibwerte auf der Glaskontroll- und Riffelplatte mit den drei Prüf gummi sätzen F50C, F50D und F50E

Ein für eine spezifische Oberfläche verwendeter Prüf gummi satz ermittelt auf Proben mit derselben Oberflächenstruktur hingegen mehrere Male in etwa dasselbe Ergebnis, wie sich aus der Abb. 4-32 links erkennen lässt. Mit dem Prüf gummi satz F50C wurde zum Beispiel auf allen drei Einzelmessproben annähernd derselbe Reibwert ermittelt, wohingegen auf der Glasoberfläche ein sehr hoher Anstieg und auf der Riffelplatte eine relativ große Abnahme des Reibwertes festgestellt wurde.

Deutlich erkennbar wird das aus Abb. 4-33. Darin sind die mit den drei Prüf gummi sätzen im Beanspruchungszustand [1] und [2] ermittelten Reibwerte auf den drei Prüf oberflächen (Sand-, Riffel- und Glasplatte) in Relation zum gemessenen Reibwert im Beanspruchungszustand [0] gesetzt. Zwischen den drei B-Stufen [0] bis [2] unterscheiden sich die Reibwerte auf den Sandproben nur geringfügig mit maximal ca. 6,5 %. Auf der Riffelplatte wurde für die zwei B-Stufen [1] und [2] im Verhältnis zum Ausgangszustand [0] eine deutliche Abnahme des Reibwertes von bis zu 16,5 % festgestellt. Auf der Glaskontrollplatte wurde vor allem mit dem Prüf gummi satz F50C im B-Zustand [1] mit 27,1 % ein wesentlich höherer Reibwert als im B-Zustand [0] gemessen. Beim Prüf gummi satz F50E betrug der Anstieg auf der Glaskontrollplatte vom B-Zustand [0] bis zum B-Zustand [1] hingegen lediglich 10 %.

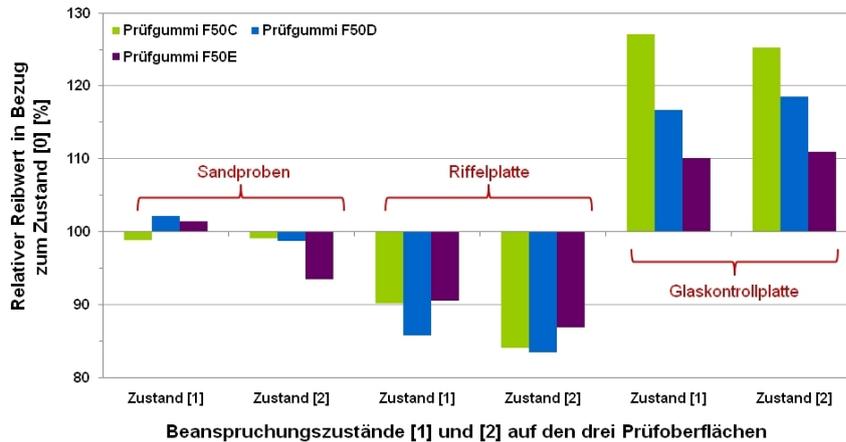


Abb. 4-33: In Bezug zum Beanspruchungszustand [0] dargestellte, relative Reibwerte der nachfolgenden zwei Reibwertbestimmungen (Zustand [1] und [2]) auf den drei Prüfoberflächen (Sand, Riffelplatte und Glasplatte)

Da das Verhalten eines gebrauchten Prüfgrundmies auf verschiedenen Kontrolloberflächen unterschiedlich ist – auf der Glasplatte führen für die Sandpolierwertbestimmung benutzte Prüfgrundmies zu einem höheren und auf der Riffelplatte zu einem niedrigeren Reibwert – müssen für die Prüfgrundmies eindeutige Regeln für die Verwendung erstellt werden. Die Verwendung von demselben Prüfgrundmiesatz für unterschiedliche Oberflächen – also Sand, Splitt, Beton oder Asphalt, etc. – ist in jedem Fall zu unterlassen. Aufgrund der vorliegenden Resultate liegt auch die Vermutung nahe, dass das Prüfen von Sanden mit unterschiedlichen Reibwertniveaus mit demselben Prüfgrundmiesatz zu einer Verfälschung des Prüfergebnisses führt.

4.7.5.2 Ergebnisse der Topographiemessungen

Die Oberfläche der Prüfgrundmies im Neuzustand – also im Beanspruchungszustand [0] – weist im Mittel einen sehr niedrigen Mittenrauwert (sRa) von 1,10 μm auf. Die zugehörige mittlere Rautiefe (sRz) beträgt ca. 48 μm , wobei die mittlere Rautiefe beim Prüfgrundmiesatz F50E mit 64 μm doppelt so hoch als jene des Prüfgrundmiesatzes F50C ist. Im Neuzustand ist die Amplitudenkenngröße (sRp) mit ca. 55 μm rund doppelt so hoch als die Kenngröße (sRv), wobei auch hier die größte Profilspitze des Prüfgrundmiesatzes F50E doppelt so groß als jene des Prüfgrundmiesatzes F50C ist.

Alle drei verwendeten Prüfgrundmiesätze weisen vor allem nach der Prüfung des ersten Sandprobekörpers eine starke Änderung der Topographie auf. In die Prüfgrundmies werden durch die raue Sandoberfläche bzw. durch die Sandkörner deutlich erkennbare Längsrillen eingefräst, wodurch die Rautiefe vergrößert wird. In Abb. 4-34 ist die Entwicklung des Prüfgrundmies Nummer 2 des Prüfgrundmiesatzes F50D in Abhängigkeit des Beanspruchungszustandes dargestellt. Im Beanspruchungszustand [0] bewegen sich die Höhenunterschiede der Prüfgrundmiesoberfläche im Bereich von ca. 30 μm . Im Zustand [1] entstehen bereits Unterschiede in der Topographie des Prüfgrundmies in der Größe von ca. 100 μm . Die größten Höhenunterschiede entstehen nach der Reibwertbestimmung an der dritten Sandprobe im Beanspruchungszustand [3] und betragen ca. 250 μm .

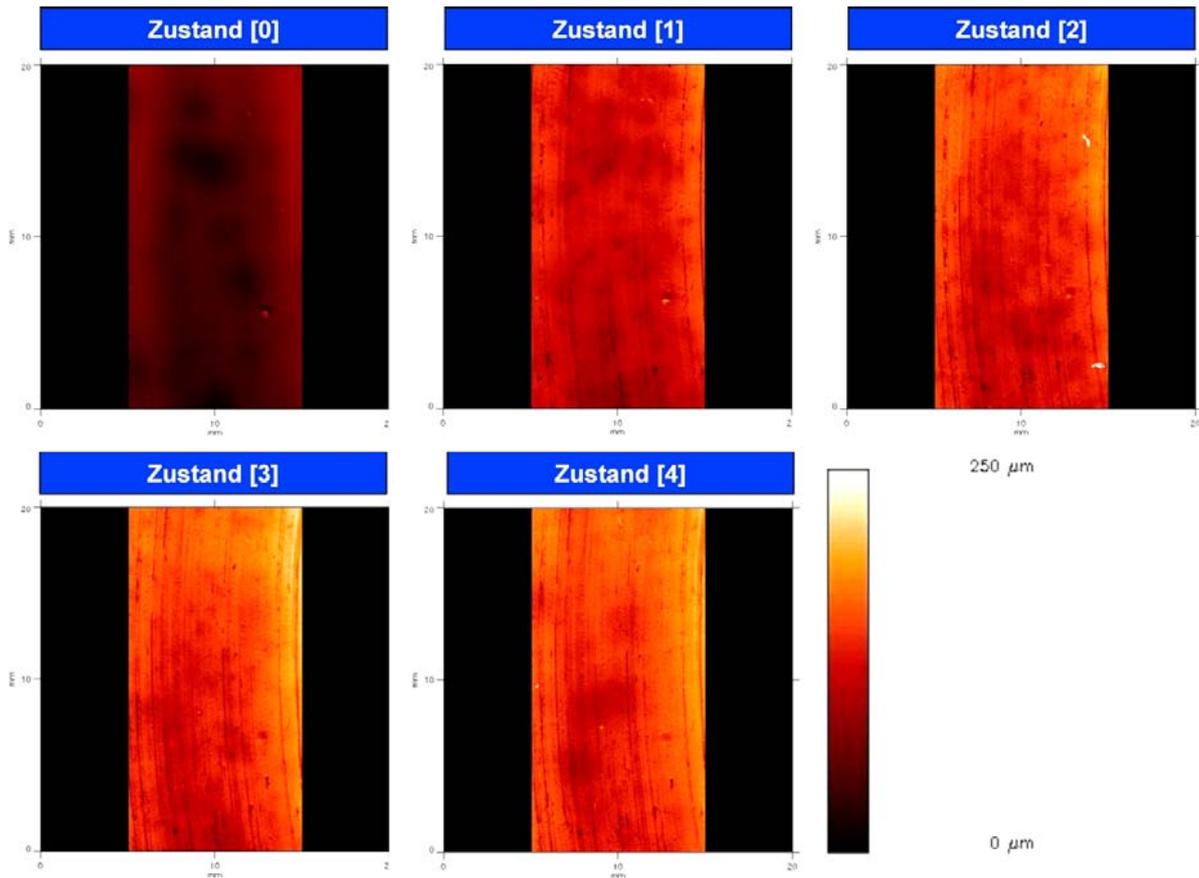


Abb. 4-34: Entwicklung der Prüfummirauheit – Draufsicht

In Abb. 4-35 ist links eine 3 x 3 mm große Fläche eines Prüfummis des Prüfummisatzes F50C im Beanspruchungszustand [0] dargestellt. In der Draufsicht ist zusätzlich die Schnittführung zweier Profile – ein Längsprofil (grün) und ein Querprofil (blau) –, welche in der Abbildung rechts ca. 30fach überhöht abgebildet sind, dargestellt.

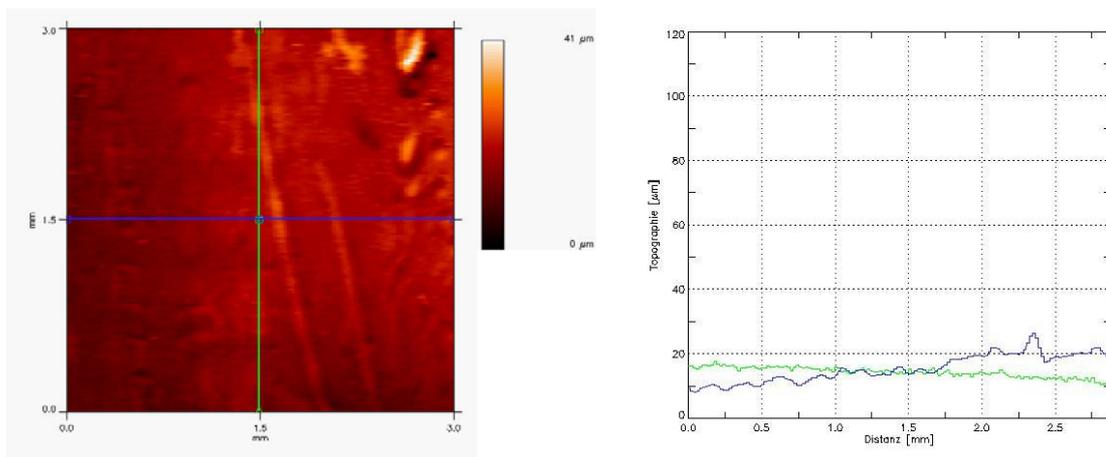


Abb. 4-35: Detailansicht des 1. Prüfummis des Prüfummisatzes F50C im Beanspruchungszustand [0] mit Kennzeichnung eines Längs- und Querprofils (30fache Überhöhung)

Vor allem in Längsrichtung weisen die Prüfummis in der Regel im Neuzustand eine sehr ebene Oberfläche auf. In Querrichtung wurden bei mehreren Prüfummis geringfügige Unregelmäßigkeiten festgestellt. Stellenweise sind auf den Prüfummis großflächige, kleine Vertiefungen festzustellen, die auf den Herstellungsprozess zurückzuführen sind. Punktuell wur-

den auch bei den meisten Prüf gummi Spitz en mit einer horizontalen Ausdehnung von ca. 0,3 mm und einer vertikalen Ausdehnung von ca. 40 μm festgestellt. Eine solche Spitze auf einem neuen Prüf gummi ist in der 3D-Darstellung in Abb. 4-36 abgebildet.

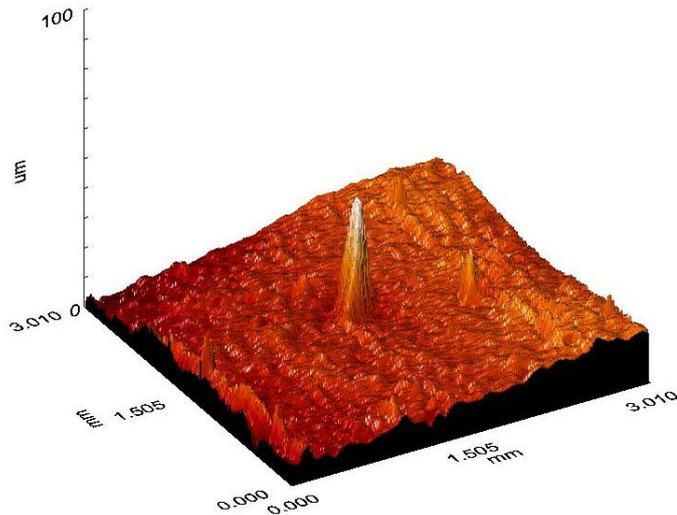


Abb. 4-36: 3D-Ansicht von einer punktuellen Spitze auf einem neuen Prüf gummi (30fache Überhöhung)

Die unterschiedlichen Reibwerte von verschiedenen neuen Prüf gummi sätzen auf der Glas-kontrolloberfläche dürften auf diese Spitz en bzw. ihre schwankende Anzahl und Ausprägung zurückzuführen sein, wie sich anhand eines Vergleichs mit den Amplitudenkenngrößen (sRp), (sRz) und (sR_{max}) erkennen lässt.

Die Neustrukturierung der Prüf gummi oberfläche durch das Reiben über die Oberfläche eines Sandprobekörpers wird durch die in Abb. 4-37 dargestellte 3 x 3 mm große Fläche eines Prüf gummi im Beanspruchungszustand [3] gut ersichtlich. Im Gegensatz zur Oberfläche eines neuen Prüf gummi ist nun in der Querrichtung eine eindeutige Riefenbildung ersichtlich, welche sich auch in Längsrichtung in der vertikalen Ausprägung unterscheidet. Der Riefenabstand in Querrichtung liegt im Mittel bei ca. 0,25 mm. Dies entspricht der untersuchten Korngröße 0,2/0,4 mm. Die Tiefe der Riefen in Querrichtung erreicht im Zustand [3] im Mittel rund 130 μm . In Längsrichtung bewegt sich die Riefentiefe in einer Bandbreite von $\pm 25 \mu\text{m}$.

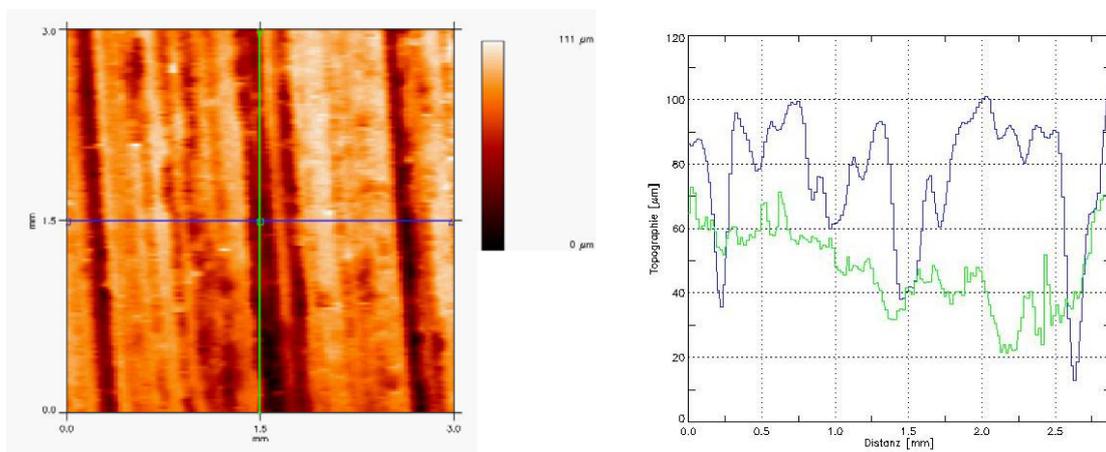


Abb. 4-37: Detailansicht des 1. Prüf gummi des Prüf gummi sattes F50C im Beanspruchungszustand [3] mit Kennzeichnung eines Längs- und Querprofils (30fache Überhöhung)

Die Veränderung der Prüf gummi topographie in den einzelnen Beanspruchungszuständen ist in Abb. 4-38 in Form von 5 x 5 mm großen, dreidimensionalen Detailansichten dargestellt.

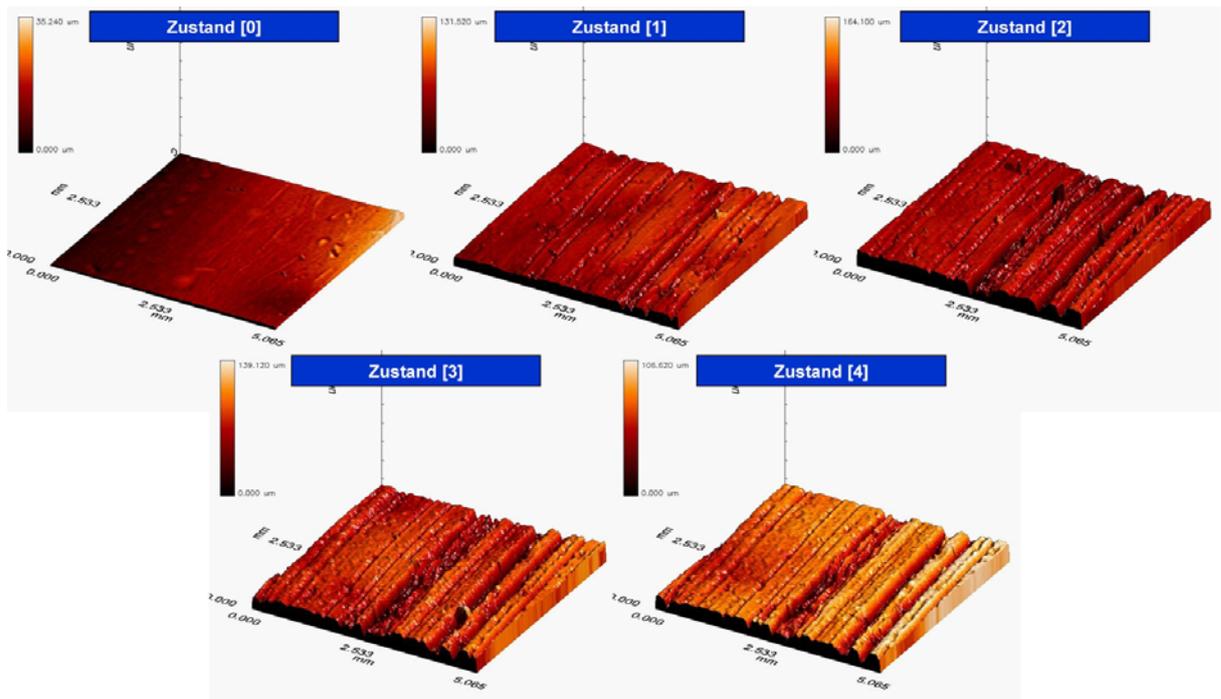


Abb. 4-38: Entwicklung der Prüfgummiraueheit – 3-dimensionale Ansicht

Die mit der Auswertesoftware FRT Mark III[®] in der Fläche berechneten Amplitudenkenngrößen sRp , sRv , sRz , sR_{max} , sRz_{25} , sR_{max25} , sRa sowie sRq sind in der Tab. 4.41 für jeden Prüfgummisatz getrennt zusammengefasst.

Tab. 4.41: Entwicklung der Amplitudenkenngrößen der Prüfgummioberflächen durch die Sandpolierprüfung mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze

Prüfgummi-nr.:	Beanspruchungsstufe	Amplitudenkenngrößen [μm]							
		sRp	sRv	sRz	sR_{max}	sRz_{25}	sR_{max25}	sRa	sRq
F50C	Zustand [0]	36,339	19,113	33,884	50,213	20,570	46,412	1,090	1,650
	Zustand [1]	75,896	86,442	120,377	145,827	80,346	131,253	5,426	7,975
	Zustand [2]	87,946	99,356	140,828	169,620	96,301	159,659	8,833	12,168
	Zustand [3]	73,476	91,321	135,301	160,467	96,012	152,257	10,287	13,590
	Zustand [4]	68,029	99,549	141,623	160,353	94,933	142,818	9,990	13,515
F50D	Zustand [0]	51,849	27,824	44,835	76,153	24,631	77,409	1,107	1,857
	Zustand [1]	94,659	83,732	107,305	144,740	62,778	140,802	3,802	5,677
	Zustand [2]	123,356	101,714	132,136	193,087	78,729	183,587	5,106	7,380
	Zustand [3]	102,396	119,870	131,805	217,047	77,676	188,210	5,246	7,462
	Zustand [4]	80,433	119,339	131,944	186,753	75,072	161,253	4,836	7,019
F50E	Zustand [0]	77,419	21,417	64,233	90,580	32,713	91,073	1,111	1,986
	Zustand [1]	66,764	93,070	87,807	135,413	44,645	128,437	2,388	3,521
	Zustand [2]	64,377	90,201	103,487	136,393	58,854	119,331	2,979	4,543
	Zustand [3]	100,952	92,901	122,619	171,893	62,876	136,248	3,030	4,801
	Zustand [4]	72,939	97,021	117,396	150,793	62,383	136,097	2,680	4,478

Im Zustand [0] ist die Höhe der größten Profilspitze (sRp) größer als die mittlere Rautiefe (sRz) und die Tiefe des größten Profiltales (sRv) in etwa halb so groß wie (sRp). Der relativ große Wert für (sRp) ist vor allem auf die vorhandenen, in Abb. 4-36 dargestellten, Profilspitzen zurückzuführen. In diesem Beanspruchungszustand entspricht die Prüf gummi oberfläche also einer konvexen Oberfläche.

Mit ansteigendem Beanspruchungszustand nimmt die mittlere Rautiefe (sRz) stark zu, bis sie in der Regel im Zustand [3] den größten Wert erreicht. Zusätzlich ändert sich das Verhältnis zwischen Profiltiefe (sRv) und Profilspitze (sRp). (sRv) steigt gegenüber (sRp) viel stärker an. Durch diese Änderung lässt sich erkennen, dass sich die anfangs konvexe Oberfläche hin zu einer konkaven, also eher nach innen gewölbten, Oberfläche verändert.

In Abb. 4-39 sind für die drei Prüf gummi sätze F50C, F50D und F50E die Amplitudenkenngrößen (sRp), (sRv) und (sRz) für die fünf Beanspruchungsstufen in Form eines Linien diagramms dargestellt.

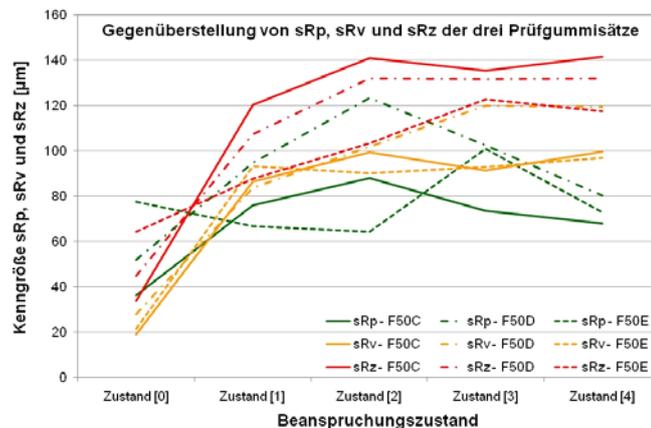


Abb. 4-39: Darstellung des absoluten Verlaufs der Rauheitsparameter (sRp), (sRv) und (sRz) der drei Prüf gummi sätze in den fünf Beanspruchungszuständen

Der Wert für die größte Profilspitze (sRp) bewegt sich bei den beiden Prüf gummi sätzen F50C und F50E in den Beanspruchungszuständen [1] bis [4] im Bereich von 60 bis 100 μm . Lediglich beim Prüf gummi satz F50D wurde im Zustand [2] ein höherer Wert festgestellt. Ebenso wie der Wert für die größte Profilspitze (sRp) ist der Verlauf der Kenngröße (sRv) bei den beiden Prüf gummi sätzen F50C und F50E trotz des unterschiedlichen Polierwiderstandes des geprüften Sandes annähernd ident. Im Zustand [3] und [4] wurde beim Prüf gummi satz F50D eine im Vergleich zu den anderen beiden Prüf gummi sätzen etwas größere Profiltiefe (sRv) festgestellt. Dies ist auf die hohe Polierresistenz des geprüften Sandes zurückzuführen. Die größte mittlere Rautiefe (sRz) wurde beim Prüf gummi satz F50C festgestellt. Somit lässt sich von einem hohen Polierwert nicht auf die Abnutzung des Prüf gummi schließen.

In Abb. 4-40 werden die in den Beanspruchungsstufen [1] bis [4] ermittelten Amplitudenkenngrößen (sRp), (sRv) und (sRz) in Relation zu den zugehörigen Amplitudenkenngrößen des Zustands [0] gesetzt. Es zeigt sich, dass die Zunahme der mittleren Rautiefe (sRz) beim Prüf gummi satz F50E aufgrund der geringen Polierresistenz des Sandes G003 am kleinsten ist. Relativ betrachtet, steigt zwischen dem Beanspruchungszustand [0] und dem Zustand [1] der Parameter (sRv) am stärksten von allen drei Amplitudenkenngrößen an. Die relative Zunahme beträgt beim Prüf gummi satz F50C und beim Prüf gummi satz F50E über 400 %. Am geringsten steigt relativ betrachtet der Kennwert für die Profilspitze (sRp). Die Zunahme zwischen Zustand [0] und [1] beträgt bei den beiden Prüf gummi sätzen F50C und F50D ca. 200 %. Beim Prüf gummi satz F50E wurde sogar eine Abnahme von ca. 14 % festgestellt.

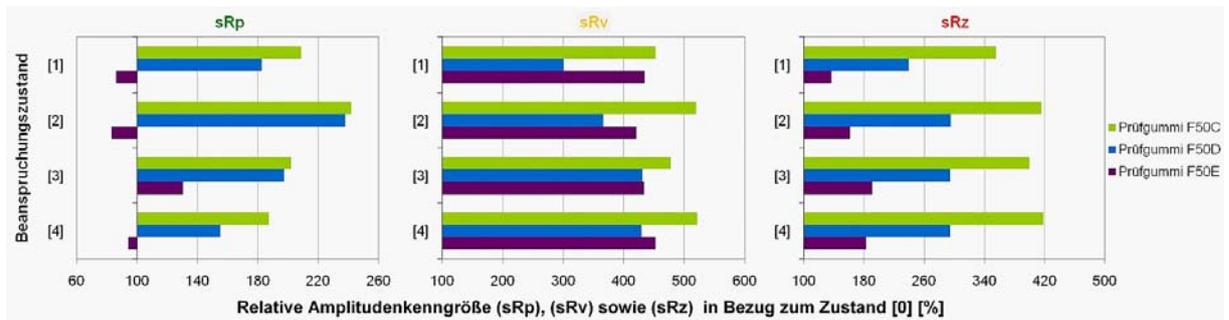


Abb. 4-40: In Bezug zum Beanspruchungszustand [0] dargestellte, relative Amplitudenkenngrößen (sRp), (sRv) sowie (sRz) der nachfolgenden vier Texturmessungen (Zustand [1] bis [4]) der drei Prüf gummi sätze F50C, F50D und F50E

Die Amplitudenkenngröße (sR_{max}), welche die maximale Rautiefe auf der untersuchten Oberfläche beschreibt, weist gemäß Tab. 4.41 dasselbe Verhalten wie der Parameter (sRz) auf und nimmt ausgehend vom Beanspruchungszustand [0] bis zum Zustand [3] zu. Durch das Bestimmen des Gleitreibungsbeiwertes auf der Glaskontroll- und der Riffelplatte werden die Prüf gummi s wiederum eben geschliffen, wodurch es im Beanspruchungszustand [4] zu einer Reduktion der maximalen Rautiefe, sowie aller mit ihr korrespondierenden Amplitudenkenngrößen (sRz), (sRa) und (sRq) kommt. Die Kenngrößen (sRz25) und ($sR_{max}25$) weisen in den fünf Zuständen dieselben Veränderungen wie die Kenngrößen (sRz) und (sR_{max}) auf, wobei jedoch die Werte der aus 25 Teilflächen berechneten Kenngrößen niedriger sind.

Zur Untersuchung, ob die messbare Änderung der Prüf gummi topographie einen Einfluss auf den PWS eines Sandes hat, werden in Abb. 4-41 die drei Amplitudenkenngrößen (sRp), (sRv) und (sRz) den auf den drei Einzelmessproben gemessenen PWS-Werten in Form von Liniendiagrammen gegenübergestellt.

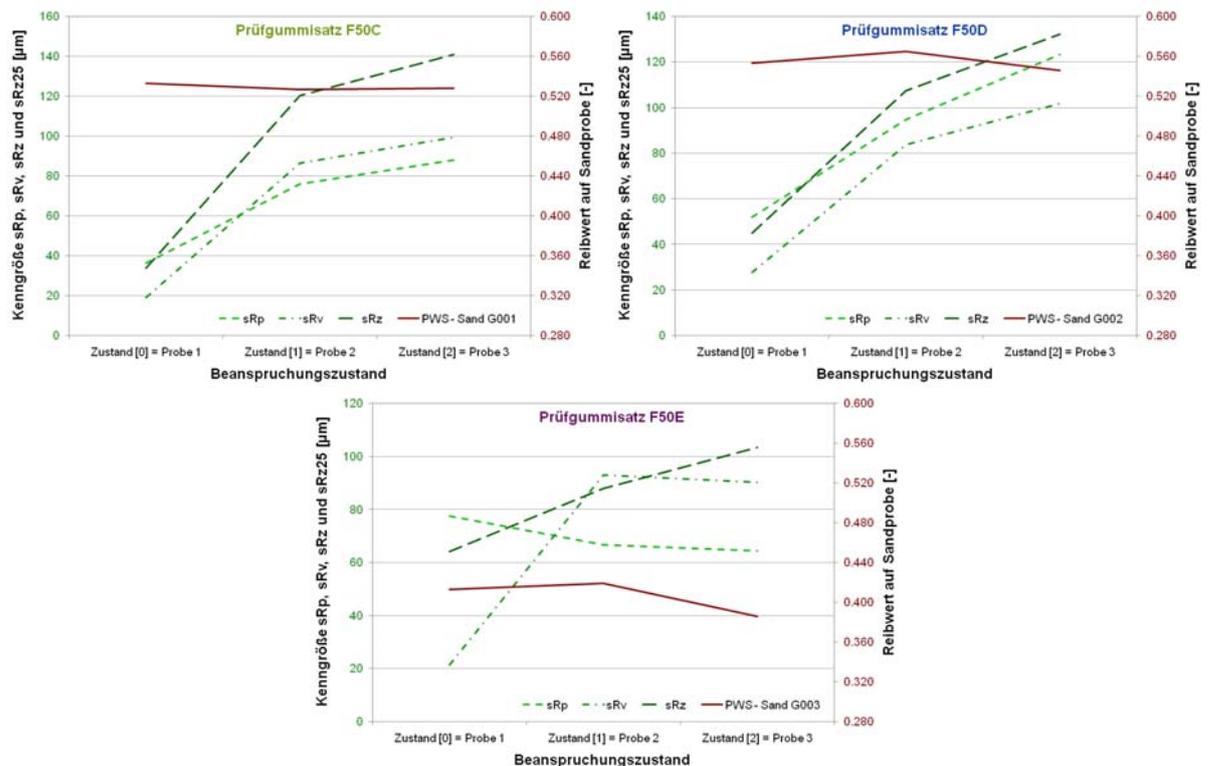


Abb. 4-41: Vergleich der PWS-Werte der drei Einzelmessproben eines Sandes mit der Entwicklung der Amplitudenkenngrößen (sRp), (sRv) und (sRz) der verwendeten Prüf gummi s

Aus Abb. 4-41 wird deutlich, dass sich die Prüf gummitopographie, insbesondere die gemittelte Rautiefe (sRz), vom Beanspruchungszustand [0] bis zum Zustand [2] sehr stark verändert. Der PWS hingegen ist in denselben Beanspruchungszuständen auf drei verschiedenen Sandprobekörpern nahezu ident. Somit zeigt sich, dass eine Veränderung der Prüf gummirauheit keinen direkten Einfluss auf den PWS einer Sandprobe hat.

In Abb. 4-42 werden für die drei Prüf gummisätze F50C, F50D und F50E die Amplitudenkenngrößen (sRp), (sRv), (sRz) sowie ($sRz25$) den auf den beiden Kontrolloberflächen ermittelten Reibwerten in den fünf Beanspruchungszuständen gegenübergestellt.

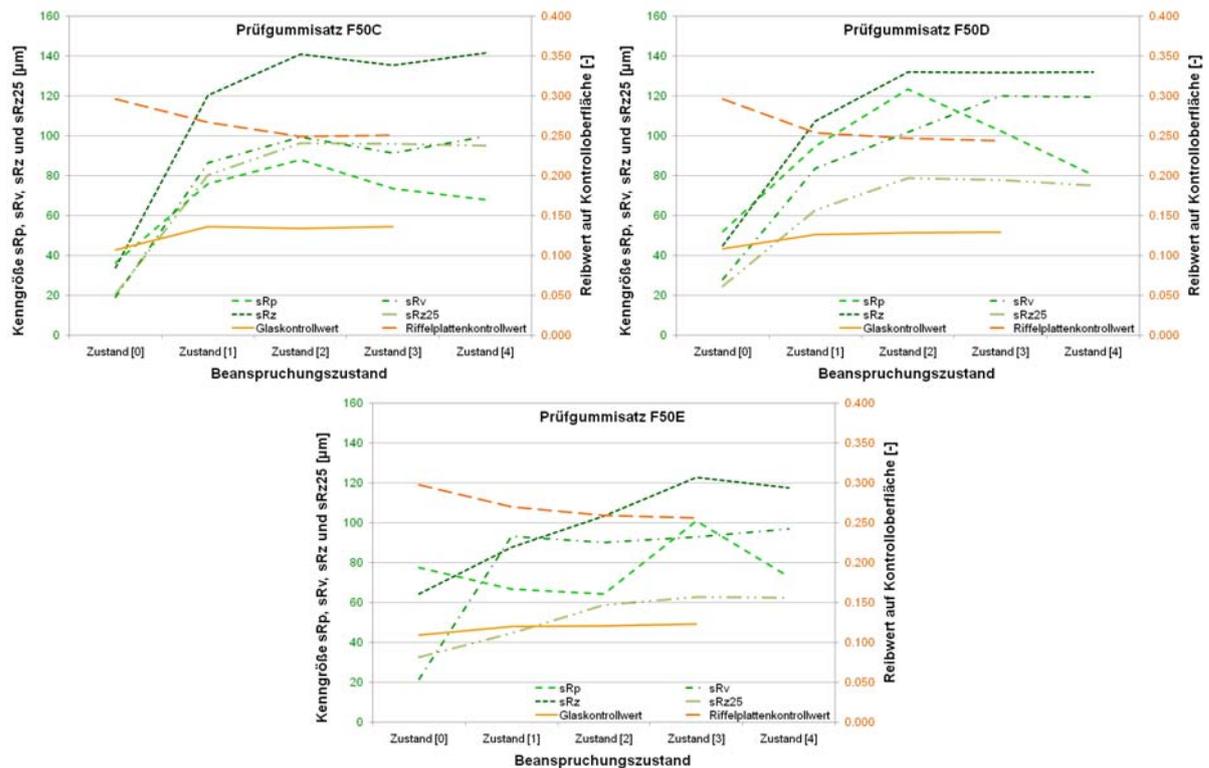


Abb. 4-42: Entwicklung der Amplitudenkenngrößen (sRp), (sRv), (sRz) und ($sRz25$) der drei Prüf gummisätze während der Polierwertbestimmung von Sand mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze

Wie bereits erwähnt, ähnelt der Verlauf der Kenngröße ($sRz25$) dem Verlauf der Kenngröße (sRz), jedoch auf einem niedrigeren Niveau. Aus den drei Diagrammen lässt sich kein klarer Zusammenhang zwischen den Amplitudenkennwerten der Prüf gummioberflächen und den Reibwerten auf den Kontrolloberflächen erkennen. Lediglich zwischen den Parametern (sRz) und ($sRz25$) sowie dem Glaskontrollwert lässt sich eine valide Korrelation ableiten.

Zur Verdeutlichung werden in Abb. 4-43 sowie in Abb. 4-44 die Amplitudenkenngrößen den Kontrollwerten getrennt für die Glas- und die Stahloberfläche gegenübergestellt. In den Abbildungen sind für jeden Rauheitsparameter Regressionslinien mit ihrem vorhandenen Bestimmtheitsmaß angegeben. Für die in der Abb. 4-43 dargestellten Amplitudenkenngrößen wurde eine lineare Regression durchgeführt. Wie bereits anhand der Diagramme in Abb. 4-42 vermutet wurde, lässt sich für die Reibwerte auf der Glasoberfläche ein linearer Zusammenhang mit den Rauheitswerten (sRz) sowie ($sRz25$) herstellen, wobei das zugehörige Bestimmtheitsmaß (R^2) bei 0,90 bzw. 0,94 [-] liegt. Für die Reibwerte auf der Riffelplatte lässt sich der Zusammenhang in dieser Qualität jedoch nicht herstellen. Für die Reibwerte auf der Riffelplatte lässt sich am ehesten ein Zusammenhang mit der Amplitudenkenngröße (sRv)

herstellen, wobei das zugehörige Bestimmtheitsmaß 0,91 [-] beträgt. Aufgrund der vorliegenden Resultate erscheint der Zusammenhang eher zufällig.

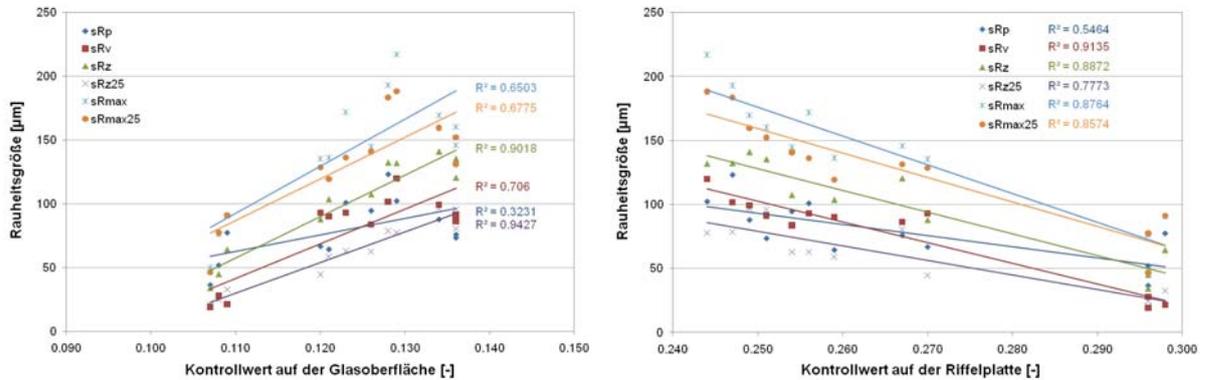


Abb. 4-43: Zusammenhang zwischen den Amplitudenkenngrößen (sRp), (sRv), (sRz), (sRz_{25}), (sR_{max}) und (sR_{max25}) sowie den Reibwerten auf den zwei Kontrolloberflächen - Glasplatte links, Riffelplatte rechts

In Abb. 4-44 erfolgt die Regression zwischen Reibwert und dem arithmetischen sowie quadratischen Mittenrauwert mithilfe einer exponentiellen Trendlinie.

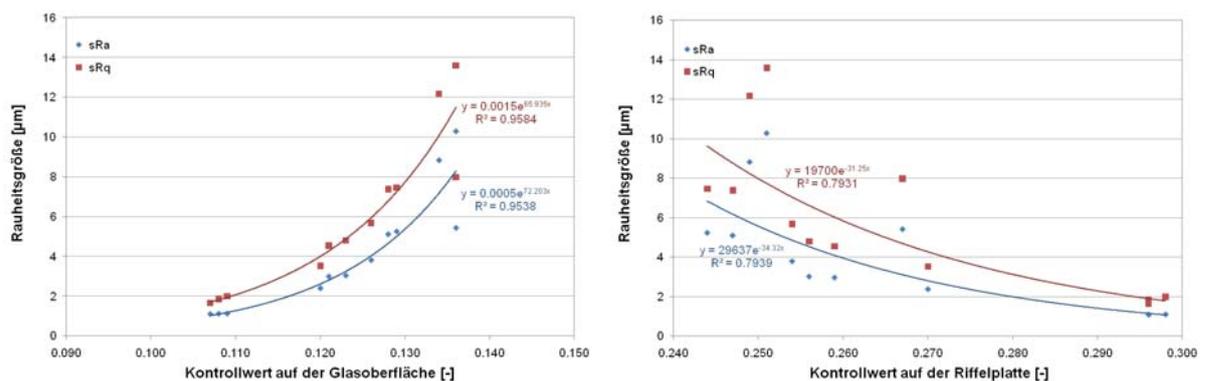


Abb. 4-44: Zusammenhang zwischen den Amplitudenkenngrößen (sRa) und (sRq) sowie den Reibwerten auf den zwei Kontrolloberflächen - Glasplatte links, Riffelplatte rechts

Hierbei wurde vor allem für die Amplitudenkenngrößen (sRa) und (sRq) und den Reibwerten auf der Glaskontrollplatte ein potentieller Zusammenhang gefunden, wobei die Abweichungen von der Trendlinie mit höher werdendem Kontrollwert auf der Glasoberfläche zunehmen. Zwischen den Reibwerten auf der Riffelplatte und den zwei Mittenrauwerten konnte keinerlei Zusammenhang identifiziert werden.

Mit den bisherigen Ergebnissen erscheint es nicht möglich, basierend auf den klassischen Amplitudenkenngrößen das Reibverhalten von Prüfummis auf gleichförmigen Kontrolloberflächen vorherzusagen bzw. einen Einfluss der Rauheit der Prüfummioberfläche auf den resultierenden Reibwert abzuleiten.

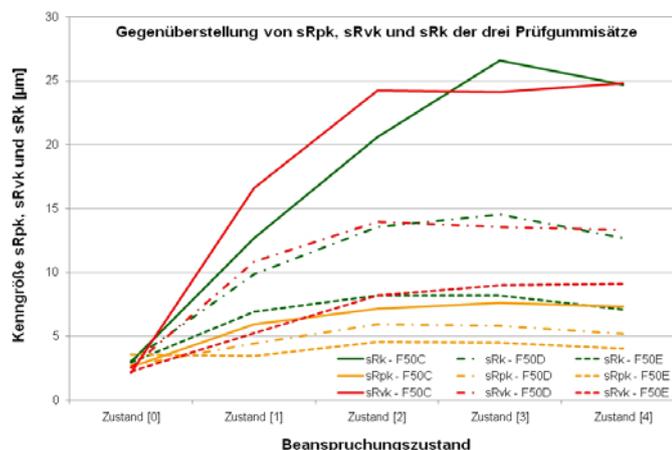
Deswegen werden nachfolgend mit den aus der Abbott'schen Kurve abgeleiteten Materialkennwerten weitere Korrelationsanalysen angestellt. In Tab. 4.42 sind die berechneten Materialkennwerte sowie das Ölhaltevolumen für die fünf Beanspruchungszustände für alle drei Prüfummisätze zusammengefasst. Die Kennwerte (sRk), ($sRpk$), und ($sRvk$) sind darin in $[\mu m]$, die Kennwerte ($sMr1$) und ($sMr2$) in [%] und das Ölhaltevolumen ($sV0$) in $[\mu m^3/\mu m^2]$ angegeben.

Tab. 4.42: Entwicklung der Kennwerte der Abbott'schen Kurve der Prüf gummi oberflächen während der fünf untersuchten Beanspruchungszustände

Prüf gummi- nr.:	Beanspru- chungsstufe	Kennwerte der Abbott-Kurve					
		sRk [μm]	sRpk [μm]	sRvk [μm]	sMr1 [%]	sMr2 [%]	sV0 [$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$]
F50C	Zustand [0]	2,997	2,575	2,127	10,770	88,366	0,124
	Zustand [1]	12,688	5,964	16,638	7,518	83,005	1,413
	Zustand [2]	20,575	7,160	24,238	7,743	81,286	2,266
	Zustand [3]	26,572	7,589	24,122	6,905	82,450	2,119
	Zustand [4]	24,683	7,309	24,785	6,872	81,660	2,281
F50D	Zustand [0]	3,058	2,679	2,543	9,695	89,093	0,137
	Zustand [1]	9,852	4,462	10,844	8,059	85,568	0,784
	Zustand [2]	13,572	5,951	13,944	7,581	85,641	1,006
	Zustand [3]	14,541	5,814	13,529	6,655	86,237	0,936
	Zustand [4]	12,697	5,176	13,310	7,164	85,083	0,998
F50E	Zustand [0]	2,952	3,569	2,214	9,245	88,119	0,131
	Zustand [1]	6,924	3,444	5,270	8,357	87,499	0,329
	Zustand [2]	8,172	4,540	8,200	8,223	87,395	0,506
	Zustand [3]	8,192	4,512	9,012	9,052	87,990	0,537
	Zustand [4]	7,079	4,032	9,110	9,696	88,651	0,517

Der Kernraubereich (sRk) von neuen Prüf gummi s weist eine Höhe von im Mittel ca. 3,0 μm auf. Bei den beiden Prüf gummi sätzen F50C und F50D ist die reduzierte Spitzenhöhe (sRpk) mit ca. 2,6 μm geringfügig größer als die reduzierte Riefentiefe (sRvk). Lediglich beim Prüf gummi sätz F50E ist (sRpk) mit ca. 3,6 μm um 1,4 μm größer als die reduzierte Riefentiefe.

Der Verlauf der Kennwerte (sRk), (sRpk) und (sRvk) über die fünf Beanspruchungszustände ist in Abb. 4-45 dargestellt. Durch die Prüfung einer Sandoberfläche steigt bei allen drei Prüf gummi sätzen sowohl die Größe des Kernraubereichs als auch die Höhe der reduzier-


Abb. 4-45: Vergleich der Kennwerte sRk, sRpk und sRvk aus der Materialanteilkurve der drei Prüf gummi sätze in den fünf Beanspruchungszuständen

ten Riefentiefe an. Am Größten ist dieser Anstieg beim Prüf gummisatz F50C ausgeprägt. Die Zunahme der beiden Rauheitsparameter ist dabei doppelt so groß wie beim Prüf gummisatz F50D, mit dem der Sand mit der höchsten Polierresistenz geprüft wurde. Beim Prüf gummisatz F50E steigt der Kernraubereich auf ca. 8,0 μm an, womit er lediglich ein Drittel des Kernraubereichs des Prüf gummis F50C ausmacht. Die reduzierte Riefentiefe steigt bei allen drei Prüf gummisätzen nur minimal an und stagniert auf dem Niveau des Beanspruchungszustandes [2]. Daraus lässt sich auch mit diesen Parametern ableiten, dass aus der ursprünglichen konvexen Oberfläche durch die Beanspruchung bei der Reibwertbestimmung eine konkave Prüf gummi oberfläche entsteht.

In Abb. 4-46 werden die berechneten Materialkennwerte (sRk), (sRpk) und (sRvk) den Reibwerten auf den beiden Kontroll oberflächen gegenübergestellt und mittels einer Potenzlinie mathematisch beschrieben. Auf der Glaskontrollplatte konnten zum Teil gute Zusammenhänge zwischen den Materialkennwerten und den Reibwerten gefunden werden, wobei auffällt, dass mit höher werdendem Kontrollwert auch die Streuung der Werte zunimmt. Für die Reibwerte auf der Riffelplatte konnte kein signifikanter Zusammenhang mit den Materialkennwerten gefunden werden.

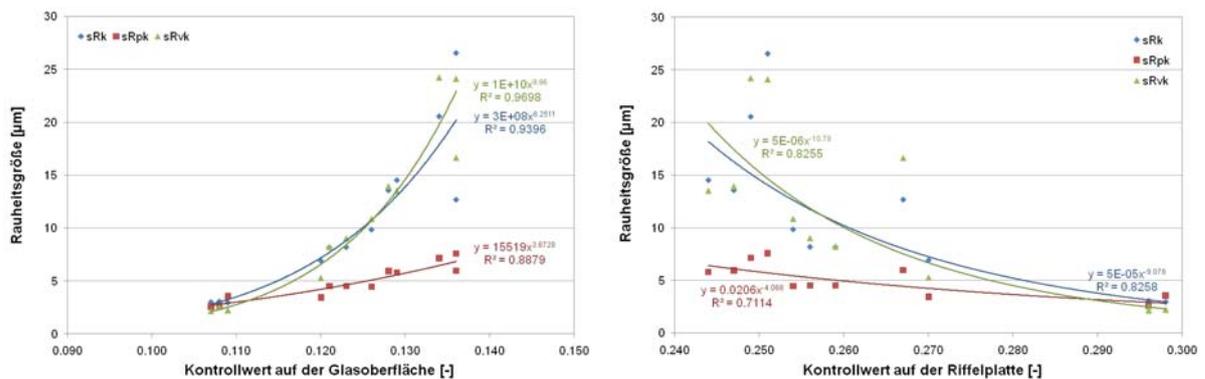


Abb. 4-46: Zusammenhang zwischen den Materialkennwerten (sRk), (sRpk) und (sRvk) und den Reibwerten auf den zwei Kontroll oberflächen - Glasplatte links, Riffelplatte rechts

Aufgrund der Resultate für die drei Parameter (sRk), (sRpk) und (sRvk) in den fünf Beanspruchungszuständen lässt sich von den Oberflächenparametern generell nicht auf den Reibwert auf den Kontrollflächen schließen.

Für die beiden Materialanteile (sMr1) und (sMr2) wurden im Neuzustand bei allen drei Prüf gummisätzen im Mittel ca. 10,0 % für (sMr1) und ca. 88,5 % für (sMr2) ermittelt. Das potentielle Ölhaltevolumen ist mit ca. 0,13 $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ sehr gering. Die Größe der zwei Parameter (sMr1) und (sMr2) nimmt mit ansteigender Beanspruchungsstufe in der Regel ab. Lediglich beim Prüf gummisatz F50E wurde zwischen dem Zustand [2] und [3] ein geringfügiger Anstieg der Materialanteile festgestellt.

In Abb. 4-47 sind die zwei Parameter für den Materialanteil den Reibwerten auf den Kontroll oberflächen gegenübergestellt und mittels einer linearen Trendlinie angenähert. Auf der Glaskontrollplatte konnte sowohl für den Materialanteil (sMr1) als auch für (sMr2) eine ausreichend gute Korrelation mit dem Reibwert festgestellt werden. Für die Kontrollwerte auf der Riffelplatte konnte aufgrund des geringen Bestimmtheitsmaßes der linearen Regression kein signifikanter Zusammenhang festgestellt werden. Dadurch ist es auch mit diesen Rauheitsparametern nicht möglich einen generellen Zusammenhang zwischen der Prüf gummitopographie und den Reibwerten auf den gleichförmigen Kontroll oberflächen herzustellen.

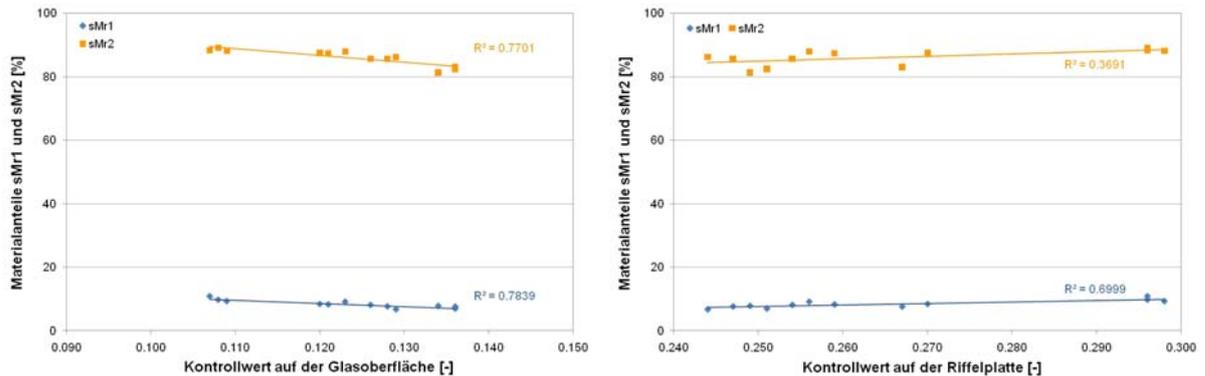


Abb. 4-47: Zusammenhang zwischen den Materialkennwerten (sMr1) und (sMr2) und den Reibwerten auf den zwei Kontrolloberflächen - Glasplatte links, Riffelplatte rechts

Das Ölhaltevolumen des Prüf gummisatzes F50C ist in den Beanspruchungszuständen [1] bis [4] einerseits doppelt so groß wie jenes des Prüf gummisatzes F50D. Andererseits ist (sV0) des Prüf gummisatzes F50E nur halb so groß wie jenes des Prüf gummisatzes F50D. Somit ist es auch mit diesem Parameter nicht möglich einen Zusammenhang zwischen den Reibwerten auf den Kontrollflächen und der Prüf gummitopographie herzustellen.

4.7.6 Zusammenfassung

Die Kennwerte aus der Materialanteilkurve waren bei allen drei Prüf gummisätzen im Neuzustand annähernd ident. Bei den Amplitudenkenngrößen stellten sich aufgrund der vorhandenen feinen Spitzen an der Prüf gummi oberfläche zum Teil große Unterschiede ein. Vor allem die Parameter (sRp) für die Höhe der größten Profilspitze und (sRz) bzw. (sR_{max}) für die gemittelte und die maximale Rautiefe zeigen einen Zusammenhang mit den Reibwerten auf der Glaskontrollplatte. Außer diesen kleinen Profilspitzen weisen die Oberflächen neuer Prüf gummis keine weiteren ausgeprägten Rauheiten auf.

Durch die Beanspruchung bei der Reibwertbestimmung auf Sandprobekörpern entstehen auf den Prüf gummis Längsrillen, welche durch mehrmaliges Prüfen immer stärker ausgeprägt werden. Mithilfe der Oberflächenkenngrößen (sRv), (sRz), (sR_{max}) sowie (sRa) und (sRq) lässt sich diese Änderung der Oberflächentopographie sehr gut dokumentieren. Bei diesem Abnutzen der Prüf gummis bzw. diesem Verschleiß wird aus der zunächst konvexen eine konkave Prüf gummi oberfläche. Die mittlere Breite der Rillen liegt bei ca. 0,25 mm.

Zwischen dem PWS einer Sandkörnung und der gemittelten Rautiefe (sRz) konnte kein Zusammenhang festgestellt werden. Selbiges gilt für den PWS und die Höhe der größten Spitze (sRp) sowie für den PWS und die Tiefe des größten Tales (sRv). Mit höherem Polierwert der Sandkörnung nimmt jedoch auch die entstehende maximale Rautiefe (sR_{max}) zu, was auch mit der Größe des tiefsten Profiltales (sRv) korrespondiert.

Führen gebrauchte Prüf gummisätze auf der Glasplatte in der Regel zu einem höheren Kontrollwert als neue Prüf gummis, so werden mit gebrauchten Prüf gummis auf der Riffelplatte kleinere Reibwerte ermittelt. Somit sind Prüf gummis nicht für das Prüfen verschiedener Oberflächen geeignet, da durch die Textur der erstgeprüften Oberfläche das Reibverhalten der Prüf gummisätze und der nachfolgend ermittelte Reibwert nachhaltig verändert wird. Zur Vermeidung falscher Prüfwerte sind deswegen in den einschlägigen Prüfvorschriften eindeutige Regeln für die Verwendung der Prüf gummis vorzusehen.

Dieser Umstand bedeutet jedoch auch, dass die Einführung eines Korrekturfaktors für die Berechnung des PWS, wie sie in Kapitel 4.6.5 erläutert wurde, nicht zulässig ist. Ein erhöhter

Reibwert auf der Glaskontrollplatte bedeutet auf einer raueren Oberfläche zwangsläufig keinen höheren Reibwert. Somit hat ein auf der Glaskontrollplatte basierender Korrekturfaktor einen negativen Einfluss auf das Endergebnis.

Durch die Reibwertbestimmung auf der Riffelplatte konnte bei allen Prüf gummisätzen eine Glättung der Oberfläche festgestellt werden. So nimmt durch den Riffelplattentest sowohl die Spitzenausprägung – also die Kennwerte (sRp) und (sRpk) – als auch die Kernrautiefe (sRk) ab. Dies führt auch zu einer Reduktion der maximalen Rautiefe (sR_{\max}). Mithilfe der Riffelplatte könnte es somit gelingen, gebrauchte Prüf gummis wieder auf ein Ausgangsniveau zu „schleifen“. Dies kann insbesondere aufgrund der hohen Anschaffungskosten neuer Prüf gummis eine interessante Alternative darstellen. Dazu sind jedoch noch weiterführende Untersuchungen mit der Riffelplatte notwendig.

Mithilfe der untersuchten klassischen Rauheitswerte konnte kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen der Prüf gummitopographie bzw. der Änderung derselben und den Reibwerten auf den Sandprobekörpern und den Reibwerten auf den zwei verwendeten Kontrolloberflächen gefunden werden. Somit ist es mit den im Abschnitt 4.7.2 beschriebenen Oberflächenkennwerten des Prüf gummis alleine nicht möglich, den Reibwert auf gleichförmigen Prüfoberflächen zu prognostizieren.

Gründe für die Unbrauchbarkeit der klassischen Oberflächenparameter sind sicherlich in ihrer historischen Entstehung – mit ihrer Hilfe wurde im Maschinenbau die Beurteilung der Qualität von Werkstücken durchgeführt – und in den ihr früher zugrunde liegenden Oberflächendaten zu suchen. So basieren diese Rauheitsparameter definitionsgemäß auf dem Vorhandensein von reinen Profildaten, die mithilfe von berührenden Tastschnittgeräten erhalten werden. Abhilfe könnte hier die sich derzeit noch im Entwurfsstadium befindliche Normenserie EN ISO 25178 und hier insbesondere die EN ISO 25178-2 [DIN, 2008] schaffen. Diese Normenserie beschäftigt sich zum ersten Mal mit der flächenhaften Rauheitsmessung und der Abdeckung der Möglichkeiten, die berührungslose Messmethoden anbieten. Es wird möglich sein, 3D-Texturparameter mithilfe spezieller Operatoren zu bestimmen, wodurch bisher undefinierte räumliche Parameter einer Fläche mathematisch beschrieben werden können. Es ist zu erwarten, dass mit diesen Parametern ein besseres Verständnis der Gummireibung im Zusammenspiel mit realen Oberflächen ermöglicht wird.

5 BEWERTUNG DER POLIERRESISTENZ VON FEINEN GESTEINSKÖRNUNGEN

In zahlreichen Untersuchungen [z.B. DAMES et al., 1988 und PFEILER, 2004,] wurde die Bedeutung des Sandes hinsichtlich seiner griffigkeitserhöhenden Eigenschaft bei dichten Deckschichten festgestellt. In Deutschland wurden zur Bestimmung der Polierresistenz von Sanden mit der Fraktion 0,2/0,4 mm Forschungsarbeiten mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze alter Bauart durchgeführt, deren Resultate in Deutschland in der Prüfvorschrift TP Gestein-StB, Teil 5.4.2 [FGSV, 2008] zur Prüfung des Polierwertes mündeten. Diese Forschungsarbeiten führten auch in Österreich zur Erstellung der Richtlinie RVS 11.06.23 [FSV, 2005], welche die Bestimmung des Polierwertes von Sand regelt, ohne dass in Österreich ein Forschungs- bzw. ein Prüfinstitut im Besitz einer Wehner/Schulze Prüfanlage neuer Bauart gewesen war. Deswegen sollte in der gegenständlichen Arbeit eine Beurteilung der in der Richtlinie angeführten Angaben und Vorschriften angestellt bzw. Verbesserungsvorschläge erarbeitet werden. Vorarbeit wurde dafür bereits in der Diplomarbeit von KIRCHMAIER [2007] geleistet. Die darin durchgeführten Arbeiten und die daraus resultierenden Erkenntnisse werden im Kapitel 5.1 kurz erläutert.

Während der Durchführung des gegenständlichen Untersuchungsprogramms wurden erste Forschungsergebnisse über die Sandpolierprüfung mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät am Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München veröffentlicht [WÖRNER, et al. 2006]. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird im Rahmen dieser Arbeit eine ganzheitliche, praxisrelevante Bewertung der Griffigkeit von Sanden für den Straßenbau umgesetzt.

5.1 Voruntersuchungen

In der Arbeit von KIRCHMAIER [2007] wurde der Einfluss des Größtkorns des Sandes auf den Polierwiderstand untersucht. Darin wurde außerdem analysiert, welche Sandfraktionen sich generell für die Ermittlung des PWS von Sand eignen und ob sich die an der Fraktion 0,2/0,4 mm ermittelten PWS für verschiedene Sande auch in anderen Fraktionen in derselben Reihenfolge reproduzieren lassen.

Diese Erkenntnisse wurden zusätzlich mit einer Analyse von repräsentativen Korngrößenverteilungen, welche den mittleren Anteil der diversen Fraktionen an der gesamten Korngruppe 0/2 mm bestimmen sollte, verifiziert.

5.1.1 Prüfmatrix

In der Arbeit von KIRCHMAIER [2007] wurde die Untersuchung der Korngrößenabhängigkeit des PWS von Sand an insgesamt drei Sanden (G101, G102 und G103) mit den vier Fraktionen 0,2/0,4, 0,4/0,63, 0,63/1,0 und 1,0/2,0 mm durchgeführt. Beim Gestein G101 handelte es sich um einen dolomitischen Kalkstein. Bei den anderen beiden untersuchten Gesteinskörnungen handelte es sich um Hartgesteine und zwar um einen Granulit (G102) und einen Diabas (G103). Das Kleinstkorn wurde mit 0,2 mm festgelegt, da feinere Fraktionen und der aufgebrauchte Klebstoff eine Füller-Klebstoff-Mastix bilden, welche nach dem Aushärten auch an der Oberfläche vorhanden ist. Dadurch würde nicht nur das Gestein poliert und geprüft werden, sondern auch die Mastix bestehend aus Feinanteilen und Klebstoff. Eine Übersicht über die Prüfmatrix ist in Abb. 5-1 dargestellt.

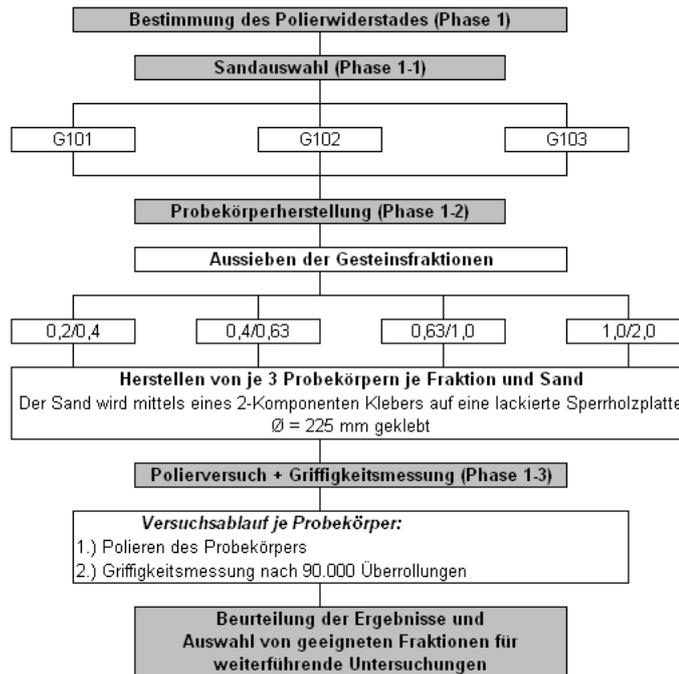


Abb. 5-1: Versuchsprogramm zur Untersuchung der Korngrößenabhängigkeit des PWS [KIRCHMAIER, 2007]

Je Sand und Fraktion wurden jeweils drei Einzelmessproben gemäß den in Abschnitt 3.1.3.1 angeführten Anleitungen hergestellt. Im Rahmen der gegenständlichen Arbeit wurden die Versuche zusätzlich um die Sandfraktion 0,2/2,0 mm ergänzt. Ziel war festzustellen, welcher Polierwert sich bei Verwendung der ganzen Fraktionsbandbreite einstellt.

Von den drei gelieferten Sanden der Korngruppe 0/2 mm erfolgte eine Bestimmung der Korngrößenverteilung gemäß EN 933-1 [ON, 2006]. Hierbei wurden jedoch nicht die Normsievesätze verwendet, sondern den durchgeführten Untersuchungen entsprechende Siebe mit den Öffnungsweiten 0,063, 0,09, 0,2, 0,4, 0,63, 1,0, 2,0, 4,0 mm. Zusätzlich wurden die Korngrößenverteilungen von 23 weiteren nicht im Prüfprogramm enthaltenen Sanden analysiert. Dazu zählten aufbereitete Natursande, Edelbrechkörnungen (EBK) und Edelkantkörnungen (EKK). Das hierfür verwendete Datenmaterial wurde vom GSV⁷⁰ zur Verfügung gestellt.

5.1.2 Korngrößenabhängigkeit des PWS

In Abb. 5-2 links sind für die durchgeführten Sandpolierprüfungen an den Prüffractionen 0,2/0,4, 0,4/0,63, 0,63/1,0, 1,0/2,0 sowie 0,2/2,0 mm die ermittelten PWS in Form eines Histogramms mit Kennzeichnung der Standardabweichungen dargestellt. Die Abb. 5-2 rechts zeigt den relativen Anstieg der ermittelten PWS-Werte mit zunehmender Korngröße ausgehend vom Anfangsreibbeiwert bei der Fraktion 0,2/0,4 mm.

Aus Abb. 5-2 wird ersichtlich, dass das Gestein G101 erwartungsgemäß eine wesentlich geringere Polierresistenz als die beiden Hartgesteine G102 und G103 aufweist. Der Reibbeiwert μ des Gesteins G103 ist in der Regel etwas höher als der Reibbeiwert des Gesteins G102. In der Fraktion 0,63/1,0 mm jedoch erzielt das Gestein G102 einen geringfügig höheren Reib-

⁷⁰ Güteschutzverband der österreichischen Kies-, Splitt- und Schotterwerke. www.strassenbaustoffe.at

beiwert als der Diabas (G103). Der PWS der Sandfraktion 0,2/2,0 mm ist bei allen drei Sanden trotz des Größtkorns von 2,0 mm wesentlich geringer als jener der Fraktion 1,0/2,0 mm. Die für die 0,2/2,0 mm ermittelten Reibwerte bewegen sich im Bereich der Fraktion 0,4/0,63 mm. Dies lässt sich durch die nicht mehr vorhandene Drainagewirkung an der Probenoberfläche erklären. Durch den Feinanteil werden die Hohlräume zwischen den großen Körnern fast vollständig ausgefüllt und das Prüfwasser kann während der Griffigkeitsmessung nicht mehr abfließen. Lediglich ein Sand, der Granulit, weist in der Fraktion 0,2/2,0 mm einen Reibwert in der Größenordnung des PWS der Fraktion 0,63/1,0 mm auf. Die Wiederholbarkeit der Prüfergebnisse ist mit der Fraktion 0,2/2,0 mm wesentlich ungünstiger als jene der anderen Fraktionen.

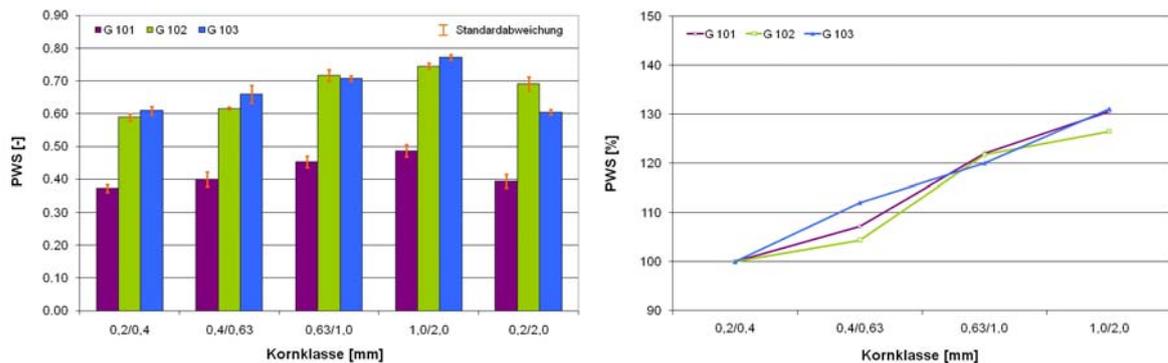


Abb. 5-2: Ergebnisse Korngrößenabhängigkeitsuntersuchung – Histogramm (links) und Liniendiagramm bereinigt um den Anfangsreibbeiwert der Fraktion 0,2/0,4 mm (rechts)

Generell steigt der PWS mit zunehmender Korngröße an. Aus Abb. 5-2 rechts ist zu erkennen, dass das Ausmaß der Zunahme des Reibbeiwertes vom Gestein nahezu unabhängig und somit für alle drei Sande beinahe ident ist. Die Zunahme des PWS aller drei Sande über die Bandbreite 0,2/0,4 bis 1,0/2,0 mm beträgt dabei in etwa 30 %. Lediglich in der Fraktion 0,4/0,63 mm weichen die ermittelten Polierwerte hinsichtlich ihrer relativen Zunahme voneinander um rund 8 % ab.

Zur genaueren mathematischen Beschreibung werden in Abb. 5-3 die Ergebnisse der Fraktionen 0,2/0,4, 0,4/0,63, 0,63/1,0 sowie 1,0/2,0 mm durch eine Trendlinie mit Angabe der mathematischen Funktion und dem Bestimmtheitsmaß angenähert. Für die Berechnung und die Darstellung wurden die ermittelten PWS-Werte auf den Mittelwert des Nenndurchmessers von oberem und unterem Siebsatz bezogen (z.B. wurde der PWS der Fraktion 0,2/0,4 mm auf der x-Achse auf der Korngröße 0,3 mm aufgetragen). Die x-Achse wird dabei in logarithmischer Skalierung dargestellt.

Die mathematische Beschreibung der Trendlinien erfolgt in der Form

$$PWS = b \cdot x^e \quad [-] \quad (5.1)$$

b.....konstanter Regressionskoeffizient [mm^{-1}]

x.....Korngröße [mm]

e.....Potenz [-]

In Formel (5.1) stellt (*b*) einen konstanten Regressionsfaktor dar. Dieser kennzeichnet das Offset der Anfangswerte bei der Fraktion 0,2/0,4 mm. So ergibt sich für das Gestein G103 mit seiner hohen Polierresistenz und einem PWS von 0,772 [-] in der Fraktion 1,0/2,0 mm eine Konstante (*b*) von 0,7278, wohingegen sich beim Dolomit (G101), mit seinem geringeren PWS von 0,487, die Konstante (*b*) sich mit 0,4585 ergibt.

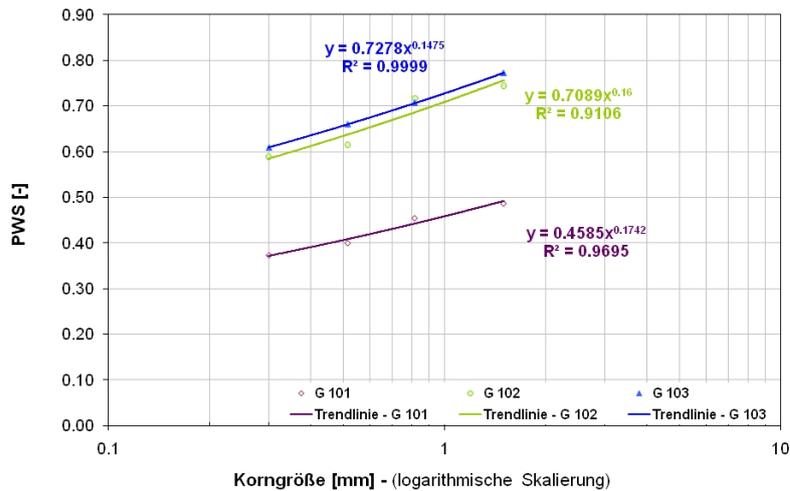


Abb. 5-3: Korngrößenabhängigkeit des PWS - Trends und Bestimmtheitsmaß

5.1.3 Repräsentative Kornklassen

Zur Klärung der Frage welche Sandfraktion als repräsentativ für die Bestimmung des PWS von feinen Gesteinskörnungen gilt, wurden die Korngrößenverteilungen der drei Sande G101 bis G103 analysiert. Entsprechend der mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze untersuchten Kornfraktionen wurden für die Bestimmung der Korngrößenverteilungen Siebe mit den Öffnungsweiten 0,063, 0,09, 0,2, 0,4, 0,63, 1,0, 2,0 und 4,0 mm verwendet. In Abb. 5-4 sind die mittleren Sieblinien der drei Sande dargestellt. Die Massenanteile in den einzelnen Kornfraktionen mit Angabe des Mittelwertes der drei Sande sind in Tab. 5.1 angeführt.

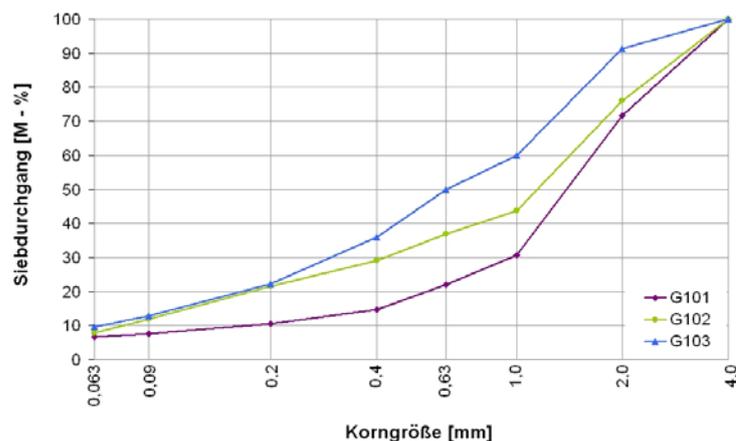


Abb. 5-4: Korngrößenverteilung der drei Sande G101, G102 und G103

Das Gestein G103 weist mit knapp 9 M-% um ca. 20 M-% weniger Überkorn als die Gesteine G101 und G102 auf. Der Fülleranteil der drei untersuchten Sande schwankt zwischen knapp 7 und 10 M-%. Die Fraktion 0,2/0,4 mm ist beim Gestein G101 lediglich mit 4,2 M-%, beim Gestein G103 hingegen mit 13,8 M-% vertreten. Bei den drei Sanden ist die Fraktion 0,2/0,4 mm im Mittel mit einem Anteil von 8,5 M-% an der gesamten Korngrößenverteilung vertreten. 8,5 M-% beträgt auch der mittlere Anteil der Fraktion 0,63/1,0 mm. Der Anteil der Fraktion 0,4/0,63 mm ist im Mittel mit knapp 10 M-% geringfügig höher. Der überwiegende Anteil an der Gesamtsieblinie entfällt mit ca. 55 M-% auf die Kornklasse 1,0/2,0 mm und das

Überkorn. Die Reproduzierbarkeit von Prüfergebnissen mit der Fraktion 1,0/2,0 mm ist jedoch wesentlich schlechter als mit den drei alternativen Sandfraktionen.

Tab. 5.1: Siebdurchgänge der drei Sande G101, G102 und G103

Korngröße [mm]	Korngrößenverteilung [M-%]			Mittelwert
	G101	G102	G103	
< 0,063	6,6	7,9	9,5	8,0
0,063 – 0,09	0,9	4,0	3,2	2,7
0,09 – 0,2	2,9	9,8	9,4	7,4
0,2 – 0,4	4,2	7,5	13,8	8,5
0,4 – 0,63	7,2	7,8	14,0	9,6
0,63 – 1,0	8,8	6,7	10,0	8,5
1,0 – 2,0	40,9	32,5	31,5	35,0
2,0 – 4,0	28,4	23,9	8,6	20,3
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0

Da sich mit kleineren Sandpartikeln als 0,2 mm keine brauchbaren Probekörper herstellen lassen, kommt die Sandfraktion 0,09/0,2 mm, welche im Mittel mit 7,4 M-% an der Gesamtsieblinie vertreten ist, nicht für die Durchführung der Polierwertbestimmung von Sand in Frage. Aufgrund der drei untersuchten Sieblinien konnte eine repräsentative Kornklasse nicht eindeutig bestimmt werden.

Die Analyse der Sieblinien von 23 weiteren Sanden, welche zur Vergrößerung der Datengrundlage durchgeführt wurde, ergab die in Abb. 5-5 getrennt für Natursande, Edelbrechkörnungen (EBK)⁷¹ und Edelkantkörnungen (EKK)⁷¹ dargestellten Korngrößenverteilungen. Die einzelnen Massenanteile mit Sieben der Öffnungsweite 0,063, 0,125, 0,25, 0,5, 1,0, 2,0 und 4,0 mm bestimmten Kornklassen sind in Tab. 5.2 mit Angabe des Gesamtmittelwertes aller 23 Sande angeführt.

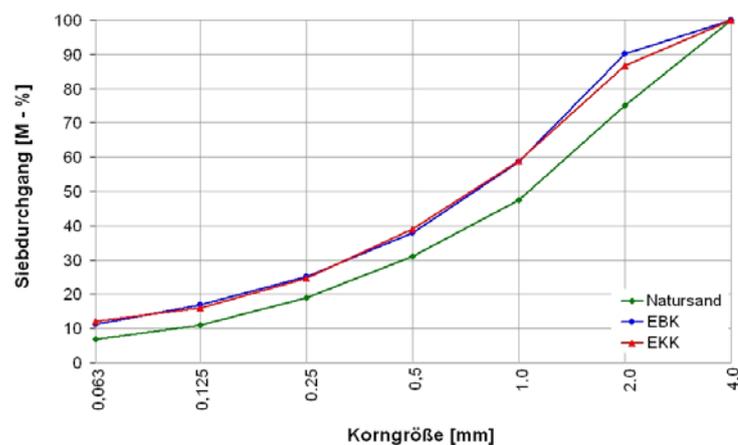


Abb. 5-5: Korngrößenverteilungen von 7 Natursanden, 14 EBK und 2 EKK von österreichischen Sandproduzenten

⁷¹ Bei EBK und EKK handelt es sich um veraltete Bezeichnungen zur Beschreibung der Bruchflächigkeit von Gesteinskörnungen (siehe Glossar)

Die mittlere Korngrößenverteilung der Edelbrech- und Edelkantkörnungen sind nahezu ident. Nur die Korngrößenverteilung von Natursanden weist einen höheren Überkornanteil ($> 2,0$ mm) und einen geringeren Eigenfülleranteil ($< 0,063$ mm) auf. Der Anteil der Kornklassen $0,25/0,5$ sowie $0,5/1,0$ mm ist allerdings bei allen drei untersuchten Körnungen ungefähr gleich groß und beträgt ca. 13 respektive ca. 19 M-%.

Tab. 5.2: Siebdurchgänge der analysierten Natursande und EBK sowie EKK

Korngröße [mm]	Natursand	Korngrößenverteilung [M-%]		Mittelwert
		EBK	EKK	
$< 0,063$	6,8	11,1	12,0	10,0
$0,063 - 0,125$	4,1	5,9	4,1	4,7
$0,125 - 0,25$	8,0	8,2	8,7	8,3
$0,25 - 0,5$	12,1	12,8	14,4	13,1
$0,5 - 1,0$	16,6	20,7	19,8	19,0
$1,0 - 2,0$	27,6	31,4	27,9	29,0
$2,0 - 4,0$	24,8	9,8	13,3	15,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0

Die mittleren Korngrößenverteilungen aller untersuchten Körnungen weisen einen steten Verlauf auf. Der minimale Anteil der Fraktion $0,25/0,5$ mm beträgt 8,3 M-% und in der Fraktion $0,5/1,0$ mm 11,1 M-%. Der maximale Anteil der Fraktion $0,25/0,5$ mm beträgt 17,7 M-% und in der Fraktion $0,5/1,0$ mm 34,5 M-%. Im Mittel ist die Fraktion $0,25/0,5$ mm bei den untersuchten Natursanden mit 12,1 M-%, bei den Edelbrechkörnungen mit 12,8 M-% und bei den Edelkantkörnungen mit 14,4 M-% vertreten. Der Anteil der Fraktion $0,5/1,0$ mm beträgt bei allen drei untersuchten Sandtypen mehr als 15 M-%.

5.1.4 Zusammenfassung und Erkenntnisse

Mit den Prüffractionen $0,4/0,63$ und $0,63/1,0$ mm lassen sich die Probekörper für die Wehner/Schulze-Prüfung in ähnlich guter Qualität wie mit der Prüffraction $0,2/0,4$ mm herstellen. Zusätzlich ist die Wiederholbarkeit von Prüfergebnissen bei allen drei Kornfractionen annähernd ident.

Die Prüfung von Probekörperplatten der Fraktion $1,0/2,0$ mm führt einerseits zu einem sehr hohen Prüfgummiverschleiß und hat andererseits eine sehr schlechte Wiederholbarkeit der Prüfergebnisse zur Folge. Zusätzlich gestaltete sich die Herstellung der Sandprobekörper mit der Fraktion $1,0/2,0$ mm sehr schwierig, da aufgrund der Korngröße eine dichte Lagerung der Körner nur schwer zu bewerkstelligen ist. Aus diesen Gründen ist die Durchführung von Reihenuntersuchungen mit der Fraktion $1,0/2,0$ mm nicht Ziel führend. Aufgrund der schlechten Reproduzierbarkeit der Prüfergebnisse mit der Fraktion $0,2/2,0$ mm ist auch diese Sandfraktion für weiterführende Untersuchungen als ungeeignet zu erachten.

Anhand der Prüfergebnisse stellte sich ein klarer Zusammenhang zwischen dem PWS und der Korngröße heraus. Der PWS steigt dabei mit zunehmender Korngröße an. Die Zunahme des PWS kann durch folgende zwei Einflüsse erklärt werden:

- Abhängigkeit der Flächenrauheit, der Kantigkeit und der Härte eines Gesteinskorns von der Korngröße (Mikrotextur), die einer Poliereinwirkung entgegenwirken.

- Unterschiedliche Makrotexturausbildung der Prüffläche in Abhängigkeit von der Korngröße und eine damit verbundene veränderte Drainagewirkung bei der Gleitreibungsbestimmung.

Da die Zunahme des PWS bei allen drei untersuchten Sanden annähernd dieselbe ist, kann davon ausgegangen werden, dass ein Einfluss der Makrotextur auf die Drainagewirkung der Probekörperoberfläche und damit auf den Gleitreibungsbeiwert vorhanden ist. So ermöglicht die relativ hohlraumreiche Oberfläche einer Probenplatte der Fraktion 1,0/2,0 mm ein wesentlich rascheres Abführen des Prüfwassers, wodurch der Effekt einer Wasserkeilbildung unter dem Prüfgummi erst gar nicht eintreten kann.

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung der untersuchten Sande Dolomit, Granulit sowie Diabas zeigt, dass der Anteil einzelner Fraktionen zwischen diesen drei Sanden um bis zu 30 M-% voneinander abweicht und die feineren Sandfraktionen ($< 1,0$ mm) in manchen Sieblinien nur mit ca. 30 M-% vertreten sind. Der Großteil entfällt auf die Fraktion 1,0/2,0 mm. Insbesondere im Vergleich des Anteils des Sandes an einem Asphalt- oder Betonmischgut zeigt sich, dass die untersuchten Prüffractionen für die Bestimmung des Polierwiderstandes von Sanden in manchen Sieblinien nur mit wenigen M-% vertreten sind. Die Fraktionen 0,2/0,4 sowie 0,63/1,0 mm sind jedoch in der Regel mit jeweils ca. 10 M-% an der Gesamtsieblinie eines Sandes vertreten. Eine Ausnahme bilden hier Mischgüter mit Ausfallskörnungen.

Aus versuchstechnischen Gründen (einfache Probenherstellung und geringe Spannweite der Einzelergebnisse) sowie aufgrund der Sieblinienanalysen werden für weitere Untersuchungen die Fraktionen 0,2/0,4 mm und 0,63/1,0 mm empfohlen. Die Verwendung der Fraktion 0,2/0,4 mm hat den Vorteil, Vergleiche mit zahlreichen veröffentlichten Ergebnissen der TU Berlin anstellen zu können, da dies die dortige Standardprüffraction für Sandprüfungen darstellt. Die Fraktion 0,63/1,0 mm wies bei noch möglicher homogener Probekörperherstellung eine sehr gute Wiederholpräzision auf. Durch diese beiden Fraktionen kann somit die untere Bandbreite des Sandes abgedeckt werden.

5.2 Versuchsüberblick und Grundlagen

In diesem Kapitel wird einerseits ein Überblick über die durchgeführten Versuche zur Bestimmung der Polierresistenz von Sand und Splitt mit berührenden Prüfmethode gegeben. Andererseits erfolgen allgemeine Erläuterungen zur Auswahl der für die Versuche verwendeten Gesteine sowie zu den angewandten Formeln für die Berechnung eines Konfidenzintervalls, welches zur qualitativen Bewertung von Korrelationsuntersuchungen erstellt wird.

5.2.1 Versuchsprogramm

Entsprechend den im Kapitel 1.3 angeführten Zielsetzungen, ist das im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Versuchsprogramm in vier Projektphasen gegliedert.

In der ersten Projektphase wird aufbauend auf den in Kapitel 5.1 erläuterten Vorarbeiten eine Festlegung auf eine einzelne Prüffraction für die Bestimmung der Polierresistenz von Sanden mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze durchgeführt. Zu diesem Zweck wird im Zuge einer Reihenuntersuchung an für den österreichischen Straßenbau repräsentativen Gesteinsmaterialien von den zwei Sandfraktionen 0,2/0,4 sowie 0,63/1,0 mm der Polierwert bestimmt. Der Polierwert wird dabei als $PWS_{0,2/0,4}$ bzw. $PWS_{0,63/1,0}$ bezeichnet. Anhand dieser

Ergebnisse wird in weiterer Folge für die ausgewählte Sandfraktion ein österreichischer Bewertungshintergrund für die Polierresistenz von Sand erstellt und eine Empfehlung für einen Grenzwert gegeben.

Aufbauend auf den von WÖRNER et al. [2006] am Centrum für Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der Technischen Universität München durchgeführten Arbeiten wird in der zweiten Projektphase ein Prüfverfahren für die Sandpolierprüfung mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät erarbeitet und die Fraktion 0,63/1,0 mm der bereits in Phase 1 verwendeten repräsentativen Sande einer Reihenuntersuchung unterzogen. Der dabei ermittelte Prüfwert für die Polierresistenz wird als PSV_{fGK} bezeichnet.

In der dritten Projektphase wird von den repräsentativen Gesteinsmaterialien an der Splittfraktion 7,2/10 mm unter Anwendung des in Abschnitt 3.1.3.2 erläuterten Herstellungsverfahrens von Mosaikprobekörpern der Polierwert bestimmt. Der mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze ermittelte Polierwert der Splittkörnung wird als $PWS_{7,2/10,0}$ bezeichnet.

Abschließend wird in der vierten Projektphase mit dem bereits normativ verankerten Prüfverfahren der PSV der Splittfraktion 7,2/10 mm gemäß EN 1097-8 [ON, 2009] bestimmt. Verwendung findet hierbei die Schnellpoliermaschine und das Pendelgerät.

Abschließend werden mit den ermittelten Polierwerten der Sand- und Splittfraktion Korrelationsanalysen durchgeführt.

Ein Überblick über die vier thematischen Blöcke ist in Abb. 5-6 dargestellt.

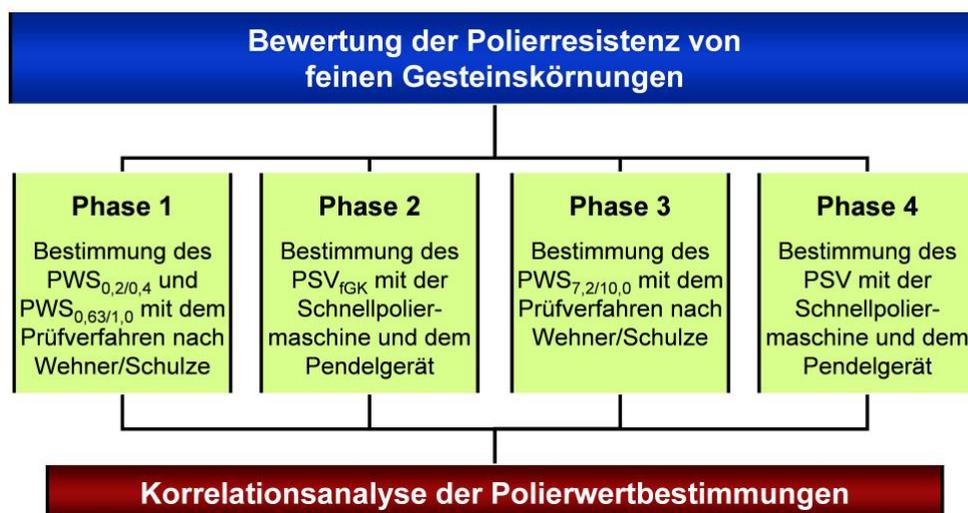


Abb. 5-6: Überblick über das Versuchsprogramm

5.2.2 Gesteinsauswahl und Sieblinienbestimmung

Für die gegenständliche Untersuchung des Polierverhaltens von Sanden und Splitten wurden elf repräsentative Gesteine, die in Österreich im Straßenbau Anwendung finden, ausgewählt. In die Untersuchungsliste wurden sowohl Hartgesteine als auch Kiese sowie ein dolomitisches Gestein aufgenommen. Die Einbindung von bekannt gering polierresistenten Gesteinen dient zur Erstellung eines Bewertungshintergrundes für die Sandpolierprüfung, welcher auch Informationen über Gesteine mit niedrigen Griffigkeitsniveaus liefern soll. Eine Auflistung der untersuchten Gesteine mit Angabe des in dieser Arbeit durchgängig verwendeten Farbcodes erfolgt in Tab. 5.3.

Von den elf verschiedenen Gesteinsmaterialien wurden dem Labor des Forschungsbereichs Straßenwesen der TU Wien im Sommer 2007 von den jeweiligen Steinbrüchen bzw. Kiesgruben zwischen 60 und 100 kg Sand der Korngruppe 0/2 mm übersandt. Eine Ausnahme bildete dabei das Gestein mit dem Laborcode G206, welches in der Korngruppe 0/4 mm angeliefert wurde. Die elf Sande wurden anschließend im Labor mittels Nasssiebung in die zu prüfenden Fraktionen aufgeteilt. Nach Trocknung bis zur Massenkonstanz bei $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ wurde nochmals eine Trockensiebung durchgeführt, um alle Sandkörner $< 0,2$ mm zu entfernen.

Tab. 5.3: Liste der verwendeten Gesteine

<i>Laborcode</i>	<i>Farbcode</i>	<i>Gesteinsbezeichnung</i>	<i>Abbaustätte (Bundesland)</i>
G201		Granit	Niederösterreich
G202		Basalt	Burgenland
G203		Diabas	Tirol
G204		Kies	Oberösterreich
G205		Serpentinit	Steiermark
G206		Kies	Oberösterreich
G207		Kies	Niederösterreich
G208		Grünschiefer	Burgenland
G209		Silikatmarmor	Niederösterreich
G210		Kersantit	Niederösterreich
G211		Dolomit	Kärnten

Die Splittproben (ca. 40 kg) der Korngruppe 8/11 mm für die Splittpolierprüfung wurden im Frühjahr 2008 von den elf Betrieben geliefert. Eine Ausnahme bildete hier das Gestein mit der laufenden Prüfnummer G207, welches als Korngruppe 0/16 mm von der Halde entnommen und aus der vom Betrieb die Korngruppe 8/11 mm ausgesiebt wurde. Von den Splittproben wurde im Labor des Fachbereichs für Straßenwesen mittels Nasssiebung die Fraktion 8/10 mm ausgesiebt und bis zur Massenkonstanz bei $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ getrocknet. Anschließend erfolgte eine Aussiebung von plattigen Körnern mithilfe eines Schlitzsiebes mit einer Nennöffnungsweite von 7,2 mm. Nach Abschluss des Aussiebprozesses bleibt somit für die nachfolgenden Splittpolierprüfungen die Kornfraktion 7,2/10 mm übrig.

Die Probenahme und Probenlieferung wurde somit von den Betrieben selbst organisiert und durchgeführt. Außerdem erfolgte die Lieferung der zwei verschiedenen Korngruppen 0/2 bzw. 8/11 mm nicht zum selben Zeitpunkt. Die Splitte wurden dem Labor im Frühjahr 2008 und somit rund ein halbes Jahr später als die Sande geliefert. Somit ist nicht gewährleistet, dass die Splitte und Sande aus demselben Abschlag stammen.

Von den im Sommer 2007 angelieferten Sanden wurde zusätzlich die Korngrößenverteilung gemäß ÖNORM EN 933-1 [ON, 2006] bestimmt. Dazu wurden die Proben zuerst getrocknet, homogenisiert und anschließend Proben für die Bestimmung der Korngrößenverteilung gemäß ÖNORM EN 932-1 [ON, 1997] gezogen.

Für die Bestimmung der Korngrößenverteilung wurden nicht die Normsiefsätze verwendet, sondern den durchgeführten Untersuchungen entsprechende Siebe mit den Öffnungsweiten 0,063, 0,09, 0,2, 0,4, 0,63, 0,71, 1,0, 2,0 und 4,0 mm. Je Gestein erfolgte eine Doppelbestimmung ($n = 2$). Die Einwaage je Siebdurchgang betrug ca. 600 g.

In Abb. 5-7 sind die mittlere, maximale sowie minimale Sieblinie der elf untersuchten Sande dargestellt. Die Massenanteile in den einzelnen Kornfraktionen sind in Tab. 5.4 angeführt.

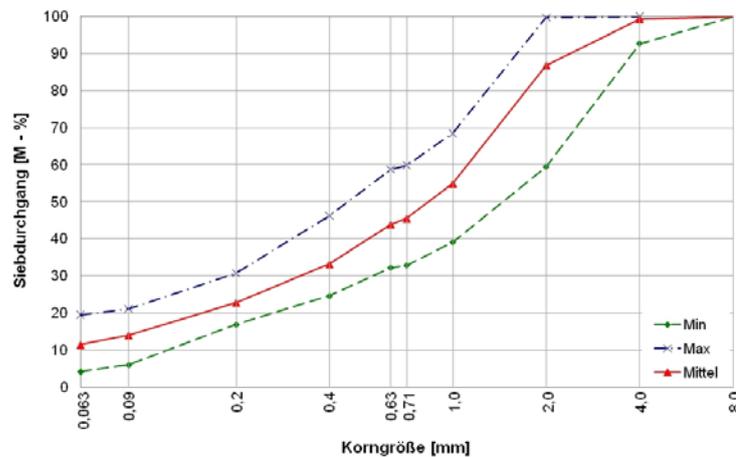


Abb. 5-7: Mittlere sowie maximale und minimale Korngrößenverteilung der elf Sande G201 bis G211

Tab. 5.4: Angabe der mittleren, maximalen und minimalen Korngrößenverteilung der elf Sande G201 bis G211

Korngröße [mm]	Korngrößenverteilung [M-%]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert
< 0,063	4,1	19,5	11,4
0,063 – 0,09	6,0	21,1	14,0
0,09 – 0,2	16,9	30,8	22,8
0,2 – 0,4	24,6	46,2	33,2
0,4 – 0,63	32,2	58,8	43,9
0,63 – 0,71	32,9	59,9	45,5
0,71 – 1,0	39,1	68,5	54,9
1,0 – 2,0	59,4	99,7	86,8
2,0 – 4,0	92,6	100,0	99,2
4,0 – 8,0	100,0	100,0	100,0

Zwei der elf Proben entsprachen einer Korngruppe 0/4 mm. Die Kornklasse 0,2/0,4 mm ist im Mittel mit 11,5 M-% und die Kornklasse 0,63/1,0 mm mit 12,2 M-% vorhanden. Somit sind die Ergebnisse der Voruntersuchungen, wonach die beiden Kornklassen 0,2/0,4 sowie 0,63/1,0 mm im Mittel mit ca. 10 M-% in der Sieblinie vertreten sind, bestätigt. Die Fraktion 0,63/0,71 mm ist im Mittel mit 2 M-% vertreten. Dieser Anteil kann als sehr gering eingestuft werden.

Die beiden Kornklassen 0,2/0,4 mm und 0,63/1,0 mm können somit als repräsentative Fraktionen für die Bestimmung des Polierwiderstandes von Sanden mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze herangezogen werden.

5.2.3 Bestimmung des Konfidenzintervalls und Prüfung auf Normalverteilung

Mithilfe der Korrelationsanalyse werden stochastische Zusammenhänge zwischen Werten einer Stichprobe untersucht. Wie bereits in 4.5.3 erläutert fungiert der Korrelationskoeffizient (r_{xy}) als Maßzahl für die Stärke und Richtung eines linearen Zusammenhangs. Normalerweise werden zwei Merkmale eines Stichprobenwertes untersucht. Im gegenständlichen Projekt handelt es sich bei den zwei Merkmalen um die verschiedenen Polierwiderstände ermittelt mit den zwei Prüfverfahren Wehner/Schulze und Schnellpoliermaschine.

Je näher (r_{xy}) zu 1 tendiert, desto stärker besteht der Zusammenhang zwischen den Merkmalen. Das Quadrat des Korrelationskoeffizienten (r_{xy}) wird als Bestimmtheitsmaß (R^2) bezeichnet. Das Bestimmtheitsmaß kennzeichnet das Ausmaß des Zusammenhangs, d. h. die Güte der Anpassung der benutzten Ausgleichsgerade oder auch Ausgleichskurve an die Stichprobenpunkte.

Der dem Bestimmtheitsmaß zugehörige Vertrauensbereich um die Ausgleichskurve wird als Konfidenzintervall bezeichnet. Dieses ist stark abhängig von der Anzahl der vorhandenen Daten und der gewünschten bzw. gewählten Irrtumswahrscheinlichkeit (α). In der Regel wird für das Signifikanzniveau 5 % angesetzt. Zur Bestimmung des Konfidenzintervalls einer Korrelationsbestimmung zweier voneinander abhängiger Datensätze wird die Studentsche t-Verteilung herangezogen. Das Konfidenzintervall ergibt sich aus Formel (5.2).

$$Y_{(x)} \pm t_{(n-2, 1-\frac{\alpha}{2})} \cdot \sigma_{Y(x)} \quad (5.2)$$

$Y_{(x)}$Breite des Konfidenzintervalls an der Stelle x

$t_{(.)}$ t-Quantil, mit α = Irrtumswahrscheinlichkeit und n = Anzahl der Messergebnisse

$\sigma_{Y(x)}$ Vorhandene Wiederholstandardabweichung an der Stelle x gemäß Formel (5.3)

$$\sigma_{Y(x)} = \sqrt{\sigma_x^2 \cdot \left(\frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right)} \quad (5.3)$$

\bar{x} Mittelwert aus den Stichproben der Variablen x

σ_xStandardabweichung aus den Stichproben der Variablen x

nAnzahl der Stichproben

Die Normalverteilung ist eine kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilung und auch unter dem Namen Gauß'sche Glockenkurve bekannt. Die Höhe und Breite dieser Glockenkurve ist von der vorhandenen Standardabweichung des Erwartungswertes der betrachteten Variable x abhängig. Im Erwartungswert ist sie achsensymmetrisch zur Achse der Variablen x .

Anhand der Ergebnisse aus der ersten Projektphase soll der derzeit gültige Grenzwert für die Sandpolierresistenz auf seine Gültigkeit hin untersucht werden. Dazu ist es notwendig die Eignung einer Stichprobe zu überprüfen. Diese Überprüfung erfolgt durch die Anwendung eines statistischen Tests zur Verteilungsanalyse von Stichproben. Ergibt sich für die vorhandenen Stichproben eine Normalverteilung, so können die Stichproben repräsentativ für die Grundgesamtheit herangezogen werden.

Mögliche Tests zur Prüfung auf Normalverteilung sind z. B. der χ^2 -Test und die Lilliefors-Modifikation des Kolmogoroff-Smirnoff Tests, der im Folgenden kurz K-S-Test genannt wird. Da der K-S-Test besonders beim Vorliegen kleiner Stichprobenumfänge Abweichungen von der Normalverteilung feststellt, wird er für die Überprüfung der Verteilungsfunktion an den Ergebnissen der elf untersuchten Sande angewandt.

5.3 Phase 1 – Bestimmung des PWS von Sand

Von den elf Sanden wurden in der ersten Projektphase mit den Fraktionen 0,2/0,4 und 0,63/1,0 mm jeweils drei Probekörper gemäß Abschnitt 3.1.3.1 hergestellt und anschließend mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze gemäß den Ausführungen in Kapitel 3.1.4 der Reibwert des Sandes bestimmt. Der Polierwert (PWS) der Sandfraktion berechnet sich als der Mittelwert aus den drei Einzelmessergebnissen.

5.3.1 Übersicht über die ermittelten Ergebnisse

In Tab. 5.5 sind die Ergebnisse der Polierwertbestimmungen mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze zusammengestellt.

Tab. 5.5: Ergebnisse für den PWS_{0,2/0,4} sowie PWS_{0,63/1,0} der elf Sande

Gestein	G201		G202		G203	
	0,2/0,4	0,63/1,0	0,2/0,4	0,63/1,0	0,2/0,4	0,63/1,0
Kornklasse [mm]						
Mittelwert PWS [-]	0,517	0,562	0,536	0,585	0,534	0,593
Standardabweichung σ_x [-]	0,009	0,006	0,011	0,022	0,010	0,019
Rel. Mittelwertabweichung $\delta_{\bar{x}}$ [%]	1,4	0,9	1,6	2,9	1,5	2,2
Spannweite w [-]	0,017	0,012	0,019	0,039	0,019	0,038

Gestein	G204		G205		G206	
	0,2/0,4	0,63/1,0	0,2/0,4	0,63/1,0	0,2/0,4	0,63/1,0
Kornklasse [mm]						
Mittelwert PWS [-]	0,572	0,584	0,450	0,499	0,352	0,387
Standardabweichung σ_x [-]	0,020	0,012	0,010	0,021	0,003	0,006
Rel. Mittelwertabweichung $\delta_{\bar{x}}$ [%]	2,5	1,4	1,6	3,2	0,7	1,0
Spannweite w [-]	0,038	0,024	0,020	0,039	0,006	0,011

Gestein	G207		G208		G209	
	0,2/0,4	0,63/1,0	0,2/0,4	0,63/1,0	0,2/0,4	0,63/1,0
Kornklasse [mm]						
Mittelwert PWS [-]	0,578	0,619	0,412	0,436	0,357	0,390
Standardabweichung σ_x [-]	0,008	0,013	0,006	0,017	0,008	0,008
Rel. Mittelwertabweichung $\delta_{\bar{x}}$ [%]	1,0	1,6	2,4	3,0	1,8	1,4
Spannweite w [-]	0,015	0,023	0,011	0,030	0,015	0,015

Gestein	G210		G211	
	0,2/0,4	0,63/1,0	0,2/0,4	0,63/1,0
Kornklasse [mm]				
Mittelwert PWS [-]	0,538	0,609	0,410	0,400
Standardabweichung σ_x [-]	0,019	0,030	0,022	0,015
Rel. Mittelwertabweichung $\delta_{\bar{x}}$ [%]	2,6	3,6	4,1	2,5
Spannweite w [-]	0,036	0,059	0,041	0,030

Neben dem PWS wird in Tab. 5.5 die vorhandene Wiederholstandardabweichung (σ_x), die relative Mittelwertabweichung ($\delta_{\bar{x}}$) sowie die vorhandene Spannweite (w) zwischen minimalem und maximalem Einzelprüfwert angegeben. Die angegebene relative Mittelwertabweichung gibt die relative Abweichung einer Reihe von Daten (x_i) und ihrem Mittelwert (\bar{x}) – in diesem Fall dem PWS – an. Die relative Mittelwertabweichung dient auch als Maß für die Streuung innerhalb einer Datengruppe und kann im Gegensatz zur absoluten Mittelwertabweichung für Vergleichszwecke verwendet werden. Die relative Mittelwertabweichung berechnet sich nach Formel (5.4).

$$\delta_{\bar{x}} = \frac{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{\bar{x}} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (5.4)$$

$\delta_{\bar{x}}$ Relative Mittelwertabweichung [%]

nAnzahl der Einzelmessergebnisse x_i – hier: $n = 3$

\bar{x} Mittelwert der Einzelmessergebnisse x_i – also der PWS

Die mittlere Wiederholstandardabweichung aller elf untersuchten Sande beträgt in der Fraktion 0,2/0,4 mm 0,012 PWS-Einheiten und in der Fraktion 0,63/1,0 mm 0,015 PWS-Einheiten. Dadurch wird ersichtlich, dass die Streuung der Prüfergebnisse in der Fraktion 0,63/1,0 mm geringfügig höher als in der Fraktion 0,2/0,4 mm ausfällt. Dies ist insbesondere auf die Probekörperherstellung zurückzuführen, da das Erzeugen von homogenen Prüfoberflächen mit dieser Fraktion aufwändiger ist. In den Versuchen zeigte sich aber auch, dass die Prüfummis bei der Prüfung der Fraktion 0,63/1,0 mm insbesondere bei Gesteinen mit einem hohen PWS (z.B. G210) schnelle Abnutzungserscheinungen in Form von Rillen- und Abriebskeilbildung aufweisen.

Die gemäß RVS 11.06.23 [FSV, 2005] einzuhaltende maximale Spannweite (w) von 0,03 [-] zwischen minimalem und maximalem Einzelprüfergebnis wurde in der Fraktion 0,2/0,4 mm bei den Gesteinen G204, G210 und G211 überschritten. Werden jedoch gemäß TP Gestein-StB – Teil 5.4.2 [FGSV, 2008] nur zwei verträgliche Einzelmessergebnisse zur Ermittlung des PWS herangezogen, so wird auch von diesen drei Gesteinen die Anforderung an die maximale Spannweite eingehalten. Die aus den zwei verträglichen Einzelmessergebnissen resultierenden $PWS_{0,2/0,4}$ weichen um ca. 0,01 PWS-Einheiten von den in der Tab. 5.5 angegebenen Werten ab.

Wie bereits aufgrund der ermittelten mittleren Wiederholstandardabweichung zu erwarten war, ist die Anzahl der Überschreitungen der maximalen Spannweite der Einzelmessergebnisse gemäß RVS 11.06.23 in der Fraktion 0,63/1,0 mm geringfügig höher. Werden aber auch in dieser Fraktion nur zwei verträgliche Einzelmessergebnisse für die Auswertung herangezogen, so ist auch hier die vorhandene Spannweite $w < 0,03$ PWS-Einheiten und entspricht der Anforderung gemäß RVS 11.06.23.

Die Ergebnisse der durchgeführten Reihenuntersuchung zur Sandpolierwertbestimmung mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze (PWS) sind für die Fraktionen 0,2/0,4 sowie 0,63/1,0 mm in Abb. 5-8 in Form eines Histogramms mit Angabe der vorhandenen Standardabweichung dargestellt.

Wie bereits in den im Kapitel 5.1 erläuterten Voruntersuchungen festgestellt wurde, nimmt der Polierwert mit steigender Korngröße zu. Die Zunahme des PWS von der Kornfraktion 0,2/0,4 zur Kornfraktion 0,63/1,0 mm beträgt im Mittel ca. 0,04 [-].

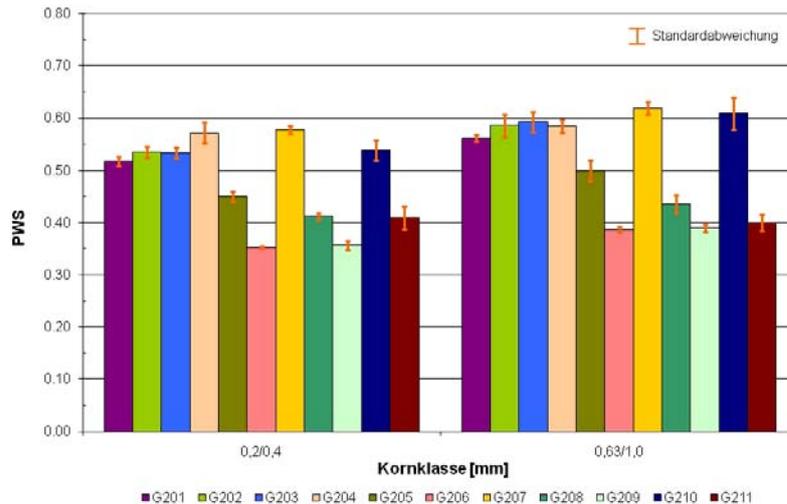


Abb. 5-8: PWS-Werte der Sandfraktionen 0,2/0,4 und 0,63/1,0 mm

Auch in der hier durchgeführten Reihenuntersuchung konnte festgestellt werden, dass die Zunahme des Polierwertes vom Wert des PWS der Fraktion 0,2/0,4 mm abhängig ist. So ist die Zunahme ΔPWS von 0,071 [-] beim Gestein G210 ($PWS_{0,2/0,4} = 0,538$ [-]) wesentlich höher als beim Gestein G209 ($\Delta PWS = 0,033$ [-] mit dem Ausgangswert $PWS_{0,2/0,4} = 0,357$ [-]). Eine Ausnahme bildet dabei das Gestein G211, für welches in der Fraktion 0,63/1,0 mm ein geringfügig niedrigerer Polierwert ermittelt wurde ($\Delta PWS = -0,010$ [-]).

Den höchsten Polierwert weist sowohl in der Fraktion 0,2/0,4 mm als auch in der Fraktion 0,63/1,0 mm das Gestein G207 auf ($PWS_{0,2/0,4} = 0,578$ [-] bzw. $PWS_{0,63/1,0} = 0,619$ [-]). Der niedrigste Polierwert wurde in beiden Fraktionen für das Gestein G206 ermittelt ($PWS_{0,2/0,4} = 0,352$ [-] bzw. $PWS_{0,63/1,0} = 0,387$ [-]).

Deutlich zu erkennen ist die große vorhandene Spreizung der Ergebnisse der elf untersuchten Gesteine. So beträgt die Differenz zwischen höchstem und niedrigstem PWS in der Fraktion 0,2/0,4 mm 0,226 PWS-Einheiten und in der Sandfraktion 0,63/1,0 mm 0,232 PWS-Einheiten.

Die Reihung der Gesteine hinsichtlich ihres Polierwertes bleibt in den beiden Fraktionen 0,2/0,4 sowie 0,63/1,0 mm nahezu unverändert, siehe Abb. 5-9.

Nr	Labor-code	Gesteins-bezeichnung	PWS [-]	
			0,2/0,4	0,63/1,0
1	G 206	Kies	0,352	0,387
2	G 209	Silikatmarmor	0,357	0,390
3	G 211	Dolomit	0,410	0,400
4	G 208	Grünschiefer	0,412	0,436
5	G 205	Serpentinit	0,450	0,499
6	G 201	Granit	0,517	0,562
7	G 203	Diabas	0,534	0,593
8	G 202	Basalt	0,536	0,585
9	G 210	Kersantit	0,538	0,609
10	G 204	Kies	0,572	0,584
11	G 207	Kies	0,578	0,619

Nr	Labor-code	Gesteins-bezeichnung	PWS [-]	
			0,2/0,4	0,63/1,0
1	G 206	Kies	0,352	0,387
2	G 209	Silikatmarmor	0,357	0,390
3	G 211	Dolomit	0,410	0,400
4	G 208	Grünschiefer	0,412	0,436
5	G 205	Serpentinit	0,450	0,499
6	G 201	Granit	0,517	0,562
7	G 204	Kies	0,572	0,584
8	G 202	Basalt	0,536	0,585
9	G 203	Diabas	0,534	0,593
10	G 210	Kersantit	0,538	0,609
11	G 207	Kies	0,578	0,619

Abb. 5-9: Reihung der Sande in den Fraktionen 0,2/0,4 und 0,63/1,0 mm aufgrund ihres PWS

Lediglich die beiden Gesteine G203 und G210 weisen in der Fraktion 0,63/1,0 mm einen etwas höheren Anstieg des PWS auf, wohingegen der PWS des Gesteins G204 von der Fraktion 0,2/0,4 zu der Fraktion 0,63/1,0 mm nur um 0,012 PWS-Einheiten ansteigt.

In Abb. 5-10 werden die an den beiden Fraktionen ermittelten PWS-Werte einander in Form eines Punktdiagramms mit Angabe der Standardabweichung und Kennzeichnung der Regressionsgeraden mit dem zugehörigen 95 %-Vertrauensbereich und ihrem Bestimmtheitsmaß dargestellt.

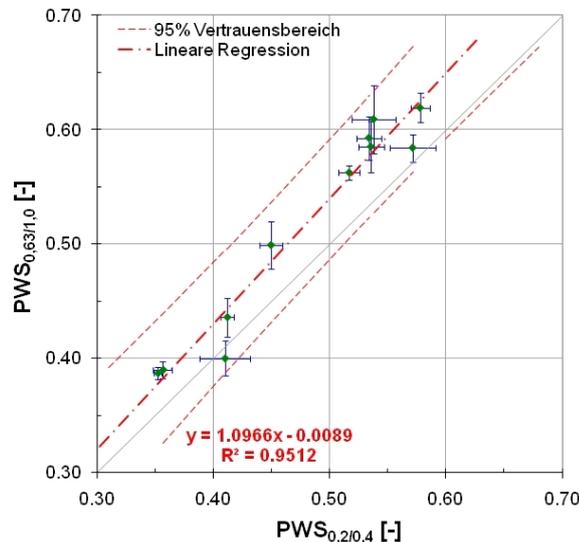


Abb. 5-10: Korrelation des PWS der zwei Sandfraktionen 0,2/0,4 und 0,63/1,0 mm

Bis auf das Gestein G211 liegen alle Datenpunkte oberhalb der Diagonalen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die PWS-Werte der Fraktion 0,63/1,0 mm in der Regel höher als jene der Fraktion 0,2/0,4 mm sind.

Eine Umrechnung der PWS-Werte von der Fraktion 0,2/0,4 mm auf die Fraktion 0,63/1,0 mm lässt sich gemäß Formel (5.5) durchführen.

$$PWS_{0,63/1,0} = 1,0966 \cdot PWS_{0,2/0,4} - 0,0089 \quad (5.5)$$

Das Bestimmtheitsmaß (R^2), ermittelt aus elf Datensätzen ($n = 11$), beträgt 0,95 [-]. Dadurch ergibt sich für die Umrechnung der PWS-Werte eine sehr hohe statistische Sicherheit.

5.3.2 Betrachtung hinsichtlich des derzeit gültigen Grenzwertes

Bisher sind in den österreichischen Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau lediglich in der Tabelle 4.1 der RVS 08.17.02 „Betondecken – Deckenherstellung“ [FSV, 2007] Anforderungen an den Polierwiderstand von Sanden gestellt. Der geforderte Mindestpolierwert für die Fraktion 0,2/0,4 mm, ermittelt mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze gemäß RVS 11.06.23, beträgt 0,55 [-].

In Abb. 5-11 sind die Ergebnisse der Polierwertbestimmung PWS von Sanden an der Fraktion 0,2/0,4 mm in Form eines Histogramms dargestellt. Ebenfalls angeführt werden die festgestellte Standardabweichung der drei Einzelmessergebnisse je Gestein und das Niveau des derzeit gültigen Grenzwertes in der RVS 08.17.02.

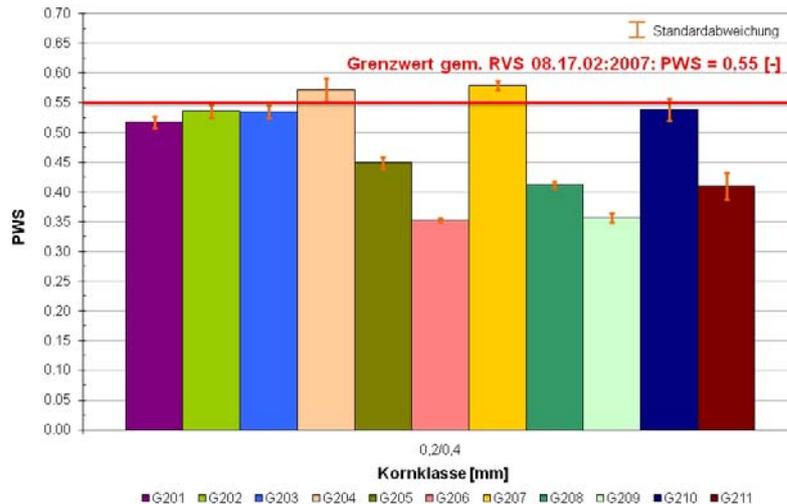


Abb. 5-11: PWS-Werte der Sandfraktion 0,2/0,4 mm mit Kennzeichnung des aktuell gültigen Grenzwertes gemäß RVS 08.17.02 [FSV, 2007]

Es ist zu erkennen, dass von den hier untersuchten elf Sanden lediglich zwei den Grenzwert von 0,55 erreichen. Dieser Wert wurde basierend auf in Deutschland durchgeführten Reihenuntersuchungen mit einer Wehner/Schulze Prüfanlage alter Bauart festgelegt.

Selbst unter Einbeziehung der vorhandenen mittleren Standardabweichung der Fraktion 0,2/0,4 mm von 0,012 PWS-Einheiten erfüllen nur fünf Gesteine den Grenzwert gemäß RVS 08.17.02. Bei dem Gestein G203 handelt es sich um einen Diabas und somit erfahrungsgemäß um ein für den Einsatz in Deckschichten hinsichtlich der vorhandenen Poliereigenschaft sehr gut geeignetes Material. Der für diesen Sand ermittelte $PWS_{0,2/0,4}$ liegt bei 0,534 [-]. Trotz Einbeziehung der ermittelten Standardabweichung aller drei Einzelmessergebnisse von 0,010 [-] würde dieser Sand nicht den in der RVS 08.17.02 geforderten Ansprüchen für den Einsatz im Oberbeton genügen. Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse erscheint der in der RVS 08.17.02 geforderte Polierwert für Sand zu hoch. Bei einer reduzierten Anforderung an den Polierwiderstand von Sand, zum Beispiel 0,52 [-], würden jedoch sechs Gesteine beziehungsweise 54,5 % der untersuchten Sande dem Kriterium genügen. Berücksichtigt man die vorhandene Prüfstreuung, so ist ein Anforderungswert von 0,50 [-] zu empfehlen.

Die derzeitige Festlegung des Grenzwertes für den Widerstand gegen Polieren von Sanden mit 0,55 [-] ist aufgrund der vorliegenden Reihenuntersuchung jedenfalls zu hinterfragen.

5.3.3 Beurteilung der Repräsentanz der Stichproben

Zur Klärung der Frage, ob die untersuchten Sande repräsentativ für die vorhandene Bandbreite des Polierwiderstandes sind, wurden die ermittelten PWS-Werte hinsichtlich ihrer Normalverteilung überprüft. Die Überprüfung erfolgte mit dem K-S-Test.

Zur Darstellung der vorhandenen Verteilungsfunktion wurden die elf Stichproben in fünf Kategorien, von 0,35 bis 0,6 mit einem Intervall von 0,05 PWS-Einheiten, eingeteilt. In Abb. 5-12 sind die elf Stichprobenwerte des $PWS_{0,2/0,4}$ in die fünf Kategorien eingeteilt und mit ihrer Verteilungshäufigkeit in Form eines Histogramms dargestellt. Die darin abgebildete Dichtefunktion basiert auf dem Erwartungswert $\mu = 0,478$ [-] und der Standardabweichung $\sigma = 0,084$ [-].

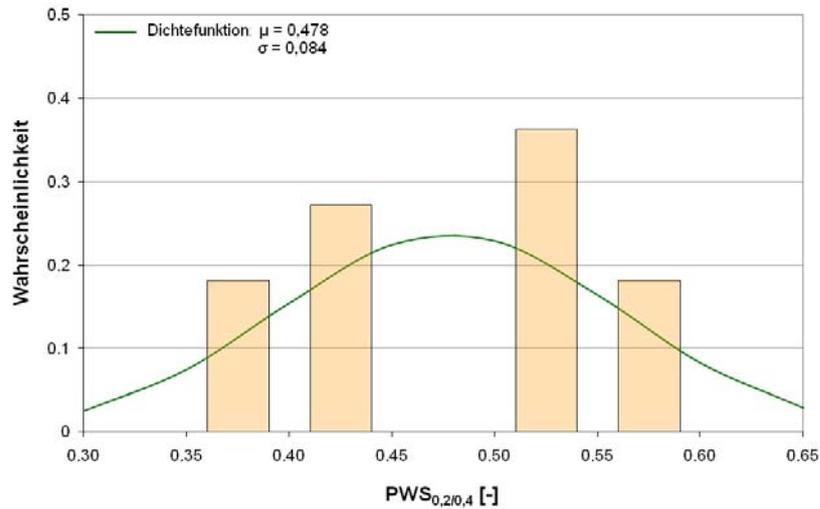


Abb. 5-12: Ergebnisse des PWS_{0,2/0,4} - Histogramm mit Dichtefunktion

Durch die Überprüfung auf Normalverteilung konnte nachgewiesen werden, dass die in dieser Projektphase untersuchten Sande einen repräsentativen Querschnitt der in Österreich im Straßenbau verwendeten Sande hinsichtlich ihrer Polierresistenz liefern.

5.4 Phase 2 – Sandpolierprüfung mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät

Annähernd jeder Stein produzierende Betrieb sowie beinahe jedes Prüflabor, das im Straßenwesen tätig ist, verfügt über ein englisches Schnellpoliergerät und ein Pendelgerät gemäß ÖNORM EN 1097-8 zur Bestimmung der Polierresistenz von Splitten. Im Gegensatz dazu ist die Verbreitung der Prüfanlage Wehner/Schulze neuer Bauart einerseits durch ihre Neueinführung am Markt und andererseits aufgrund ihrer hohen Anschaffungskosten derzeit eher gering. Ein wesentliches Ziel dieser Arbeit war es daher festzustellen, ob die Ergebnisse aus der Sandpolierprüfung mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze mit der Schnellpoliermaschine und dem dazugehörigen Pendelgerät reproduzierbar sind.

Dazu wurde in Vorversuchen die Eignung des Prüfverfahrens mit der Schnellpoliermaschine zur Bestimmung des Polierwiderstandes von Sanden (PSV_{FGK}) untersucht und aufbauend auf Arbeiten des Centrums für Baustoffe und Materialprüfung (cbm) an der TU München [WÖRNER et al., 2006] eine Methodik sowohl für die Herstellung der Probekörper als auch für die anschließende Prüfdurchführung erarbeitet. Eine Kurzzusammenfassung der Probekörperherstellung wird im folgenden Kapitel angeführt.

5.4.1 Probekörperherstellung

Die Probekörperherstellung ist bei Prüfungen von Sanden mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät noch nicht standardisiert. Um zu garantieren, dass die Ausrichtung der Körner der aufgetragenen Sandfraktion ident mit den Sandpolierplatten beim Prüfverfahren nach Wehner/Schulze ist, wurde das vom (cbm) entwickelte und in der Arbeit von WÖRNER et al. [2006] erstmals veröffentlichte Herstellungsverfahren modifiziert. Die Schwierigkeit bei der Probekörperherstellung besteht vor allem darin, den Sand gleichmäßig auf die für die Polierprüfung notwendigen, konvexen Probekörper aufzubringen. Des Weiteren besteht aufgrund der Poliereinrichtung die Notwendigkeit eine konstante Dicke aller Probekörper zu gewährleisten, um ein „Hüpfen“ des vollgummibereiften Polierrades auf den einzelnen Proben zu unterbinden.

Als Prüffraktion wurde die bereits für die erste Phase der gegenständlichen Reihenuntersuchung ausgesiebte Kornklasse 0,63/1,0 mm verwendet. Die Festlegung auf die Fraktion 0,63/1,0 mm erfolgte abweichend von der in der TP Gestein-StB – Teil 5.4.3 [FGSV, 2008] genannten Fraktion 0,71/1,0 mm, um einen direkten Vergleich mit den Sandpolierwerten, ermittelt mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze, zu erhalten.

Für die Herstellung der Rohkörper sind in einem ersten Schritt die – auch für die Herstellung von Splittprobekörpern benötigten – metallischen Schalkkörper mit einem Trennmittel zu bestreichen. Anschließend wird eine zuvor gemäß Herstellerangaben im richtigen Mischungsverhältnis angerührte 2-Komponenten Spachtelmasse bis zum Überlaufen in die Schalkkörper eingefüllt. Bevor die Spachtelmasse zu Erhärten beginnt, wird auf den Schalkkörper ein passender Deckel aufgesetzt und mit einer Schraubzwinde fest auf den Schalkkörper aufgespresst. Die dabei herausquellende Spachtelmasse ist mit einer Spatel abzutrennen. Nach einer kurzen Aushärtezeit wird die Schraubzwinde gelöst und der noch nicht erhärtete Rohkörper dem Schalkkörper entnommen. Bis zur vollständigen Erhärtung ist der Rohkörper nochmals in einem sauberen Schalkkörper ohne Seitenteile jedoch mit Schaldeckelaufsatz einzuspannen. Sind

die Rohkörper ausgehärtet, werden sie auf der Unterseite gemäß ÖNORM EN 1097-8 [ON, 2009], Abschnitt 10.2, fortlaufend von Nummer 1 bis 14 beschriftet.

Die Rohkörper sind in weiterer Folge mit einem Gemisch aus einem 2-Komponenten Epoxidharz und Quarzmehl mit einem Borstenpinsel ca. 1 mm dick zu bestreichen. Die Zugabe des Quarzmehls zum Klebstoff ist notwendig, um ein Zerlaufen des Klebstoffes auf den Probekörpern zu verhindern. Der Sand wird anschließend ähnlich der Sandprobekörperherstellung für das Verfahren nach Wehner/Schulze auf den Rohkörper eingerieselt. Dazu wird ein Analysensieb mit einer Öffnungsweite von 1,0 mm verwendet. Das Sieb wird ca. 20 cm über dem Rohkörper gehalten und mit leichtem Klopfen der Sand zum Herunterfallen gebracht.

Es ist wichtig, dass der Sand gleichmäßig auf den Rohkörper aufgebracht wird. Um eine einheitliche Dicke zu erhalten, wird mit einer Walze ganz leicht über die Oberfläche gerollt. Zur Gewährleistung einer über die Breite ebenen Probenoberfläche sind zwei Rohkörper gleichzeitig mit der Walze zu überrollen. Der Einriesel- und Einwalzvorgang ist mindestens zweimal zu wiederholen.

Die Seiten der Probekörper sind in einem weiteren Arbeitsschritt von überschüssigem Klebstoff mittels einer Spatel zu befreien. Die mit Sand bestreuten Probekörper werden abschließend aneinandergereiht und die Dicke mehrerer Probekörper durch nochmaliges Überrollen mit einer Gummiwalze angeglichen. Wichtig ist hierbei, dass die Dicke der aufgetragenen Sandschicht über die ganze Länge der Wölbung der Probekörper konstant ist, da ansonsten der ordnungsgemäße Einbau der Probekörper auf dem Straßenrad und die Einhaltung der richtigen Reiblänge bei der Pendelmessung nicht gewährleistet ist.

Nach ca. 12 Stunden ist das Quarzmehl/Klebstoffgemisch vollständig erhärtet und der überschüssige Sand auf der Probenoberseite kann durch vorsichtiges Klopfen der Probekörper gegen eine Tischplatte entfernt werden.

Eine Bilddokumentation der gesamten Probekörperherstellung – von der Herstellung der Rohkörper bis zum Abgleichen der fertigen Probekörperhöhe – ist in Abb. 5-13 dargestellt. Die im Rahmen der gegenständlichen Arbeit verfasste Herstellungsanweisung mit detaillierter Beschreibung der benötigten Klebstoffmengen wurde bereits in der Arbeit von KIRCHMAIER et al. [2010] publiziert.



Abb. 5-13: Bilddokumentation der Sandprobekörperherstellung für die Anwendung in der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät

Je Prüfmaterial sind insgesamt vier Einzelmessproben herzustellen. Die fertigen Prüfkörper sind abschließend auf einer Längsseite zu markieren und werden dann gemäß der in der ÖNORM EN 1097-8, Abschnitt 10.2, angegebenen Reihenfolge für die Prüfdurchführung auf das Straßenrad montiert. Eventuell vorhandene Zwischenräume sind mit geeigneten Füllstücken, die bündig mit den übrigen Probekörpern abschließen, auszugleichen.

Es können keine Splitt- und Sandprobekörper gleichzeitig geprüft werden, da die Höhe der Probekörper variiert. Dies hätte zur Folge, dass das vollgummibereifte Polierrad nicht gleichmäßig über die Probekörper rollt und somit keine konstante Poliereinwirkung aufbringt.

5.4.2 Prüfdurchführung

Die Poliersimulation inklusive anschließender Polierwertbestimmung mit der Pendelmessung entspricht den Festlegungen in der ÖNORM EN 1097-8 [ON, 2009] für die Splittpolierprüfung, wobei für das gegenständliche Forschungsprojekt die Zufuhrate des groben Naturkorunds mit 27 g/min und die zugehörige Zuflussrate des Wassers mit 30 ml/min festgelegt wurde. Die Zufuhrate des feinen Naturkorunds wurde mit 3 g/min und die zugehörige Zuflussrate des Wassers mit ~6 ml/min festgelegt.

Je Probekörper werden fünf Pendelmessungen durchgeführt. Vor jeder Pendelmessung ist der Sandprobekörper mit klarem Wasser anzunässen. Die Ablesung des Pendelwertes erfolgt auf der F-Skala. Der Prüfwert einer Einzelprobe ermittelt sich aus dem Mittelwert der letzten drei Pendelwerte. Der Polierwert von feinen Gesteinskörnungen (PSV_{fGK}) wird anschließend aus den Prüfwerten von vier Einzelmessproben ohne Einführung eines Korrekturfaktors mittels Referenzgestein ermittelt.

5.4.3 Ergebnisse der Bestimmung des PSV_{fGK}

Von den elf Sanden wurden jeweils acht Probekörper gemäß Kapitel 5.4.1 hergestellt und der zuvor beschriebenen Prüfung unterzogen. Somit wurde für jedes Gesteinsmaterial eine Doppelbestimmung mit je vier Einzelmessproben ($n = 8$) durchgeführt.

In Tab. 5.6 sind die Ergebnisse der Polierwertbestimmungen von Sand mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät zusammengestellt.

Tab. 5.6: Ergebnisse der Bestimmung des PSV_{fGK} mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät

Gestein	G201	G202	G203	G204	G205	G206
Mittelwert PSV_{fGK} [-]	66	62	64	63	59	52
Standardabweichung σ_x [-]	1,6	2,1	2	1,4	2,4	1,6
Rel. Mittelwertabweichung δ_x [%]	1,9	2,8	2,4	1,9	3,1	2,3
Spannweite w [-]	5,2	5,7	6,2	3,5	6,7	5,0
Gestein	G207	G208	G209	G210	G211	
Mittelwert PSV_{fGK} [-]	62	58	57	62	54	
Standardabweichung σ_x [-]	1,7	1,3	1,6	1,4	1,2	
Rel. Mittelwertabweichung δ_x [%]	2,3	1,6	2,0	1,8	1,9	
Spannweite w [-]	4,7	4,5	5,0	3,3	3,3	

Die in Tab. 5.6 angegebene Spannweite (w) bezieht sich auf das minimale und maximale Einzelmessergebnis der acht Proben eines Sandes.

Den höchsten Sandpolierwert ermittelt mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät weist das Gestein G201 mit $PSV_{fGK} = 66$ [-] auf. Die zugehörige Standardabweichung (σ_x) beträgt 1,6 [-].

Der niedrigste PSV_{fGK} -Wert wurde für das Gestein G206 mit $PSV_{fGK} = 52$ und einer zugehörigen Standardabweichung der Einzelmessergebnisse von ebenfalls $\sigma_x = 1,6$ [-] ermittelt. Daraus ergibt sich eine Spreizung zwischen minimalem und maximalem Polierwert von Sand von 14 PSV_{fGK} -Einheiten.

Die vorhandene mittlere Standardabweichung (σ_x) der elf Polierwertbestimmungen beträgt:

$$\sigma_{x,mittel} = 1,7 \text{ [-]}$$

Die größte Spannweite zwischen maximalem und minimalem Einzelmessergebnis eines Gesteines trat bei G205 mit $w = 6,7$ [-] auf. Im Mittel weist die vorhandene maximale Spannweite von acht Einzelmessergebnissen einen Wert von $w = 4,8$ [-] auf.

Für die durchgeführten Sandpolierprüfungen mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät sind die ermittelten PSV_{fGK} -Werte in Abb. 5-14 in Form eines Histogramms mit Kennzeichnung der Standardabweichung dargestellt.

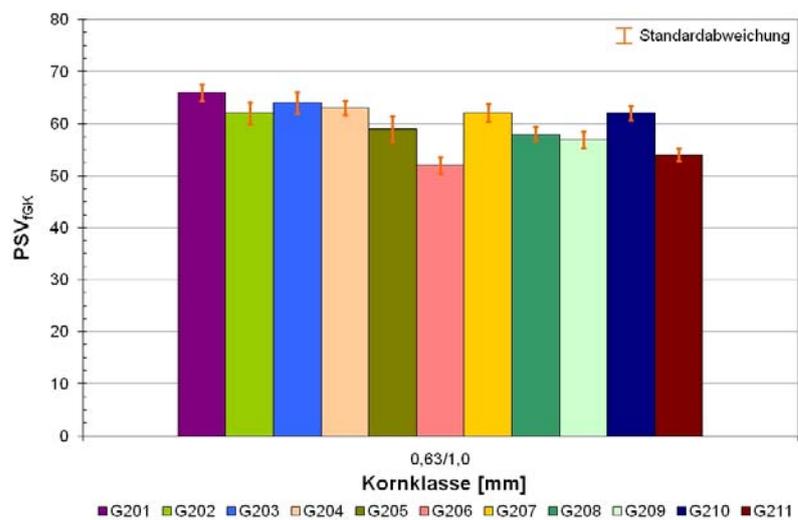


Abb. 5-14: Ergebnisse der Bestimmung des PSV_{fGK} an elf Sanden - Histogramm

Für die fünf Gesteine G202 bis G204 sowie G207 und G210 wurde ein PSV_{fGK} mit ähnlich hohem Niveau ermittelt, wobei die zwei Gesteine G202 und G203 eine zugehörige Standardabweichung der Einzelmessergebnisse von über 2,0 PSV_{fGK} -Einheiten aufweisen.

5.5 Phase 3 – Bestimmung des PWS von Splitt

Wie der von der ASPHALTA in den Jahren 2008/2009 durchgeführte Ringversuch zur Bestimmung des Polierwertes von Splitt mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze zeigte (vgl. LINDNER et al., 2009), ist diese Prüfung noch nicht sehr gebräuchlich. Dennoch besteht auf europäischer Ebene grundsätzlich die Absicht, das Prüfverfahren nach Wehner/Schulze für die Bestimmung des Polierwertes von Gesteinskörnungen – und hier evt. als Alternative zum Verfahren mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät – in die Normung aufzunehmen. Der Forschungsbereich für Straßenwesen der TU Wien beschäftigt sich deshalb seit drei Jahren mit der Durchführung der Polierwertbestimmung von Splitten mit dem Prüfgerät nach Wehner/Schulze und führte abseits von dem eingangs erwähnten Ringversuch bereits zahlreiche Tests durch.

5.5.1 Prüfdurchführung

Die Splitte der Korngruppe 8/11 mm, wurden vom Gestein produzierenden Betrieb als Standardlieferkornung bereitgestellt. Lediglich das Gestein mit der laufenden Prüfnummer G207 war vom Werk aus einer Halde mit der Korngruppe 0/16 mm entnommen und zu der Korngruppe 8/11 mm aufbereitet worden. Die Splitte wurden dem Labor im Frühjahr 2008 und somit rund ein halbes Jahr später als die Sande geliefert. Somit ist nicht gewährleistet, dass die Splitte und Sande aus demselben Abschlag stammen.

Das Aufbereiten der Splitte erfolgte nach den Anweisungen der EN 1097-8 [ON, 2009]. Gemäß dieser Prüfvorschrift ist von der Korngruppe 8/11 mm die grobe Gesteinsfraktion 7,2/10 mm aufzubereiten. Die Bestimmung des PWS erfolgte an der Fraktion 7,2/10 mm, um einen direkten Vergleich mit den in Phase 4 durchgeführten Splittpolierprüfungen mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät zu ermöglichen.

Für die Herstellung der Probekörper wurde das Mosaikauslegeverfahren – beschrieben in Abschnitt 3.1.3.2 – ausgewählt. Als Grund hierfür sei die aus dem Ringversuch der ASPHALTA bestimmte etwas bessere Präzision gegenüber dem Mastix-Eingussverfahren und die Ähnlichkeit der Beschaffenheit der Probekörper mit jenen des Verfahrens nach EN 1097-8 erwähnt.

Von jeder Gesteinskörnung wurden insgesamt zwei Einzelmessproben hergestellt und anschließend mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze einer Prüfung gemäß der in Kapitel 3.1.5 erläuterten Prüfroutine unterzogen. Da die Abnutzung der Prüfummis auf den Splittoberflächen sehr gering ist und keinerlei Schäden, wie z.B. Rillen- oder Abriebskeilbildung, erkennbar waren, wurde für die Prüfung aller Gesteine derselbe Prüfummisatz verwendet. Die im nachfolgenden Kapitel angeführten Prüfergebnisse wurden als Mittelwert der zwei Einzelmessergebnisse berechnet.

5.5.2 Ergebnisse der Bestimmung des PWS von Splitt

In Tab. 5.8 sind die Ergebnisse der Bestimmung des PWS an den Splitten der elf Gesteine G201 bis G211 zusammengestellt. Neben dem ermittelten PWS wird zusätzlich die Spannweite (w) zwischen den zwei Einzelmessproben angegeben.

Den höchsten Polierwert weist das Gestein G205 mit einem $PWS_{7,2/10,0}$ von 0,414 [-] auf. Die zugehörige Spannweite (w) zwischen den zwei Einzelmessproben beträgt 0,006 PWS-Einheiten.

Tab. 5.7: Ergebnisse der Bestimmung des PWS von Splitt der Fraktion 7,2/10,0 mm

Gestein	G201	G202	G203	G204	G205	G206
Mittelwert $PWS_{7,2/10,0}$ [-]	0,345	0,302	0,383	0,329	0,414	0,209
Spannweite w [-]	0,024	0,042	0,030	0,016	0,006	0,013

Gestein	G207	G208	G209	G210	G211
Mittelwert $PWS_{7,2/10,0}$ [-]	0,321	0,278	0,325	0,334	0,186
Spannweite w [-]	0,025	0,021	0,001	0,007	0,016

Der niedrigste Polierwert wurde beim Gestein G211 mit $PWS_{7,2/10,0} = 0,186$ mit einer vorhandenen Spannweite (w) zwischen den zwei Einzelmessergebnissen von 0,016 PWS-Einheiten ermittelt. Daraus ergibt sich eine Spreizung zwischen höchstem und niedrigstem Polierwert der elf geprüften Splitte von 0,228 PWS-Einheiten.

Generell weichen die Prüfwerte der zwei Einzelmessproben eines Gesteins nur geringfügig voneinander ab. Beim Gestein G209 betrug die Differenz der beiden Einzelmessergebnisse lediglich 0,001 PWS-Einheiten. Bei den zwei Gesteinen G202 und G203 trat jedoch eine relativ hohe Spannweite (w) von 0,042 bzw. 0,030 PWS-Einheiten auf. Die vorhandene mittlere Spannweite (w_{mittel}) beträgt für die elf $PWS_{7,2/10,0}$ -Bestimmungen 0,018 PWS-Einheiten.

Für die durchgeführten Splittpolierprüfungen mit dem Prüfgerät nach Wehner/Schulze sind die ermittelten $PWS_{7,2/10,0}$ -Werte in Abb. 5-15 in Form eines Histogramms dargestellt.

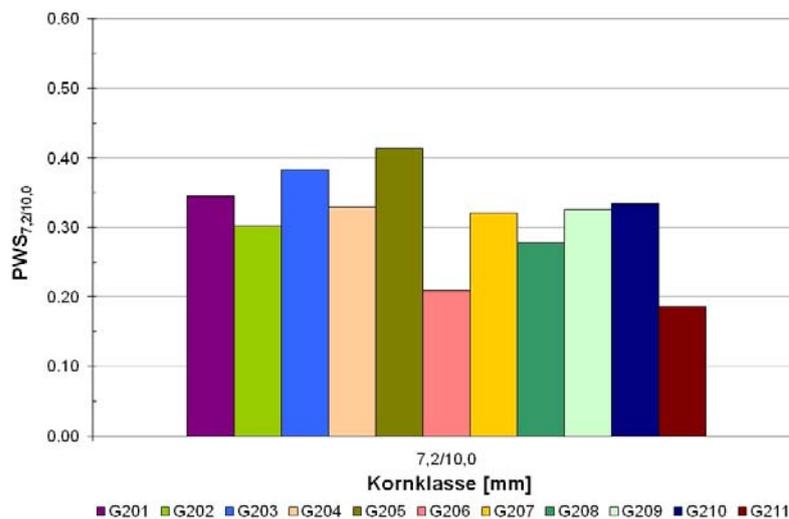


Abb. 5-15: Ergebnisse der Bestimmung des $PWS_{7,2/10,0}$ an elf Splitten - Histogramm

5.6 Phase 4 – Bestimmung des PSV gemäß EN 1097-8

Das derzeit normativ in Österreich bzw. in den europäischen Normen festgelegte Verfahren zur Bestimmung des Polierwiderstandes von Gesteinskörnungen ist das Verfahren mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät zur Bestimmung des PSV gemäß EN 1097-8 [ON, 2009]. Die Ermittlung des PSV (Polished Stone Value) erfolgt dabei an der Korngruppe 8/11 mm, vgl. Kapitel 3.2.

5.6.1 Prüfdurchführung

Für die Prüfung wurden die Splitte aus demselben Aufbereitungsprozess verwendet, die auch bei der Polierwertbestimmung mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze verwendet wurden. Die Durchführung der Bestimmung des PSV mit der Schnellpoliermaschine und anschließender Pendelprüfung erfolgte nach den Anweisungen der EN 1097-8 [ON, 2009]. Gemäß dieser Prüfvorschrift wurden zwei komplette Prüfdurchgänge mit je zwei Probekörpern pro zu prüfendem Gestein durchgeführt. Als PSV-Kontrollgestein diente ein im Labor gelagerter Quarzdolerit⁷² vom TRL⁷³ in Großbritannien.

5.6.2 Ergebnisse der Bestimmung des PSV im Labor

In Tab. 5.8 sind die Ergebnisse der Bestimmung des PSV der elf Gesteine G201 bis G211 zusammengestellt. Neben dem ermittelten PSV werden die vorhandene Standardabweichung (σ_x) der vier Einzelmessproben, die relative Mittelwertabweichung ($\delta\bar{x}$) sowie die Spannweite (w) zwischen minimaler und maximaler Einzelmessprobe angegeben. Zusätzlich wird die mittlere Splittkornanzahl eines Prüfkörpers je Gesteinsmaterial angegeben. Die verwendete Kornanzahl ist abhängig von der Aufbereitung bzw. der Größe der Splittkörner, weswegen in der EN 1097-8 eine Toleranz für die zu verwendende Kornanzahl vorgesehen ist.

Den höchsten PSV weist das Gestein G203 mit einem PSV von 53 [-] auf. Die zugehörige Standardabweichung (σ_x) beträgt 1,8 [-].

Der niedrigste PSV wurde beim Gestein G211 mit PSV = 40 und einer zugehörigen Standardabweichung der Messergebnisse von $\sigma_x = 2,9$ [-] ermittelt. Daraus ergibt sich eine Spreizung der Messergebnisse von 13 PSV-Einheiten für die geprüften elf Splitte.

Die vorhandene mittlere Standardabweichung ($\sigma_{x,mittel}$) beträgt für die elf PSV-Wert-Bestimmungen 1,6 [-] PSV-Einheiten.

Bei keinem der insgesamt 44 Splittprobekörper wurde die minimale Kornanzahl von 36 unterschritten. Aufgrund der Kornform konnten bei den beiden Gesteinen G204 und G208 mit im Mittel 37 Körnern die wenigsten Splittkörner je Messprobe eingebaut werden.

⁷² Dabei handelt es sich um ein Ergussgestein, das als Zwischenglied zwischen Basalt und Gabbro fungiert. Die Bezeichnung Dolerit ist heute nicht mehr gebräuchlich. Früher wurden damit grobkörnige basaltische Gesteine bezeichnet, heute versteht man darunter Alkali-Olivin-Basalte bzw. wenn viel Quarz vorhanden ist Alkali-Quarz-Basalte. Dieses Kontrollgestein weist einen mittleren PSV im Bereich von 50 bis 60 auf.

⁷³ TRL = Transport Research Laboratory in Crowthorne, Großbritannien. www.trl.co.uk
Der Vorrat an Quarzdolerit am TRL ist jedoch erschöpft, weswegen in europäischen Ringversuchen bereits die Verwendung von alternativem Kontrollgestein getestet wurde. Vergleiche dazu BALD et al. [2010]

Die größte Spannweite zwischen maximalem und minimalem Einzelmessergebnis eines Gesteines trat beim Gestein G211 mit $w = 6,3$ [-] auf. Im Mittel weist die vorhandene Spannweite von vier Einzelmessergebnissen einen Wert von $w = 3,6$ [-] auf.

Tab. 5.8: Ergebnisse für den PSV der elf Splitte

<i>Gestein</i>	<i>G201</i>	<i>G202</i>	<i>G203</i>	<i>G204</i>	<i>G205</i>	<i>G206</i>
Mittelwert PSV [-]	49	47	53	48	51	41
Standardabweichung σ_x [-]	1,4	1,5	1,8	2,5	0,7	2,7
Rel. Mittelwertabweichung $\delta_{\bar{x}}$ [%]	2,0	2,6	2,8	3,6	1,0	5,3
Spannweite w [-]	3,3	3,3	3,7	5,7	1,7	6,0
Mittlere Kornanzahl der Probekörper	40	42	38	37	39	38

<i>Gestein</i>	<i>G207</i>	<i>G208</i>	<i>G209</i>	<i>G210</i>	<i>G211</i>
Mittelwert PSV [-]	47	46	52	49	40
Standardabweichung σ_x [-]	1,2	0,7	1,0	1,5	2,9
Rel. Mittelwertabweichung $\delta_{\bar{x}}$ [%]	2,1	1,3	1,4	2,2	5,7
Spannweite w [-]	2,7	1,3	2,3	3,7	6,3
Mittlere Kornanzahl der Probekörper	40	37	40	39	41

In der RVS 08.97.05 – „Anforderungen an Asphaltmischgut“ [FSV, 2007] ist an die Gesteinsklasse G1 für den Einsatz in Deckschichten ein minimaler PSV-Wert von 50 gefordert. Ebenso wird in der RVS 08.17.02 von Gesteinskörnungen für die Verwendung im Oberbeton ein PSV-Wert von 50, bestimmt an der Korngruppe 8/11 mm, gefordert. Für die drei Gesteine G203, G205 sowie G209 wurde ein $PSV > 50$ ermittelt. Somit entsprechen aufgrund der hier durchgeführten Untersuchungen lediglich diese Gesteine der Anforderung an Gesteinsmaterial der Klasse G1 hinsichtlich ihres Polierwiderstandes für den Einsatz in Asphaltdeckschichten beziehungsweise im Oberbeton.

Berücksichtigt man jedoch die in der Prüfnorm ÖNORM EN 1097-8 [ON, 2009] angegebene Vergleichspräzision von $R = 5$ und erhöht die in der Reihenuntersuchung ermittelten PSV-Werte um 2,5 PSV-Einheiten (entspricht der halben Spannweite der Vergleichspräzision), so entsprechen inklusive Rundung auf die nächste ganze Zahl insgesamt acht der elf untersuchten Gesteine den Anforderungen gemäß RVS 08.97.05 bzw. RVS 08.17.02.

Für die durchgeführten Splittpolierprüfungen sind die ermittelten PSV-Werte in Abb. 5-16 mit Kennzeichnung der Standardabweichung sowie des in der ÖNORM EN 1097-8:2009 angegebenen Vertrauensbereiches von $\pm 2,5$ PSV-Einheiten für den PSV_{50} dargestellt.

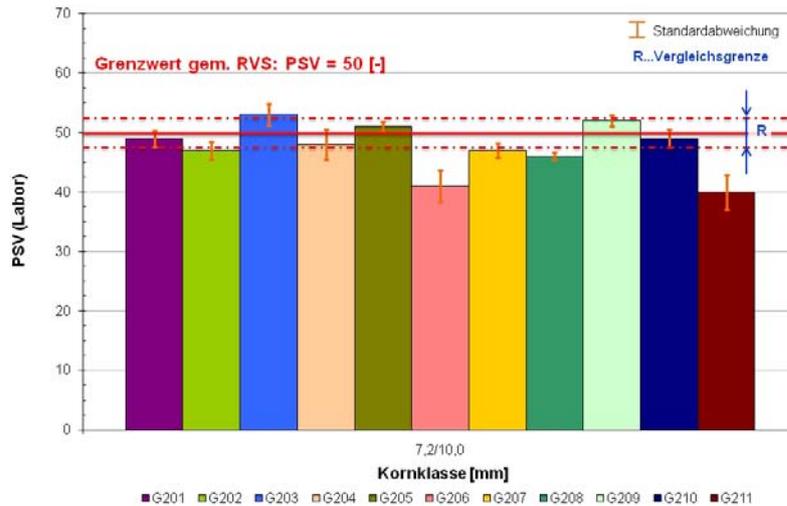


Abb. 5-16: Ergebnisse der PSV-Bestimmung im Labor - Histogramm mit Kennzeichnung der Vergleichsgrenze (R) gemäß EN 1097-8 [ON, 2009]

5.6.3 Vergleich des PSV mit den Angaben in der Güteschutzliste

Das Prüfverfahren mit der Schnellpoliermaschine beinhaltet viele Verfahrensschritte, welche zum Teil einen großen Einfluss auf die Messergebnisse haben können. Dazu gehört einerseits die aufgebrachte Polierwirkung (Zugabe des Poliermittels sowie der aufgebrachte Anpressdruck des Gummirades), andererseits auch die Probekörperherstellung. Es ist bekannt, dass durch die Herstellung der Probekörper der resultierende PSV-Wert maßgebend beeinflusst werden kann.

Zur Verifizierung der in der gegenständlichen Reihenuntersuchung ermittelten PSV-Werte und der normgerechten Durchführung der Polierprüfung gemäß EN 1097-8 [ON, 2009] wurden die Resultate der PSV-Bestimmung den in der Güteschutzliste des Güteschutzverbandes der Österreichischen Kies-, Splitt- und Schotterwerke [GSV, 2010] angegebenen PSV-Werten gegenübergestellt, siehe Tab. 5.9. Zusätzlich wird die Differenz zwischen PSV-Labor und PSV-Güteschutzliste angegeben. Grüne Werte bedeuten, dass der im Labor ermittelte PSV höher als der in der Güteschutzliste angegebene PSV ist und rote Werte zeigen, dass der PSV-Labor niedriger als der PSV gemäß Herstellererklärung ist. Da für das Gestein G207 kein PSV in der Güteschutzliste angegeben wird, konnte kein Vergleich zu dem im Labor ermittelten PSV-Wert gezogen werden. Für das Gestein G209 wird in der aktuellen Güteschutzliste aus dem Jahre 2010 auch kein PSV-Wert angegeben. Für Vergleichszwecke wurde daher der in der Güteschutzliste vom Jahr 2008 angegebene PSV für das Gestein G209 herangezogen. Für das Gestein G202 sowie G206 wurde im Labor ein um 3 PSV-Punkte niedrigerer Polierwert ermittelt als für diese Gesteine in der Güteschutzliste angegeben wird. Für die Gesteinskörnung G208 wurde jedoch im Labor ein um 3 PSV-Punkte höherer Polierwert ermittelt, als in der Güteschutzliste angeführt. Für die beiden Gesteine G201 und G210 wurde im Labor eine geringe Abweichung von -2 PSV-Punkten bestimmt. Für alle anderen Gesteinskörnungen wurde im Labor der in der Güteschutzliste angegebene PSV ± 1 Punkt bestimmt. Da im Labor für die unterschiedlichen Gesteinskörnungen sowohl höhere als auch niedrigere Polierwerte als in der Güteschutzliste angegeben, bestimmt wurden, kann ein systematischer Fehler in der Prüfdurchführung ausgeschlossen werden. Zumal für zwei Gesteinskörnungen im Labor der angegebene PSV genau reproduziert wurde.

Tab. 5.9: Gegenüberstellung PSV (Labor – Güteschutzliste 2010)

Laborcode	Labor	PSV [-]		Anmerkung
		Güteschutzliste	Differenz	
G201	49	51	- 2	
G202	47	50	- 3	
G203	53	54	- 1	
G204	48	48	± 0	
G205	51	50	+ 1	
G206	41	44	- 3	
G207	47	---- ¹⁾	----	aus 0/16 ausgesiebt (Deponie)
G208	46	43	+ 3	
G209	52	50 ²⁾	+ 2	
G210	49	51	- 2	
G211	40	40	± 0	

- 1) Für dieses Gestein wird in der Güteschutzliste kein PSV angegeben
- 2) Für dieses Gestein wird in der Güteschutzliste 2010 kein PSV angegeben, weswegen der in der Güteschutzliste 2008 angegebene PSV für die Vergleichsuntersuchung verwendet wird

Berücksichtigt man die in der ÖNORM EN 1097-8:2009 angegebene Vergleichspräzision $R = 5$ [-] und addiert zum ermittelten PSV eine Toleranz von 2,5 Einheiten, entsprechen von den untersuchten Splitten insgesamt sieben der Herstellererklärung. An dieser Stelle soll festgehalten werden, dass die in der ÖNORM EN 1097-8 angegebene Präzision nach neueren Untersuchungen [AUSTROLAB, 2003 und KALLERT, 2007] in den meisten Fällen nicht eingehalten werden kann.

In Abb. 5-17 sind die im Labor ermittelten PSV-Werte den PSV-Werten der Güteschutzliste mit Kennzeichnung der im Labor ermittelten Standardabweichung (blaue Balken) gegenübergestellt. Rot dargestellt sind die Grenzen für die Vergleichspräzision (R) gemäß ÖNORM. Punkte, die über der diagonalen Linie liegen, kennzeichnen im Labor ermittelte PSV-Werte, die größer als die PSV-Werte gemäß Güteschutzliste sind.

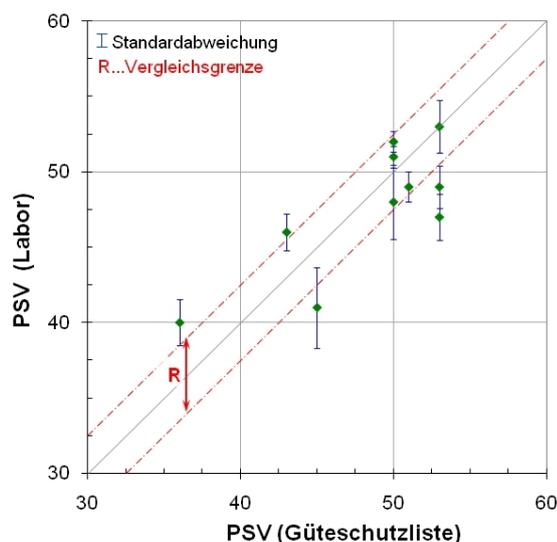


Abb. 5-17: Vergleich PSV Labor - Güteschutzliste

5.7 Korrelationsuntersuchungen der Polierwerte von Sand und Splitt

In diesem Kapitel werden die in den vier Projektphasen ermittelten Polierwerte von elf Sand- und Splittproben zusammengefasst und einander in Form von Korrelationsuntersuchungen gegenübergestellt. Dabei werden bei vorhandenen signifikanten Korrelationen Umrechnungsfunktionen zwischen den betrachteten Polierwerten bzw. Polierverfahren angegeben.

5.7.1 Zusammenfassung der Prüfergebnisse

Im Rahmen der hier durchgeführten Reihenuntersuchung wurde mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze der Polierwert von zwei Sandfraktionen – 0,2/0,4 und 0,63/1,0 mm – sowie von der Splittfraktion 7,2/10,0 mm bestimmt. Der Prüffraktion entsprechend, erfolgt die Bezeichnung der Polierwerte:

- $PWS_{0,2/0,4}$ Fraktion 0,2/0,4 mm ausgesiebt aus Korngruppe 0/2 mm
- $PWS_{0,63/1,0}$ Fraktion 0,63/1,0 mm ausgesiebt aus Korngruppe 0/2 mm
- $PWS_{7,2/10,0}$ Fraktion 7,2/10,0 mm ausgesiebt aus Korngruppe 8/11 mm

Mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät wurde sowohl von der Sandfraktion 0,63/1,0 mm als auch von der Splittfraktion 7,2/10,0 mm ein Polierwert bestimmt. Folgende Bezeichnung wurde für die Polierwerte der beiden Prüfkörnungen gewählt:

- PSV_{FGK} Fraktion 0,63/1,0 mm ausgesiebt aus Korngruppe 0/2 mm
- PSV Fraktion 7,2/10,0 mm ausgesiebt aus Korngruppe 8/11 mm

In der Tab. 5.10 sind für jedes untersuchte Gesteinsmaterial die drei Polierwerte für die feine sowie die zwei Polierwerte für die grobe Gesteinskörnung zusammengefasst angeführt.

Tab. 5.10: Zusammenstellung der ermittelten Polierwerte für grobe und feine Gesteinskörnungen

<i>Gesteinsmaterial</i>		<i>Polierwert Sand [-]</i>			<i>Polierwert Splitt [-]</i>	
<i>Laborcode</i>	<i>Farbcode</i>	$PWS_{0,2/0,4}$	$PWS_{0,63/1,0}$	PSV_{FGK}	$PWS_{7,2/10,0}$	PSV
G201		0,517	0,562	66	0,345	49
G202		0,536	0,585	62	0,302	47
G203		0,534	0,593	64	0,383	53
G204		0,572	0,584	63	0,329	48
G205		0,450	0,499	59	0,414	51
G206		0,352	0,387	52	0,209	41
G207		0,578	0,619	62	0,321	47
G208		0,412	0,436	58	0,278	46
G209		0,357	0,390	57	0,325	52
G210		0,538	0,609	62	0,334	49
G211		0,410	0,400	54	0,186	40

Bei beiden Prüfverfahren wurde absolut betrachtet an den groben Gesteinskörnungen ein niedrigerer Polierwert als an den feinen Gesteinskörnungen bestimmt. Dies ist vor allem auf die Rauheit der Prüfoberfläche von Sandproben zurückzuführen.

Aus der Tab. 5.10 wird ersichtlich, dass das Gestein G206 bei allen drei Sandpolierwertbestimmungen den niedrigsten Polierwert aufweist. Bei den groben Gesteinskörnungen wurde jedoch für das G211 mit beiden Prüfverfahren der niedrigste Polierwert ermittelt. Das Gestein G203 erzielte beim Verfahren zur Bestimmung des PSV den höchsten Prüfwert. Beim Verfahren nach Wehner/Schulze erzielte jedoch die grobe Gesteinskörnung G205 einen etwas höheren Polierwert als das Gestein G203.

An den feinen Gesteinskörnungen wurde bei den Prüfungen mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze für das Gestein G207 der höchste Wert bestimmt, wohingegen bei der Sandpolierwertbestimmung mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät für drei Gesteine (G201, G203 sowie G204) höhere Werte erzielt wurden. Bei der Bestimmung des PSV an der groben Gesteinskörnung wiesen sechs Gesteine (G201, G203 bis G205, G209 und G210) einen höheren Polierwiderstand als an der Sandfraktion auf.

In Tab. 5.11 werden die maximalen und minimalen Prüfwerte einer Polierwertkategorie sowie die dadurch vorhandene Differenz zwischen den Extremwerten – also die Spreizung der Polierwerte – zusammengefasst.

Tab. 5.11: Zusammenstellung der ermittelten Polierwerte für grobe und feine Gesteinskörnungen

<i>Extremwerte</i>	<i>Polierwert Sand [-]</i>			<i>Polierwert Splitt [-]</i>	
	<i>PWS_{0,2/0,4}</i>	<i>PWS_{0,63/1,0}</i>	<i>PSV_{fGK}</i>	<i>PWS_{7,2/10,0}</i>	<i>PSV</i>
Maximaler Prüfwert:	0,578	0,619	66	0,414	53
Minimaler Prüfwert:	0,352	0,387	52	0,186	40
Differenz:	0,226	0,232	14	0,228	13

Die Ergebnisse der Polierwiderstandsermittlung mit der Schnellpoliermaschine ergaben sowohl für den PSV als auch für den PSV_{fGK} annähernd dieselbe Spreizung. So beträgt die Differenz zwischen maximalem und minimalem Polierwert bei den Splitten 13 PSV-Einheiten und bei den Sanden 14 PSV_{fGK} -Einheiten. Absolut gesehen brachten die Ergebnisse für die Polierwiderstandsermittlung mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze eine bessere Differenzierung zwischen gutem und schlechtem Polierwiderstand. So beträgt die Differenz zwischen höchstem und niedrigstem Polierwert bei der Bestimmung des PWS sowohl für die Sandfraktionen als auch für die Splittfraktion in etwa 0,23 PWS-Einheiten.

Zur besseren Einteilung der Mineralstoffe hinsichtlich ihrer Polierresistenz in verschiedene Klassen ist es vor allem unter Einbeziehung der Messungenauigkeit der Prüfverfahren von Bedeutung, eine möglichst große Spreizung der Ergebnisse zu erzielen.

In der nachfolgend angeführten Tab. 5.12 erfolgt eine Auflistung der Polierwerte in den fünf Prüfkategorien $PWS_{0,2/0,4}$, $PWS_{0,63/1,0}$, PSV_{fGK} bestimmt an der Fraktion 0,63/1,0 mm, $PWS_{7,2/10,0}$ sowie PSV bestimmt an der Fraktion 7,2/10 mm. Die elf verschiedenen Gesteine sind dabei für jede durchgeführte Prüfkategorie relativ zum Höchstwert der jeweiligen Kategorie gereiht angeführt.

Für die Polierwertbestimmung von Sanden mit der Schnellpoliermaschine ergibt sich aufgrund des hohen Maximalwertes von 66 PSV_{fGK} -Einheiten eine relative Spreizung von nur ca. 21 %. Basierend auf den erzielten Ergebnissen lässt sich feststellen, dass das Prüfverfahren nach Wehner/Schulze eine deutlich bessere Verteilung der Ergebnisse über eine größere Bandbreite bei gleichzeitig etwas geringerer Prüfstreuung ermöglicht. Vor allem bei der Prüfung der groben Gesteinskörnung ergab sich für das Verfahren nach Wehner/Schulze bedingt durch das generell niedrigere Prüfwertniveau eine sehr hohe Spreizung zwischen dem Maxi-

mal- und Minimalwert. Die relativen Spreizungen der fünf Polierwerte bezogen auf den maximalen Polierwert der jeweiligen Prüfkategorie sind in Abb. 5-18 in Form eines Balkendiagramms dargestellt.

Tab. 5.12: Reihung der Polierwerte (relativ)

Legende	Pos.	Polierwert Sand [-]			Polierwert Splitt [-]		Pos.
		$PWS_{0,2/0,4}$	$PWS_{0,63/1,0}$	PSV_{fGK}	$PWS_{7,2/10,0}$	PSV	
G201	1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	1
G202	2	98,9	98,4	97,0	92,5	98,1	2
G203	3	93,1	95,7	95,5	83,3	96,2	3
G204	4	92,7	94,5	93,9	80,7	92,5	4
G205	5	92,4	94,3	93,9	79,5	92,5	5
G206	6	89,4	90,8	93,9	78,5	90,6	6
G207	7	77,8	80,6	89,4	77,5	88,7	7
G208	8	71,3	70,4	87,9	72,9	88,7	8
G209	9	70,9	64,6	86,4	67,1	86,8	9
G210	10	61,7	63,0	81,8	50,5	77,4	10
G211	11	61,0	62,5	78,8	44,9	75,5	11

In der Tab. 5.12 ist der für das Gestein G207 ermittelte $PWS_{0,2/0,4}$ von 0,578 [-] mit 100 % (Position 1) und der niedrigste PWS dieser Kategorie (G206 mit einem PWS von 0,352 [-]) mit 61 % angegeben (Position 11). Die absolute Abnahme des Sandpolierwertes beträgt dabei 0,226 [-] beziehungsweise 39 %. Im Vergleich dazu wurde für das Gestein G203 in der Prüfkategorie PSV der Höchstwert mit 53 [-] ermittelt und mit 100 % angeführt. Der niedrigste Wert wurde für das Gestein G211 mit einem PSV von 40 [-] bestimmt. Dies entspricht einer absoluten Abnahme von 13 PSV-Einheiten beziehungsweise einer relativen Abnahme von 24,5 %. Die relative Differenz zwischen höchstem und niedrigstem Sandpolierwert, ermittelt mit der Schnellpoliermaschine, beträgt 21,2 %. Der höchste Polierwert der groben Gesteinskörnung ermittelt mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze wurde beim Gestein G205 mit einem $PWS_{7,2/10,0}$ von 0,414 [-] ermittelt. Der niedrigste Polierwert dieser Kategorie wurde beim Gestein G211 mit 0,186 PWS-Einheiten (= - 55 %) festgestellt.

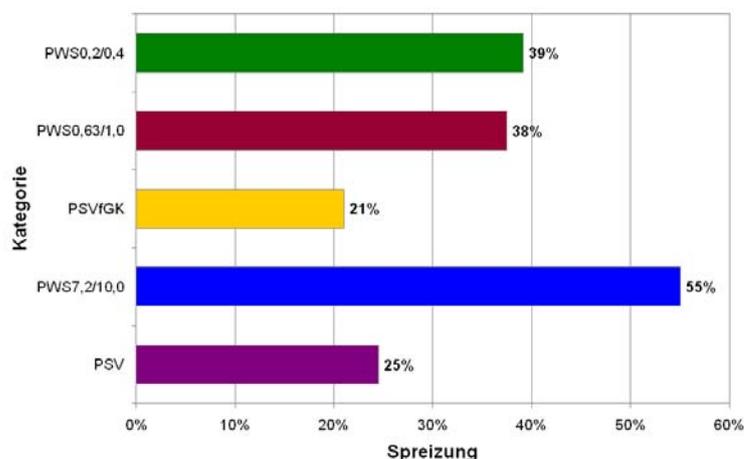


Abb. 5-18: Relative Spreizung innerhalb der fünf Polierwertkategorien

Betrachtet man in Tab. 5.12 nur die drei Prüfkategorien der Polierwiderstandsbestimmung der feinen Gesteinskörnung so wird deutlich, dass die Reihung der Positionen 7 bis 11 nahezu unverändert bleibt. Erst ab einem Niveau des PWS von über 0,500 [-] bzw. des PSV_{FGK} von über 60 [-] beginnt die Reihung der Ergebnisse der zwei unterschiedlichen Polierverfahren an Systematik zu verlieren. Beim Prüfverfahren nach Wehner/Schulze stimmt die Reihung der zwei untersuchten Fraktionen 0,2/0,4 und 0,63/1,0 mm bis auf die zwei Gesteine G204 und G210 gut überein. Hingegen differiert die Reihung der Gesteine bei der Polierwiderstandsbestimmung mit der Schnellpoliermaschine zum Teil erheblich. Vor allem für das Gestein G201 wurde ein überproportional hoher PSV_{FGK} -Wert ermittelt.

Eine graphische Darstellung der relativen Abnahme der Sandpolierwerte in den drei Prüfkategorien aller untersuchten elf Gesteine erfolgt in Abb. 5-19.

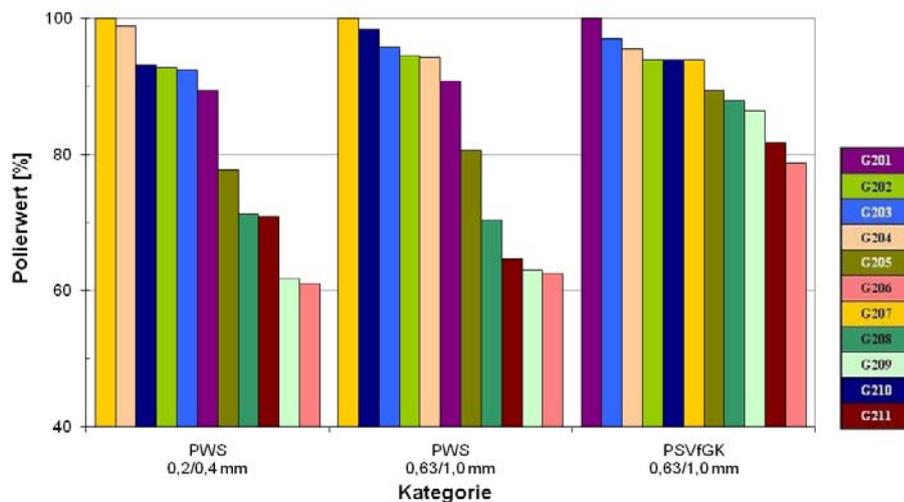


Abb. 5-19: Relative Reihung der Polierwerte der feinen Gesteinskörnung je Prüfkategorie - Histogramm

In Abb. 5-20 ist die relative Reihung der ermittelten zwei Polierwerte für die Splittfraktion 7,2/10,0 mm dargestellt. Vergleicht man die Reihung der Polierwerte der feinen mit denen der groben Gesteinskörnungen, so fällt auf, dass sich lediglich für das Gestein G203 ein annähernd gleich hoher Polierwert ergibt. Für die zwei Gesteine G206 und G211 hingegen wurden in allen fünf Prüfkategorien zumeist die niedrigsten Polierwerte bestimmt.

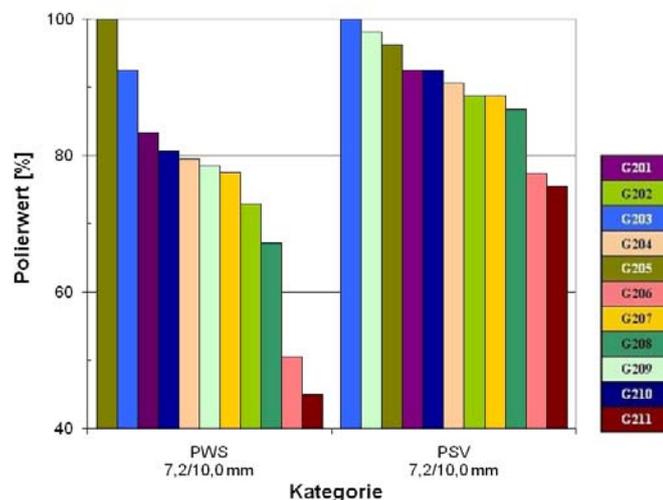


Abb. 5-20: Relative Reihung der Polierwerte der groben Gesteinskörnung je Prüfkategorie - Histogramm

Die größte Abweichung zwischen den Polierwerten der Sand- und Splittpolierprüfungen tritt beim Gestein G209 auf. Für dieses wurde vor allem bei der Bestimmung des PSV mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät ein vielfach höherer Polierwiderstand des Splittes gegenüber dem des Sandes ermittelt. Die zwei Polierwerte PSV und $PWS_{7,2/10,0}$ weichen bei diesem Gestein jedoch auch sehr stark voneinander ab, wodurch die Richtigkeit des ermittelten PSV für das Gestein G209 mit einem Fragezeichen zu versehen ist.

Auch das Gestein mit der Prüfnummer G205 zeigte gegenüber den Sandpolierprüfungen in der Splittfraktion eine höhere Polierresistenz. Insbesondere bei der Polierwertbestimmung mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze wurde mit diesem Gestein der höchste Wert erzielt.

In der Abb. 5-20 wird besonders die sehr große Spreizung der Polierwerte ermittelt mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze deutlich.

5.7.2 Korrelation des PWS von Sand und Splitt

Die Untersuchung bzw. die Bestimmung der Polierresistenz der feinen Gesteinskörnungen ist nur dann wirtschaftlich sowie technisch gerechtfertigt, wenn sich die Polierwerte zwischen den groben und den feinen Gesteinskörnungen auch unterscheiden. Zur Feststellung ob sich die Polierwerte zwischen den beiden Gesteinskörnungen auch bei den hier untersuchten, für den österreichischen Straßenbau repräsentativen, Gesteinsmaterialien tatsächlich unterscheiden, werden in diesem Kapitel die mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze ermittelten Polierwerte miteinander verglichen.

In Abb. 5-21 ist der PWS der groben Gesteinskörnung ($PWS_{7,2/10,0}$) dem PWS der Sandfraktion 0,2/0,4 mm (links) sowie dem PWS der Sandfraktion 0,63/1,0 mm (rechts) in Form von korrespondierenden Datenpunkten gegenübergestellt. In den Punktdiagrammen sind die Standardabweichungen der Sandpolierwertbestimmungen in Form von blauen Querbalken gekennzeichnet.

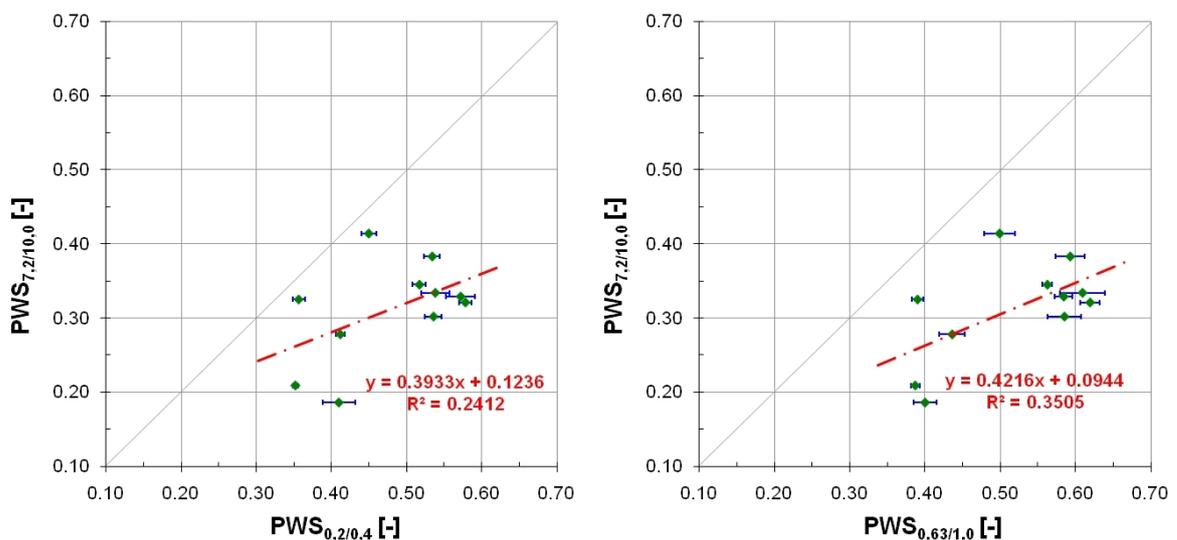


Abb. 5-21: Korrelation des $PWS_{7,2/10,0}$ mit dem $PWS_{0,2/0,4}$ (links) und dem $PWS_{0,63/1,0}$ (rechts)

Generell weisen die Polierwerte ermittelt an der Sandfraktion einen absolut betrachtet höheren Wert auf als die Polierwerte der dem Gestein zugehörigen Splittfraktion 7,2/10,0 mm. Die Spannweite zwischen dem höchsten und niedrigsten Polierwert der geprüften Fraktion ist jedoch sowohl für die feine als auch für die grobe Gesteinskörnung mit ca. 0,23 PWS-Einheiten ident.

Wie aus den Abbildungen hervorgeht, ergab die durchgeführte Korrelationsanalyse mittels Berechnung einer linearen Regressionsgeraden keinen signifikanten Zusammenhang. Erkennbar durch das sehr niedrige Bestimmtheitsmaß R^2 . Beide Regressionsgleichungen weisen eine Unsicherheit von $> 60\%$ auf, wobei die Regression zwischen dem $PWS_{7,2/10,0}$ und dem $PWS_{0,63/1,0}$ geringfügig besser als zwischen dem $PWS_{7,2/10,0}$ und dem $PWS_{0,2/0,4}$ ist. Vor allem zwei Gesteine sind dafür verantwortlich. Zum einen das Gestein G205, welches den höchsten Polierwert in der Fraktion 7,2/10,0 mm erzielte, zum anderen das Gestein G211, für welches mit der groben Gesteinskörnung der niedrigste Polierwert ermittelt wurde.

Durch die vorhandenen Resultate der Wehner/Schulze-Polierprüfung kann jedenfalls bestätigt werden, dass sich das Polierverhalten von feinen und groben Gesteinskörnungen zum Teil signifikant voneinander unterscheiden kann. Somit sind separate Anforderungen an die Polierresistenz von Sanden und Splitten erforderlich.

5.7.3 Korrelation PSV_{fGK} und PSV

Wie schon im Kapitel zuvor erwähnt, muss zur Einführung einer neuen Gesteinsanforderung auch deren Zulässigkeit anhand von Untersuchungen bestätigt werden. Vor allem für die Industrie bedeutet die zusätzliche Bestimmung des Polierwertes der Sandfraktion einen Mehraufwand. In diesem Kapitel werden die mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät ermittelten Polierwerte der feinen und groben Gesteinskörnungen miteinander verglichen. Mit diesem Vergleich kann zusätzlich die zuvor aufgrund der Wehner/Schulze Polierprüfungen festgestellte Forderung nach einem eigenen Sandpolierwert validiert werden.

Im Vergleich zur Prüfung des Polierwiderstandes mit der Schnellpoliermaschine an groben Gesteinskörnungen ist die ermittelte Messungenauigkeit bei der Bestimmung des PSV_{fGK} geringfügig höher. Allerdings muss hier berücksichtigt werden, dass zur Ermittlung der Messungenauigkeit bei der Bestimmung des PSV_{fGK} insgesamt acht und somit vier Probekörper mehr als bei der Splittpolierwiderstandsbestimmung herangezogen wurden.

Wie bereits im Kapitel 5.7.1 festgestellt wurde, zeigte sich für ein paar Gesteinsarten zwischen der groben und feinen Gesteinskörnung ein unterschiedliches Polierverhalten. Aufgrund dieser Abweichungen ist ein Zusammenhang zwischen den Sand- und Splittpolierwerten ermittelt mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät statistisch nicht belegbar.

Der mittels linearer Regressionsrechnung berechnete Zusammenhang stellt sich gemäß Formel (5.6) folgendermaßen dar.

$$PSV_{fGK} = 0,691 \cdot PSV + 27,07 [-] \quad (5.6)$$

In Abb. 5-22 sind die im Labor ermittelten PSV -Werte den PSV_{fGK} -Werten mit Angabe der Standardabweichung – blau markiert – gegenübergestellt. In dieser Abbildung liegen alle korrespondierenden Datenpunkte oberhalb der diagonalen Linie. Das heißt, absolut gesehen sind die ermittelten Polierwerte der Sande höher als jene der zugehörigen Splitte. Dies ist vor allem auf die rauere Oberfläche der Prüfkörper zurückzuführen.

Die Regression basiert auf elf Datensätze ($n = 11$). Aufgrund des schlechten Bestimmtheitsmaßes $R^2 = 0,43$ der Regression muss, wie im Kapitel zuvor, auch hier festgestellt werden, dass der Polierwiderstand der Splittfraktion mit dem Polierwiderstand der Sandfraktion nicht korreliert.

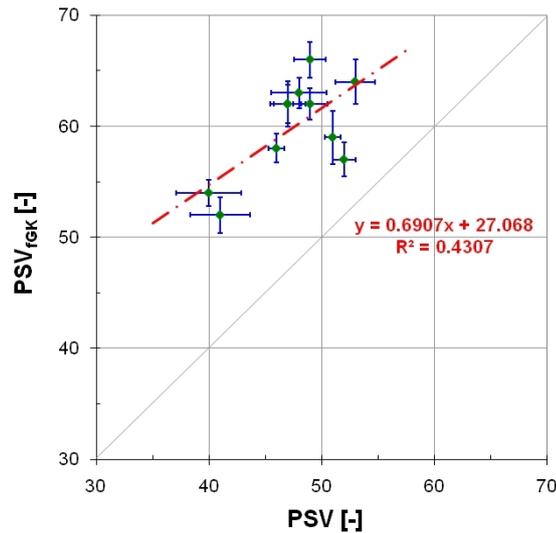


Abb. 5-22: Korrelation PSV - PSV_{FGK}

Für das Gestein G205 wurde mit der groben Gesteinskörnung ein, relativ zu den anderen Gesteinen, viel höherer Polierwert als mit der feinen Gesteinskörnung ermittelt. Umgekehrt zeigten aber auch Gesteine in der Sandfraktion eine wesentlich höhere Polierresistenz als in der Splittfraktion. Daraus bestätigt sich, dass die Sande einen vom Polierwiderstand des zugehörigen Splittes unabhängigen Einfluss auf die Griffigkeitseigenschaften einer Fahrbahndeckenschicht besitzen und somit gesonderte Prüfungen des Polierwiderstandes von Sanden notwendig sind.

Aufgrund der in Formel (5.6) dargestellten Korrelationsanalyse können die Ergebnisse der an der TU München durchgeführten Untersuchungen nicht bestätigt werden. In der Arbeit von WÖRNER, et al. [2006] wurde zwischen den PSV- und den PSV_{FGK}-Werten (ermittelt dabei jedoch an der Fraktion 0,71/1,0 mm) ein statistisch signifikanter Zusammenhang in der Form:

$$PSV_{FGK} = 0,658 \cdot PSV + 31,0 \text{ [-]} \quad (5.7)$$

festgestellt.

Die Umrechnung vom PSV auf den PSV_{FGK} ähnelt dabei stark dem, im Zuge dieser Reihenuntersuchung ermitteltem Zusammenhang – vgl. Formel (5.6). Die leichte Abweichung in der Berechnung lässt sich durch den unterschiedlichen Einsatz des Poliermittels während der Polierprüfung und der etwas anderen Prüffraktion erklären. Jedoch konnte für die in der Arbeit von WÖRNER, et al. [2006] durchgeführten Untersuchungen an zwölf Gesteinen (n = 12) ein Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,84 ermittelt werden. Diese Güte der Regression wurde in der gegenständlichen Arbeit nicht erreicht.

5.7.4 Korrelation PWS von Splitt und PSV

Das Verfahren zur Bestimmung des Polierwertes von Gesteinskörnungen mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze ist bisher vor allem auf die Prüfung der feinen Gesteinskörnungen beschränkt worden. In europäischen Arbeitskreisen wird dieses Prüfverfahren jedoch bereits als mögliche Alternative zur Prüfung des Polierwertes von groben Gesteinskörnungen, also als Alternative zum PSV, diskutiert.

In diesen Diskussionen wird auch die Art und Weise der Probekörperherstellung behandelt. Für die gegenständlichen Untersuchungen wurde trotz der etwas längeren Herstellungsdauer der Probekörper das Mosaikauslegeverfahren verwendet.

Anhand der hier durchgeführten Korrelationsuntersuchungen zwischen dem PSV und dem $PWS_{7,2/10,0}$ der groben Gesteinskörnungen soll geprüft werden, ob ein genereller Zusammenhang zwischen den beiden Prüfverfahren besteht.

In Abb. 5-23 sind die korrespondierenden Datenpunkte der beiden Polierwerte mit Darstellung einer linearen Trendlinie abgebildet. Es zeigt sich, dass der $PWS_{7,2/10,0}$ generell niedriger als der zugehörige PSV ist. Jedoch steigt die Trendlinie sehr stark an, was ein Kennzeichen für die größere Spreizung des PWS gegenüber dem PSV ist.

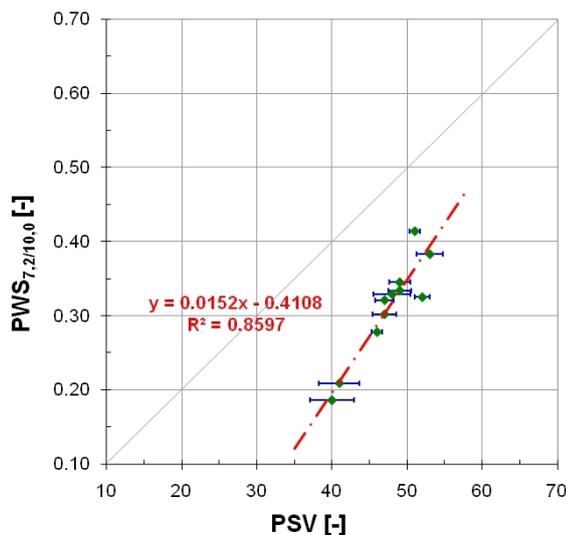


Abb. 5-23: Korrelation des Polierwertes $PWS_{7,2/10,0}$ mit dem PSV

Der Zusammenhang zwischen dem PSV und dem $PWS_{7,2/10,0}$ lautet gemäß Formel

$$PWS_{7,2/10,0} = 0,015 \cdot PSV - 0,411 \quad (5.8)$$

Das zugehörige Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,86$ zeigt, dass die beiden Polierverfahren sehr gut miteinander korrelieren. Aufgrund des hier gezeigten Zusammenhangs zwischen den zwei Polierwertbestimmungen bietet sich jedenfalls das Polierverfahren nach Wehner/Schulze als Alternative zum alten Verfahren mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät an.

5.7.5 Korrelation PWS von Sand und PSV_{fGK}

Das Prüfverfahren nach Wehner/Schulze ist erst seit wenigen Jahren ein auf dem Markt etabliertes Prüfverfahren, weswegen die Verbreitung dieses Prüfgerätes noch sehr gering ist. In Österreich sind zurzeit überhaupt erst zwei Prüfgeräte in Betrieb. Eine Anforderung für den Polierwert der feinen Gesteinskörnung hat bereits im Jahr 2007 mit Erscheinen der RVS 08.17.02 Eingang in das österreichische Richtlinienwesen gefunden. Es ist also davon auszugehen, dass in den nächsten Jahren der Bedarf an Sandpolierwertbestimmungen enorm steigen wird, da die Produzenten von Gesteinskörnungen für das hochrangige Straßennetz diesen Wert deklarieren müssen. Eine wesentliche Fragestellung der gegenständlichen Untersuchung betrifft deswegen den Zusammenhang zwischen Polierwiderständen von Sanden er-

mittelt mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze (PWS) und jenen ermittelt mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät (PSV_{fGK}).

In Tab. 5.10 wurden die Polierwerte der beiden Sandfraktionen 0,2/0,4 sowie 0,63/1,0 mm, ermittelt mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze aus drei Einzelmessproben, sowie der PSV_{fGK} der Sandfraktion 0,63/1,0 mm (acht Einzelmessproben), ermittelt mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät angeführt.

Zum Vergleich der beiden Prüfverfahren werden in Abb. 5-24 die mit der Schnellpoliermaschine ermittelten PSV_{fGK} -Werte den mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze ermittelten PWS-Werten, unter Angabe der ausgewiesenen Standardabweichungen gegenübergestellt. Im Bild links wird die vorhandene Korrelation zwischen dem PSV_{fGK} und dem PWS der Fraktion 0,63/1,0 mm und rechts zwischen dem PSV_{fGK} und dem PWS der Fraktion 0,2/0,4 mm dargestellt.

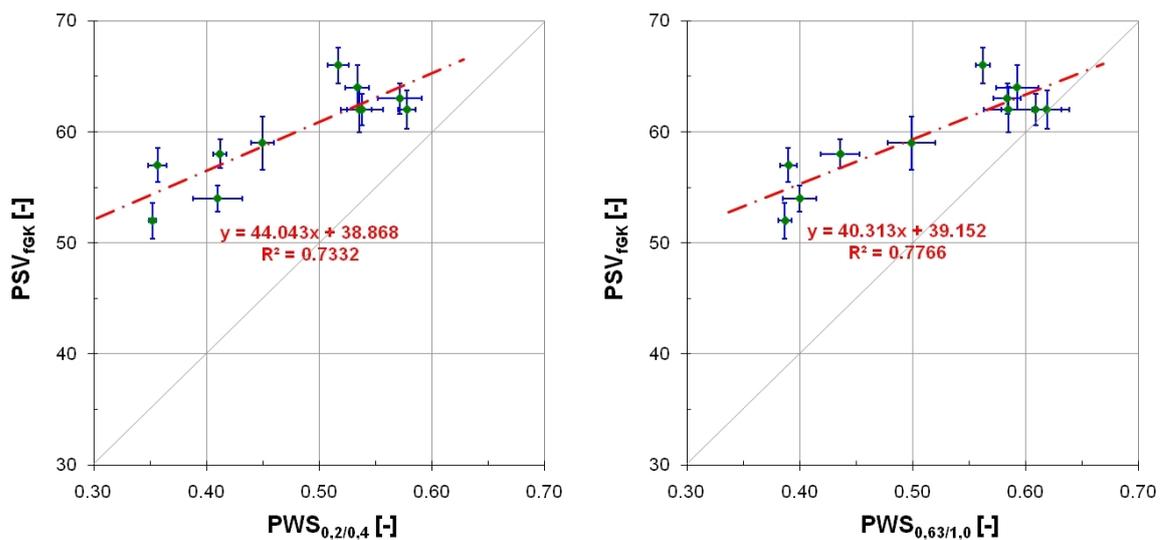


Abb. 5-24: Korrelation $PWS_{0,2/0,4}$ - PSV_{fGK} (links) sowie $PWS_{0,63/1,0}$ - PSV_{fGK} (rechts)

Die Korrelation zwischen dem PWS der Fraktion 0,63/1,0 mm und dem PSV_{fGK} ist geringfügig besser als zwischen dem PWS-Wert der Fraktion 0,2/0,4 mm und dem PSV_{fGK} -Wert. Kennzeichen hierfür ist das Bestimmtheitsmaß der Korrelation. In der geringen Steigung der Regressionsgeraden spiegelt sich die schmale Bandbreite der Prüfergebnisse des Verfahrens mit der Schnellpoliermaschine wider. So sind die PSV_{fGK} -Werte im Bereich von kleineren Polierwerten, ermittelt mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze, relativ gesehen um ein vielfaches höher als im Bereich von hohen Polierwerten der Mineralstoffe.

Für die Prüffraktion 0,63/1,0 mm besteht somit ein Zusammenhang, ermittelt an elf Gesteinsmaterialien nach Formel (5.9):

$$PSV_{fGK} = 41 \cdot PWS_{0,63/1,0} + 38,7 \quad (5.9)$$

Die zugehörige statistische Sicherheit mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,79$ ist als eher gering einzustufen.

Zwischen der Polierwertbestimmung mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze an der Sandfraktion 0,2/0,4 mm und der Sandpolierwertbestimmung an der Fraktion 0,63/1,0 mm mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät ergibt sich ein linearer Zusammenhang gemäß Formel (5.10):

$$PSV_{fGK} = 44,9 \cdot PWS_{0,2/0,4} + 38,5 \quad [-] \quad (5.10)$$

Das zugehörige Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt 0,75.

Aufgrund des vorhandenen Bestimmtheitsmaßes der Regressionsrechnung ist eine statistisch gesicherte direkte Umrechnung der Sandpolierwerte, ermittelt mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät an der Fraktion 0,63/1,0 mm, auf $PWS_{0,2/0,4}$ -Werte ermittelt mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze nicht möglich.

Es kann jedoch aufgrund der mit der Schnellpoliermaschine ermittelten PSV_{fGK} -Polierwerte eine erste Beurteilung der Sande hinsichtlich ihrer Polierresistenz für den Einsatz im Straßenbau getroffen werden. Dadurch können Prüflabors, welche über eine Schnellpoliermaschine verfügen, die Sande vorab beurteilen. Somit können hohe Prüfkosten für die Bestimmung der Sandpolierresistenz mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze vermieden werden.

In Abb. 5-25 ist der PSV_{fGK} dem $PWS_{0,2/0,4}$ gegenübergestellt.

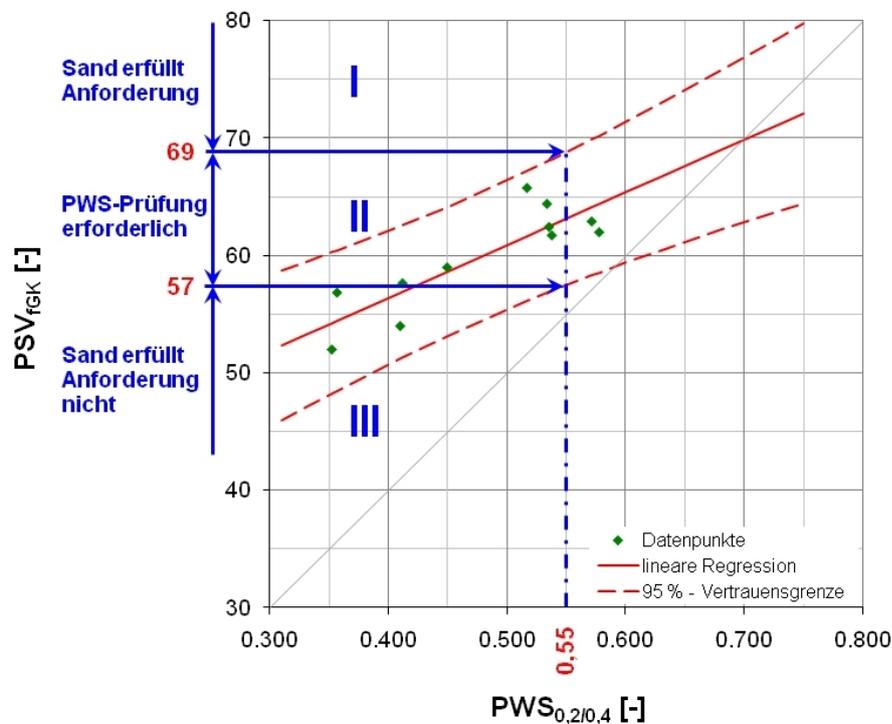


Abb. 5-25: Klasseneinteilung des PSV_{fGK} für $PWS \geq 0,55$ [-]

Neben der Regressionsgeraden wird das zugehörige 95 %-ige Konfidenzintervall dargestellt. Das Konfidenzintervall wurde dabei mit der t-Verteilung ermittelt. Der Grenzwert für das obere ($PSV_{fGK,max}$) und untere ($PSV_{fGK,min}$) Vertrauensintervall ermittelt sich nach Formel (5.11) sowie Formel (5.12).

$$PSV_{fGK,max} = 48,1 \cdot (PWS_{0,2/0,4})^2 - 0,96 \cdot PWS_{0,2/0,4} + 54,8 \quad [-] \quad (5.11)$$

$$PSV_{fGK,min} = -12,4 \cdot (PWS_{0,2/0,4})^2 + 56,8 \cdot PWS_{0,2/0,4} + 29,9 \quad [-] \quad (5.12)$$

Ausgehend von einem zu erzielenden $PWS_{0,2/0,4}$ von 0,55 [-] gemäß RVS 08.17.02 [FSV, 2007] und unter Berücksichtigung des Vertrauensbereichs von 95 % lässt sich der PSV_{fGK} in drei Klassen einteilen, siehe Tab. 5.13.

Tab. 5.13: Klasseneinteilung des PSV_{fGK} für $PWS \geq 0,55$ [-]

<i>Klasse</i>	<i>PSV_{fGK} [-]</i>	<i>Beurteilung</i>
I	> 69	Polierresistenz ausreichend, $PWS \geq 0,55$ [-]
II	57 - 69	Polierresistenz ist anhand einer Wehner/Schulze Prüfung zu bestätigen
III	< 57	Polierresistenz nicht ausreichend

Klasse I:

PSV_{fGK} -Werte > 69 weisen mit 95 %-iger statistischer Sicherheit einen PWS von $\geq 0,55$ [-] auf und sind für den Einsatz in Betonfahrbahnen geeignet.

Klasse II:

Sande mit einem PSV_{fGK} -Wert von ≥ 57 [-] und ≤ 69 [-] liegen im Grenzbereich und können unter Berücksichtigung der statistischen Unsicherheit ohne eine weiterfolgende Polierwertbestimmung mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze nicht eingeordnet werden. Für diese Sande ist eine PWS-Wert Bestimmung an der Fraktion 0,2/0,4 mm anzuraten.

Klasse III:

Werden mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät an der Sandfraktion 0,63/1,0 mm Polierwerte < 57 [-] ermittelt, so entspricht der Sand keinesfalls den Anforderungen gemäß der RVS 08.17.02:2007 für den Einsatz in Betonfahrbahnen.

Wie bereits in Kapitel 5.3.2 hingewiesen wurde, konnte mit den hier verwendeten Gesteinsmaterialien der gemäß RVS 08.17.02:2007 geforderte Grenzwert nur in ganz wenigen Fällen erreicht werden. Wird unter Berücksichtigung des mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze neuester Bauart geänderten absoluten Prüfniveaus als Kriterium für die Mindestanforderung der Polierresistenz von Sanden ein $PWS_{0,2/0,4}$ von 0,50 [-] festgelegt, ergibt sich gemäß Formel (5.11) und Formel (5.12) ein unterer bzw. oberer Grenzwert für den PSV_{fGK} von 55 bzw. 66 [-], siehe Tab. 5.14 und Abb. 5-26.

Tab. 5.14: Klasseneinteilung des PSV_{fGK} für $PWS \geq 0,50$ [-]

<i>Klasse</i>	<i>PSV_{fGK} [-]</i>	<i>Beurteilung</i>
I	> 66	Polierresistenz ausreichend, $PWS \geq 0,50$ [-]
II	55 - 66	Polierresistenz ist anhand einer Wehner/Schulze Prüfung zu bestätigen
III	< 55	Polierresistenz nicht ausreichend

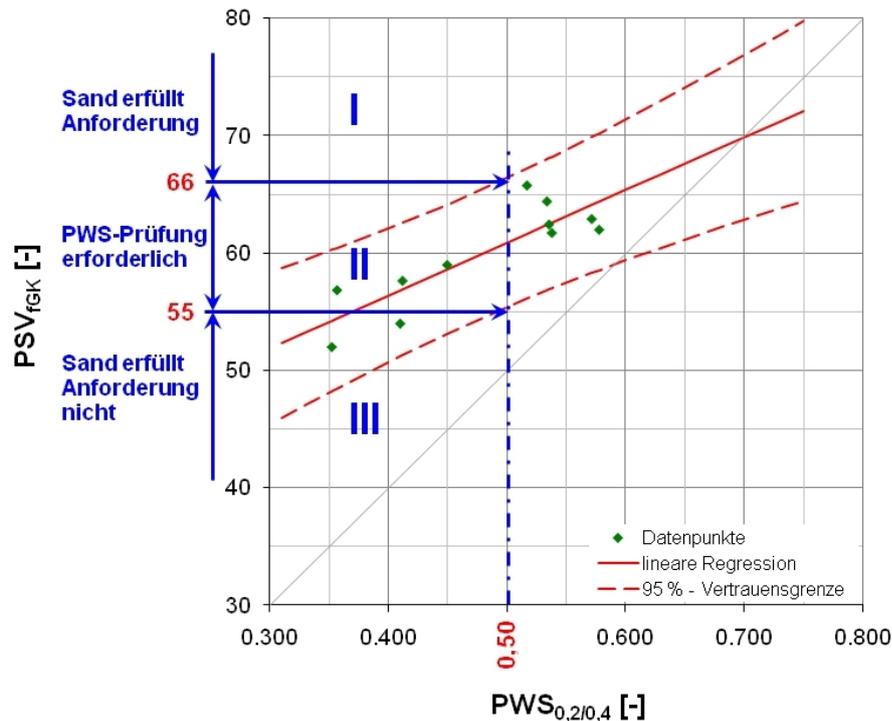


Abb. 5-26: Klasseneinteilung des PSV_{fGK} für $PWS \geq 0,50$ [-]

5.7.6 Zusammenfassung der Korrelationsanalysen

Im Rahmen der hier durchgeführten Reihenuntersuchung zur Bestimmung des Polierwertes von Gesteinskörnungen ist es gelungen, Sandprobekörper für das Prüfverfahren mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät reproduzierbar herzustellen und einer Polierwertbestimmung zu unterziehen. Die Prüfstreuung der Polierwerte entspricht dabei in etwa der Prüfstreuung, wie sie sich auch beim normativ verankerten Prüfverfahren zur Bestimmung des PSV einstellt.

In der hier durchgeführten Untersuchung konnte gezeigt werden, dass sich sowohl mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze, als auch mit dem Polierverfahren unter Verwendung der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät – bis auf wenige Ausnahmen – dieselbe Reihung der Polierwerte ermitteln lässt. Dies ermöglicht es, das Prüfverfahren nach Wehner/Schulze nicht nur für die Prüfung der feinen Gesteinskörnungen, sondern auch als Alternative zum Polierverfahren mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät anzuwenden.

Bei beiden Prüfverfahren konnte festgestellt werden, dass sich die Polierresistenz zwischen den feinen und groben Gesteinskörnungen eines Gesteinsmaterials zum Teil erheblich voneinander unterscheiden kann. Daher ist in Hinblick auf die Straßensicherheit und auf die langfristige Sicherstellung einer ausreichenden Straßengriffigkeit die Einführung einer separaten Anforderung an die Polierresistenz von feinen Gesteinskörnungen auf jeden Fall notwendig.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND RESÜMEE

Die Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche ist eine wesentliche Kenngröße für die Gebrauchstauglichkeit einer Straße mit großer Relevanz für die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer bei hohen Geschwindigkeiten und nasser Fahrbahn. Als Griffigkeit wird die Wirkung der Rauheit der Oberfläche auf das Kraftschlussvermögen zwischen der Fahrbahn und dem Fahrzeugreifen verstanden.

Sowohl das Niveau als auch die zeitabhängige Entwicklung der Straßengriffigkeit hängen neben anderen Faktoren maßgeblich von der Polierresistenz der verwendeten Gesteinskörnungen ab. Die Polierresistenz von feinen Gesteinskörnungen hat besonders bei dichten Asphaltdeckschichten sowie bei Betonfahrbahnen einen wesentlichen Einfluss auf die Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche. Bisher wurden in Österreich vorwiegend Anforderungen an die Polierresistenz von groben Gesteinskörnungen gestellt. Als Maß für die Polierresistenz dient dafür der PSV (Polished Stone Value). Dieser wird mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät ermittelt. Die Bestimmung des PSV erfolgt dabei an der Korngruppe 8/11 mm.

In internationalen Untersuchungen wird allerdings festgehalten, dass der PSV geprüft an groben Gesteinskörnungen kein geeignetes Kriterium ist, um die Polierresistenz von feinen Gesteinskörnungen (≤ 2 mm) zu beschreiben, da sich die Polierresistenz von groben und feinen Gesteinskörnungen oft deutlich unterscheiden kann.

6.1 Ausgangssituation und Zielsetzungen

Für die Ermittlung der Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen im Labor wurden vor allem in Deutschland, aber auch in Großbritannien und Österreich mehrere Prüfverfahren entwickelt. Zur Beschreibung des Polierwiderstandes von Gesteinskörnungen ≤ 2 mm wird auf wissenschaftlicher Ebene jedoch vor allem das Polierverfahren nach Wehner/Schulze (W/S) eingesetzt.

Basierend auf einer Versuchsserie mit einem Wehner/Schulze Poliersimulator alter Bauart wurde im Oktober 2005 eine entsprechende Österreichische Richtlinie zur Bestimmung des Polierwertes von Sand, die RVS 11.06.23, veröffentlicht. Die Bestimmung des Prüfwertes zur Beschreibung der Polierresistenz erfolgte in dieser Versuchsserie mit dem Griffigkeitsmessgerät „Frictometer“. Der mit diesem Prüfverfahren ermittelte Wert für die Polierresistenz von Sanden wird als PWS-F bezeichnet und an der Fraktion 0,2/0,4 mm ermittelt. Diese Prüffraktion wird auch in Deutschland zur Bestimmung des Polierwertes von Sanden empfohlen, wobei in Deutschland sowohl die Polierbeanspruchung, als auch die Ermittlung des Reibwertes mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze durchgeführt werden. Auf Grundlage der bisher veröffentlichten Untersuchungen an einer Prüfanlage nach Wehner/Schulze alter Bauart, wurde für die Polierresistenz der feinen Gesteinskörnungen in Österreich für Sande im Oberbeton von Betondecken ein Anforderungswert von 0,55 [-] eingeführt.

Inwiefern die Kornklasse 0,2/0,4 mm stellvertretend für die gesamte Sandfraktion die Polierresistenz der feinen Gesteinskörnung beschreibt, war bis dato wissenschaftlich noch nicht abgesichert. Aufgrund der durchgeführten Modifikationen und teilweisen Neukonstruktion der Prüfanlage nach Wehner/Schulze ist auch der bisher existierende Bewertungshintergrund für die Sandpolierresistenz zu hinterfragen. Während für die Prüfanlage nach Wehner/Schulze alter Bauart die Wiederholpräzision der Sandpolierwertbestimmung bekannt ist, liegen bisher

jedoch noch keine Untersuchungen zur Wiederhol- und Vergleichspräzision der Sandpolierwertbestimmung mit einem Prüfgerät neuer Bauart vor. Das Vorhandensein von Präzisionswerten sowie von Informationen über die Bedeutung von wesentlichen Einflussfaktoren auf das Prüfergebnis ist für die Erstellung einer Prüfnorm bzw. einer Richtlinie für die Prüfdurchführung jedoch eine notwendige Voraussetzung.

In Österreich existiert derzeit neben dem Forschungsbereich Straßenwesen der TU Wien erst eine weitere Prüfstelle, die im Besitz einer Wehner/Schulze Prüfanlage neuer Bauart ist.

Ausgehend vom beschriebenen Stand der Technik stellen sich die Zielsetzungen der gegenständlichen Arbeit wie folgt dar:

- Im Zuge einer Literaturrecherche waren gebräuchliche berührende Prüfverfahren zur Bestimmung des Polierwertes von Gesteinskörnungen zu erläutern und hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für die Polierwertbestimmung zu diskutieren.
- Aufbauend auf Voruntersuchungen, welche am Forschungsbereich für Straßenwesen der TU Wien geleistet wurden, war unter Auswahl einer für die Wehner/Schulze-Sandpolierprüfung am besten geeigneten Prüfkörnung eine vereinheitlichte Prüfanweisung zu erstellen. Diese Prüfanweisung sollte als Grundlage für die Überarbeitung der derzeit in Österreich gültigen Richtlinie zur Prüfung des Polierwertes von Sand, der RVS 11.06.23:2005, dienen.
- Mithilfe einer vereinheitlichten Prüfanweisung war für die Neufassung der RVS 11.06.23 die Wiederhol- und die Vergleichspräzision der Polierwertbestimmung von Sand zu ermitteln. Im Zuge dieser Präzisionsuntersuchungen sollten wesentliche Prüfbedingungen bei der Durchführung der Prüfung aufgezeigt und deren Bedeutung auf das Prüfergebnis analysiert werden.
- Im Zuge einer Reihenuntersuchung an für den österreichischen Straßenbau repräsentativen Gesteinsmaterialien war mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze neuer Bauart ein Bewertungshintergrund für die Polierresistenz von Sand zu schaffen. Weiters sollte basierend auf diesem Bewertungshintergrund der existierende Anforderungswert an den Polierwert überprüft und gegebenenfalls neue Empfehlungen abgeleitet werden.
- Als Alternative zum Prüfverfahren nach Wehner/Schulze sollte die Möglichkeit der alternativen Prüfung des Polierwertes von feinen Gesteinskörnungen mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät untersucht werden. Dazu war ein Probekörperherstellungsverfahren zu konzipieren und im Zuge einer Reihenuntersuchung die Korrelation zwischen den beiden Prüfmethoden zu analysieren.
- Da die Einführung einer Polierwertforderung an die Sandfraktion ein unterschiedliches Polierverhalten der groben und feinen Gesteinskörnungen voraussetzt, war mithilfe der Prüfanlage nach Wehner/Schulze sowie der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät das Polierverhalten beider Kornfraktionen zu untersuchen und auszuwerten.

6.2 Untersuchungsprogramm

Den Zielsetzungen entsprechend wurde das Versuchs- bzw. Untersuchungsprogramm dieser Arbeit in drei große Themenblöcke geteilt.

Im ersten thematischen Block wird der aktuelle Stand der Normung und Technik der Polierwertbestimmung von Gesteinskörnungen in Österreich erläutert und diskutiert. Zusätzlich werden die derzeit in Deutschland und Österreich gebräuchlichsten Prüfverfahren zur Ermittlung des Polier- und Griffigkeitswertes von Gesteinskörnungen und Oberflächen diskutiert. Im Detail wird für die Polierwertbestimmung von Sanden mit dem Prüfverfahren nach Weh-

ner/Schulze eine vereinheitlichte Anleitung für die Prüfdurchführung erarbeitet und beschrieben, welche als Grundlage für die Überarbeitung der RVS 11.06.23 dient.

Der zweite thematische Block beschäftigt sich mit den Präzisionswerten der Polierwertbestimmung von Gesteinskörnungen mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze. In diesem Block wird zuerst ein europäischer Ringversuch für die Präzisionsbestimmung der Polierwertbestimmung von groben Gesteinskörnungen erläutert. Anschließend wird ein in Österreich organisierter und unter Beteiligung von zwei Prüflabors durchgeführter Ringversuch für die Polierwertbestimmung von feinen Gesteinskörnungen beschrieben und die daraus erhaltenen Ergebnisse anhand der Normenreihe ISO DIN 5725 ausgewertet und diskutiert. Basierend auf dieser Auswertung erfolgt die Bestimmung der Wiederhol- und Vergleichspräzision, welche Eingang in eine Überarbeitung der für die Prüfung des Polierwertes von feinen Gesteinskörnungen maßgeblichen RVS 11.06.23 finden. Im Rahmen der Präzisionsbestimmung werden zusätzliche Untersuchungen von Einflussgrößen auf den Prüfwert durchgeführt, diese hinsichtlich ihrer Relevanz untersucht, beurteilt und Angaben zu ihrer Berücksichtigung in den Prüfnormen gemacht. Dabei wird insbesondere die Veränderung der Prüfgummitopographie während der Prüfung mehrerer Einzelmessproben mithilfe eines optischen Texturerfassungssystems untersucht.

Im dritten Block wird anhand einer für den österreichischen Straßenbau repräsentativen Auswahl von elf Gesteinskörnungen eine Reihenuntersuchung zur Bestimmung des Polierwertes durchgeführt. Dabei werden mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze von den feinen Gesteinskörnungen zwei Prüffractionen untersucht und anhand der ermittelten Streuung der Einzelmessergebnisse eine Festlegung auf eine Fraktion für die Prüfdurchführung getroffen. Weiters erfolgt mit dem Wehner/Schulze Verfahren eine Bestimmung des Polierwertes der groben Gesteinskörnungen, welcher auch mit dem bekannten Prüfverfahren unter Verwendung der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät geprüft wird. Ein wesentlicher Punkt dieses dritten Themenblocks ist die Erarbeitung einer Prüfmethodik für die Bestimmung des Polierwertes der feinen Gesteinskörnungen mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät. Abschließend werden die mit den zwei Prüfverfahren ermittelten Polierwerte miteinander verglichen und Zusammenhänge analysiert.

6.3 Forschungsergebnisse

Aufgrund des vielseitigen Einsatzgebietes und der vollautomatisierten Prüfdurchführung erscheint das Prüfverfahren nach Wehner/Schulze als das derzeit beste Laborprüfgerät zur Beschreibung der Poliereigenschaften von Gesteinskörnungen und Oberflächen. Lediglich die für die Beschaffung von Verschleißteilen (z.B. Prüfgummis) anfallenden hohen Kosten sind ein nicht unwesentlicher Aspekt, der hinsichtlich des zukünftigen Status dieses Verfahrens in den nationalen und internationalen Richtlinien und Normen berücksichtigt werden muss.

Der Vergleich von zwei bauartgleichen Wehner/Schulze-Prüfmaschinen der neuesten Generation zeigte Abweichung im Messniveau von 0,007 PWS-Einheiten. Bezogen auf ein Messwertniveau von 0,500 [-] sind das 1,4 %. Das zeigt, dass die in Österreich vorhandenen Prüfmaschinen bei sachgemäßer Bedienung Ergebnisse mit nur sehr geringer Abweichung liefern.

Die Auswertung des im Rahmen von AustroLab organisierten Ringversuchs nach DIN ISO 5725-5 ergab, dass die Standardabweichung zufolge von Unterschieden zwischen mehreren Gesteinsproben einer Gesteinskörnung wesentlich höher als die bedingt durch die unterschiedliche Prüfdurchführung mehrerer Laboranten auftretende Standardabweichung

zwischen Labors ist. Die durchgeführten Präzisionsuntersuchungen für die Polierwertbestimmung von Sand ergaben folgende Wiederhol- und Vergleichsstandardabweichung:

Wiederholstandardabweichung	$s_F = 0,015 [-]$
Vergleichsstandardabweichung	$s_R = 0,018 [-]$

Die für die Praxis relevanten Werte für die Wiederhol- und Vergleichsgrenze betragen somit:

Wiederholgrenze	$r = 0,04 [-]$
Vergleichsgrenze	$R = 0,05 [-]$

Bezogen auf die Präzisionswerte für die Wiederhol- und Vergleichbarkeit von Prüfergebnissen, welche aus der Heterogenität des Prüfmaterials resultieren, zeigt sich, dass die geringe Messabweichung zwischen den zwei Prüfgeräten von 0,007 PWS-Einheiten einen vernachlässigbar kleinen bzw. durch einen Korrekturfaktor berücksichtigbaren Einfluss hat.

Die Ergebnisse einer Regressionsanalyse mit insgesamt 155 Einzelmesswerten von 25 verschiedenen Merkmalniveaus ließen keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen den untersuchten Einflussgrößen (wie z.B. Polierbeanspruchung, Gesteinsmenge, Prüfwassertemperatur, etc.) und dem resultierenden PWS erkennen. Da auch mithilfe einer multiplen linearen Regression an drei Merkmalniveaus die vermuteten Zusammenhänge zwischen dem PWS und den untersuchten Einflussgrößen (wie z.B. Abhängigkeit des PWS von der Poliereinwirkung) nicht nachgewiesen werden konnten, scheinen die heterogenen Eigenschaften des Prüfmaterials und der Prüfmittel zu der ermittelten Prüfstreuung beizutragen.

Die Analyse der Qualität bzw. des Reibwertes von 26 neuen Prüfgummisätzen mittels Messungen auf einer Glasplatte mit niedrigem Reibwertniveau ergab eine Standardabweichung von 0,002 PWS-Einheiten, wobei die Spannweite zwischen minimalem und maximalem Prüfwert 0,01 PWS-Einheiten beträgt. Die Messungen auf der im Rahmen dieser Arbeit konzipierten Riffelplatte (Reibwertniveau im Bereich von 0,290 bis 0,300 [-]) ergab eine Standardabweichung von 0,005 PWS-Einheiten bei einer Spannweite zwischen größtem und kleinstem Prüfwert von 0,021 PWS-Einheiten. Somit hat der Prüfgummi einen nachweislichen Einfluss auf das Prüfergebnis, was eine strenge Qualitätskontrolle der Prüfmittel verlangt.

Die Untersuchungen der Prüfgummitopographie haben gezeigt, dass durch die hohe Beanspruchung bei der Reibwertbestimmung von Sandprobekörpern, auf den Prüfgummis Längsrillen entstehen. Diese Längsrillen werden durch mehrmaliges Prüfen von Sandoberflächen immer stärker ausgeprägt. Mithilfe der Oberflächenkenngrößen (s_{Rv}), (s_{Rz}), ($s_{R_{max}}$) sowie (s_{Ra}) und (s_{Rq}) lässt sich diese Änderung der Oberflächentopographie sehr gut dokumentieren. Ein direkter Bezug zum resultierenden Reibwert auf einer homogenen Prüffläche lässt sich mit klassischen Rauheitswerten jedoch nicht feststellen. Führen gebrauchte Prüfgummisätze auf einer Glasplatte mit einem sehr niedrigen Reibwertniveau in der Regel zu einem höheren Kontrollwert als neue Prüfgummis, so werden mit gebrauchten Prüfgummis auf der Riffelplatte kleinere Reibwerte ermittelt. Somit sind Prüfgummis nicht für das Prüfen verschiedener Oberflächen geeignet, da durch die Textur der erstgeprüften Oberfläche das Reibverhalten der Prüfgummisätze und der nachfolgend ermittelte Reibwert nachhaltig verändert wird. Zur Vermeidung falscher Prüfwerte sind deswegen in den einschlägigen Prüfvorschriften eindeutige Regeln für die Verwendung der Prüfgummis vorzusehen.

Zur Schaffung eines österreichischen Bewertungshintergrundes für die praxisrelevante Beurteilung der Polierresistenz von Sanden wurde von den elf Sanden der Polierwert PWS an

den Fraktionen 0,2/0,4 sowie 0,63/1,0 mm bestimmt. Bei der Auswahl der zu untersuchenden Sande wurde bereits im Vorfeld darauf Bedacht genommen, einen repräsentativen Querschnitt aller in Österreich im Straßenbau eingesetzten Gesteine zu erhalten. Im Prüfprogramm befanden sich neben bekannt hoch polierresistenten Hartgesteinen sowohl stark carbonathaltige Gesteine als auch gebrochene Kiese mit einem hohen Quarzgehalt.

Der in der RVS 08.17.02 [2007] für Betondecken im Oberbeton geforderte Polierwert für Sande der Fraktion 0,2/0,4 mm von $\geq 0,55$ wurde in der gegenständlichen Reihenuntersuchung mit einer Wehner/Schulze-Anlage neuer Bauart lediglich von zwei Sanden erreicht. Da auch bekannt hoch polierresistente Gesteine diesen geforderten Grenzwert nicht erreichten, ist dieser jedenfalls zu hinterfragen. Festgelegt wurde dieser Grenzwert basierend auf Erfahrungen der TU Berlin mit der Wehner/Schulze-Prüfanlage alter Bauart. Durch die maschinentechnischen Adaptierungen für die neue Baureihe ist davon auszugehen, dass Prüfergebnisse erzielt mit der alten Baureihe nicht auf die neue Bauart umgelegt werden können. Dadurch erscheint eine Abänderung des derzeit in der RVS 08.17.02 [2007] geforderten Grenzwertes für die Polierresistenz von Sanden notwendig. Bei einer reduzierten Anforderung an die Polierresistenz von Sand auf $PWS \geq 0,50$ [-] genügen jedoch sechs Gesteine dem Kriterium und es wird gleichzeitig der Präzision des Prüfverfahrens Rechnung getragen. Die Berücksichtigung der Präzision des Prüfverfahrens hat im Hinblick auf die Festlegung des Grenzwertes deshalb große Bedeutung, da prüftechnisch bedingte Abweichungen bei der Bestimmung des Polierwiderstandes zu falschen Deklarierungen der Polierresistenz führen können.

Die Ergebnisse der Reihenuntersuchung lassen auch eine eindeutige Unterteilung in hoch- und niedrigpolierresistent zu. So wurde für fünf Sande ein Polierwert $\leq 0,45$ und für sechs Sande ein Polierwert $\geq 0,52$ ermittelt. Da für keinen der elf untersuchten Sande ein Polierwert zwischen 0,46 und 0,51 [-] erreicht wurde, erscheint die Reduktion des Grenzwertes als gerechtfertigt. Durch die Herabsetzung des Grenzwertes auf 0,50 [-] kann auch gewährleistet werden, dass in allen Teilen Österreichs die Möglichkeit besteht, polierresistente Sande für den Einsatz im Straßenbau zu beziehen.

Da die Prüfung mit der Wehner/Schulze Anlage sehr kostenintensiv ist, wurde die Möglichkeit der Sandpolierprüfung mit der Schnellpoliermaschine überprüft. Der dabei ermittelte Polierwert von Sanden wird als PSV_{fGK} (= Polierwert von feinen Gesteinskörnungen) bezeichnet. Die Herstellung der Probekörper wurde an das Einrieselverfahren für die Sandprobekörperherstellung für das Prüfverfahren nach Wehner/Schulze angelehnt und erfolgte mit der Sandfraktion 0,63/1,0 mm. Eine ausführliche Arbeitsanweisung für die Probekörperherstellung wurde erstellt. Die Durchführung der Poliersimulation mit der Schnellpoliermaschine sowie die anschließende Pendelprüfung zur Ermittlung des PSV_{fGK} erfolgen gemäß den Festlegungen der ÖNORM EN 1097-8 [2009].

Ein Vergleich des PSV_{fGK} der Fraktion 0,63/1,0 mm mit dem PWS der Sandfraktion 0,2/0,4 mm zeigte folgenden Zusammenhang der Polierwerte:

$$PSV_{fGK} = 44,9 \cdot PWS_{0,2/0,4} + 38,5 \text{ [-]}$$

Aufgrund des vorhandenen Bestimmtheitsmaßes der Regressionsrechnung von $R^2 = 0,75$ ist eine statistisch gesicherte direkte Umrechnung der Sandpolierwerte ermittelt mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät an der Fraktion 0,63/1,0 mm und dem $PWS_{0,2/0,4}$ ermittelt mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze nicht möglich.

Auf Grundlage des der Regressionsrechnung zugehörigen 95 % Konfidenzintervalls, ermöglicht der mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät ermittelte PSV_{fGK} eine erste

Beurteilung des Sandes hinsichtlich seiner Polierresistenz. Dadurch können Prüflabors, welche über eine Schnellpoliermaschine und ein Pendelgerät verfügen, die Sande vorab beurteilen und höhere Prüfkosten für die Bestimmung der Sandpolierresistenz mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze vermieden werden.

Für die Ermittlung des Polierwertes der groben Gesteinskörnung wurde einerseits das Prüfverfahren nach Wehner/Schulze verwendet, wobei für die Probekörperherstellung das Mosaikauslegeverfahren angewendet wurde. Als Prüfkörnung diente die Splittfraktion 7,2/10 mm. Der ermittelte Polierwert dieser Gesteinskörnung wird somit als $PWS_{7,2/10,0}$ bezeichnet. Zusätzlich wurde gemäß der ÖNORM EN 1097-8 mithilfe der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät der PSV derselben Kornfraktion bestimmt.

Zwischen dem Polierwert $PWS_{7,2/10,0}$ und dem Polierwert $PWS_{0,2/0,4}$ konnte bei den untersuchten elf Gesteinen kein statistischer Zusammenhang festgestellt werden. Die Korrelationsanalyse zwischen den beiden Polierwerten PSV und PSV_{fGK} lieferte ebenso keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der Polierresistenz von Sanden und Splitten. Dadurch wurde bestätigt, dass sich das Polierverhalten der feinen und groben Gesteinskörnungen bei vielen Gesteinsmaterialien unterscheidet. Erklärungen hierfür sind in der Mineralogie und der unterschiedlichen Aufbereitung der Korngruppen zu suchen. Dadurch sind gesonderte Anforderungen an den Polierwiderstand von Sanden für die Anwendung im Straßenbau gerechtfertigt bzw. notwendig.

6.4 Umsetzung der Forschungsergebnisse in die nationalen Richtlinien

Da auf Seiten der Straßenbetreiber, aber auch der Industrie die Sicherstellung einer hohen Straßengriffigkeit von großer Bedeutung ist, fand die Durchführung und Ausarbeitung dieser Arbeit in engem Kontakt mit Vertretern der ASFINAG und der Industrie statt. Erklärtes Ziel war die fundierte Aufarbeitung des Themas Polierresistenz von Sanden mit neuester Prüftechnik und, basierend auf der neuen Prüftechnik, die Erarbeitung von verbindlichen Anforderungen für das nationale Richtlinienwesen. Diese Anforderungen sollen einerseits eine unmittelbare Verbesserung der Griffigkeit des hochrangigen Straßennetzes in Österreich und somit der Verkehrssicherheit bringen, und andererseits auf mittelfristige Sicht zu Einsparungen in der Straßenerhaltung in Folge von reduzierten Sanierungsmaßnahmen führen. In diesem Kapitel werden der Stand der Richtlinien per 01.01.2010 und die aufgrund der erzielten Forschungsergebnisse bereits erfolgten Änderungen der Richtlinien ausgeführt.

6.4.1 Stand der Normung und Richtlinien bis 2010

Gemäß den Anforderungen an Asphaltmischgut nach RVS 08.97.05 [2007] müssen Gesteinskörnungen > 2 mm für den Einsatz in Asphaltdeckschichten je nach Anforderungsklasse (Gesteinskörnungsklasse G1 – G9) einen minimalen PSV-Wert aufweisen. An feine Gesteinskörnungen (0/2 mm) wurden jedoch keine Anforderungen gestellt.

In der für die Betondeckenherstellung maßgeblichen RVS 08.17.02 [2007] sind bereits getrennte Anforderungen an die Polierresistenz von groben und feinen Gesteinskörnungen für den Einsatz im Oberbeton vorgesehen. In dieser RVS wird für Gesteinskörnungen > 4 mm der Nachweis eines PSV_{50} und für Gesteinskörnungen ≤ 4 mm der Nachweis eines $PWS-F \geq 0,55$, bestimmt nach der RVS 11.06.23:2005, gefordert. Alternativ kann für Gesteinskörnungen ≤ 4 mm auch ein Nachweis des CO_2 -Gehalts erfolgen. Die Festlegung des Grenzwertes für die

Polierresistenz von feinen Gesteinskörnungen ($PWS-F \geq 0,55$) basiert auf einem Erfahrungshintergrund der TU Berlin. Zur Anwendung kam dabei jedoch eine Wehner/Schulze-Prüfanlage alter Bauart.

Somit wurden hinsichtlich der Polierresistenz von Gesteinskörnungen im Asphalt- und Betonstraßenbau bis ins Jahr 2010 unterschiedliche Anforderungen gestellt.

6.4.2 Änderungen in den nationalen Regelwerken

Da im Rahmen des gegenständlichen Forschungsprojektes nachgewiesen wurde, dass ein polierresistenter Splitt nicht zwangsläufig auf eine hohe Polierresistenz der zugehörigen Sandfraktion schließen lässt, war sowohl für den Beton- als auch für den Asphaltstraßenbau eine gesonderte Anforderung an die Polierresistenz von feinen und groben Gesteinskörnungen zu implementieren.

6.4.2.1 RVS 11.06.23 – Bestimmung des Polierwertes von Sand

Die nationale Richtlinie für die Durchführung der Polierwertbestimmung von Sand wurde basierend auf den im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse einer grundlegenden Überarbeitung unterzogen und befindet sich derzeit in Begutachtungsphase. Mit ihrem Erscheinen kann im Frühjahr 2011 gerechnet werden.

Die wesentlichsten Änderungen gegenüber der Ausgabe aus dem Jahr 2005 sowie die wichtigsten Neuerungen sind:

- Detaillierte Arbeitsanleitung für die Probekörperherstellung für das Verfahren nach Wehner/Schulze
- Für jede zu prüfende Gesteinskörnung ist ein eigener Satz Prüfgummis zu verwenden.
- Tauschen des Wasser-Quarzmehl-Gemisches nach Prüfung von sechs Einzelmessproben, wobei nach jeder Poliersimulation 70 g Quarzmehl nachzufüllen sind.
- Die Bestimmung des PWS einer feinen Gesteinskörnung hat an drei Einzelmessproben zu erfolgen, wobei die maximal zulässige Spannweite zwischen den drei Proben 0,035 [-] betragen darf. Wird diese zulässige Spannweite überschritten, sind drei weitere Einzelmessproben herzustellen und zu prüfen sowie der PWS aus den sechs Einzelmessergebnissen zu berechnen.
- Angabe der Wiederhol- und Vergleichsgrenze
- Detaillierte Arbeitsanleitung für die Herstellung von Sandprobekörpern mit der Fraktion 0,63/1,0 mm für das Verfahren mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät.
- Prüfanleitung für die Bestimmung des PSV_{fGK} mit der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät
- Tabelle mit Bezug zwischen dem PSV_{fGK} und dem $PWS_{0,2/0,4}$

6.4.2.2 RVS 08.97.05 – Anforderungen an Asphaltmischgut

Die neue RVS 08.97.05 [FSV, 2010] erschien bereits im Februar 2010. Darin wurden erstmals zehn Gesteinsklassen (G1 bis G9 sowie GS) für den Einsatz im Asphaltstraßenbau deklariert. Die Abkürzung GS steht für „Gesteinskategorie Superior“ und legt Anforderungen an Gesteinskörnungen für den Einsatz im hochrangigen Straßennetz fest. Diese Gesteinskategorie ist in der Regel Ausschreibungsbestandteil in Bauvorhaben der ASFINAG.

Für GS ist auch eine Forderung an den Polierwert der feinen Gesteinskörnung enthalten. Gefordert wird ein PWS von $\geq 0,50$ [-] bestimmt mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze neuer Bauart gemäß RVS 11.06.23. Zusätzlich wird von der feinen Gesteinskörnung gefordert, dass sie aus einem Material besteht, dessen grobe Gesteinskörnung einen LA_{20} ⁷⁴ aufweist.

6.4.2.3 RVS 08.17.02 – Betondecken - Deckenherstellung

Diese RVS befindet sich derzeit noch in Überarbeitung und wird im Frühjahr 2011 erscheinen. Darin wird der derzeit von der feinen Gesteinskörnung für den Einsatz im Oberbeton geforderte Polierwert auf $\geq 0,50$ [-] herabgesetzt und somit der Anforderung der RVS 08.97.05 gleichgesetzt. Der bisher zulässige, alternative Nachweis zur Beschreibung der Polierresistenz von feinen Gesteinskörnungen mithilfe des CO_2 -Gehalts wird entfernt.

6.5 Ausblick

Diese Arbeit konnte nachweisen, dass sich das Prüfverfahren nach Wehner/Schulze sowohl für die Bestimmung des Polierwertes der feinen als auch der groben Gesteinskörnung eignet. Somit kann dieses Prüfverfahren in Zukunft als Alternative zur Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät eingesetzt werden.

Zur vertieften Prognose bzw. Ermittlung der Prüfstreuung der Polierwertbestimmung nach Wehner/Schulze ist es zweckmäßig, einen europäischen Ringversuch unter Anwendung des in dieser Arbeit gezeigten Auswerteverfahrens nach DIN ISO 5725-5 durchzuführen.

Es gibt derzeit noch keine detaillierten Untersuchungen des Zusammenhangs zwischen dem LA- und dem PWS-Wert. Eine Anforderung an den LA-Wert für die Sandfraktion erscheint aus technischer Sicht jedenfalls bei Asphalten fragwürdig, da vorwiegend die Splitte für die Lastabtragung verantwortlich sind. Derzeit können in Österreich Sande mit einer hohen Polierresistenz aufgrund eines niedrigen LA-Wertes der Splittfraktion vom Einsatz im hochrangigen Straßennetz ausgeschlossen werden.

Durch die Reibwertbestimmung auf der neu entwickelten Riffelplatte konnte bei allen Prüfummisätzen eine Glättung der Oberfläche festgestellt werden. Mithilfe der Riffelplatte sollte es somit gelingen, gebrauchte Prüfummis wieder auf ein Ausgangsniveau zu „schleifen“. Dies kann insbesondere aufgrund der hohen Anschaffungskosten neuer Prüfummis eine interessante Alternative darstellen. Dazu sind jedoch noch weiterführende Untersuchungen mit der im Rahmen dieser Arbeit konzipierten Riffelplatte notwendig.

⁷⁴ Der LA-Wert (Los Angeles-Wert) ist ein Maß für den Widerstand der groben Gesteinskörnung gegen Zerkleinerung.

7 GLOSSAR

Abkürzungen von mathematischen Gleichungen und statistischen Werten:

α	y-Achsenabschnitt einer Regressionsgeraden bei $x = 0$
β	Steigung einer Regressionsgeraden
ε_i	Residuen bzw. Restfehler einer Regressionsgeraden bei $x = i$
γ	Verhältnis zwischen Vergleichsstandardabweichung s_R und Wiederholstandardabweichung s_r
σ_{mittel}	Aus einer Reihe von Standardabweichungen berechnete mittlere Standardabweichung
σ_{max}	Aus einer Reihe von Standardabweichungen ermittelte maximale Standardabweichung
σ_{min}	Aus einer Reihe von Standardabweichungen ermittelte minimale Standardabweichung
σ_x	Standardabweichung einer Reihe von Daten x
$\delta_{\bar{x}}$	Relative Mittelwertabweichung einer Reihe von Daten x_i und ihrem Mittelwert \bar{x}
a, α_p	Signifikanzniveau einer Irrtumswahrscheinlichkeit
b_j	Regressionskoeffizient der unabhängigen Variable x_j
h	Vereinbarkeitsgröße h der grafischen Mandels-Statistik
j	Index für ein Merkmalniveau
k	Vereinbarkeitsgröße k der grafischen Mandels-Statistik
m	Gesamtmittelwert aus einer Reihe von Stichproben
c	y-Achsenabschnitt einer Regressionsgeraden bei $x = 0$
C	Prüfgröße nach Cochran
F	Testgröße des F-Tests zur Überprüfung der Nullhypothese H_0 . Gibt Auskunft darüber, ob eine hinreichende Güte des Regressionsmodells erzielt wird
F_{krit}	Kritischer Wert des F-Tests
G_p	Prüfgröße nach Grubbs
H_0	Nullhypothese bei der Anwendung von Hypothesentests (t- bzw. F-Test)
n	Anzahl von Ermittlungsergebnissen, Proben
r	Wiederholgrenze eines vereinheitlichten Prüfverfahrens
r_{xy}	Empirischer Korrelationskoeffizient zwischen zwei Merkmalen x und y
R	Vergleichsgrenze eines vereinheitlichten Prüfverfahrens
R^2	Bestimmtheitsmaß – Maß für die Genauigkeit einer Regressionsgleichung
p, i	Anzahl von an einem Ringversuch teilnehmenden Labors
$s^2(b_j)$	Varianz des Regressionskoeffizienten b_j
s_H	Gemäß DIN ISO 5725-5:2002: Aus einer Stichprobe geschätzte Standardabweichung zwischen einer Anzahl von Proben t
s_L	Gemäß DIN ISO 5725-5:2002: Aus einer Stichprobe geschätzte Standardabweichung zwischen Labors p
s_r	Aus einer Stichprobe geschätzte Wiederholstandardabweichung
s_R	Aus einer Stichprobe geschätzte Vergleichsstandardabweichung
t, g	Gemäß DIN ISO 5725-5:2002: Anzahl von Proben bestehend aus mehreren Einzelmessproben

$|t_j|$	Testgröße des Student t-Tests zur Überprüfung der Nullhypothese H_0 . Gibt Auskunft darüber, ob die unabhängige Variable (x) zur Erklärung der abhängigen Variable (y) signifikant ist.
t_{krit}	Kritischer Wert des t-Tests
w	Spannweite zwischen dem maximalen und minimalen Wert von mehreren Einzelmessergebnissen
w_{FG}	Anzahl der Freiheitsgrade
X	Matrize der unabhängigen Variablen bei der multiplen Regressionsanalyse
x_i	Einzelmessergebnis i aus einer Reihe von Daten x
\bar{x}	Mittelwert aus einer Reihe von Daten x

Allgemeine Abkürzungen:

AC11	Asphaltbeton mit einem Größtkorn von 11 mm
ARI	Abriebswiderstand von Gummi in %
cbm	Centrum für Baustoffe und Materialprüfung an der TU München
d/D	Größenangabe für die Korngruppe einer Gesteinskörnung
d	untere Siebgröße einer Korngruppe
D	obere Siebgröße einer Korngruppe
EBK	Edelbrechkörnungen, veraltete Bezeichnung für Gesteinskörnungen mit einem minimalen Brechkornanteil von mindestens 90 M-%
EKK	Edelkantkörnungen, veraltete Bezeichnung für Gesteinskörnungen. Edelkantkörnungen müssen einen Masseanteil von mindestens 50 % Brechkorn und der verbleibende Rest einen Masseanteil von mindestens 90 % Kantkorn K enthalten
EPGV	Erfurter Griffigkeitsprognoseverfahren
F_x	während eines Reibungsvorganges aktivierte Horizontalkraft
F_z	während eines Reibungsvorganges einwirkende Vertikalkraft
GK11	Größtkorn 11 mm
PA11	Offenporiger Asphalt mit einem Größtkorn von 11 mm
PGM	Polier- und Griffigkeitsmessgerät
PSV	Polished Stone Value, Polierwert von Splitten geprüft an der Fraktion 7,2/10 mm
PSV_{FGK}	Polished Stone Value von feinen Gesteinskörnungen. In Österreich wird darunter der mit dem PSV-Verfahren bestimmte Polierwert von Sanden geprüft an der Fraktion 0,63/1,0 mm verstanden. In Deutschland erfolgt davon abweichend die Bestimmung an der Fraktion 0,71/1,0 mm
PWF	Polierwert ermittelt mit dem Frictometer
PWS	Polierwert nach Wehner/Schulze
PWS-F	Polierwert von feinen Gesteinskörnungen (gemäß RVS 11.06.23:2005 geprüft an der Fraktion 0,2/0,4 mm)
RGP	Programmtool in MS Office® zur Durchführung einer multiplen Regressionsanalyse
SMA11	Splitt-Mastix-Asphalt mit einem Größtkorn von 11 mm
SRT	Skid Resistance Tester
λ_c	Grenzwellenlänge zur Trennung zwischen Welligkeit und Rauheit eines Profil
μ	Reibungsbeiwert nach Coloumb bzw. Erwartungswert einer Normalverteilung
σ_{300}	Spannung bei 300 % Dehnung, Maß für die Elastizität von Elastomeren

Abkürzungen von Oberflächen- bzw. Profilkennwerten:

$l_{c,i}$	Länge der profilschneidenden Geraden i auf dem Schnittniveau c bei der Erstellung der Abbott-Kurve
l_n	Gesamtmesstrecke bei der Erfassung einer Oberflächenprofils
l_r	Länge der Einzelmessstrecke eines Rauheitsprofils. Entspricht in der Regel der Grenzwellenlänge λ_c
l_t	Taststrecke = optisch erfasste Länge bei der Aufnahme eines Oberflächenprofils
R_p	Eine aus einem Rauheitsprofil gewonnen Oberflächenkenngröße, welche die Höhe der größten Profilspitze wiedergibt
$R_{mr}(c)$	Materialanteil in % der Schnittebene c am Rauheitsprofil. Mit der variablen Schnittebene c wird die Abbott'sche-Kurve ermittelt
$sMr1$	Kleinster Materialanteil der Messfläche
$sMr2$	Größter Materialanteil der Messfläche
sRa	Arithmetischer Mittelwert der Flächenordinaten einer Messfläche
sRk	Kernrautiefe einer Messfläche
sRp	Höhe der größten Spitze auf einer Rauheitsfläche
sRp_k	Reduzierte Spitzenhöhe einer Messfläche
sRq	Quadratischer Mittelwert der Flächenordinaten einer Messfläche
sRv	Tief des größten Tales auf einer Rauheitsfläche
$sRvk$	Reduzierte Riefentiefe auf einer Messfläche
sRz	Gemittelte Rautiefe auf der Messfläche
sR_{max}	Maximale Einzelrautiefe auf der Messfläche
$sRz25$	Gemittelte Rautiefe auf der Messfläche berechnet aus 5 x 5 Teilflächen
$sR_{max}25$	Maximale Einzelrautiefe auf der Messfläche berechnet aus 5 x 5 Teilflächen
$sV0$	Ölhaltevolumen einer Fläche

8 LITERATURVERZEICHNIS

- Augustin H. (1987): Ein neues Gerät zur Messung der Griffigkeit. Österreichische Bauwirtschaft, Nr. 4/1987, Wien.
- Austrolab (2003): Endbericht über den Ringversuch 2003 „Gesteinskörnungen“. Sektion Bautechnik, Arbeitsgruppe Verkehrswegebau.
- Bachmann Th. (1998): Wechselwirkungen im Prozess der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 360, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Bald S., Böhm S. und Rosauer V. (2010): Einfluss der Verwendung von Quarzkörnungen als Poliermittel und von Granitsplitt als Kontrollgestein auf die Präzision bei der Ermittlung des PSV. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Band 1027, Bonn.
- Bronstein I. N., Semendjajew K. A., Musiol G. und Mühlig H. (2001): Taschenbuch der Mathematik. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main.
- Dames J., Rodewald X., Lindner J. und Schellenberg X. (1988): Einfluss der Polierbarkeit von Sand auf die Griffigkeit von Asphaltbetondeckschichten und Anlage einer Versuchsstrecke mit Sanden zur Kontrolle des Aussagewertes von Laboratoriumsprüfungen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Band 525, Bonn.
- Dames J. (1990): The influence of polishing resistance of sand on skid resistance of asphalt concrete. Surface Characteristics of Roadways, International Research and Technologies, ASTM STP 1031, W.E. Meyer and J. Reichert, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, S. 14-29.
- Dames J. (2000): Untersuchungen zur Sandpolierprüfung in Anlehnung an BS 812. Schlussbericht zu FE-Nr. 06.068/1996/CGB, Berlin.
- DIN – Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.
- DIN 4760 (1982): Gestaltabweichungen - Begriffe, Ordnungssystem
- DIN 53504 (2009): Prüfung von Kautschuk und Elastomeren - Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch
- DIN 53505 (2000): Prüfung von Kautschuk und Polymeren - Härteprüfung nach Shore A und Shore D.
- DIN 55350-13 (1987): Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik - Teil 13: Begriffe zur Genauigkeit von Ermittlungsverfahren und Ermittlungsergebnissen.
- DIN 7868-1 (1982): Gummi- und kunststoffbeschichtete Walzen - Teil 1: Härtefestlegungen.
- DIN EN ISO 11562 (1998): Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Messtechnische Eigenschaften von phasenkorrekten Filtern.
- DIN EN ISO 13565-2 (1998): Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften - Teil 2: Beschreibung der Höhe mittels linearer Darstellung der Materialanteilkurve.
- DIN EN ISO 25178-2 (2008): Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen.

- DIN EN ISO 8785 (1999): Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenunvollkommenheiten - Begriffe, Definitionen und Kenngrößen.
- DIN ISO 4649 (2006): Elastomere oder thermoplastische Elastomere - Bestimmung des Abriebwiderstandes mit einem Gerät mit rotierender Zylindertrommel.
- DIN ISO 5725-1 (1997): Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen - Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Begriffe.
- DIN ISO 5725-2 (2002): Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen - Teil 2: Grundlegende Methode für die Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichspräzision eines vereinheitlichten Messverfahrens.
- DIN ISO 5725-5 (2002): Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen - Teil 5: Alternative Methoden für die Ermittlung der Präzision eines vereinheitlichten Messverfahrens.
- DIN ISO 5725-6 (2002): Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen - Teil 6: Anwendung von Genauigkeitswerten in der Praxis.
- Eureka, PETROSCOPE II (2006): Project no. 3665, Announced 26 June 2006, EUREKA, Brussels, www.eurekanetwork.org/project/-/id/3665.
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- Merkblatt (1982): Statistische Auswertung von Prüfergebnissen - Teil 4: Auswertung von Ringversuchen und Errechnung von Prüf Fehlern.
- TP Gestein-StB Teil 5.4.2 (2008): Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau - Bestimmung des Polierwertes mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze.
- TP Gestein-StB Teil 5.4.3 (2008): Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau - Bestimmung des Polierwertes von feinen Gesteinskörnungen (PSV_{FGK}).
- FRT – Fries Research & Technology GmbH (2009): Bedienungsanleitung für die Analysesoftware FRT Mark III. Version 3.9. R1, Bergisch Gladbach.
- FRT – Fries Research & Technology GmbH (2010): Datenblatt für den konfokalen Punktsensor. www.frt-gmbh.com/frt/upload/pdf_de/FRT_CFP_de_web.pdf
- FSV – Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, Wien.
- RVS 08.17.02 (2007): Betondecken - Deckenherstellung.
- RVS 08.97.05 (2007): Anforderungen an Asphalt Schichten - Baustoffe
- RVS 08.97.05 (2010): Anforderungen an Asphaltmischgut - Baustoffe
- RVS 11.062 (1986): Prüfverfahren - Steinmaterial.
- RVS 11.06.23 (2005): Bestimmung des Polierwertes von Sand.
- Gauer IFB (2010): www.ifbgauer.de/arbeitsgebiete.html
- Geyer W. (1971): Beitrag zur Gummireibung auf trockenen und insbesondere nassen Oberflächen. Dissertation, Technische Universität, München.
- Grosch K.A. (1963): The relation between the friction and visco-elastic properties of rubber. Proceedings of the Royal Society, Vol. A 274, S. 21-39.

- Grosch K.A. (1989): Visko-elastische Eigenschaften von Gummimischungen und deren Einfluss auf das Verhalten von Reifen. KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe 42, Nr. 9, S. 745-751.
- GSV (2010): Güteschutzliste des Güteschutzverbandes der österreichischen Kies-, Splitt- und Schotterwerke. Wien
www.strassenbaustoffe.at/leistungen_data/Gueteschutzliste2010_100709.pdf
- Haas W. (2010): Oberflächenbeurteilung – Rauheitsmessung. Skriptum zum allgemeinen Praktikum Maschinenbau und Hauptfachversuch, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart.
- Hofer V., Pilz J., Helgason T.S. (2007): Support vector machines for classification of aggregates by means of IR-spectra. Mathematical Geology, Volume 39, No. 3, S. 307-319.
- Hushek S., Dames J. und Lindner J. (1989): Ermittlung der Endpolierwerte von im Straßenbau verwendeten Gesteinen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Band 574, Bonn.
- Hushek S. (2002): Griffigkeitsprognose mit der Verkehrssimulation nach Wehner/Schulze. Mitteilungen des Institutes für Straßenbau und Straßenerhaltung, Heft 13, Wien, S. 39-55.
- Isac (2010): Institut für Straßenwesen Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH), www.isac.rwth-aachen.de/aw/cms/website/themen/materialpruefstelle/~tby/ausstattung/?lang=de
- Kallert G. (2007): Ringversuch: PSV mit nationalem Kontrollgestein - Abschlussbericht. FGSV-Nr: 1/2004, Dresden 2007.
- KfV (2010): Unfallstatistik des Kuratoriums für Verkehrssicherheit, <http://www.kfv.at/unfallstatistik/>
- Kirchmaier L. (2007): Bewertung der Korngrößenabhängigkeit des Polierwiderstandes von Sanden mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze. Diplomarbeit, Technische Universität Wien.
- Kirchmaier L. und Blab R. (2010a): Consideration of sand polishing resistance in the Austrian standard - The Wehner/Schulze sand polishing test. Proceedings of the Conference CETRA 2010, Department of Transportation, Universität Zagreb, ISBN: 978-953-6272-37-2; S. 409 – 415.
- Kirchmaier L. und Blab R. (2010b): Improving road friction - The polishing test according to Wehner/Schulze. Proceedings of the Junior Scientist Conference 2010, Technische Universität Wien, ISBN: 978-3-200-01797-9; S. 187 - 188.
- Kirchmaier L., Blab R., Eppensteiner W. und Litzka J. (2010c): Praxisrelevante Bewertung der Polierresistenz von Sanden für den Straßenbau. Schriftenreihe Straßenforschung, Heft 586, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien.
- Klüppel M. und Heinrich G. (2000): Rubber friction on self-affine road tracks. Rubber Chemistry and Technology 73, S. 578-606.
- Kummer H.W. und Meyer W.E. (1967a): Verbessertes Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn – Ergebnisse einer neuen Reibungstheorie (Teil 1). ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 69, Nr. 8, S. 245-251.

- Kummer H.W. und Meyer W.E. (1967b): Verbesserter Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn – Ergebnisse einer neuen Reibungstheorie (Teil 1). ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 69, Nr. 11, S. 382-386.
- Lindner J., Dudenhöfer B. und Li A. (2009): Bestimmung des Polierwertes mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze, Durchführung von Ringversuchen zur Ermittlung der Präzision unter Vergleichsbedingungen. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben FGSV-Nr. 3/2007, Berlin.
- Litzka J., Pfeiler A. und Zieger M. (2003): Einfluss des Sandes auf das Griffigkeitsverhalten bituminöser Decken. Schriftenreihe Straßenforschung, Heft 534, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien.
- Marotech GmbH (2010): www.marotech.eu/GummiartenGummi-Eigenschaften.html
- Mastrad (2010): Mastrad Limited. www.mastrad.com/pendul.htm.
- Meinke H. (2010): Anleitung für das Praktikum Oberflächenmesstechnik. Fachbereich 2 / Ingenieurwissenschaften II, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin. <http://mb.f2.htw-berlin.de/fileadmin/datenpool/mb/MT/laborversuche/Oberflaeche.pdf>
- Neubauer O. (2002): PSV – Prüfung in der Schweiz – Verfahren im Labor, kritische Betrachtung. Vortrag anlässlich des Griffigkeitsworkshops im Jänner 2002, Wien.
- ON – Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- ÖNORM B 3130 (2010): Gesteinskörnungen für Asphalte und Oberflächenbehandlungen für Straßen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen - Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13043.
- ÖNORM B 3131 (2010): Gesteinskörnungen für Beton - Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 12620.
- ÖNORM EN 1097-2 (2010): Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 2: Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung.
- ÖNORM EN 1097-8 (2009): Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 8: Bestimmung des Polierwertes.
- ÖNORM EN 12620 (2008): Gesteinskörnungen für Beton.
- ÖNORM EN 13036-4 (2009): Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen - Prüfverfahren - Teil 4: Verfahren zur Messung der Griffigkeit von Oberflächen: Der Pendeltest (Normentwurf).
- ÖNORM EN 13043 (2004): Gesteinskörnungen für Asphalt und Oberflächenbehandlungen für Straßen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen.
- ÖNORM EN 196-2 (2005): Prüfverfahren für Zement - Teil 2: Chemische Analyse von Zement.
- ÖNORM EN 932-1 (1997): Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Probenahmeverfahren.
- ÖNORM EN 932-6 (1999): Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Definitionen für die Wiederholpräzision und Vergleichpräzision
- ÖNORM EN 933-1 (2006): Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren.

- ÖNORM EN ISO 3274 (1998): Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Nenneigenschaften von Tastschnittverfahren.
- ÖNORM EN ISO 4287 (2010): Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit.
- ÖNORM EN ISO 4288 (1998): Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit.
- Pfeiler A. (2004): Erhöhung der Griffbarkeit von Asphaltstraßen. Mitteilungen des Institutes für Straßenbau und Straßenerhaltung der TU Wien, Heft 16, Wien.
- Rauschenbach V. und Borek J. (2010): Griffbarkeit ausgewählter Beobachtungsstrecken im Freistaat Sachsen in Abhängigkeit der Zeit. Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 14937 BR/1, Dresden.
- Richter E., Liedloff F. und Schubert M. (2004): EGPV: Ein neues Prognoseverfahren für die Griffbarkeit von Verkehrsflächen. Bitumen, Nr. 4/2004, S. 144-149.
- Schramm E.J. (2002): Reibung von Elastomeren auf rauen Oberflächen und Beschreibung von Nassbremseigenschaften von PKW-Reifen. Dissertation, Universität Regensburg.
- Steinauer B., Ueckermann A., Meyer A., Schulze Ch. (2008): Nachhaltiger Straßenbau - Bemessungsmodell zur Förderung der Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittelständischer Straßenbauunternehmen. Teil II: Entwurfs- und Prognoseinstrumentarium für die Griffbarkeit von Fahrbahndecken aus Asphalt. Schlussbericht zum Verbundprojekt „Nachhaltiger Straßenbau“, RWTH Aachen, Aachen.
- Wehner B. (1965): Ergebnisse von Griffbarkeitsmessungen und Verkehrssicherheit. Straße und Autobahn, Nr. 8/1965, Bad Godesberg, S. 266-268.
- Wenzl P., Beckhaus K. und Schießl P. (2005): Einfluss der Zementart auf die Texturbeständigkeit von Fahrbahndecken aus Beton. Beton-Informationen, Nr. 6/2005, Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf, S. 107-113.
- Wilhelm A. (1996): Polierverhalten von Mineralstoffen. Diplomarbeit, VWU/052-96, FH-Erfurt.
- Wörner T. und Böhnisch S. (2003): Untersuchung zur Qualifizierung von Geräten zur Prognose von Griffbarkeitsmesswerten – Vorstudie. Schlussbericht zum Forschungsauftrag FGSV-Nr. 4/2002, München.
- Wörner T. und Böhnisch S. (2004): Laborverfahren zur Prognose der Griffbarkeit. Straße und Autobahn, Nr. 6/2004, S. 314-321.
- Wörner T., Westiner E. und Böhnisch S. (2006): Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung des Polierwiderstandes von Sand. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Band 943, Bonn.
- Zipkes E. (1989): Das Phänomen ansteigender Griffbarkeits-Koeffizienten bei hohen Geschwindigkeiten. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Nr. 12/1989, Kippenheim.

9 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2-1: Einwirkende Reifenkräfte gemäß dem Coloumb'schen Reibungsmodell	5
Abb. 2-2: Übersicht über die Rauigkeitsbezeichnungen im Straßenwesen.....	6
Abb. 2-3: Auswirkungen der Oberflächenstruktur auf die Höhe des Reibungsbeiwertes μ [ZIPKES, 1989].....	7
Abb. 2-4: Definition der Höhe der größten Profilspitze R_p (links), zugehöriges, nicht überhöhtes Profil mit Kennzeichnung der Mikrotextrur von Kornoberflächen (rechts).....	8
Abb. 2-5: Kalksteinsandkörner der Fraktion 0,63/1,0 mm vor (links) und nach (rechts) einer Polierbeanspruchung [KIRCHMAIER, 2007].....	8
Abb. 2-6: Übersicht über relevante Gesteinsnormen für den Straßenbau in Österreich	10
Abb. 2-7: Der PSV und seine Gültigkeit gemäß den Vorgaben in den harmonisierten Normen	11
Abb. 2-8: Kennwerte der Polierresistenz und ihre Prüffraktion.....	15
Abb. 2-9: Zulässige Korngrößenverteilung für ein Mischgut Typ AC 11 deck A2 mit Angabe der verwendeten Gesteinskörnungen.....	16
Abb. 2-10: Griffigkeitsentwicklung der beiden Mischgutttypen – links – absolut, rechts – relativ	18
Abb. 3-1: Poliersimulationsmaschine (links) sowie Detail des Polierkopfes (rechts) [Fotos: DAMES, 1990]	22
Abb. 3-2: Reibwertbestimmungsmaschine (links) sowie externe Geschwindigkeits-Reibwertaufzeichnung (rechts) [Fotos: DAMES, 1990]	23
Abb. 3-3: Prüfanlage nach Wehner/Schulze - Version 1 der Fa. Maschinen- und Gerätebau Josef Freundl [Foto: RAUSCHENBACH und BOREK, 2010].....	24
Abb. 3-4: Prüfanlage nach Wehner/Schulze - Version 2 der Fa. BPS Wennigsen [Foto: Kirchmaier, 2007].....	25
Abb. 3-5: Mobile Wehner/Schulze Anlage [Foto: ISAC, 2010]	25
Abb. 3-6: Bestandteile der Prüfanlage nach Wehner/Schulze neuester Bauart [Foto: KIRCHMAIER, 2007].....	26
Abb. 3-7: Polierkopf mit den drei Polierrollen [Foto: KIRCHMAIER, 2007]	26
Abb. 3-8: Detailansicht einer Polierrolle.....	27
Abb. 3-9: Anordnung der Polierrollen auf der Probenoberfläche. Maßangaben in mm [Foto: KIRCHMAIER und BLAB, 2010a]	27
Abb. 3-10: Sieblinie des Poliermittels.....	28
Abb. 3-11: Änderung des Polierwertes durch erhöhte Poliermittelzufuhr	28
Abb. 3-12: Prüfkopf mit den Prüfgummis [Foto: KIRCHMAIER, 2007]	29
Abb. 3-13: Detailansicht eines Prüfgummis	29
Abb. 3-14: Anordnung der Prüfgummis auf der Probenoberfläche [Foto: KIRCHMAIER und BLAB, 2010b]	30
Abb. 3-15: Verfahrbarer Probentisch im Betriebszustand (links), Geöffneter Probentisch mit Darstellung des eingebauten Referenz-Drehmomentmessscheibe	30
Abb. 3-16: (a) Sandprobekörper, (b) Splittprobekörper nach dem Mastixeingussverfahren, (c) Splittprobekörper nach dem Mosaikauslegeverfahren, (d) Asphaltprobekörper [Foto: KIRCHMAIER et al., 2010c]	31
Abb. 3-17: Abmessungen der Holzträgerplatte bzw. Schadensbild einer nicht versiegelten Holzträgerbild nach der Wehner/Schulze Prüfung [Foto: KIRCHMAIER, 2007].....	32

Abb. 3-18: Fotodokumentation der Probekörperherstellung [Fotos: KIRCHMAIER et al., 2010c]	33
Abb. 3-19: Auslegen und Verfüllen der Splittkörner	33
Abb. 3-20: Skizzenhafter Querschnitt eines Probekörpers hergestellt nach dem Mosaikauslegeverfahren	34
Abb. 3-21: Auffüllen der Schalform mit einem Klebstoff-Quarzmehl Gemisch	34
Abb. 3-22: Splittprobekörper mit und ohne eingelegtem Platzhalter nach dem Mosaikauslegeverfahren	34
Abb. 3-23: Zylindrische Metallschalung für die Probenherstellung	35
Abb. 3-24: Splittprobekörper hergestellt nach dem Splitt-Mastix-Eingussverfahren	35
Abb. 3-25: Statisches System bei der Griffigkeitsmessung	38
Abb. 3-26: Rohdaten der Griffigkeitsmessung mit dem Prüfgerät nach Wehner/Schulze	39
Abb. 3-27: Mathematische Näherung durch Polynom 6. Ordnung	40
Abb. 3-28: Ablesen des PWS aus dem geglätteten Reibwertverlauf	41
Abb. 3-29: Schnellpoliermaschine [Foto: PFEILER, 2004] bzw. [Skizze: FSV, 1986]	43
Abb. 3-30: Pendelgerät [Foto: MASTRAD, 2010] bzw. [Skizze: ÖNORM EN 1097-8:2009]	43
Abb. 3-31: Prüfkörper für die Bestimmung des PSV-Wertes [KIRCHMAIER et al., 2010c]	44
Abb. 3-32: Laborgriffigkeitsmessgerät – Frictometer [PFEILER, 2004]	46
Abb. 3-33: Das Polier- und Griffigkeitsmessgerät PGM [GAUER, 2010] bzw. Detailansicht der Polier- und Griffigkeitsmessstößel [RAUSCHENBACH und BOREK, 2010]	48
Abb. 3-34: Das Erfurter Griffigkeitsprognoseverfahren [Skizze: RICHTER et al., 2004]	50
Abb. 3-35: Das Erfurter Griffigkeitsprognoseverfahren [Skizze: RICHTER et al., 2010]	51
Abb. 3-36: Aufgezeichnetes Poliermoment neuer Rollenlager (links) und beschädigter Rollenlager (rechts)	54
Abb. 3-37: (a) Prüfgummis mit Abriebskeil, (b) Prüfgummis mit Blasenbildung	55
Abb. 3-38: Prinzipskizze der Poliersimulation mit der Schnellpoliermaschine (Feinpolieren)	58
Abb. 3-39: Thermografische Aufnahme einer Pendelmessung [NEUBAUER, 2002]	58
Abb. 4-1: Ermittelte PWS-Werte der drei Gesteinskörnungen für das Mosaikauslegeverfahren (links) und das Splitt-Mastix-Eingussverfahren (rechts)	64
Abb. 4-2: Relative Unsicherheiten der ermittelten Wiederhol- und Vergleichsstandardabweichungen bei einem Erwartungswert von 95 % in Abhängigkeit der Anzahl der teilnehmenden Prüflabors und Anzahl der untersuchten Einzelmessproben [DIN, ISO 5725-1:1997]	68
Abb. 4-3: Drahtornamentglasplatte 521-7 mm, 3D-Ausschnitt und mittleres Oberflächenprofil	70
Abb. 4-4: Riffelplatte aus gehärtetem Stahl, 3D-Ausschnitt und mittleres Oberflächenprofil	70
Abb. 4-5: Riffelplatte – Detailansicht mit Profilausschnitt	71
Abb. 4-6: Übersicht über die im Ringversuch hergestellten Probekörper	75
Abb. 4-7: Übersicht über das Prüfprogramm zur Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichsstandardabweichung der Polierwertbestimmung von Sand mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze	75
Abb. 4-8: Einzelmessergebnisse Gestein G309 gereiht nach Prüfdatum	79
Abb. 4-9: Einzelmessergebnisse Gestein G309 gereiht nach Probennummer	80
Abb. 4-10: Einzelmessergebnisse Gestein GTPA gereiht nach Prüfdatum	83
Abb. 4-11: Einzelmessergebnisse Gestein GTPA gereiht nach Probennummer	84

Abb. 4-12: Darstellung der Einzelmessergebnisse mit Kennzeichnung der arithmetischen Mittelwerte.....	87
Abb. 4-13: Vergleich der Ergebnisse aus der Bestimmung der Wiederholstandardabweichung mittels Box-Plot.....	88
Abb. 4-14: Verfahren zur Prüfung der Annehmbarkeit von Einzelmesswerten, gewonnen unter Wiederholbedingungen, bei anfangs n Einzelmesswerten.....	95
Abb. 4-15: (a) Zusammenstellung aller auf der Glaskontrollplatte ermittelten Reibwerte; (b) Reibwerte auf der Glaskontrollplatte mit dem Prüf gummi satz F42Z.....	98
Abb. 4-16: (a) Zusammenhang zwischen Glas- und Riffelplatte inklusive der zwei gebrauchten Prüf gummi satze; (b) Zusammenhang ohne die zwei gebrauchten Prüf gummi satze	100
Abb. 4-17: Einflussfaktoren auf den Polierwert Wehner/Schulze (PWS) von Sand.....	102
Abb. 4-18: Poliermoment–Überrollungs-Beziehung	106
Abb. 4-19: Eindringtiefe-Geschwindigkeits-Beziehung [STEINAUER et al., 2008].....	114
Abb. 4-20: Oberflächentypen [STEINAUER et al., 2008]	115
Abb. 4-21: Modellbild zur Gummieindringtiefe	115
Abb. 4-22: Prüf gummi mit starker Abriebskeilbildung	116
Abb. 4-23: Vergleich zweier Prüf gummi typen; Prüf gummi der Fa. BPS-Wennigsen (oben), nachgebauter Prüf gummi (unten)	119
Abb. 4-24: Reibwerte auf der Riffelplatte (links); Vergleich der Reibwerte ermittelt auf der Riffel- und auf der Glaskontrollplatte.....	121
Abb. 4-25: Darstellung der Gestaltabweichungen 1. bis 4. Ordnung (Profilschnitt)	126
Abb. 4-26: Ungefiltertes Profil einer realen Oberfläche (P-Profil) [MEINKE, 2010].....	127
Abb. 4-27: Gefilterte Rauheitsprofil (R-Profil) [MEINKE, 2010].....	127
Abb. 4-28: Messprinzip eines konfokalen Punktsensors [FRT, 2010].....	129
Abb. 4-29: Optisches Messgerät zur Erfassung der Topographie von Oberflächen. Darstellung der gesamten Prüfeinrichtung mit montierter Einspannvorrichtung für die drei Prüf gummi s (links); Detailansicht der Vermessung eines Prüf gummi s mit dem konfokalen Punktsensor mit einer Wellenlänge des Lichtes von 660 nm (rechts)	130
Abb. 4-30: Anordnung der Prüffläche auf einem Prüf gummi - Maße in [mm]	130
Abb. 4-31: Topographieänderung der Prüf gummi s – Prüf programm	131
Abb. 4-32: Darstellung der PWS- und Reibwerte auf der Glaskontroll- und Riffelplatte mit den drei Prüf gummi satzen F50C, F50D und F50E	133
Abb. 4-33: In Bezug zum Beanspruchungszustand [0] dargestellte, relative Reibwerte der nachfolgenden zwei Reibwertbestimmungen (Zustand [1] und [2]) auf den drei Prüfoberflächen (Sand, Riffelplatte und Glasplatte).....	134
Abb. 4-34: Entwicklung der Prüf gummi rauheit – Draufsicht	135
Abb. 4-35: Detailansicht des 1. Prüf gummi s des Prüf gummi satzes F50C im Beanspruchungszustand [0] mit Kennzeichnung eines Längs- und Querprofils (30fache Überhöhung)	135
Abb. 4-36: 3D-Ansicht von einer punktuellen Spitze auf einem neuen Prüf gummi (30fache Überhöhung).....	136
Abb. 4-37: Detailansicht des 1. Prüf gummi s des Prüf gummi satzes F50C im Beanspruchungszustand [3] mit Kennzeichnung eines Längs- und Querprofils (30fache Überhöhung)	136
Abb. 4-38: Entwicklung der Prüf gummi rauheit – 3-dimensionale Ansicht.....	137

Abb. 4-39: Darstellung des absoluten Verlaufs der Rauheitsparameter (sRp), (sRv) und (sRz) der drei Prüfgummisätze in den fünf Beanspruchungszuständen	138
Abb. 4-40: In Bezug zum Beanspruchungszustand [0] dargestellte, relative Amplitudenkenngrößen (sRp), (sRv) sowie (sRz) der nachfolgenden vier Texturmessungen (Zustand [1] bis [4]) der drei Prüfgummisätze F50C, F50D und F50E.....	139
Abb. 4-41: Vergleich der PWS-Werte der drei Einzelmessproben eines Sandes mit der Entwicklung der Amplitudenkenngrößen (sRp), (sRv) und (sRz) der verwendeten Prüfgummis	139
Abb. 4-42: Entwicklung der Amplitudenkenngrößen (sRp), (sRv), (sRz) und (sRz25) der drei Prüfgummisätze während der Polierwertbestimmung von Sand mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze	140
Abb. 4-43: Zusammenhang zwischen den Amplitudenkenngrößen (sRp), (sRv), (sRz), (sRz25), (sR _{max}) und (sR _{max} 25) sowie den Reibwerten auf den zwei Kontrolloberflächen - Glasplatte links, Riffelplatte rechts	141
Abb. 4-44: Zusammenhang zwischen den Amplitudenkenngrößen (sRa) und (sRq) sowie den Reibwerten auf den zwei Kontrolloberflächen - Glasplatte links, Riffelplatte rechts	141
Abb. 4-45: Vergleich der Kennwerte sRk, sRpk und sRvk aus der Materialanteilkurve der drei Prüfgummisätze in den fünf Beanspruchungszuständen	142
Abb. 4-46: Zusammenhang zwischen den Materialkennwerten (sRk), (sRpk) und (sRvk) und den Reibwerten auf den zwei Kontrolloberflächen - Glasplatte links, Riffelplatte rechts.....	143
Abb. 4-47: Zusammenhang zwischen den Materialkennwerten (sMr1) und (sMr2) und den Reibwerten auf den zwei Kontrolloberflächen - Glasplatte links, Riffelplatte rechts	144
Abb. 5-1: Versuchsprogramm zur Untersuchung der Korngrößenabhängigkeit des PWS [KIRCHMAIER, 2007]	147
Abb. 5-2: Ergebnisse Korngrößenabhängigkeitsuntersuchung – Histogramm (links) und Liniendiagramm bereinigt um den Anfangsreibbeiwert der Fraktion 0,2/0,4 mm (rechts).....	148
Abb. 5-3: Korngrößenabhängigkeit des PWS - Trends und Bestimmtheitsmaß.....	149
Abb. 5-4: Korngrößenverteilung der drei Sande G101, G102 und G103	149
Abb. 5-5: Korngrößenverteilungen von 7 Natursanden, 14 EBK und 2 EKK von österreichischen Sandproduzenten.....	150
Abb. 5-6: Überblick über das Versuchsprogramm.....	153
Abb. 5-7: Mittlere sowie maximale und minimale Korngrößenverteilung der elf Sande G201 bis G211.....	155
Abb. 5-8: PWS-Werte der Sandfraktionen 0,2/0,4 und 0,63/1,0 mm	160
Abb. 5-9: Reihung der Sande in den Fraktionen 0,2/0,4 und 0,63/1,0 mm aufgrund ihres PWS	160
Abb. 5-10: Korrelation des PWS der zwei Sandfraktionen 0,2/0,4 und 0,63/1,0 mm	161
Abb. 5-11: PWS-Werte der Sandfraktion 0,2/0,4 mm mit Kennzeichnung des aktuell gültigen Grenzwertes gemäß RVS 08.17.02 [FSV, 2007].....	162
Abb. 5-12: Ergebnisse des PWS _{0,2/0,4} - Histogramm mit Dichtefunktion.....	163
Abb. 5-13: Bilddokumentation der Sandprobekörperherstellung für die Anwendung in der Schnellpoliermaschine und dem Pendelgerät	165
Abb. 5-14: Ergebnisse der Bestimmung des PSV _{fGK} an elf Sanden - Histogramm	167
Abb. 5-15: Ergebnisse der Bestimmung des PWS _{7,2/10,0} an elf Splitten - Histogramm	169

Abb. 5-16: Ergebnisse der PSV-Bestimmung im Labor - Histogramm mit Kennzeichnung der Vergleichsgrenze (R) gemäß EN 1097-8 [ON, 2009]	172
Abb. 5-17: Vergleich PSV Labor - Güteschutzliste	173
Abb. 5-18: Relative Spreizung innerhalb der fünf Polierwertkategorien.....	176
Abb. 5-19: Relative Reihung der Polierwerte der feinen Gesteinskörnung je Prüfkategorie - Histogramm	177
Abb. 5-20: Relative Reihung der Polierwerte der groben Gesteinskörnung je Prüfkategorie - Histogramm	177
Abb. 5-21: Korrelation des $PWS_{7,2/10,0}$ mit dem $PWS_{0,2/0,4}$ (links) und dem $PWS_{0,63/1,0}$ (rechts).....	178
Abb. 5-22: Korrelation PSV - PSV_{fGK}	180
Abb. 5-23: Korrelation des Polierwertes $PWS_{7,2/10,0}$ mit dem PSV	181
Abb. 5-24: Korrelation $PWS_{0,2/0,4}$ - PSV_{fGK} (links) sowie $PWS_{0,63/1,0}$ - PSV_{fGK} (rechts)	182
Abb. 5-25: Klasseneinteilung des PSV_{fGK} für $PWS \geq 0,55$ [-].....	183
Abb. 5-26: Klasseneinteilung des PSV_{fGK} für $PWS \geq 0,50$ [-].....	185

ANHANG A – VEREINHEITLICHTE PRÜFBEDINGUNGEN

Auf den folgenden Seiten werden die wesentlichsten Verfahrensschritte bei der Sandpolierwertbestimmung mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze detaillierter ausgeführt.

Probenaufbereitung

- Aus ca. 50 kg der Korngruppe 0/2 mm ist durch Trockensiebung ca. 10 kg der Fraktion 0,125/0,5 mm vor auszusieben.
- Mittels Nasssiegung wird anschließend die Sandfraktion 0,2/0,4 mm ausgesiebt. Zu verwenden sind neue, kalibrierte Siebe mit den Öffnungsweiten 0,063 – 0,2 – 0,4 mm.
- Das so erhaltene Gestein ist in geeigneten Behältern für 24 Stunden mit Wasser aufzuschlämmen. Nach den 24 Stunden wird der Behälter aufgerührt, damit die gelösten Feinteile in Schwebelagerung geraten und vorsichtig abgossen werden können. Zur Gewährleistung, dass die Sandkörner von sämtlichen anhaftenden Feinteilen befreit sind, ist das Prüfmaterial anschließend mit einem frischen, sauberen Wasser aufzugießen und in einem Ultraschallbad für ca. 2 Minuten zu behandeln. Die so gelösten Schwebstoffe sind wiederum abzugießen.
- Das ausgesiebte Gestein ist anschließend für ca. 18 Stunden bei $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ im Trockenschrank bis zur Massenkonstanz zu trocknen.
- Anschließend ist mit dem getrockneten Gestein nochmals eine Trockensiebung unter Verwendung der Siebe mit den Öffnungsweiten 0,2 und 0,4 mm durchzuführen. Die so aufbereitete Messprobe ist in verschließbaren Behältern aufzubewahren.

Prüfplattenherstellung

- Die Holzträgerplatten aus Sperrholz sind mit einer klaren Holzschutzlasur zu versiegeln.
- Für den Versiegelungsvorgang sind jeweils 15 Platten nebeneinander aufzulegen und diese mit einem Flachpinsel nacheinander mit Holzschutzlasur zu bestreichen. Dieser Vorgang wird 2- bis 3-Mal wiederholt. Der Versiegelungsvorgang ist sowohl auf der Ober- als auch auf der Unterseite sowie an den Rändern der Holzträgerplatten durchzuführen, um bei Wasserzutritt ein späteres Aufschüsseln der Probeplatten zu unterbinden.
- Nach dem Versiegeln sind die Platten für ca. 12 Stunden bei Raumtemperatur zu lagern bis der Lack vollständig aufgetrocknet ist.
- Anschließend sind die Holzträgerplatten einzeln auf die Probeneinspannvorrichtung der Prüfanlage nach Wehner/Schulze zu montieren und auf ihre Ebenheit hin zu kontrollieren. Dazu wird mittels einer Fühlerlehre ($t = 0,4 \text{ mm}$) überprüft, ob der Spalt zwischen Holzplatte und Einspannvorrichtung nicht größer als 0,4 mm ist. Platten mit einem größeren Spalt sind von der Prüfung auszuschließen.
- Der für das Sand-Aufklebeverfahren zu verwendende Klebstoff der Marke MC-DUR 1200 VK kann aus den Beständen der Prüflabors entnommen werden.

Da über die gleichbleibende Qualität des Klebstoffgebundes bei längerer Nutzungsdauer keine Informationen vorliegen, für die Probenherstellung jedoch kein neuwertiger Klebstoff verwendet wurde, kann ein Einfluss des Klebstoffes auf die Prüfstreuung nicht ausgeschlossen werden.

- Es sind immer drei Einzelmessproben in einem Durchgang herzustellen.
- Die Holzträgerplatten sind zu wiegen und das Leergewicht auf 0,1 g zu notieren.

- Von dem 2-Komponenten Klebstoff sind in einem Einweg-Plastikbecher gemäß dem vorgegebenen Mischungsverhältnis 28 g für ca. 2 Minuten anzurühren.
- Der Klebstoff ist anschließend mit einem weichen Pinsel gleichmäßig auf drei Holzträgerplatten aufzuteilen. Dabei ist der Pinsel ohne Druck über die Holzplatten zu führen. Das Bestreichen der Platten mit Klebstoff hat auf einer horizontalen, ebenen Fläche zu erfolgen.
- Überschüssiger Klebstoff an den Plattenrändern und in den Bohrungen ist zu entfernen und die Holzplatte mit Klebstoff neuerlich auf 0,1 g zu wiegen
- Die Messprobe ist im Behälter kräftig durchzurühren, um eine Entmischung zu verhindern. Von der Messprobe sind anschließend ca. 100 g in ein Maschensieb mit einer Öffnungsweite von 0,5 mm zu füllen.
- Die Prüfkörnung ist durch Klopfen gegen die Siebwand auf eine mit Klebstoff bestrichene Platte aufzubringen. Dabei ist das Sieb in einem vertikalen Abstand von ca. 30 cm zur Platte in kreisenden Bewegungen zu führen, um die Platte gleichmäßig mit Sand zu bestreuen. Im 1. Einstreuvorgang ist bereits soviel Sand aufzubringen, dass die gesamte Holzplatte mit Sand bedeckt ist und keine frei liegenden Klebstoffstellen sichtbar sind. Es ist jedoch darauf zu achten, dass kein zu großer Sandüberschuss auf der Plattenoberfläche entsteht, da sonst der anschließende Einwalzvorgang keine Wirkung zeigt.
- Der Sand ist dann kreuzweise mit der Tapeziererwalze einzuwalzen. Die Walze ist dabei nur leicht anzudrücken.
- Einrieseln und Einwalzen sind insgesamt noch 2-Mal zu wiederholen, so dass kein Klebstoff mehr an der Oberfläche sichtbar und die gesamte Platte mit einer konstant dicken Sandschicht bedeckt ist. Zuviel Klebstoff ist durch dunkle Verfärbungen der Oberfläche ersichtlich. Beim letzten Einwalzvorgang ist die Walze fest gegen die Prüfoberfläche zu drücken.
- Die bestreute Platte ist anschließend für mindestens 18 Stunden aushärten zu lassen.
- Nach Aushärten des Klebstoffes ist der überschüssige Sand durch Abklopfen auf eine Tischplatte zu entfernen. Das noch lose anhaftende Gestein ist durch gegenseitiges, im Winkel von ca. 45°, vorsichtiges Aneinanderreiben der Prüfplatten zu entfernen.
- Anschließend sind die Einzelmessproben mit einer Borstenbürste abzubürsten und mittels Luftdruck abzublasen. Die Sandprobekörper dürfen keine deutlich erkennbaren Kleberanhäufungen auf der Prüffläche aufweisen. Diese sind durch weiße Stellen erkennbar.
- Als letzter Arbeitsschritt sind noch allfällig verklebte Befestigungsbohrungen von unten frei zubohren und die Proben zur Ermittlung der aufgeklebten Gesteinsmenge neuerlich auf 0,1 g zu wiegen.

Poliersimulation

- Für die Poliersimulation müssen sich im Wasser-Quarzmehl-Behälter insgesamt 40 Liter des Gemisches befinden. Wird das Gemisch für einen Zeitraum von länger als 2 Stunden nicht durchmischt, so ist es vor der Prüfung einer Einzelmessprobe von Hand kräftig aufzurühren.
- Die Temperatur des Wasser-Quarzmehl-Gemisches hat während der Poliersimulation (20 ± 2) °C zu betragen.
- Die Zufuhrate des Wasser-Quarzmehl-Gemisches beträgt ($5 \pm 0,5$) l/min.
- Nach jedem Poliervorgang ist in den Wasser-Quarzmehl-Behälter eine Menge von ca. 70 g Quarzmehl nachzufüllen, um den Verlust während einer Poliersimulation zu kompensieren.

- Nach insgesamt sechs Poliervorgängen ist das gesamte Wasser-Quarzmehl-Gemisch zu erneuern.
- Es können bereits benützte und auf der Prüfmaschine montierte Polierrollen verwendet werden. Eine spezielle Lagerung wird nicht vorgegeben. Die Polierrollen müssen jedoch zur Gewährleistung einer gleichwertigen Gummimischung von der Fa. BPS Wennigsen stammen.
- Der Poliervorgang ist mit aktivierten Blattfedern, jedoch ohne Aufspannen der Gummimanschette durchzuführen.
- Das während der Poliersimulation einwirkende Poliermoment ist zur Kontrolle der Lagerreibung und zur späteren statistischen Auswertung kontinuierlich aufzuzeichnen.
- Nach Abschluss des Poliervorganges ist die Einzelmessprobe für 120 Sekunden mit Wasser zu spülen, um anhaftende Quarzmehlrückstände zu entfernen. Daran anschließend ist umgehend die Griffigkeitsmessung auf der Prüfstation durchzuführen.

Reibwertbestimmung

- Während der Griffigkeitsmessung ist die Einzelmessprobe mit 20 l Wasser pro min zu beaufschlagen. Die Temperatur des Prüfwassers hat dabei (10 ± 2) °C zu betragen.
- Der zu verwendende Prüfgummisatz ist zumindest 12 Stunden vor der Prüfung aus dem Kühlschrank zu entnehmen und neben der Maschine zu temperieren.
- Vor der Prüfung einer Einzelmessprobe ist eine Kontrollprüfung auf der Glaskontrollplatte durchzuführen. Der vor der Prüfung einer Einzelmessprobe gemessene Reibwert auf der Glasplatte darf um 40 % vom Reibwert auf der Glasplatte im Neuzustand abweichen.
- Für die Wiederholungsmessungen mit einem Merkmalniveau ist grundsätzlich derselbe Prüfgummisatz zu verwenden. Sollte ein Prüfgummisatz nach einer durchgeführten Prüfung deutliche Schäden aufweisen, wie z.B. Blasen- bzw. Abriebskeilbildung am Ende des Prüfgummis, so ist dieser Prüfgummisatz auszuwechseln.
- Der Gesteinsverlust, der durch die Polierbeanspruchung auftritt, ist nach dem Prüfen und Trocknen der Einzelmessprobe durch Wägung festzustellen.
- Es sind Prüfgummis der Fa. BPS Wennigsen mit einer Shorehärte von (65 ± 5) Shore A zu verwenden.
- Glättung des Reibwertverlaufs zw. 5 und 95 km/h mittels Polynom 6. Ordnung.

ANHANG B – STATISTISCHE AUSWERTUNG NACH DIN 5725 – TEIL 2 UND 5

B.1 Auswertung gemäß DIN ISO 5725-2

Da die in der Norm DIN ISO 5725-2:2002 angeführten Berechnungs- bzw. Auswertemethoden vom Vorhandensein einer Vielzahl von am Ringversuch teilnehmenden Prüflabors ausgehen, mussten aufgrund der geringen Anzahl von Prüflabors im gegenständlichen Ringversuch folgende Festlegungen getroffen werden:

- Für die Bestimmung der Wiederholstandardabweichung wurde jede geprüfte 3er Serie eines Materials bzw. Merkmalniveaus als ein Prüfergebnis für ein Labor gewertet. Verwendet wurden für beide Materialien (G309 und GTPA) nur die Proben mit der fortlaufenden Nummer 1 bis 30. Das bedeutet für die Auswertung, dass die Anzahl der Labors p in diesem Fall 10 beträgt, da von den beteiligten Labors A und B je Merkmalniveau insgesamt fünf „3er Serien“ geprüft worden sind.
- Für die Bestimmung der Vergleichsstandardabweichung wurden für das Material G309 die Proben mit der fortlaufenden Nummer 1,3,5,7,9,11 und 31 bis 36 verwendet. Für das Material GTPA wurden die Proben mit der fortlaufenden Nummer 2,4,6,8,10,12 und 31 bis 36 verwendet. Von jedem Labor wurden je Material somit zwei „3er Serien“ geprüft. Für die Auswertung beträgt die Anzahl der Labors p somit 4.
- Die im Zuge dieses Ringversuches ermittelten Prüfergebnisse werden auf ihre Vereinbarkeit bzw. auf das Vorhandensein von Ausreißern kontrolliert. Dabei werden sowohl grafische als auch numerische Auswertemethoden angewandt, um trotz der geringen Anzahl an teilnehmenden Labors eine möglichst hohe Aussagekraft der Ergebnisse zu erlangen. An dieser Stelle soll erwähnt werden, dass diese Ausreißertests erst bei einer hohen Anzahl an teilnehmenden Prüflabors (≥ 10) ihre ganze Wirkung entfalten.

Jedes Labor p , bezeichnet mit dem Index i ($i = 1, 2, \dots, p$) hat in der gegenständlichen Untersuchung für jedes Merkmalniveau q , bezeichnet mit dem Index j ($j = 1, 2, \dots, q$), dazu zählen die Gesteinskategorien G309 und GTPA als auch die für die Untersuchungen auf der Rifelfplatte verwendeten Prüf gummi sätze (z.B. F40A) eine bestimmte Anzahl von Wiederholungsmessungen n , bezeichnet mit dem Index k ($k = 1, 2, \dots, n$) ausgeführt. Die einzelnen Prüfergebnisse einer „3er Serie“ eines Labors eines Merkmalniveaus werden in einer Zelle zusammengefasst, siehe Formblatt A in Abb. B-1. Die darin angeführten Abkürzungen bedeuten:

n_{ij} die Anzahl von Ermittlungsergebnissen in der Zelle für das Labor i auf dem Merkmalsniveau j , in der Regel gilt in diesem Ringversuch: $n = 3$;

y_{ijk} ein einzelnes Ermittlungsergebnis innerhalb einer „3er Serie“

p_j die Anzahl der Labors mit Bericht über mindestens ein Ermittlungsergebnis für das Merkmalsniveau j (nach Aussonderung von Ermittlungsergebnissen, die als Ausreißer oder als falsch gekennzeichnet wurden). Für die Schätzung der Wiederholstandardabweichung ist $p = 10$, für die Schätzung der Vergleichsstandardabweichung ist $p = 4$.

In weiterer Folge für jedes Labor (p) von jedem Merkmalsniveau (q) gemäß (10.1) der arithmetische Mittelwert einer Zelle berechnet und in Formblatt B der Abb. B-1 eingetragen.

$$\bar{y}_{ij} = \frac{1}{n_{ij}} \cdot \sum_{k=1}^{n_{ij}} y_{ijk} \quad (10.1)$$

Formblatt A: Empfohlenes Formblatt für die Zusammenstellung der Ursprungsdaten									
Labor	Merkmal s n i v e a u								
	1	2	<i>j</i>	..	..	<i>q</i> - 1	<i>q</i>
1									
2									
..									
..					..				
..					..				
<i>i</i>					<i>y_{ijk}</i>				
..					..				
..									
<i>p</i>									

Formblatt B: Empfohlenes Formblatt für die Zusammenstellung der arithmetischen Mittelwerte									
Labor	Merkmal s n i v e a u								
	1	2	<i>j</i>	..	..	<i>q</i> - 1	<i>q</i>
1									
2									
..									
<i>i</i>					\bar{y}_{ij}				
..									
..									
<i>p</i>									

Formblatt C: Empfohlenes Formblatt für die Zusammenstellung der Maße für die Streuung innerhalb einer Zelle									
Labor	Merkmal s n i v e a u								
	1	2	<i>j</i>	..	..	<i>q</i> - 1	<i>q</i>
1									
2									
..									
<i>i</i>					<i>s_{ij}</i>				
..									
..									
<i>p</i>									

Abb. B-1: Formblätter für die Zusammenstellung von Prüfergebnissen eines Ringversuchs [DIN ISO 5725-2, 2002]

Im nächsten Auswertungsschritt wird die Streuung innerhalb einer Zelle, also die Streuung innerhalb der Prüfergebnisse einer „3er Serie“ in Form der vorhandenen Standardabweichung gemäß (10.2) berechnet und in das Formblatt C der Abb. B-1 eingetragen.

$$s_{ij} = \sqrt{\frac{1}{n_{ij} - 1} \cdot \sum_{k=1}^{n_{ij}} (y_{ijk} - \bar{y}_{ij})^2} \quad (10.2)$$

Auf die Werte der Formblätter A, B und C sind anschließend Ausreißertests durchzuführen. Dazu werden in der DIN ISO 5725-2 folgende zwei numerische Testmethoden angeführt:

- Cochran-Test
- Grubbs-Tests

Der **Cochran-Test** dient zur Kontrolle der Streuung innerhalb eines Labors und wird auf die berechneten Standardabweichungen des Formblatts C der Abb. B-1 angewandt. Mit diesem Test wird kontrolliert, ob die getroffene Annahme, dass alle teilnehmenden Labors mit annähernd derselben Prüfstreuung arbeiten, überprüft. Dieser Test zählt zu den einseitigen Ausreißertests - lediglich die größte Standardabweichung wird geprüft - und wird für jedes Merkmalniveau getrennt angewendet. Der Cochran-Test erfordert streng genommen von jedem Labor (p) dieselbe Anzahl (n) von Wiederholergebnissen. Die Durchführung des Cochran-Tests erfordert die Berechnung einer Prüfgröße (C) nach Cochran (Details zur Berechnung sind in der DIN ISO 5725-2 angeführt). Ist die errechnete Prüfgröße $C \leq$ der Grenze des kritischen Bereichs für ein Signifikanzniveau⁷⁵ von 5 %, kann die geprüfte Einheit als korrekt angenommen werden. Die Grenzen des kritischen Bereichs variieren in Abhängigkeit der Anzahl der teilnehmenden Labors und der vorhandenen Anzahl von Wiederholergebnissen. Werte für den kritischen Bereich können den Tabellenwerken der DIN ISO 5725-2 entnommen werden.

Der **Grubbs-Test** ist ein Test der Streuung zwischen den Labors und wird angewendet auf die arithmetischen Mittelwerte einer Zelle eines Merkmalniveaus, also auf die Werte des Formblatts B in Abb. B-1. Bedingung für die Anwendung ist das Vorhandensein von einer Anzahl von Wiederholergebnissen von $n > 2$. Zusätzlich kann der Grubbs-Test auf ein Einzelergebnis innerhalb einer Zelle angewendet werden, wo der Cochran-Test gezeigt hat, dass die Standardabweichung der Zelle zweifelhaft ist. Bei der Durchführung des Grubbs-Tests wird die Prüfgröße (G_p) errechnet (Details zur Berechnung sind in der DIN ISO 5725-2 angeführt). Diese kann sowohl für den größten vorhandenen Wert bzw. für die beiden größten Werte als auch für den kleinsten bzw. für die beiden kleinsten Werte berechnet werden. Ist die errechnete Prüfgröße $G_p \leq$ der Grenze des kritischen Bereichs für ein Signifikanzniveau von 5 %, kann die geprüfte Einheit als korrekt angenommen werden. Die Grenzen des kritischen Bereichs hängen anders als beim Cochran-Test lediglich von der Anzahl der teilnehmenden Labors ab. Werte für den kritischen Bereich können den Tabellenwerken der DIN ISO 5725-2 entnommen werden.

Die DIN ISO 5725-2 gibt zusätzlich zu den numerischen Ausreißertests auch zwei grafische Auswertemethoden vor. Dazu zählen die:

- Mandels h-Statistik
- Mandels k-Statistik

Da diese beiden grafischen Ausreißertests in Österreich bei der Beurteilung der Ergebnisse von Ringversuchen standardmäßig angeführt werden, werden sie im Rahmen dieses Ringversuchs zusätzlich zu den numerischen Methoden angewandt. Mithilfe dieser beiden „Statistiken“ kann sowohl die Prüfgenauigkeit von Labors als auch die Variabilität des vereinheitlichten Messverfahrens beschrieben werden. Ein Vorteil dieser Auswertemethoden ist, dass sie auch bei lediglich zwei Wiederholergebnissen ($n = 2$) ohne Einschränkung angewendet werden können.

⁷⁵ Bei der Beobachtung von Zufallsprozessen gibt es immer die Wahrscheinlichkeit, dass die Ergebnisse einen bestimmten Grenzwert überschreiten. Die Wahrscheinlichkeit der Überschreitung dieses Grenzwerts wird als Signifikanzniveau (α) bezeichnet. Gebräuchlich sind in der Statistik die drei Signifikanzniveaus $\alpha < 0,05$ - signifikant (Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 5 %), $\alpha < 0,01$ - sehr signifikant (Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 1 %) und $\alpha < 0,001$ – höchst signifikant (Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 1 ‰).

Die Vereinbarkeitsprüfgröße (h) dient wie die Prüfgröße (G_p) des Grubbs-Tests zur Feststellung der Streuung zwischen den Labors. Als Indikator für ein von der Grundgesamtheit konstant abweichendes Labor dienen horizontale Indikatorlinien für das Signifikanzniveau 5 und 1 %, welche in die Auswertegrafik eingezeichnet werden. Diese sind abhängig von der Anzahl der Wiederholergebnisse und der Anzahl der teilnehmenden Labors.

Die Vereinbarkeitsprüfgröße (k) dient wie die Prüfgröße (C) des Cochran-Tests zur Feststellung der Streuung innerhalb des Labors. Wie schon bei der h-Statistik werden auch in die k-Statistik Indikatorlinien eingezeichnet, um auffällige Resultate hinsichtlich der vorhandenen Prüfstreuung einer „3er Serie“ eines Labors herausfiltern zu können.

Werden aufgrund der Ausreißertests vorhandene Ergebnisse in Frage gestellt bzw. sind einzelne Ergebnisse aufgrund dieser Tests eindeutig abzuweisen, so sind die Berechnungen der Formblätter B und C in Abb. B-1 sowie die statistischen Ausreißertests mit den entfernten Werten erneut durchzuführen.

Mit den Werten in den Formblättern A, B und C der Abb. B-1 wird nach Analyse der Verträglichkeit mittels der Ausreißertests der Gesamtmittelwert (m) sowie die Wiederhol- und Vergleichspräzision, getrennt für jedes Merkmalniveau, geschätzt.

Der als Schätzwert für den Erwartungswert dienende Gesamtmittelwert berechnet sich für das Merkmalniveau (j) nach (10.3):

$$m_j = y_j = \frac{\sum_{i=1}^p n_{ij} \cdot \bar{y}_{ij}}{\sum_{i=1}^p n_{ij}} \quad (10.3)$$

In weiterer Folge werden für jedes Merkmalniveau drei Varianzen⁷⁶ errechnet. Dies sind die Wiederholvarianz (s_r^2), die Varianz zwischen den Labors (s_L^2) und die Vergleichsvarianz (s_R^2).

Die Wiederholvarianz (s_r^2) für das Merkmalniveau j errechnet sich zu:

$$s_{rj}^2 = \frac{\sum_{i=1}^p (n_{ij} - 1) \cdot s_{ij}^2}{\sum_{i=1}^p (n_{ij} - 1)} \quad (10.4)$$

Die Varianz zwischen den Labors (s_L^2), welche bei der Prüfdurchführung die Unterschiede zwischen den Bearbeitern und den zwischen den Geräteausstattungen mit einschließt, berechnet sich zu:

$$s_{Lj}^2 = \frac{s_{dj}^2 - s_{rj}^2}{n_j} \quad (10.5)$$

wobei

⁷⁶ Die Varianz (s^2) ist wie die Standardabweichung (s) ein Schätzwert für das Maß der Streuung einer Stichprobe. Sie kann bei grafischer statistischer Auswertung auch als Maß für die Streubreite von Daten verwendet werden.

$$s_{dj}^2 = \frac{1}{p-1} \cdot \sum_{i=1}^p n_{ij} \cdot (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_j)^2 \quad (10.6)$$

und

$$s_j^2 = \frac{1}{p-1} \cdot \left[\sum_{i=1}^p n_{ij} - \frac{\sum_{i=1}^p n_{ij}^2}{\sum_{i=1}^p n_{ij}} \right] \quad (10.7)$$

Errechnet sich für (s_{Lj}^2) ein negativer Wert, so ist die Varianz zwischen Labors mit dem Wert Null anzusetzen.

Die Vergleichsvarianz (s_R^2) als Kennwert für die Präzision unter Vergleichsbedingungen errechnet sich zu:

$$s_{Rj}^2 = s_{rj}^2 + s_{Lj}^2 \quad (10.8)$$

B.2 Auswertung gemäß DIN ISO 5725-5

Das im vorigen Abschnitt erläuterte Auswerteverfahren für Ringversuche setzt das Vorhandensein von identen Probekörpern beziehungsweise homogenes Prüfmaterial voraus. Bei dem mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze untersuchten Gesteinskörnungen handelt es sich jedoch in Abhängigkeit des Abbauortes um ein heterogenes Material, dessen Eigenschaften oft stark schwanken können. Selbst bei der in diesem Ringversuch durchgeführten Probenaufbereitung, bei der aus einer großen Laboratoriumsprobe eine Messprobe von ca. 3,5 kg aufbereitet wurde, ist zu erwarten, dass sich die Gesteinskörnung durch das Hantieren entmischt und somit die Einzelmessproben von unterschiedlichen „3er Serien“ ein geringfügig anderes Polierverhalten aufweisen. Das wesentliche Charakteristikum von heterogenem Material ist somit, dass wegen der Schwankung des Materials die Herstellung von Proben oder Prüfmengen eine bedeutende Quelle für Schwankungen im Prüfergebnis darstellt.

Um diesem Faktor Rechnung zu tragen, gibt die DIN ISO 5725-5 [2002] ein alternatives Auswerteverfahren für einen Ringversuch an heterogenem Material vor. Dafür sind von ein und demselben Prüfmaterial mehrere Proben (t) zu bilden, davon Einzelmessergebnisse zu ermitteln und auszuwerten. Die in der DIN ISO 5725-5 beschriebene Versuchsdurchführung sieht vor, dass alle Prüfschritte, also auch die gesamte Probenaufbereitung, für jede zu untersuchende Probe (t) separat durchgeführt wird. Im gegenständlichen Ringversuch wurde jedoch die von einer Gesteinskörnung vorhandene Laboratoriumsprobe auf einmal von einem Laboranten zu einer Messprobe aufbereitet. In diesem Punkt weicht der hier beschriebene Ringversuch von den Anleitungen der Norm ab. Da jedoch von einem Gesteinsmaterial insgesamt eine Menge von ca. 3,5 kg für die Herstellung der Proben zur Verfügung stand und dadurch von einem Entmischen der Sandfraktion 0,2/0,4 mm im Behälter auszugehen ist, erscheint das Anwenden dieser Auswertemethode für die Bestimmung der Präzision des Prüfverfahrens gerechtfertigt.

Bei der Durchführung eines Ringversuchs gemäß der DIN ISO 5725-5:2002 ist jedes der teilnehmenden Labors (i) mit zumindest zwei Proben (t) auf mehreren Merkmalniveaus (j) versorgt. Aus jeder dieser Proben (t) sind gleich viele Einzelmessergebnisse (k) zu bestimmen.

Bei dem gegenständlichen Ringversuch wurde für die Schätzung der Wiederholstandardabweichung (s_r) von beiden Materialien G309 und GTPA die Proben mit der fortlaufenden Nummer 1 bis 30 verwendet. Jedes Labor prüfte je Merkmalniveau fünf Proben (t) bestehend aus jeweils drei Einzelmessproben (k).

Für die Schätzung der Vergleichsstandardabweichung (s_R) wurden für das Gestein G309 die Proben mit der fortlaufenden Nummer 1,3,5,7,9,11 und 31 bis 36 verwendet. Für das Material GTPA wurden die Proben mit der fortlaufenden Nummer 2,4,6,8,10,12 und 31 bis 36 verwendet. Das bedeutet, jedes Labor hat für ein Merkmalniveau (j) zwei Proben (t) bestehend aus jeweils drei Einzelmessproben (k) geprüft. Die Wiederholstandardabweichung wird also auf einer größeren Anzahl an Wiederholungsmessungen bestimmt als die Vergleichsstandardabweichung.

Die ermittelten Einzelmessergebnisse aus dem Plan eines Ringversuchs an heterogenem Material werden bezeichnet mit

$$y_{ijk}$$

wobei:

- Index i das Labor bezeichnet ($i = 1, 2, \dots, p$)
- Index j das Merkmalniveau bezeichnet ($j = 1, 2, \dots, q$)
- Index t die Probe bezeichnet ($t = 1, 2, \dots, g$)
- Index k die Einzelmessprobe bezeichnet ($k = 1, 2, 3$)

Die ermittelten Einzelmessergebnisse werden für die Auswertung in ein Formblatt gemäß Tab. B.1 eingetragen.

Tab. B.1: Formblatt für die Zusammenstellung von Einzelprüfergebnisse eines Ringversuchs an heterogenem Material [DIN ISO 5725-5, 2002]

Labor	Probe t	Merkmalniveau 1 (G309)			Merkmalniveau 2 (GTPA)		
		Nummer des Ermittlungsergebnisses k			Nummer des Ermittlungsergebnisses k		
		1	2	3	1	2	3
A	1						
	2						
						
	g						
B	1				„Zelle“		
	2						
						
	g						

Aus den ermittelten Einzelmessergebnissen werden in weiterer Folge die Mittelwerte der Proben (g) gemäß (10.9),

$$y_{ijt} = \frac{\sum_{k=1}^3 y_{ijk}}{3} \tag{10.9}$$

sowie die Spannweiten der drei Ermittlungsergebnisse einer Probe (t) für das Labor (i) und das Merkmalniveau (j) gemäß (10.10) berechnet.

$$w_{ijt} = y_{ijt,\max} - y_{ijt,\min} \quad (10.10)$$

Im nächsten Schritt werden die Mittelwerte innerhalb einer Zelle nach (10.11),

$$y_{ij} = \frac{\sum_{t=1}^g y_{ijt}}{g} \quad (10.11)$$

sowie die Spannweiten zwischen den Proben für das Labor (i) und das Merkmalniveau (j) nach (10.12) berechnet.

$$w_{ij} = y_{ijt,\max} - y_{ijt,\min} \quad (10.12)$$

Anschließend erfolgt eine Prüfung auf Vereinbarkeit und Ausreißer unter Anwendung der grafischen Mandels-Statistiken und des numerischen Cochran-Tests. Die Mandels-k-Statistik dient hierbei zur Überprüfung der Vereinbarkeit der Spannweiten zwischen den Proben und zur Prüfung der Spannweiten zwischen den Ermittlungsergebnissen. Die Mandels-h-Statistik dient zur Überprüfung der Vereinbarkeit der Mittelwerte innerhalb einer Zelle. Der Cochran-Test ist eine zusätzliche Methode zur Feststellung von Ausreißern bei den Spannweiten zwischen Ermittlungsergebnissen. Werden Ausreißer festgestellt, so ist die Auswertung mit den bereinigten Ermittlungsergebnissen zu wiederholen.

Der Gesamtmittelwert (m) eines Merkmalniveaus (j) errechnet sich aus der Summation über (i), (t) und (k) aller einbezogenen Ermittlungsergebnisse (n_j) gemäß (10.13).

$$m_j = \frac{\sum \sum \sum y_{ijk}}{n_j} \quad (10.13)$$

Bei der statistischen Auswertung gemäß DIN ISO 5725-5 werden neben dem Gesamtmittelwert (m_j) folgende Standardabweichungen (s_j) ermittelt:

- Wiederholstandardabweichung s_{Rj}
- Standardabweichung zwischen den Proben s_{Hj}
- Standardabweichung zwischen den Labors s_{Lj}
- Vergleichsstandardabweichung s_{Rj}

Für die Berechnung der Standardabweichungen im allgemeinen Fall, d.h. mit mehr als zwei Proben (t) je teilnehmenden Labor (i) und mehr als zwei Einzelmessergebnisse (k) je Probe (t) eines Merkmalniveaus (j) sei an dieser Stelle auf die DIN ISO 5725-5:2002 verwiesen. In Kapitel 5.9 der ISO-Norm erfolgt eine schrittweise Anleitung für die Berechnung mit Angabe der notwendigen Zwischenschritte. Sowohl für die erste Prüfphase mit dem Ziel der Bestimmung der Wiederholpräzision, als auch für die zweite Prüfphase mit dem Ziel der Bestimmung der Vergleichsstandardabweichung wurden die in Kapitel 5.9 der DIN ISO 5725-5:2002 angeführten Auswerteschritte angewendet.

ANHANG C – ERGEBNISSE DER AUSREIßERTESTS

C.1 Ausreißertests für die Auswertung nach DIN ISO 5725-2

Wiederholstandardabweichung

Bei den numerischen Ausreißertests wurde für den Cochran-Test aufgrund der Zusammenstellung der Ergebnisse für zehn Labors (p) je Merkmalniveau, drei Einzelmessergebnissen (n) je Labor, einem Signifikanzniveau von 5 % der kritische Wert 0,445 [-] den Tabellenwerken der DIN ISO 5725-2:2002 entnommen. Für den Grubbs-Test wurde mit $p = 10$ und einem Signifikanzniveau von 5 % für den kleinsten bzw. größten PWS der kritische Wert 2,290 [-] ermittelt.

Sowohl die mit dem Cochran- und dem Grubbs-Test ermittelten Prüfgrößen C bzw. G_p liegen unter den kritischen Werten für das 5 %-ige Signifikanzniveau, siehe Tab. C.1. Somit konnten mit diesen numerischen Ausreißertests kein statistisch gesicherter Ausreißer bzw. Fastausreißer festgestellt werden.

Tab. C.1: Wiederholpräzision gemäß ISO DIN 5725-2 - Kennwerte der numerischen Ausreißertests

<i>Cochran-Test:</i>	<i>Merkmalniveau</i>		<i>Grubbs-Test:</i>	<i>Merkmalniveau</i>	
	<i>G309</i>	<i>GTPA</i>		<i>G309</i>	<i>GTPA</i>
C	0,380	0,398	$G_{p,min}$	2,081	1,707
krit. Wert (5 %)	0,445		$G_{p,max}$	1,299	1,614
			krit. Wert (5 %)	2,290	

Die für die grafischen Ausreißertests der Mandels h - und k -Statistik berechneten Vereinbarkeitsgrößen, die Mandels-Indikatoren, sind in Tab. C.2 angeführt.

Tab. C.2: Vereinbarkeitswerte der Mandels Statistiken für die Bestimmung der Wiederholpräzision

<i>Signifikanzniveau</i>	<i>Mandels h-Statistik</i>		<i>Mandels k-Statistik</i>	
	<i>5 %</i>	<i>1 %</i>	<i>5 %</i>	<i>1 %</i>
Werte der Indikatoren	1,80	2,18	1,68	2,00

Die Mandels-Grafiken sind in Abb. C-1 und Abb. C-2 dargestellt. Die gestrichelten horizontalen Linien stellen die Mandel'schen Indikatoren für das Signifikanzniveau 5 und 1 % dar und weisen auf kritische Werte hin. Die ersten fünf Gruppen (Labor 1 bis 5) stellen Ergebnisse dar, welche im Labor A gewonnen wurden. Die zweiten fünf Gruppen in der Abb. C-1 und Abb. C-2 (Labor 6 bis 10) stellen Ergebnisse dar, welche im Labor B gewonnen wurden.

Die Mandels- h -Statistik weist keine besonderen Auffälligkeiten auf. Sowohl von den im Labor A ermittelten, blau umrahmten als auch von dem im Labor B ermittelten, gelb umrahmten Prüfergebnissen sind positive und negative h -Werte vorhanden. Dies weist auf eine gleichmäßige Streuung der Prüfwerte hin. Eine Ausnahme stellt jedoch das in der 2. Serie mit dem Gestein G309 ($p = 2$) ermittelte Prüfergebnis dar. Das Signifikanzniveau von 5 %, jedoch nicht das Signifikanzniveau von 1 %, wird unterschritten. Dadurch ist dieser Wert nach unten hin als Fastausreißer zu kennzeichnen, verbleibt aber weiterhin in der Auswertung.

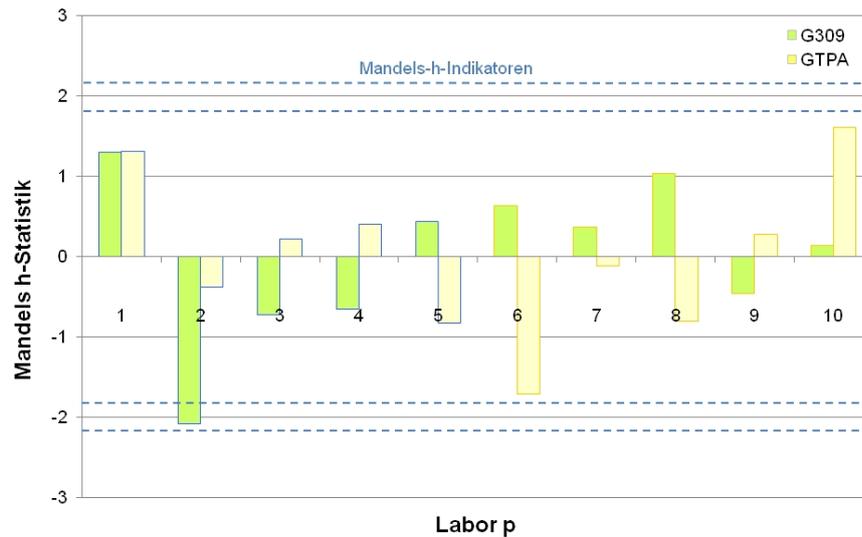


Abb. C-1: Mandels h-Statistik für die Ermittlung von Ausreißern bei der Bestimmung der Wiederholstandardabweichung

Die Mandels k-Statistik in Abb. C-2 zeigt, dass sowohl für das Material G309 (bei $p = 2$ und $p = 7$) als auch für das Material GTPA (bei $p = 1$ und $p = 6$) jeweils zwei Prüfserien mit einer etwas höheren Prüfstreuung der drei Einzelwerte identifiziert wurden. Drei dieser Prüfstreuungen überschreiten den Mandels k-Indikator für ein Signifikanzniveau von 5 %, liegen jedoch knapp unter dem Mandels k-Indikator für ein Signifikanzniveau von 1 %. Da sowohl vom das Labor A als auch vom Labor B für jedes Gesteinsmaterial von je einer Prüfserie eine hohe Streuung der Einzelwerte identifiziert wurde, kann diese Prüfstreuung als eine für das Prüfverfahren typische Prüfstreuung betrachtet werden.

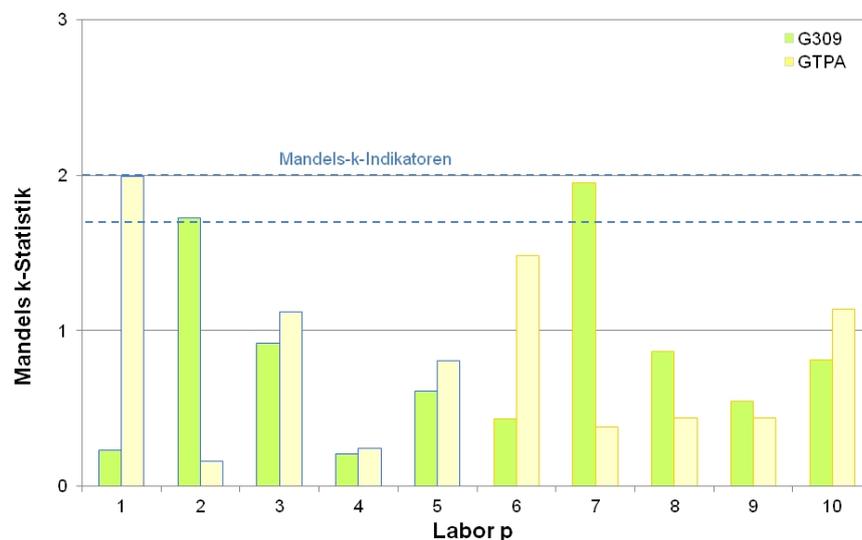


Abb. C-2: Mandels k-Statistik für die Ermittlung von Ausreißern bei der Bestimmung der Wiederholstandardabweichung

Vergleichsstandardabweichung

Bei den numerischen Ausreißertests zur Überprüfung der Einzelmessergebnisse auf Verträglich wurde aufgrund der Zusammenstellung der Ergebnisse für den Cochran-Test mit vier Labors (p) je Merkmalniveau, drei Einzelmessergebnissen (n) je Labor, einem Signifikanzniveau von 5 % der kritische Wert 0,768 [-] den Tabellenwerken der DIN ISO 5725-2:2002 entnommen. Für den Grubbs-Test wurde mit $p = 4$ und einem Signifikanzniveau von 5 % für den kleinsten bzw. größten PWS der kritische Wert 1,481 [-] ermittelt.

Sowohl die mit dem Cochran- und dem Grubbs-Test ermittelten Prüfgrößen C bzw. G_p liegen unter den kritischen Werten für das Signifikanzniveau von 5 %, siehe Tab. C.3. Somit konnten mit diesen numerischen Ausreißertests kein statistisch gesicherter Ausreißer bzw. Fastausreißer festgestellt werden.

Tab. C.3: Vergleichspräzision gemäß ISO DIN 5725-2 - Kennwerte der numerischen Ausreißertests

<i>Cochran-Test:</i>	<i>Merkmalniveau</i>		<i>Grubbs-Test:</i>	<i>Merkmalniveau</i>	
	<i>G309</i>	<i>GTPA</i>		<i>G309</i>	<i>GTPA</i>
C	0,661	0,557	$G_{p,\min}$	0,810	0,988
krit. Wert (5 %)	0,768		$G_{p,\max}$	1,456	1,291
			krit. Wert (5 %)	1,481	

Die für die grafischen Ausreißertests der Mandels h - und k -Statistik berechneten Vereinbarkeitsgrößen, die Mandels-Indikatoren, sind in Tab. C.4 angeführt.

Tab. C.4: Vereinbarkeitswerte der Mandels Statistiken für die Bestimmung der Vergleichspräzision

<i>Signifikanzniveau</i>	<i>Mandels h-Statistik</i>		<i>Mandels k-Statistik</i>	
	<i>5 %</i>	<i>1 %</i>	<i>5 %</i>	<i>1 %</i>
Werte der Indikatoren	1,42	1,49	1,59	1,77

Die Mandels-Grafiken sind in Abb. C-3 und Abb. C-4 dargestellt. Die gestrichelten horizontalen Linien stellen die Mandel'schen Indikatoren für das Signifikanzniveau 5 und 1 % dar und weisen auf kritische Werte hin.

Die ersten zwei Gruppen (Labor 1 und 2) stellen Ergebnisse dar, welche im Labor A gewonnen wurden, $p = 3, 4$ stehen für Ergebnisse, welche im Labor B gewonnen wurden. Für die im Labor A und im Labor B ermittelten Prüfergebnisse wurden sowohl positive als auch negative h -Werte ermittelt. Beim Gestein G309 nähert sich die erste „3er Serie“ des Labor A den Mandels- h -Indikatoren an. Überschreitet diese jedoch nicht, wodurch die Prüfergebnisse für die statistische Auswertung ohne Einschränkung verwendet werden können.

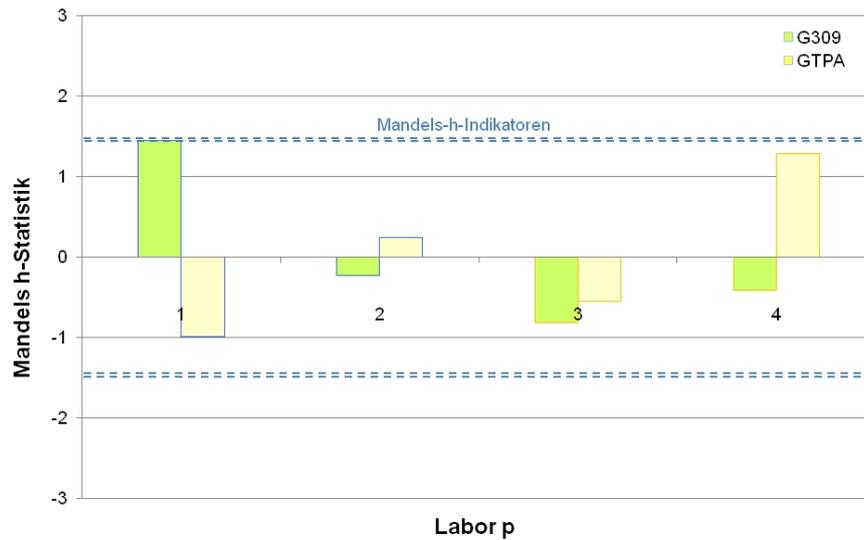


Abb. C-3: Mandels h-Statistik für die Ermittlung von Ausreißern bei der Bestimmung der Vergleichsstandardabweichung

Die Mandels-k-Statistik, Abb. C-4, weist für das Material G309 in der zweiten „3er Serie“ des Labors A ($p = 2$) eine hohe Streuung der drei Einzelmessergebnisse auf, welche zwar das Signifikanzniveau von 5 %, jedoch nicht das Signifikanzniveau von 1 % übersteigt. Diese Prüferie ist als Fastausreißer zu werten, verbleibt jedoch in der Auswertung.

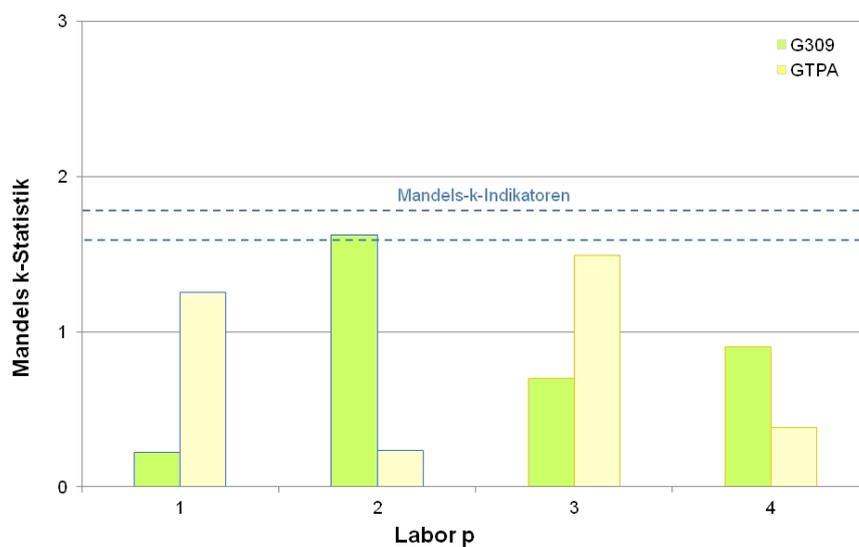


Abb. C-4: Mandels k-Statistik für die Ermittlung von Ausreißern bei der Bestimmung der Vergleichsstandardabweichung

C.2 Ausreißertests für die Auswertung nach DIN ISO 5725-5

Wiederholstandardabweichung

Auf die in der Tab. 4.20 und Tab. 4.21 zusammengestellten Einzelprüfergebnisse wurde zur Überprüfung auf Ausreißer als erstes der Cochran-Test auf die vorhandenen Spannweiten zwischen den Ermittlungsergebnissen ($w(k)$) angewendet. Die Eingangswerte für die Bestimmung des kritischen Wertes ermitteln sich aus der Anzahl der Proben (t) je Prüflabor multipliziert mit der Anzahl der am Ringversuch teilnehmenden Prüflabors (p), sowie der Anzahl an Einzelmessproben (n) je Probe (t). Der kritische Wert C für das Signifikanzniveau von 5 % beträgt 0,445 [-].

Im nächsten Schritt zur Überprüfung auf Ausreißer wurde der Cochran-Test auf die Spannweiten zwischen den Proben ($w(PWS)$) angewendet. Zur Ermittlung des kritischen Wertes wird als Eingangswert (p) die Anzahl der teilnehmenden Labors und als Eingangswert (n) die Anzahl der Einzelmessergebnisse je Probe (t) verwendet. Der kritische Wert C für das Signifikanzniveau von 5 % beträgt 0,975 [-].

Da für die Anwendung des Grubbs-Tests zur Überprüfung der Mittelwerte (y_{ij}) innerhalb einer Zelle zumindest Prüfergebnisse von drei Labors (p) vorhanden sein müssen, wurde im Rahmen dieser Auswertung dieser Vereinbarkeitstest nicht durchgeführt.

In Tab. C.5 werden die für die Überprüfung auf Ausreißer berechneten Cochran-Werte C sowohl für die Spannweiten zwischen den Einzelmessergebnissen (k) als auch für die Spannweiten zwischen den Proben (t) für die beiden Merkmalniveaus G309 und GTPA zusammengefasst und den kritischen Werten gegenübergestellt.

Tab. C.5: Werte des Cochran-Tests bei der Ermittlung der Wiederholstandardabweichung gemäß DIN ISO 5725-5

Gesteinskörnung	Cochran-Werte C der Spannweiten zwischen	
	Ermittlungsergebnissen (k)	Proben (t)
G309	0,328	0,837
GTPA	0,360	0,707
kritischer Wert (5 %)	0,445	0,975

Die in Tab. C.5 angeführten Cochran-Werte C für die Gesteinskörnungen G309 und GTPA liegen unter dem kritischen Wert für das Signifikanzniveau von 5 %. Somit können aufgrund der durchgeführten numerischen Ausreißertests alle Prüfergebnisse für die Bestimmung der Wiederholstandardabweichung verwendet werden.

Zur grafischen Vereinbarkeitsprüfung werden in Abb. C-5 (a) und (b) die vorhandenen Prüfstreuungen in Form einer Mandels- k -Statistik dargestellt. Da für eine Anzahl von < 3 an einem Ringversuch teilnehmenden Prüflabors keine Indikatorwerte existieren, kann anhand dieser Abbildungen lediglich das Vorhandensein einer systematischen Abweichung eines Labors abgelesen werden. In Abb. C-5 (a) sind für das Gestein G309 und GTPA die Streuungen von drei Einzelmessergebnissen der 10 „3er Serien“, getrennt für die beiden Labors (p), abgebildet. In Abb. C-5 (b) werden die Streuungen zwischen den fünf Proben (t) eines Merkmalniveaus und eines Labors dargestellt.

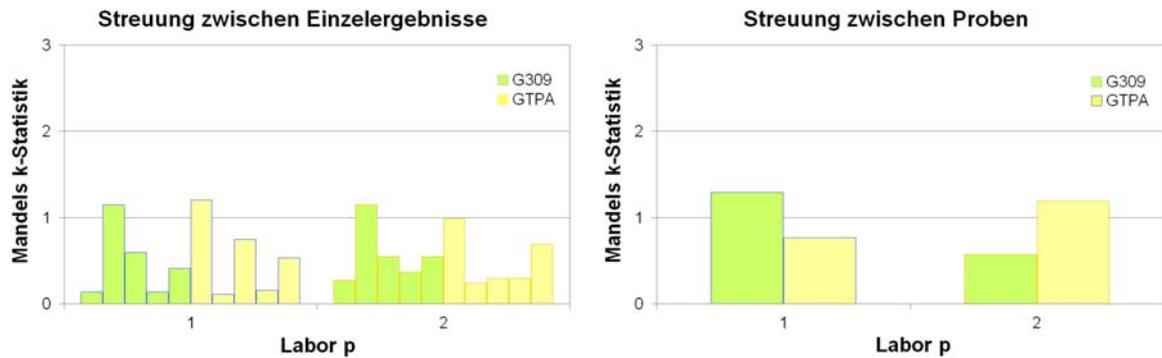


Abb. C-5: (a) Mandels k-Statistik für die Streuung der Einzelergebnisse und (b) Streuung zwischen den Proben bei der Bestimmung der Wiederholstandardabweichung gemäß DIN ISO 5725-5

Vergleichsstandardabweichung

Auf die in der Tab. 4.23 und Tab. 4.24 zusammengestellten Einzelprüfergebnisse wurde zur Überprüfung auf Ausreißer als erstes der Cochran-Test auf die vorhandenen Spannweiten zwischen den Ermittlungsergebnissen ($w(k)$) angewendet. Die Eingangswerte für die Bestimmung des kritischen Wertes ermitteln sich aus der Anzahl der Proben (t) je Prüflabor multipliziert mit der Anzahl der am Ringversuch teilnehmenden Prüflabors (p), sowie der Anzahl an Einzelmessproben (n) je Probe (t). Der kritische Wert C für das Signifikanzniveau von 5 % beträgt 0,768 [-].

Im nächsten Schritt zur Überprüfung auf Ausreißer wurde der Cochran-Test auf die Spannweiten zwischen den Proben ($w(PWS)$) angewendet. Zur Ermittlung des kritischen Wertes wird als Eingangswert (p) die Anzahl der teilnehmenden Labors und als Eingangswert (n) die Anzahl der Einzelmessergebnisse je Probe (t) verwendet. Der kritische Wert C für das Signifikanzniveau von 5 % beträgt 0,975 [-].

Der Grubbs-Test wurde auch bei der Bestimmung der Vergleichsstandardabweichung nicht angewendet.

In Tab. C.6 werden die für die Überprüfung auf Ausreißer berechneten Cochran-Werte C sowohl für die Spannweiten zwischen den Einzelmessergebnissen (k) als auch für die Spannweiten zwischen den Proben (t) für die beiden Merkmalsniveaus G309 und GTPA zusammengefasst und den kritischen Werten gegenübergestellt.

Tab. C.6: Werte des Cochran-Tests bei der Ermittlung der Vergleichsstandardabweichung gemäß DIN ISO 5725-5

Gesteinskörnung	Cochran-Werte C der Spannweiten zwischen	
	Ermittlungsergebnissen (k)	Proben (t)
G309	0,657	0,948
GTPA	0,576	0,690
kritischer Wert (5 %)	0,768	0,975

Die Anwendung der Mandels k-Statistik lieferte die in der Abb. C-6 abgebildeten Statistikwerte. In Abb. C-6 (a) sind für das Gestein G309 und GTPA die Streuungen von drei Einzelmessergebnissen der 4 „3er Serien“, getrennt für die beiden Labors (p), abgebildet. In Abb. C-6 (b) werden die Streuungen zwischen den zwei Proben (t) eines Merkmalsniveaus und eines Labors dargestellt.

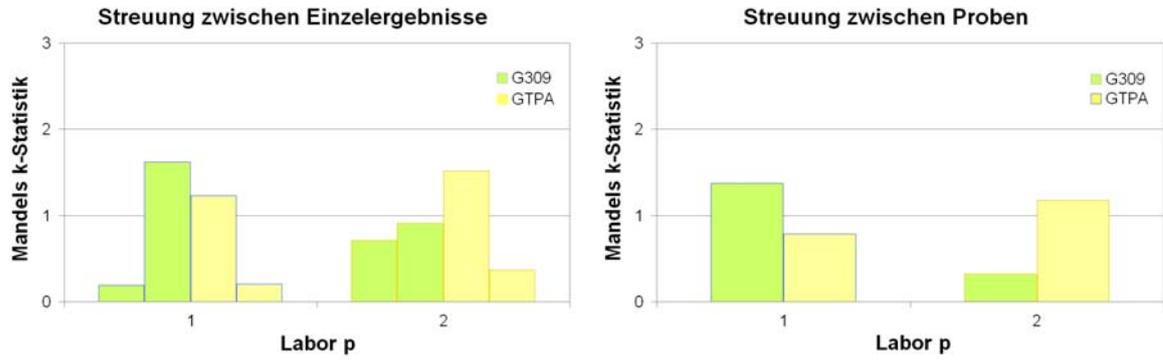


Abb. C-6: (a) Mandel's k-Statistik für die Streuung der Einzelergebnisse und (b) Streuung zwischen den Proben bei der Bestimmung der Vergleichsstandardabweichung gemäß DIN ISO 5725-5

ANHANG D – ROHDATEN UND DETAILS ZUR RELEVANZUNTERSUCHUNG

D.1 Rohdaten für die Relevanzuntersuchungen

In diesem Abschnitt werden die für die Relevanzanalyse in Kapitel 4.5 verwendeten Rohdaten der 155 Datensätze angeführt. Zusätzlich werden identifizierte Fastausreißer mit einem (*) und eindeutig identifizierte Ausreißer mit einem (**) gekennzeichnet.

Tab. D.1: Rohdatenzusammenstellung 1/6

Probekörpercode	Klebstoffmenge		Gesteinsmenge		Gesteinsverluste		Prüftemperatur		Poliertemperatur		Polierwirkung		Kalibrierwert		PWS-F	
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[J]	[J]	[J]	[J]	[-]	[-]
G234-01	-	48,03	7,29	10,15	20,00	318696,8	0,109	0,511								
G234-02	-	47,46	7,72	10,74	19,97	326581,5	0,128	0,513								
G234-03	-	43,70	7,36	9,27	19,99	322574,1	0,129	0,528								
G234-04	-	43,50	7,54	9,25	19,98	339336,0	0,130	0,527								
G234-05	7,89	43,26	8,76	11,04	19,99	443736,1	0,122	0,496								
G234-06	8,56	47,11	9,37	10,16	20,03	437037,9	0,130	0,485								
G234-07	7,60	43,71	7,82	9,49	20,04	379665	0,140	0,495								
G238-01	-	60,10	5,63	9,65	20,04	334802,9	0,107	0,542								
G238-02	-	50,90	4,59	9,62	19,97	321169,0	0,123	0,523								
G238-03	-	54,90	6,80	9,97	19,96	335519,1	0,116	0,542								
G253-01	-	54,60	4,86	10,58	19,99	334576,0	0,110	0,546								
G253-02	-	46,50	4,42	9,47	19,95	327226,7	0,123	0,529								
G253-03	-	48,10	5,05	10,12	19,90	326791,5	0,121	0,527								
G253-04	9,10	43,70	1,84	9,92	19,94	365985,6	0,118	0,515								
G253-05	7,50	51,20	2,76	9,86	19,98	344747,1	0,128	0,569								
G257-01	-	38,60	9,04	9,76	19,98	335655,7	0,110	0,439								
G257-02	-	34,90	7,18	9,75	20,04	339537,6	0,120	0,459								
G257-03	-	32,60	7,43	9,81	19,99	332747,0	0,116	0,451								
G261-01	-	62,40	4,59	9,20	20,00	343877,5	0,110	0,550								
G261-02	-	62,30	6,70	10,85	20,02	335419,0	0,123	0,577								
G261-03	-	64,60	4,16	10,08	19,99	332733,6	0,124	0,519								
G261-04	-	54,90	5,80	10,13	19,98	337213,4	0,128	0,588								
G269-01	8,20	56,10	4,03	9,79	19,96	332447,2	0,108	0,581								

Tab. D.2: Rohdatenzusammenstellung 2/6

Probekörpercode	Klebstoffmenge		Gesteinsmenge		Gesteinsverluste		Prüftemperatur		Poliertemperatur		Polierwirkung		Kalibrierwert		PWS-F	
	[g]		[g]		[g]		[°C]		[°C]		[J]		[-]		[-]	
G269-02	8,00		52,40		3,83		9,45		20,01		332608,2		0,136		0,569	
G269-03	7,30		54,60		4,60		9,53		19,98		338375,9	*	0,137		0,584	
G283-01	10,20		53,30		7,12		10,02		19,95		309519,9		0,109		0,350	
G283-02	8,90		48,70		6,59		10,13		19,98		328112,6		0,119		0,351	
G283-03	8,40		46,10		7,43		9,39		20,01		327304,1		0,119		0,356	
G283-04	9,10		53,70		8,15		9,34		20,06		378134,1		0,113		0,321	
G283-05	9,40		53,00		9,73		9,80		19,99		424237,5		0,114		0,324	
G283-06	8,00		54,50		10,41		9,89		20,00		438995,9		0,113		0,316	
G293-01	7,20		46,30		3,68		9,06		20,00		298707,0		0,107		0,408	
G293-02	8,60		45,60		3,41		9,48		19,98		277473,4		0,116		0,409	
G293-03	8,60		43,40		3,20		9,78		20,00		351094,3		0,123		0,419	
G313-01	8,10		49,20		2,75		10,64		20,25		298606,4		0,107		0,559	
G313-02	8,60		43,10		2,50		9,50		20,01		275187,5		0,129		0,532	
G313-03	8,20		66,60		4,91		9,51		19,97		305754,8		0,128		0,523	
G317-01	7,50		50,30		2,25		10,67		20,00		286205,5		0,104		0,435	
G317-02	7,90		52,60		2,16		9,50		19,98		305537,9		0,115		0,400	
G317-03	9,10		74,80		3,53		9,35		19,99		280014,2		0,115		0,394	
G351-01	8,70		44,70		-		10,62		20,00		220860,2		0,102		0,545	
G351-02	8,10		44,20		1,56		10,41		20,03		263104,2		0,120		0,562	
G351-03	8,70		51,80		3,15		10,11		19,96		218525,1		0,126		0,579	
G352-01	8,90		52,70		0,89		10,12		19,96		212537,0		0,100	**	0,599	
G352-02	9,10		50,20		3,13		9,45		20,02		327315,7		0,134		0,552	
G352-03	9,40		54,90		1,65		10,58		20,05		244968,2		0,128		0,528	
G368-01	-		-		-		11,36		20,00		268258,8		0,116		0,497	
G368-02	5,80	*	39,90		16,30		11,32		19,96		182354,0	*	0,123		0,542	
G368-03	6,60	*	39,10		15,30		11,75		19,97		187349,9	*	0,128		0,550	
G368-04	8,80		42,40		18,30		12,36		19,83		249607,6		0,130		0,529	
G380-01	8,30		42,00		5,07		9,75		19,13		402828,8		0,107		0,584	
G380-02	8,30		42,90		4,67		10,94		20,05		409265,5		0,117		0,559	
G380-03	7,60		38,00		7,46		9,61		20,03		391965,0		0,122		0,550	

Tab. D.3: Rohdatenzusammenstellung 3/6

Probekörpercode	Klebstoffmenge		Gesteinsmenge		Gesteinsverluste		Prüftemperatur		Poliertemperatur		Polierwirkung		Kalibrierwert		PWS-F	
	[g]		[g]		[g]		[°C]		[°C]		[J]		[-]		[-]	
G389-01	7.80		43.60		4.99		9.96		19.33		409969.7		0.100	**	0.570	
G389-02	7.80		40.60		3.57		9.82		19.95		407040.5		0.129		0.559	
G389-03	9.70		41.30		1.81		10.52		19.81		392562.3		0.125		0.528	
G390-01	8.50		44.60		2.78		9.23		20.04		400115.5		0.100	**	0.552	
G390-02	9.20		42.90		3.29		9.53		20.01		392208.3		0.126		0.536	
G390-03	10.00		48.30		4.03		9.43		19.90		384020.2		0.122		0.555	
G417-01	8.20		38.00		7.42		9.69		19.21		403880.6		0.108		0.540	
G417-02	7.80		38.70		6.89		10.94		19.67		410553.7		0.129		0.521	
G417-03	7.90		39.40		6.78		10.41		19.85		416790.5		0.126		0.519	
G418-01	8.50		43.30		7.61		9.70		20.01		430675.7		0.108		0.554	
G418-02	8.60		44.90		7.19		9.42		19.99		431190.3		0.123		0.597	
G418-03	8.50		41.00		5.45		9.30		20.02		416920.8		0.130		0.548	
G437-01	7.30		41.30		13.95		9.96		19.37		371680.8		0.108		0.474	
G437-02	8.80		47.70		14.07		9.32		20.03		419506.8		0.119		0.467	
G437-03	8.10		45.90		13.62		9.75		20.00		444064.1		0.118		0.460	
G438-01	9.90		53.30		11.71		10.89		19.13		428506.0		0.109		0.523	
G438-02	9.00		53.90		11.24		18.36	**	19.96		418075.8		0.118		0.521	
G438-03	8.00		52.30		8.56		12.18		20.45		297734.3		0.122		0.520	
G466-01	9.00		58.40		2.51		10.60		18.37		273879.3		0.108		0.491	
G466-02	8.10		55.60		2.19		9.10		19.77		298090.3		0.111		0.499	
G466-03	8.40		62.40		2.17		9.36		19.76		269635.1		0.112		0.527	
G467-01	7.80		38.60		2.32		10.65		19.95		240262.3		0.111		0.481	
G467-02	7.80		40.80		3.68		9.36		19.85		266762.1		0.114		0.469	
G467-03	7.60		40.00		3.99		10.95		19.83		259333.2		0.119		0.455	
G476-01	8.40		50.10		-		10.48		19.80		258833.3		0.104		0.511	
G476-02	8.10		45.40		-		10.87		19.98		246850.7		0.112		0.504	
G476-03	8.10		43.00		-		10.83		19.60		248456.3		0.113		0.516	
G309-A	8.60		48.40		3.25		9.46		19.99		303097.4		0.108		0.366	
G309-B	8.00		58.00	**	3.67		9.27		18.88		296516.4		0.120		0.351	
G309-C	7.80		46.00		4.07		9.14		19.95		278171.1		0.123		0.353	

Tab. D.4: Rohdatenzusammenstellung 4/6

Probekörpercode	Klebstoffmenge		Gesteinsmenge		Gesteinsverluste		Prüftemperatur		Poliertemperatur		Poliereinwirkung		Kalibrierwert		PWS-F	
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[J]	[J]	[J]	[J]	[-]	[-]
G309-01	8.80		44.60		1.72		9.72		19.67		362569.6		0.108		0.372	
G309-02	8.70		41.60		0.11		12.73		19.99		274880.5		0.132		0.370	
G309-03	8.40		36.30		0.77		10.40		20.05		389702.7		0.124		0.375	
G309-04	9.80		41.90		1.58		12.69		20.03		282083.4		0.131		0.364	
G309-05	9.00		38.60		1.84		9.93		19.91		383952.3		0.124		0.372	
G309-06	9.60		43.30		0.89		12.28		20.01		279622.0		0.132		0.365	
G309-07	9.30		37.90		2.25		10.05		19.72		391821.4		0.129		0.325	
G309-08	11.10	*	38.90		0.94		11.93		19.97		286135.1		0.136		0.347	
G309-09	10.00		40.70		2.41		9.57		20.03		411066.2		0.130		0.342	
G309-10	7.80		41.40		1.09		11.70		19.97		270611.5		0.139		0.372	
G309-11	9.00		38.30		2.52		10.44		19.89		410427.2		0.131		0.350	
G309-12	8.00		31.90		0.87		12.61		20.02		281941.2		0.142		0.372	
G309-13	8.80		43.00		2.51		10.40		19.55		408414.7		0.144		0.355	
G309-14	9.70		39.80		1.30		11.67		19.33		298506.6		0.149	*	0.363	
G309-15	8.60		41.90		2.57		9.80		19.90		397104.2		0.141		0.345	
G309-16	8.50		43.00		1.00		12.12		20.02		297303.7		0.151	*	0.373	
G309-17	7.70		39.60		4.13		10.65		20.02		408793.4		0.133		0.358	
G309-18	7.60		39.30		1.74		12.75		19.78		294959.0		0.150	*	0.375	
G309-19	9.80		44.70		2.65		11.14		20.03		420671.1		0.123		0.352	
G309-20	8.50		38.90		0.44		11.88		19.83		304914.0		0.139		0.356	
G309-21	8.70		41.60		3.45		10.20		19.97		422758.5		0.128		0.353	
G309-22	8.90		40.90		0.77		12.62		19.90		297821.3		0.131		0.351	
G309-23	9.10		41.90		3.48		10.44		19.98		433605.5		0.125		0.355	
G309-24	8.50		43.50		0.73		12.95		19.56		633010.1	**	0.128		0.359	
G309-25	8.80		40.10		3.56		9.32		20.01		410992.5		0.139		0.369	
G309-26	8.30		38.90		1.98		12.26		15.28	**	296043.2		0.131		0.362	
G309-27	7.60		37.40		3.84		10.59		20.03		326210.7		0.142		0.360	
G309-28	10.00		40.90		1.48		11.50		17.77	**	297556.2		0.133		0.355	
G309-29	8.90		40.80		2.24		11.28		19.97		318421.7		0.140		0.364	
G309-30	8.40		39.60		2.01		11.00		17.45	**	341678.4		0.132		0.367	

Tab. D.5: Rohdatenzusammenstellung 5/6

Probekörpercode	Klebstoffmenge		Gesteinsmenge		Gesteinsverluste		Prüftemperatur		Poliertemperatur		Poliereinwirkung		Kalibrierwert		PWS-F	
	[g]		[g]		[g]		[°C]		[°C]		[J]		[-]		[-]	
G309-31	6.97		39.83		4.83		11.42		16.55	**	314596.1		0.124		0.322	
G309-32	8.99		39.49		2.88		5.79	**	18.92		254545.3		0.123		0.327	
G309-33	11.14	*	53.10	*	2.19		8.60		19.52		325664.6		0.124		0.333	
G309-34	7.51		49.51		2.50		11.54		18.76		260517.1		0.122		0.329	
G309-35	7.18		44.25		2.05		12.15		19.60		313639.2		0.123		0.334	
G309-36	7.33		42.62		1.91		11.72		19.69		299703.6		0.122		0.343	
GTPA-01	7.30		39.98		5.64		9.95		19.81		363327.9		0.112		0.342	
GTPA-02	7.30		40.83		7.91		11.85		19.60		273764.3		0.111		0.232	
GTPA-03	8.16		23.30		8.90		10.37		19.93		387035.7		0.118		0.301	
GTPA-04	7.92		43.16		7.54		11.98		19.93		268198.4		0.112		0.269	
GTPA-05	8.42		46.07		6.05		10.08		20.00		383021.9		0.115		0.297	
GTPA-06	8.63		44.00		6.07		11.24		20.03		279033.5		0.116		0.250	
GTPA-07	8.67		45.00		6.64		9.86		19.97		401211.3		0.120		0.276	
GTPA-08	9.15		43.00		5.54		16.83	**	20.02		572035.6	**	0.119		0.289	
GTPA-09	9.03		38.90		7.66		10.20		19.87		411706.4		0.120		0.278	
GTPA-10	6.68		44.20		6.08		12.26		20.00		279563.5		0.124		0.280	
GTPA-11	7.99		43.90		7.28		9.38		19.93		424992.4		0.120		0.280	
GTPA-12	6.76		42.10		5.05		11.71		20.04		279676.5		0.127		0.282	
GTPA-13	7.73		37.80		6.51		9.49		20.01		403065.5		0.119		0.305	
GTPA-14	9.60		43.90		6.95		17.44	**	20.43		288634.8		0.123		0.275	
GTPA-15	8.89		41.20		8.27		10.40		20.00		424716.4		0.126		0.290	
GTPA-16	9.90		48.20		6.23		12.13		20.03		278080.3		0.129		0.269	
GTPA-17	10.37	*	44.50		8.79		9.70		20.00		417317.9		0.124		0.277	
GTPA-18	8.80		46.90		5.58		11.86		19.91		284769.7		0.128		0.264	
GTPA-19	8.00		38.90		9.76		9.69		19.89		310472.4		0.144		0.291	
GTPA-20	7.18		35.67		5.78		11.80		18.93		302799.7		0.130		0.297	
GTPA-21	7.53		40.50		7.09		9.02		20.06		281383.9		0.152	*	0.295	
GTPA-22	8.64		41.10		6.14		11.49		18.59		317310.3		0.139		0.286	
GTPA-23	9.10		38.45		8.17		9.39		20.03		279424.0		0.153	*	0.297	
GTPA-24	9.20		42.43		5.92		12.25		19.71		301754.6		0.137		0.292	

Tab. D.6: Rohdatenzusammenstellung 6/6

Probekörpercode	Klebstoffmenge		Gesteinsmenge		Gesteinsverluste		Prüftemperatur		Poliertemperatur		Poliereinwirkung		Kalibrierwert		PWS-F	
	[g]		[g]		[g]		[°C]		[°C]		[J]		[-]		[-]	
GTPA-25	7.64		37.50		7.87		9.72		17.49	**	248121.0		0.137		0.258	
GTPA-26	6.88		37.00		5.96		10.99		19.58		299446.2		0.144		0.310	
GTPA-27	7.71		41.00		9.27		11.08		19.77		238958.9		0.133		0.270	
GTPA-28	8.53		47.30		5.91		10.93		19.50		312562.6		0.146		0.336	
GTPA-29	9.47		45.40		6.01		10.69		19.91		239017.0		0.132		0.278	
GTPA-30	9.71		49.20		5.04		10.86		16.71	**	303272.3		0.145		0.313	
GTPA-31	8.10		43.40		0.26	*	9.25		16.57	**	249014.5		0.109		0.225	
GTPA-32	7.70		38.70		2.15		11.01		19.55		236343.5		0.108		0.247	
GTPA-33	8.20		39.70		-		10.83		19.89		235784.4		0.112		0.255	
GTPA-34	10.70	*	51.50		0.91		9.62		19.19		233680.7		0.120		0.263	
GTPA-35	8.30		45.40		1.06		10.48		19.98		235264.8		0.122		0.263	
GTPA-36	7.90		41.50		0.33		9.75		20.06		241150.2		0.125		0.268	

D.2 Test auf Unabhängigkeit

In diesem Abschnitt wird der in Kapitel 4.5.3 durchgeführte Test auf Unabhängigkeit ausführlich beschrieben. Zusätzlich werden die festgestellten Abhängigkeiten des PWS in Tabellenform wiedergegeben. Für die drei Gesteine G309, GTPA sowie G283 werden außerdem die zwischen dem PWS und den sieben Einflussfaktoren berechneten Korrelationskoeffizienten in Form von Kreuztabellen abgebildet.

Für die Feststellung von Abhängigkeiten zwischen dem PWS und einem der Einflussfaktoren wird für jeden Einflussfaktor der empirische Korrelationskoeffizient (r_{xy}) nach Formel (10.14) bestimmt.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (10.14)$$

x_i, y_i, \dots Einzelwert eines Merkmalniveaus (z.B. Poliereinwirkung, PWS, etc.)

n, \dots Stichprobenumfang, Anzahl der Werte eines Merkmalniveaus

\bar{x}, \bar{y}, \dots Mittelwert auf dem Merkmalniveau

Der empirische Korrelationskoeffizient ist ein Maß für das Vorhandensein einer lineare Abhängigkeit der Merkmale x (z.B. Kontrollwerte, Poliereinwirkung, etc.) und y (PWS). Der Korrelationskoeffizient bewegt sich im Intervall $[-1, 1]$. $r_{xy} = 0$ bedeutet, dass kein Zusammenhang besteht. x und y sind also voneinander unabhängig. Nähert sich r -1 oder 1 an, wird die lineare Abhängigkeit immer wahrscheinlicher. Ist $r = -1$ oder 1 liegt ein funktionaler linearer Zusammenhang vor, siehe Abb. D-1.

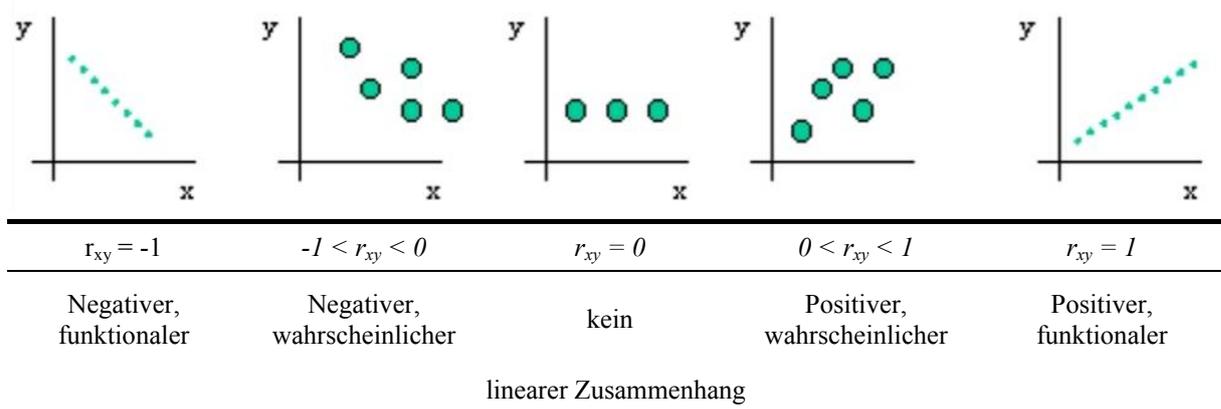


Abb. D-1: Bedeutung und Aussage des Korrelationskoeffizienten

Zur statistischen Prüfung ob der PWS von einem der untersuchten Merkmale abhängig ist oder nicht, ist ein Test auf Unabhängigkeit durchzuführen. Dieser erfolgt mittels eines Hypothesentests mit t-verteilter⁷⁷ Testprüfgröße. Dabei wird die Nullhypothese $H_0: r_{xy} = 0$ aufgestellt. Zur Feststellung ob die Nullhypothese Gültigkeit besitzt, ist einerseits die Testgröße $|t|$ zu berechnen und dem von der Anzahl der vorhandenen Messergebnisse (n) und der Irrtumswahrscheinlichkeit (α) abhängigen kritischen Wert t_{krit} gegenüberzustellen, siehe Formel (10.15).

$$|t| = \left| \frac{r_{xy} \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}} \right| > t_{krit} = t(\alpha; n-2) \tag{10.15}$$

r_{xy}Empirischer Korrelationskoeffizient nach (10.14)

$t(..)$ t-Quantil, mit $\alpha =$ Irrtumswahrscheinlichkeit und $n =$ Anzahl der Messergebnisse

Wird die Gleichung (10.15) erfüllt, so trifft die Nullhypothese zu und es sind somit die beiden betrachteten Variablen (x) und (y) voneinander unabhängig.

Unter Anwendung von (10.15) wurde anhand der Daten von 25 Merkmalniveaus untersucht, ob der PWS von einem Teil der hier betrachteten Parameter unabhängig ist. Eine Zusammenstellung der festgestellten Abhängigkeiten getrennt nach Merkmalniveau ist in Tab. D.7 angeführt.

⁷⁷ Bei der studentsche t-Verteilung handelt es sich um eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, welche die Schätzung der Varianz eines Merkmals anhand einer vorhandenen Stichprobe berücksichtigt. Da sie auf dem Vorhandensein eines kleineren Stichprobenumfangs n basiert, zeigt die t-Verteilung für kleine Werte des Parameters n eine größere Breite und Flankenbetonung als die Normalverteilung. Hypothesentests, bei denen die t-Verteilung Verwendung findet, bezeichnet man als t-Tests.

Tab. D.7: Abhängigkeiten des PWS

<i>Merkmalniveau</i>	Klebstoffmenge [g]	Gesteinsmenge [g]	Gesteinsverlust [g]	Prüfwassertemperatur [°C]	Polierwassertemperatur [°C]	Poliereinwirkung [kJ]	Kontrollwert [-]
G234	-----	-----	✓	-----	-----	✓	-----
G238	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
G253	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
G257	-----	-----	-----	-----	-----	-----	✓
G261	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
G269	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
G283	-----	-----	✓	-----	-----	✓	-----
G293	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
G309	-----	-----	-----	-----	✓	-----	-----
G313	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
G317	-----	-----	-----	✓	-----	-----	-----
G351	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
G352	-----	-----	-----	-----	✓	-----	-----
G368	-----	-----	✓	-----	-----	-----	-----
G380	-----	-----	-----	-----	-----	-----	✓
G389	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
G390	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
G417	-----	-----	✓	-----	-----	-----	-----
G418	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
G437	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
G438	-----	-----	-----	-----	✓	-----	✓
G466	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
G467	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
G476	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
GTPA	-----	-----	-----	-----	-----	✓	✓

Vom PWS völlig unabhängig sind die aufgebrauchte Klebstoff- und Gesteinsmenge. Die meisten Abhängigkeiten konnten zwischen dem Gesteinsverlust und PWS sowie zwischen dem Kontrollwert auf der Glasplatte und dem PWS gefunden werden. Für die Poliereinwirkung konnte nur bei insgesamt drei Merkmalniveaus ein Zusammenhang mit dem PWS festgestellt werden. Ebenso viele Abhängigkeiten wurden zwischen dem PWS und der Polierwassertemperatur identifiziert.

Die für die drei Gesteine G283, G309 und GTPA berechneten Korrelationskoeffizienten zwischen dem PWS und den sieben Einflussfaktoren sind in Tab. D.8, Tab. D.9 und Tab. D.10 in Form von Kreuztabellen zusammengefasst.

Tab. D.8: Kreuztabelle der Korrelationskoeffizienten für das Gestein G309

	PWS [-]	Klebstoffmenge [g]	Gesteinsmenge [g]	Gesteinsverlust [g]	Prüfwassertemperatur [°C]	Polierwassertemperatur [°C]	Poliereinwirkung [kJ]	Kontrollwert [-]
PWS [-]	-----	-0,05	-0,33	-0,38	0,20	0,32	0,00	0,31
Klebstoffmenge [g]		-----	0,16	-0,29	-0,17	-0,08	0,16	0,05
Gesteinsmenge [g]			-----	0,16	-0,30	-0,31	-0,12	-0,41
Gesteinsverlust [g]				-----	-0,61	0,19	-0,29	-0,38
Prüfwassertemperatur [°C]					-----	-0,04	0,39	0,20
Polierwassertemperatur [°C]						-----	-0,04	0,32
Poliereinwirkung [kJ]				-----			-----	0,31
Kontrollwert [-]								-----

Tab. D.9: Kreuztabelle der Korrelationskoeffizienten für das Gestein GTPA

	PWS [-]	Klebstoffmenge [g]	Gesteinsmenge [g]	Gesteinsverlust [g]	Prüfwassertemperatur [°C]	Polierwassertemperatur [°C]	Poliereinwirkung [kJ]	Kontrollwert [-]
PWS [-]	-----	-0,05	-0,14	0,30	-0,04	0,14	0,46	0,47
Klebstoffmenge [g]		-----	0,49	-0,04	0,14	-0,02	0,11	0,07
Gesteinsmenge [g]			-----	-0,36	0,12	-0,09	-0,20	0,01
Gesteinsverlust [g]				-----	0,06	0,30	0,48	0,30
Prüfwassertemperatur [°C]					-----	0,21	-0,22	-0,12
Polierwassertemperatur [°C]						-----	0,22	-0,12
Poliereinwirkung [kJ]				-----			-----	-0,10
Kontrollwert [-]								-----

Tab. D.10: Kreuztabelle der Korrelationskoeffizienten für das Gestein G283

	PWS [-]	Klebstoffmenge [g]	Gesteinsmenge [g]	Gesteinsverlust [g]	Prüfwassertemperatur [°C]	Polierwassertemperatur [°C]	Poliereinwirkung [kJ]	Kontrollwert [-]
PWS [-]	-----	0,25	-0,79	-0,86	0,17	-0,46	-0,92	0,40
Klebstoffmenge [g]		-----	0,27	-0,39	0,27	-0,45	-0,42	-0,57
Gesteinsmenge [g]			-----	0,61	0,18	0,02	0,59	-0,85
Gesteinsverlust [g]				-----	-0,09	0,18	0,96	-0,30
Prüfwassertemperatur [°C]					-----	-0,80	-0,08	-0,16
Polierwassertemperatur [°C]						-----	0,31	0,25
Poliereinwirkung [kJ]				-----			-----	-0,18
Kontrollwert [-]								-----

D.3 Regressionsanalyse

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen der in Kapitel 4.5.4 durchgeführten Regressionsanalyse erläutert.

Mithilfe einer Regressionsanalyse wird die Form der Abhängigkeit zwischen zwei bzw. mehreren Parametern sowie die statistische Signifikanz untersucht. Der einfachste Fall ist das Vorhandensein eines eindeutig linearen Zusammenhanges, wie in Abb. D-1 für $r_{xy} = -1$ bzw. 1 dargestellt.

Bei der eindimensionalen linearen Regression wird lediglich der Zusammenhang zwischen zwei Faktoren (x und y) betrachtet. Die Gleichung der Regressionsgeraden für die Grundgesamtheit (der vorliegenden Daten) für diesen Fall ist in (10.16) angeführt.

$$y_i = \alpha + \beta \cdot x_i + \varepsilon_i \quad (10.16)$$

x_i, y_i, \dots Einzelwert eines Merkmalsniveaus (z.B. Poliereinwirkung, PWS, etc.)

α, \dots y-Achsenabschnitt der Regressionsgeraden

β, \dots Steigung der Regressionsgeraden

ε_i, \dots Residuen bzw. Restfehler

Zur Lösung der Geradengleichung sind die summierten Quadrate der Residuen der Einzelwerte ($\varepsilon_i \rightarrow e_i$) gemäß (10.17) zu minimieren.

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (a + b \cdot x_i)]^2 \rightarrow \text{MIN} \quad (10.17)$$

Mithilfe von (10.14) ermittelt sich der Näherungswert für β gemäß (10.18)

$$\beta \approx b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (10.18)$$

Mit (10.16) erhält man den Näherungswert für α nach (10.19)

$$\alpha \approx a = \bar{y} - \beta \cdot \bar{x} \quad (10.19)$$

Der einfache Fall einer eindimensionalen linearen Regressionsbetrachtung wurde bereits in Kapitel 4.5.3 im Zuge der Ermittlung des empirischen Korrelationskoeffizienten (r_{xy}) durchgeführt.

Bei der multiplen linearen Regression wird angenommen, dass zwischen mehreren unabhängigen Variablen (x_i) – dazu zählen z.B. die aufgebrauchte Gesteinsmenge, die Poliereinwirkung, die Prüfwassertemperatur, etc. – und der von diesen Variablen abhängigen Variablen (y), die das Prüfergebnis (PWS) einer Einzelmessprobe repräsentiert, eine lineare Beziehung besteht. Die für die multiple Regression benötigte Matrixgleichung hat die Form

$$y = X \cdot \beta + \varepsilon \quad (10.20)$$

Mit

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix}; \quad \text{und} \quad X = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \dots & x_{np} \end{pmatrix}$$

Die Residuen haben die Form

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} = y - X \cdot b \quad (10.21)$$

yVektor der abhängigen Variablen (hier: PWS)

XMatrix der unabhängigen Variablen (hier: Poliereinwirkung, Prüfwassertemperatur, Gesteinsmenge, etc.)

β ($\rightarrow b$)..Vektor der Regressions- bzw. Korrelationskoeffizienten

εAbweichungsfaktor von y zu $X \cdot b$

Zur Lösung der Matrixgleichung ist wiederum bei bekannter abhängiger Variable (y) und bei bekannter Matrix (X) die skalare Funktion gemäß (10.22) zu minimieren

$$f(\beta) = \varepsilon^T \cdot \varepsilon \rightarrow \text{MIN} \quad (10.22)$$

Der Vektor der geschätzten Regressionskoeffizienten errechnet sich nach

$$b = \begin{bmatrix} b_1 \\ \dots \\ b_n \end{bmatrix} = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot (X^T \cdot y) \quad (10.23)$$

In dem gängigen Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft® Office Excel® kann für die Durchführung der Regressionsanalyse die Funktion RGP verwendet werden. Diese Funktion berechnet die Fehlerstatistik für eine Linie gemäß der Methode der kleinsten Abstandsquadrate. Ausgegeben wird somit eine gerade Linie, die am besten an die Eingabedaten angepasst ist. Konkret werden für jede Variable (x) die zugehörigen Regressionskoeffizienten (b_j), das Bestimmtheitsmaß (R^2), der F-Wert mit dem dazugehörigen Freiheitsgrad sowie die Varianzen der Regressionskoeffizienten ($s^2(b_j)$) automatisch berechnet.

Liegt ein Datenkollektiv vor, das eine abhängige Variable (y) und eine größere Anzahl zugehöriger unabhängiger Variablen (x) enthält, so sind bei Anwendung der multiplen linearen Regression im ersten Schritt alle unabhängigen Variablen (x) in die Berechnung der Regressionskoeffizienten (b_j) mit einzubeziehen. Die mittels RGP-Analyse ermittelten Regressionskoeffizienten (b_j) sind anschließend auf die Signifikanz ihres Beitrags zur Erklärung der abhängigen Variable (y) zu prüfen. Dies erfolgt wieder mittels eines Hypothesentests mit t-verteilter Testprüfgröße. Dazu wird für die Eignung eines aus der RGP-Analyse ermittelten Korrelationskoeffizienten (b_j) die Nullhypothese $H_0: \beta_j = 0$ aufgestellt. Zur Feststellung ob die Nullhypothese Gültigkeit besitzt, ist einerseits die Testgröße $|t_j|$ zu berechnen und dem von der Anzahl der vorhandenen Messergebnisse (n) sowie der Anzahl der untersuchten unabhängigen Parameter (x) und der Irrtumswahrscheinlichkeit (α_p) abhängigen kritischen Wert t_{krit} gegenüberzustellen, siehe (10.24).

$$|t_j| = \left| \frac{b_j}{s^2(b_j)} \right| > t_{krit} = t\left(1 - \frac{\alpha_p}{2}; n - w_{FG}\right) \quad (10.24)$$

$s^2(b_j)$ geschätzte Varianz des Regressionskoeffizienten

$t(\dots)$ t-Quantil, mit α_p = Irrtumswahrscheinlichkeit und n = Anzahl der Messergebnisse sowie w_{FG} = Freiheitsgrad

Besitzt für den betrachteten Korrelationskoeffizienten (b_j) die Gleichung (10.24) Gültigkeit, so ist die Nullhypothese (H_0) abzulehnen und die Kovariable (x_j) (hier z.B. die Poliereinwirkung oder die Prüfwassertemperatur, etc.) im Modell beizubehalten und der Beitrag zur Erklärung von der abhängigen Variable (y) – hier der PWS einer Einzelmessprobe – signifikant groß. Wird festgestellt, dass die Gleichung (10.24) für einen betrachteten Korrelationskoeffizienten nicht erfüllt wird, so ist die betrachtete Variable (x) ungeeignet zur Prognose der abhängigen Variablen (y). Wird festgestellt, dass das berechnete Regressionsmodell generell für die Prognose der abhängigen Variable (y) geeignet ist, so sind solche Variablen (x) aus dem Regressionsmodell zu entfernen

Mittels F-Test wird die Güte des ermittelten Regressionsmodells anhand des Bestimmtheitsmaßes (R^2) bestimmt. Das Bestimmtheitsmaß (R^2) ist jener Prozentsatz der Varianz von (y) der durch lineare Regression von (x) – hier: Poliereinwirkung, Kontrollwert, etc. – und (y) – hier: PWS – erklärt werden kann. Das Bestimmtheitsmaß (R^2) bewegt sich im Intervall [0, 1]. Ist das Bestimmtheitsmaß klein kann man die Signifikanz durch Aufstellen der Nullhypothese $H_0: R^2 = 0$ mit der Prüfgröße (F) testen, wobei (R^2) und (F) als Ergebnisse der RGP-Auswertung ausgegeben werden. Besitzt Gleichung (10.25) Gültigkeit, so ist (H_0) abzulehnen und der ermittelte Zusammenhang nicht zufällig.

$$F = \frac{\frac{R^2}{(w_{FG} + 1)}}{\frac{R^2}{(n - w_{FG} - 1)}} > F_{krit} = F(1 - \alpha_p; n - w_{FG} - 1) \quad (10.25)$$

R^2 Bestimmtheitsmaß der Regressionsgleichung
 $F(..)$ F-Quantil, mit α_p = Irrtumswahrscheinlichkeit und n = Anzahl der Messergebnisse sowie w_{FG} = Freiheitsgrad

Wird nach Anwendung des F-Tests festgestellt, dass der ermittelte Zusammenhang im Regressionsmodell (R^2) nicht zufällig ist, dann sind im nächsten Schritt jene Variablen (x) aus dem Datenkollektiv zu entfernen, die aufgrund des t-Tests zur Beschreibung der abhängigen Variable (y) als ungeeignet erscheinen. Anschließend wird mit dem verbliebenen Datenkollektiv erneut die RGP-Analyse durchgeführt.

Da die Anwendung einer multiplen linearen Regressionsanalyse das Vorhandensein eines größeren Datenkollektivs erfordert, wurde in der gegenständlichen Arbeit diese Auswertemethode lediglich auf die beiden Gesteine G309 und GTPA angewandt. Für die statistischen Hypothesentests (t- und F-Test) wurde eine Irrtumswahrscheinlichkeit (α_p) von 5 % angesetzt.

In der Tab. D.11 und Tab. D.12 sind die Ergebnisse der RGP-Analyse für die beiden Gesteine angeführt.

Tab. D.11: Ergebnisse der RGP-Analyse des Gesteins G309

unabhängige Variablen (x)							
	Klebstoffmenge [g]	Gesteinsmenge [g]	Gesteinsverlust [g]	Prüfwassertemperatur [°C]	Polierwassertemperatur [°C]	Poliereinwirkung [k.]	Kontrollwert [-]
Regressionskoeffizienten/ Statistische Parameter							
b_j	-0,0063	0,0007	-0,0066	-0,0030	0,0516	1,15E-09	0,1901
$s^2(b_j)$	0,0031	0,0009	0,0033	0,0032	0,0182	5,94E-08	0,2661
$|t|_{(b_j)}$	2,00	0,78	2,01	0,93	2,83	0,02	0,72
t_{krit}				2,08			
c	-0,6214						
$s^2(c)$	0,3729						
n	29						
w_{FG}	21						
R^2	0,39						
F	1,88						
F_{krit}	2,48						

Tab. D.12: Ergebnisse der RGP-Analyse des Gesteins GTPA

Regressionskoeffizienten/ Statistische Parameter	unabhängige Variablen (x)						
	Klebstoffmenge [g]	Gesteinsmenge [g]	Gesteinsverlust [g]	Prüfwassertemperatur [°C]	Polierwassertemperatur [°C]	Poliereinwirkung [kJ]	Kontrollwert [-]
b_j	-0,0066	-0,0003	-0,0024	-0,0017	-0,0027	2,26E-07	1,2425
$s^2(b_j)$	0,0044	0,0009	0,0022	0,0053	0,0118	8,66E-08	0,4040
$|t_{(b_j)}|$	1,48	0,28	1,09	0,33	0,23	2,61	3,08
t_{krit}				2,08			
c	0,2073						
$s^2(c)$	0,2709						
n	28						
w_{FG}	20						
R^2	0,52						
F	3,07						
F_{krit}	2,51						

Die in der Tab. D.11 und Tab. D.12 angeführten Abkürzungen stehen für:

b_jdie Regressionskoeffizienten für die unabhängigen Variablen (x)

$s^2(b_j)$ Varianz der Regressionskoeffizienten

$|t_{(b_j)}|$t-Wert aus Hypothesentest zur Überprüfung der Eignung von b_j

t_{krit}kritischer Wert des t-Tests

cy-Achsenabschnitt der Regressionsgeraden

$s^2(c)$ Varianz von c

nAusreißerbereinigte Anzahl der Einzelmessergebnisse eines Merkmalniveaus

w_{FG} Anzahl der Freiheitsgrade

R^2 Bestimmtheitsmaß der Regressionsgleichung

FF-Wert aus Hypothesentest zur Überprüfung des Regressionsmodells

F_{krit}kritischer Wert des F-Tests

ANHANG E – OBERFLÄCHENKENNGRÖßEN

Zum besseren Verständnis der einzelnen Parameter werden diese in Folge gemäß den europäischen Normen erläutert. Die Darstellung erfolgt mit Skizzen, welche zum Teil aus den Normen entnommen und adaptiert wurden. Da die Normen derzeit nur zweidimensionale Kennwerte berücksichtigen, erfolgt die Angabe der Berechnungsformeln jeweils nur für ein Profilelement. Durch Erweiterung der Summenformeln bzw. Integrale um eine dritte Ebene, können aus den Profilparametern die Flächenparameter ermittelt werden.

Amplitudenkenngrößen (Senkrechtkenngrößen)

(a) sRp

Gemäß EN ISO 4287 [ON, 2010] entspricht (R_p) der größten Profilspitze (Z_p) innerhalb einer Einzelmessstrecke (l_r), siehe Abb. E-1. Die Länge der Einzelmessstrecke entspricht dabei der Grenzwellenlänge (λ_c).

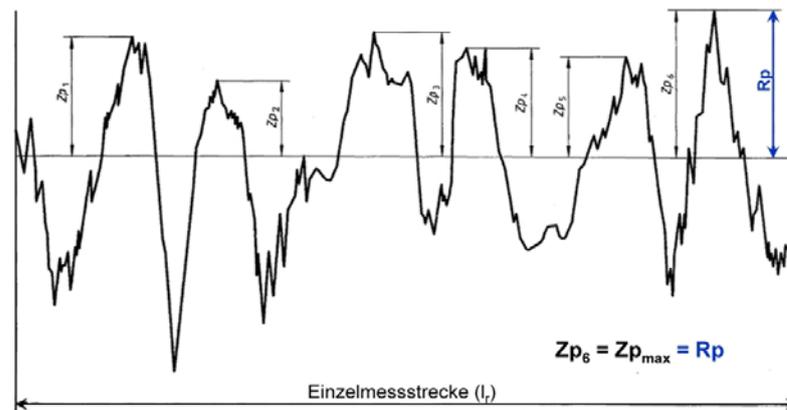


Abb. E-1: Höhe der größten Profilspitze R_p [nach ÖNORM EN ISO 4287:2010]

(b) sRv

Gemäß EN ISO 4287 [ON, 2010] entspricht (R_v) dem tiefsten Profiltal (Z_v) innerhalb einer Einzelmessstrecke (l_r), siehe Abb. E-2. Die Länge der Einzelmessstrecke entspricht dabei der Grenzwellenlänge (λ_c).

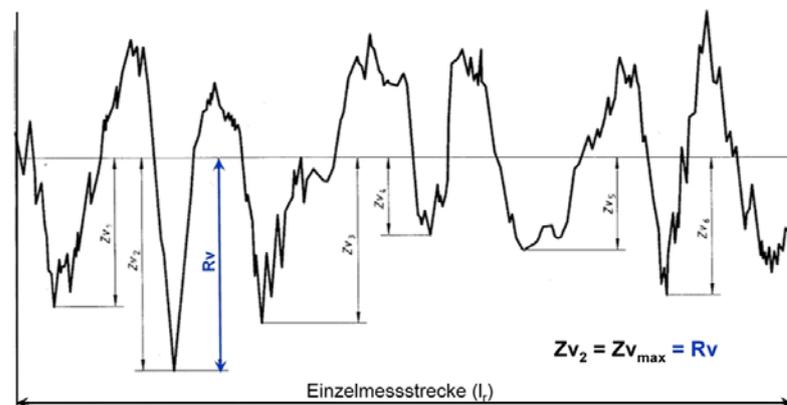


Abb. E-2: Tiefe des größten Profiltals R_v [nach ÖNORM EN ISO 4287:2010]

(c) sRz und sR_{max}

(Rz) ist die mittlere Rautiefe ermittelt aus der gesamten Messstreckenlänge (l_n). Zur Ermittlung werden von fünf Einzelmessstrecken (l_r) jeweils die Rautiefen ($Rz(r)$) berechnet. Gemäß EN ISO 4287 [ON, 2010] entspricht ($Rz(r)$) der Summe der größten Profilspitze (R_p) und dem tiefsten Profiltal (R_v) innerhalb einer Einzelmessstrecke (l_r), siehe Abb. E-3. Die Länge der Einzelmessstrecke entspricht dabei der Grenzwellenlänge (λ_c).

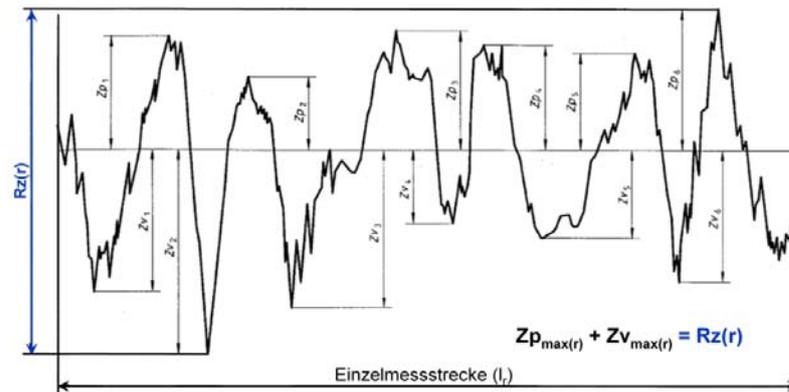


Abb. E-3: Größte Höhe des Rauheitsprofils $Rz(r)$ [nach ÖNORM EN ISO 4287:2010]

Die gemittelte Rautiefe (Rz) über die gesamte Messstreckenlänge (l_n) ist das arithmetische Mittel der Differenz der Höhe der größten Profilspitzen und der Tiefe des größten Profiltals innerhalb von fünf Einzelmessstrecken (l_r). (Rz) errechnet sich nach:

$$Rz = \frac{1}{5} \sum_{r=1}^5 Rz(r) \text{ [}\mu\text{m]}$$

Im Gegensatz dazu ist (R_{max}) die größte Einzelrautiefe ($Rz(r)$) innerhalb der gesamten Messstreckenlänge (l_n), siehe Abb. E-4.

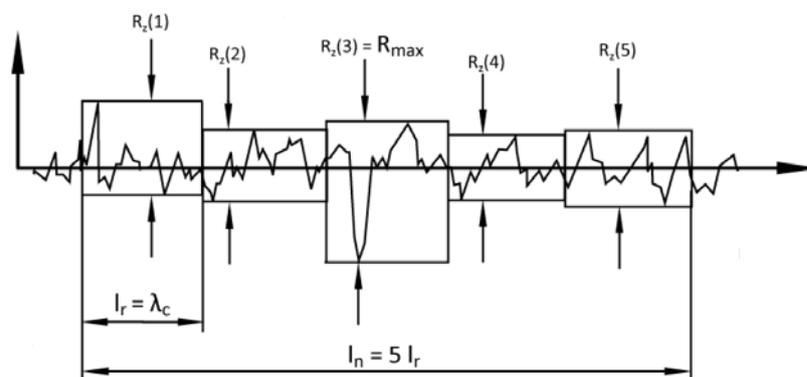


Abb. E-4: Definition der Rautiefe Rz und der maximalen Einzelrautiefe R_{max}

(d) sRz₂₅ und sR_{max25}

Dabei handelt es sich um einen Parameter der noch in keiner internationalen bzw. europäischen Norm Eingang gefunden hat. Für die Berechnung dieses Parameters wird die 3D-Flächenmessung in 5×5 Teilflächen unterteilt. Von jeder Teilfläche wird anschließend die größte Höhe ($Rz(i,j)$) berechnet. Der Parameter (sRz_{25}) errechnet sich dann als der arithmetische Mittelwert der 25 Werte für (Rz) und wird in [μm] angegeben, siehe Abb. E-5.

Dieselbe Vorgehensweise wird bei der Berechnung bzw. der Ermittlung der größten Einzelrautiefe der Messfläche ($sR_{\max 25}$) angewandt.

				Rz(5,5)
...				
Rz(1,3)	...			
Rz(1,2)	Rz(2,2)	...		
Rz(1,1)	Rz(2,1)	Rz(3,1)	Rz(4,1)	Rz(5,1)

$$sRz25 = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 Rz(i,j)$$

$$sR_{\max 25} = \max (Rz(i,j))$$

Abb. E-5: Ermittlung von $sRz25$ aus 25 Teilflächen [FRT, 2009]

(e) sRa

Gemäß EN ISO 4287 [ON, 2010] wird (Ra) als der arithmetische Mittelwert der Profilor­dinaten, also als der arithmetische Mittenrauwert bezeichnet. Für die Berechnung wird gemäß (10.26) aus den Beträgen der Ordinatenwerte des Rauheitsprofils innerhalb einer Einzelmessstrecke (l_r) das arithmetische Mittel gebildet. Der Mittenrauwert (in einer Dimension) entspricht also der Höhe des Rechtecks, das die gleiche Länge wie die zu untersuchende Strecke sowie den gleichen Flächeninhalt wie jene Fläche zwischen mittlerer Linie und Profil besitzt, siehe dazu auch Abb. E-6.

$$Ra = \frac{1}{l_r} \cdot \int_0^{l_r} |Z(x)| \cdot dx \quad [\mu\text{m}] \quad (10.26)$$

Ra Arithmetischer Mittenrauwert in einer Dimension

l_r Einzelmessstrecke

$Z(x)$ Ordinatenwert des Rauheitsprofils an der Stelle x

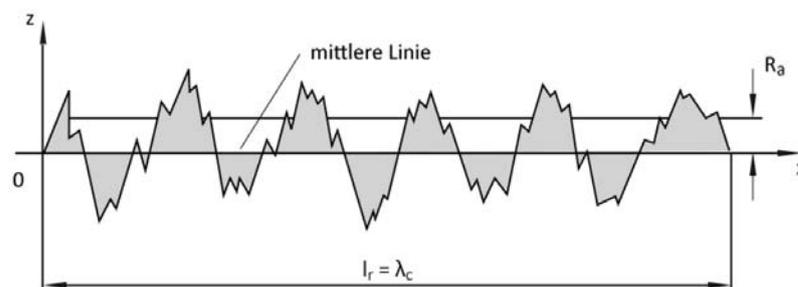


Abb. E-6: Skizze zum arithmetischen Mittenrauwert Ra [HAAS, 2010]

(f) sRq

Gemäß EN ISO 4287 [ON, 2010] wird (Rq) als der quadratische Mittelwert der Profilor­dinaten, also als der quadratische Mittenrauwert bezeichnet. Für die Berechnung wird gemäß (10.27) der Mittelwert aus den quadrierten Ordinatenwerten des Rauheitsprofils innerhalb einer Einzelmessstrecke (l_r) berechnet.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l_r} \cdot \int_0^{l_r} Z^2(x) \cdot dx} \quad [\mu\text{m}] \quad (10.27)$$

(Rq) ist somit ähnlich definiert als (Ra) reagiert jedoch empfindlicher auf einzelne Spitzen bzw. Riefen.

Der arithmetische und der quadratische Mittenrauwert können grundsätzlich nicht zwischen Spitzen und Riefen unterscheiden. Ebenso wenig ist es mit diesen Parametern möglich eine Profilform zu erkennen. Als Anschauungsbeispiel soll Abb. E-7 dienen.

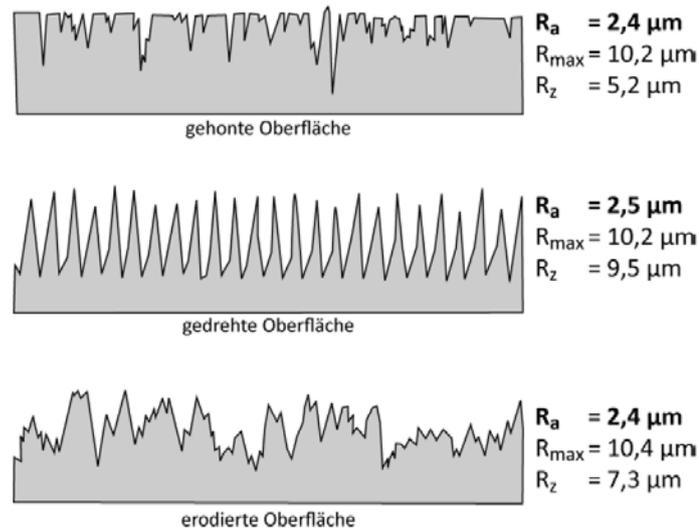


Abb. E-7: Unterschiedliche Profile mit gleichem Mittenrauwert (Ra) und gleicher maximaler Einzelrautiefe (R_{max}) [HAAS, 2010]

Wie aus Abb. E-7 ersichtlich wird, besitzt ein Profil mit vielen Spitzen dieselben Ra- und R_{max}-Werte als ein Profil mit vielen Riefen gleicher Tiefe. Mit diesen Parametern lässt sich ein Profil, bzw. betrachtet man diese Parameter in einer zusätzlichen Dimension auch eine Oberfläche, nur grob hinsichtlich ihrer vertikalen Ausprägung charakterisieren. Das heißt man weiß, ob große Spitzen bzw. Riefen vorhanden sind, jedoch nicht exakt, ob es sich um Spitzen oder Riefen handelt. Da die Parameter (Ra) und (Rq) auf der Bildung von Mittelwerten beruhen, streuen diese Werte jedoch nur geringfügig und sind somit gut reproduzierbar. Eine aussagekräftige Beschreibung des Aussehens einer Oberfläche bzw. eines Profils kann also nur über eine Kombination aus den Parametern (Rp), (Rv), (Rz) und (Ra) erfolgen.

Abbott'sche Kurve (Materialanteilkurve)

Zusätzlich zu den unter (a) bis (f) aufgelisteten Oberflächenkennwerten können andere Parameter zur „horizontalen“ Charakterisierung eines Profils bzw. einer Oberfläche verwendet werden. Diese Parameter, dazu zählen (sRk), (sRpk), (sRvk), (sMr1) sowie (sMr2), basieren auf der linearen Darstellung der Materialanteilkurve – auch Abbott-Kurve genannt. Sie beschreibt die Zunahme des Materialanteils der Oberfläche mit zunehmender Tiefe des Rauheitsprofils. Die Abbott-Kurve wird gebildet, indem man den Materialanteil (R_{mr}(c)) über die Höhe des Profils aufträgt. Dafür wird das Profil in einer entsprechenden Höhe (c) geschnitten und die profilschneidenden, horizontalen Strecken (l_{c,i}) werden aufaddiert und ins Verhältnis zur Gesamtmessstrecke (l_n) gesetzt, siehe (10.28).

$$R_{mr}(c) = \frac{100}{l_n} \cdot \sum_{i=1}^m l_{c,i} \quad [\%] \quad (10.28)$$

$R_{mr}(c)$Materialanteil der Schnittebene c

$l_{c,i}$Profilschneidende Strecken ($i=1$ bis m) auf Höhe der Schnittebene c

Die Form der dabei entstehenden Kurve ist stark abhängig von der höchsten Spitze bzw. dem tiefsten Tal. Die Bildung sowie die Darstellung einer Abbott-Kurve ist in Abb. E-8 dargestellt.

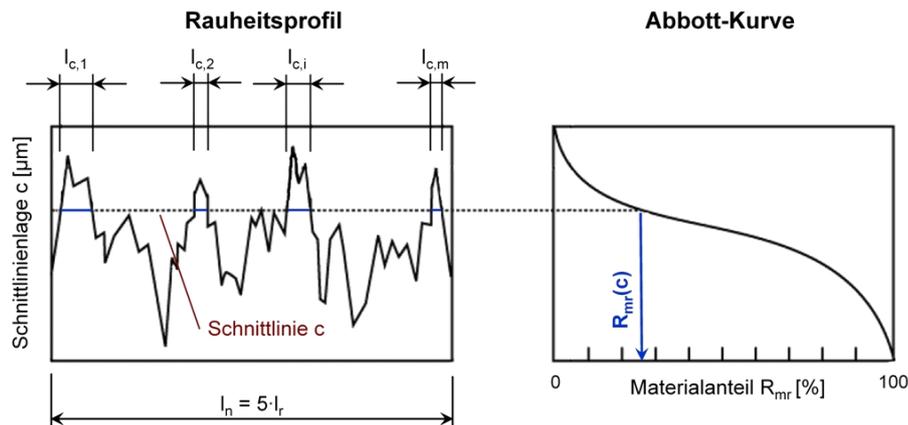


Abb. E-8: Zusammenhang zwischen Rauheitsprofil und Abbott-Kurve [nach HAAS, 2010]

Aus der gemäß Formel (10.28) berechneten Materialanteilkurve werden in weiterer Folge die Parameter (sRk), (sRpk), (sRvk), (sMr1) sowie (sMr2) ermittelt.

Gemäß EN ISO 13565-2 [DIN, 1998] ist dazu in einem ersten Auswerteschritt in der Abbott-Kurve eine Ausgleichsgerade zu berechnen. Diese Ausgleichsgerade wird für den zentralen Bereich der Materialanteilkurve, der 40 % aller gemessenen Profilpunkte einschließt, berechnet. Der zentrale Bereich liegt dort, wo die Sekante über 40 % Materialanteil der Materialanteilkurve einerseits den geringsten Anstieg aufweist, andererseits die Summe der Abweichungsquadrate der Profilordinaten ein Minimum wird, siehe Abb. E-9.

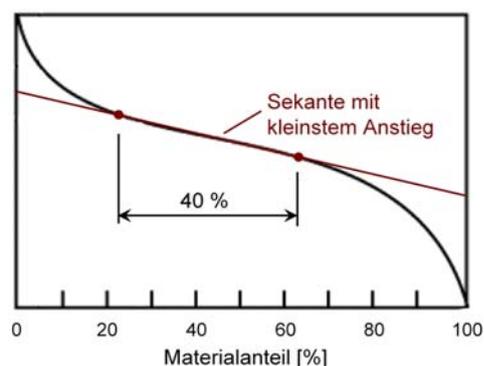


Abb. E-9: Erstellen der Ausgleichsgerade in der Abbott-Kurve

Basierend auf der Ausgleichsgerade können nun die Parameter (sRk), (sMr1) sowie (sMr2), welche in weiterer Folge näher erläutert werden, berechnet werden.

(g) sRk, sMr1 und sMr2

Die berechnete Ausgleichsgerade schneidet die Ordinate für einen Materialanteil von 0 bzw. 100 %, siehe Abb. E-10. An den Schnittpunkten werden zur x-Achse parallele Linien

gezogen, die im Rauheitsprofil die Kernrautiefe (R_k) einschließen. (R_k) wird in der Regel in [μm] bzw. [mm] angegeben. Die Schnittpunkte der parallelen Linien mit der Materialanteilkurve bestimmen die Materialanteile (Mr_1) und (Mr_2), welche in [%] angegeben werden.

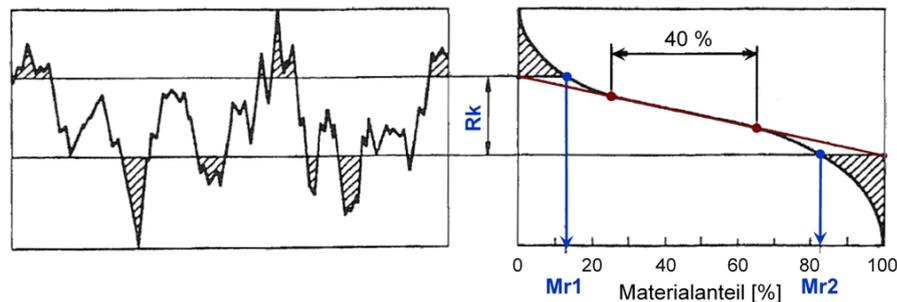


Abb. E-10: Ermittlung von R_k , Mr_1 und Mr_2 aus der Abbott-Kurve [nach DIN ISO 13565-2:1998]

(h) sR_{pk} , sR_{vk}

Die reduzierte Spitzenhöhe (R_{pk}) ist die gemittelte Höhe der aus dem Kernraubereich (R_k) herausragenden Spitzen. Die reduzierte Riefentiefe (R_{vk}) im Gegensatz dazu ist die gemittelte Tiefe der aus dem Kernraubereich herausragenden Riefen. Die reduzierte Spitzenhöhe (R_{pk}) entspricht der Höhe, des mit den Kuppenflächen (siehe Fläche A im Detail C in Abb. E-11) flächengleichen rechtwinkligen Dreiecks mit der Basislänge (Mr_1). Zur Bestimmung von (R_{vk}) wird ein zu den Tal- bzw. Riefenflächen flächengleiches, rechtwinkeliges Dreieck mit der Basislänge 100 % - Mr_2 erzeugt. Die Höhe des Dreiecks entspricht dann der reduzierten Riefentiefe (R_{vk}).

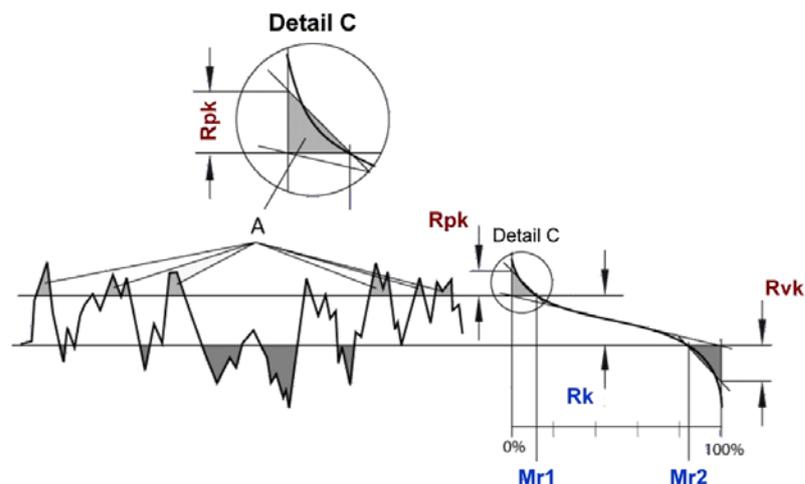


Abb. E-11: Ableitung der Parameter R_{pk} und R_{vk} [nach HAAS, 2010]

(i) sV_0

Das Ölhaltevolumen wurde speziell für Anwendungen im Motorenbau konzipiert und wird gemäß Formel (10.29) direkt aus der reduzierten Riefentiefe (R_{vk}) bestimmt.

$$V_0 = \frac{R_{vk} \cdot (100\% - Mr_2)}{200} \left[\frac{\mu\text{m}^3}{\mu\text{m}^2} \right] \quad (10.29)$$

Das Ölhaltevolumen (V_0) beschreibt einerseits im Motorenbau plateauartige Oberflächen mit tiefen Riefen, kann aber auch zur Charakterisierung von Riefen in den Prüfummis, wie sie bei der Bestimmung des Sandpolierwertes mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze entstehen, verwendet werden.