

Praxisgerechte Beurteilung der Qualität von feinen Gesteinskörnungen für den Anwendungsbereich Asphalt (Qualifine)

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
D-A-CH Kooperation
Verkehrsinfrastrukturforschung 2017
DACH 2017

Juni 2019



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

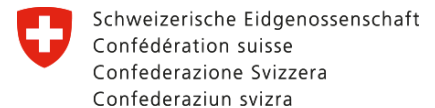
Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)
Invalidenstraße 44
10115 Berlin
Deutschland



Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT)
Radetzkystraße 2
1030 Wien
Österreich



Bundesamt für Straßen (ASTRA)
Mühlestraße 2, Ittigen
3003 Bern
Schweiz



Bundesamt für Strassen ASTRA

Für den Inhalt verantwortlich:

TPA Gesellschaft für Qualitätssicherung und Innovation GmbH
Bahnstraße 1a,
2521 Trumau
Österreich



Centrum Baustoffe und Materialprüfung
MPA BAU, Abteilung Baustoffe
AG 5 Bitumenhaltige Baustoffe und Gesteine
Baumbachstraße 7
81245 München



Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
1090 Wien
Österreich



Praxisgerechte Beurteilung der Qualität von feinen Gesteinskörnungen für den Anwendungsbereich Asphalt (Qualifine)

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
D-A-CH Kooperation
Verkehrsinfrastrukturforschung 2017
DACH 2017

AutorInnen:

Dr. -Ing. Hannes KUGLER

Dr. -Ing. Thomas WÖRNER

Dipl.-Geol. Dr.rer.nat. Erhard WESTINER

Dipl.-Geol. Dr.rer.nat. Sara NEIDINGER

Dr. François RÖTHLISBERGER

Ao.Univ.Prof.i.R. Mag. Dr. Franz OTTNER

Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Deutschland

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Österreich

Bundesamt für Straßen, Schweiz

Auftragnehmer:

TPA Gesellschaft für Qualitätssicherung und Innovation GmbH
Bahnstraße 1a,
2521 Trumau
Österreich

Auftragnehmer:

Centrum Baustoffe und Materialprüfung
MPA BAU, Abteilung Baustoffe
AG 5 Bitumenhaltige Baustoffe und Gesteine
Baumbachstraße 7
81245 München

INHALTSVERZEICHNIS

1	Problemstellung	8
2	Ziele	11
3	Materialien	13
3.1	Mineralische Zuschläge für Asphalt aus der Praxis	13
3.1.1	Kriterien zur Auswahl der Proben für die Performance-Prüfungen	14
3.2	Mineralogische Reinphasen	15
3.3	Referenzgestein und Mischungspartner	16
4	Methodik	17
4.1	Überblick zu Strategie und Methodik	17
4.1.1	Relevanz der Sandfraktionen	19
4.2	Fraktionsabhängiger methodischer Überblick	20
4.3	Spezielle Methodik	21
4.3.1	Korngrößenverteilung	21
4.3.2	Geochemische Analytik	21
4.3.3	Thermoanalytik	21
4.3.4	Mineralanalytik	21
4.3.5	Petrographie	24
4.3.6	MB	24
4.3.7	SE (10)	25
4.3.8	Spezifische Oberfläche	26
4.3.9	Zeta-Potenzial	26
4.3.10	Schüttelabrieb	27
4.3.11	Wasserempfindlichkeit an Asphalt-Probekörpern	29
4.3.12	Frosthebung und Infiltration	32
4.3.13	Nicht berücksichtigte Methoden	32

5	Ergebnisse und Diskussion.....	34
5.1	Untersuchungen an den mineralogischen Reinphasen	34
5.2	Untersuchungen der natürlichen Materialien sowie deren mineralogisch- petrographischen Abhängigkeiten	43
5.2.1	KGV.....	43
5.2.2	Geochemische Zusammensetzung.....	43
5.2.3	Thermoanalytik	43
5.2.4	Mineralogie.....	45
5.2.5	Petrographie.....	48
5.2.6	MB.....	57
5.2.7	SE (10)	61
5.2.8	Spezifische Oberfläche (BET).....	63
5.2.9	Zeta-Potenzial	64
5.2.10	Schüttelabrieb an Füller und Sand.....	67
5.2.11	Asphaltprüfungen	72
5.2.12	Frosthebungsprüfung und Infiltration	76
5.3	Bewertungshintergründe und Wertespreizungen im Überblick	78
5.4	Korrelationen zwischen den Verfahren zur Qualitätsbeurteilung	83
5.4.1	Überblick	83
5.4.2	MB.....	85
5.4.3	Zeta-Potenzial	87
5.4.4	Spezifische Oberfläche (BET).....	87
5.4.5	SE (10)	90
5.4.6	Schüttelabriebe an Füller und Asphalt	92
5.4.7	Asphaltprüfungen	98
5.4.8	Frosthebung und Infiltration	104
5.5	Evaluierung der Versuche.....	105

6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	108
7	Quellenverzeichnis	115
8	Abbildungsverzeichnis	120
9	Tabellenverzeichnis	124
10	Anhang	126
10.1	Arbeitsanleitung für die Prüfung von Walzasphalt auf Wasserempfindlichkeit mit dem Schüttelabrieb am Marshall-Probekörper	126
10.2	Ergebnistabellen	129

1 PROBLEMSTELLUNG

In der Vergangenheit wurde der Qualität von feinen Gesteinskörnungen ($< 2 \text{ mm}$) im Anwendungsbereich Asphalt nur eine untergeordnete Bedeutung zugewiesen. Aktuelle Forschungsprojekte und Erfahrungen aus den vergangenen Jahren und Jahrzehnten haben jedoch gezeigt, dass die Qualität eines Asphaltes maßgeblich von der Qualität der feinen Gesteinskörnung abhängt (Feix, R., 1979 und Graf, K. & Vassiliou, 2007). Die besonderen Eigenschaften mancher Minerale, besonders innerkristallin quellfähiger Tonminerale, führen zu Quellungerscheinungen bei Wasserzutritt oder Adsorption mobiler Bestandteile aus dem Bitumen. Beides hat unmittelbare Schäden am Asphalt zur Folge.

Unter Feinanteil ist die Korngrößenfraktion $< 0,063 \text{ mm}$ zu verstehen, die dadurch charakterisiert ist, dass sie erhöhte Anteile an Verwitterungsprodukten (Tonminerale) beinhaltet, deren Eigenschaften die Asphaltqualität entscheidend beeinflussen können. In Deutschland werden von Seiten der Asphaltmischgutproduzenten vermehrt feine Gesteinskörnungen mit niedrigem Feinanteil und damit günstigem Einfluss auf die Wasserempfindlichkeit angefragt. Für den Bereich der ungebundenen Tragschichten wird zur Sicherstellung einer ausreichenden Wasserdurchlässigkeit und Frostunempfindlichkeit ebenfalls ein niedriger Feinanteil im verdichteten Baustoffgemisch gefordert. Auch in Österreich wird in Ermangelung aussagekräftiger Prüfverfahren zumeist so verfahren, dass der Feinanteilgehalt begrenzt wird (max. f_{10} bzw. f_{16} in $0/2 \text{ mm}$ und f_{10} im Korngemisch $0/X \text{ mm}$). Bei hochrangigen Straßen wird ein möglichst großer Feinanteil sogar kostenintensiv gegen inerten Fremdfüller (z.B. Kalksteinmehl oder Kalkhydrat) ausgetauscht.

Für die Qualität von Asphalt ist nicht nur die Quantität des Feinanteils im Sand, sondern auch die Qualität des Sandes von großer Bedeutung.

Folgende Parameter beeinflussen die Wasserempfindlichkeit von Sand (inkl. der Feinanteile):

- Abbauverhältnisse (Abraum, Bruchwand, Witterung),
- Art, Betriebsweise und Zustand des Zerkleinerungssystems (Betriebsweise der Brechwerkzeuge und Zustand der Verschleißteile),
- Selektion durch Sieben,
- Kornausbildung und Gefüge,
- Festigkeit,
- Mineralogische Zusammensetzung,
- Anteil an Tonmineralien und quellfähigen Bestandteilen,
- Vorbelastung des Sandes durch Hitzebeanspruchung.

Quarz, Glimmer, Chlorit oder quellfähige Tonmineralien können auch im Kornanteil $> 0,063$ mm in den eigentlichen Sandfraktionen enthalten sein und die Wasserempfindlichkeit ungünstig beeinflussen (z. B. Feix, R., 1979; Graf, K. & Vassiliou, 2007; Westiner & al., 2007). Die Wasserempfindlichkeit korreliert mit der Affinität gegenüber Bitumen. Die Art der Gewinnung, Zerkleinerungstechnik (Art, Betriebsweise und Beschickung der Brechwerkzeuge) und Absiebung beeinflussen die Wasserempfindlichkeit ebenfalls maßgebend (Feix, R., 1979; Feix, R., 1975). Eine thermische Beanspruchung führt bei Tonmineralien zu irreversiblen Änderungen des Mineralaufbaues und kann somit die Wasserempfindlichkeit verbessern (Feix, R., 1975).

Die Tatsache, dass der Qualität der feinen Gesteinskörnung u. a. im Anwendungsbereich Asphalt bisher keine große Bedeutung zugeordnet wurde, spiegelt sich auch im aktuellen Regelwerk wider. Im Rahmen der Europäischen Produktnorm EN 13043 ist daher eine Beurteilung der Qualität der Feinanteile in Gesteinskörnungen durch das Methylenblau (MB)-Verfahren nach EN 933-9 nur dann gefordert, wenn die Feinanteile einen Gehalt von 3 M.-% überschreiten. EN 13242 lässt neben dem MB-Verfahren auch das Sandäquivalent (SE)-Verfahren nach EN 933-8 zu. Die Weiterführung der Europäischen Normung wird künftig Kategorien für die beiden Prüfverfahren beinhalten (auch für Asphalt waren in der zurückgezogenen Version von EN 13043 aus 2013 bereits Kategorien für das SE enthalten). Somit werden in den nationalen Anwendungsdokumenten Festlegungen zur Qualitätseinstufung dieser Kennwerte zu treffen sein.

Die kausal mit der Qualität der feinen Gesteinskörnung zusammenhängende mineralogische Zusammensetzung wird bislang in der europäischen Regelung nicht berücksichtigt. Ballmann P. (1999) konnte zeigen, dass zwischen SE-Werten und Tonmineralgesamtgehalten der Fraktionen $< 0,02$ mm ein mäßig signifikanter negativer Zusammenhang besteht. Zwischen MB-Werten und Tonmineralgesamtgehalten ist keine Korrelation ermittelt worden, lediglich die quellbaren Phasen weisen - wie zu erwarten - zumindest eine schwache bis mäßige wenngleich tendenziell eindeutige Abhängigkeit auf. Dennoch konnte bislang kein Zusammenhang der MB- und SE-Messwerte mit baustoffspezifischen Eigenschaften oder Schadensfällen nachgewiesen werden. Beide im europäischen Regelwerk verankerten Prüfverfahren sind nach dem derzeitigen Wissensstand nur begrenzt geeignet, die Qualität von feinen Gesteinskörnungen hinreichend zu beschreiben. Um dieses Manko zu beheben, werden derzeit unterschiedliche alternative Ansätze in den DACH-Ländern verfolgt. Österreich und Schweiz versuchen die Qualität der feinen Gesteinskörnungen über direkte mineralogische Untersuchungen zu erfassen, Deutschland baut auf das Schüttelabriebverfahren. Letzteres wird als Chance

gesehen, feine Gesteinskörnungen zielführend und ressourcenschonend einzusetzen. In Bayern wird dies bereits seit Jahrzehnten erfolgreich praktiziert. Damit soll sichergestellt werden, dass Gesteinskörnungen, die sich über Jahrzehnte im Straßenbau bewährt haben, von der Verwendung nicht ausgeschlossen werden (Westiner & al., 2007).

2 ZIELE

Zur Beurteilung der Qualität der Feinanteile ($< 0,063$ mm) fordern europäische Produktnormen für Asphalt die Ermittlung von Kennwerten nach dem Methylenblau (MB)-Verfahren und für ungebundene Schichten zusätzlich nach dem Sandäquivalent (SE)-Verfahren. Die europäische Normung wird daher künftig für beide Verfahren Kategorien vorgeben, die in nationalen Anwendungsdokumenten Qualitätseinstufungen zugeordnet werden müssen.

Ziele des Forschungsvorhabens sind daher

- mit geeigneten Methoden die Aussagekraft von MB und SE zu verifizieren und
- praxisgerechte Qualitätseinstufungen vorzunehmen oder besser geeignete Alternativen vorzuschlagen.

Um die Aussagekraft von MB- und SE-Werten zu evaluieren, wurden künstlich zusammengesetzte Gemische mit schädlichen Mineralen hergestellt und geprüft. Diese sollten jene wesentlichen Schichtsilikate als Reinphasen umfassen (in definiert abgestuften Gehalten), die zuvor in einem mineralogischen Screening von natürlichen Straßenbaumaterialien erfasst wurden.

Zur Festlegung und Einstufung von Qualitätskategorien für MB- und SE-Messwerte (bzw. für alternative Methoden) sollten praxisnahe Bewertungshintergründe für die durchgeführten Versuche aufgebaut werden. Dafür wurden aus allen 3 DACH-Ländern 35 natürliche, repräsentative Materialien mit bekanntem Praxisverhalten beschafft und den vorgesehenen Untersuchungen unterzogen.

Diese Untersuchungen sollten neben MB und SE auch umfassende mineralogisch-petrographische Charakterisierungen nach dem Stand der Technik beinhalten (mit besonderem Bezug zu den Erfahrungen in Österreich und Schweiz) sowie Performance-Versuche einschließen (deutsche Schüttelabrieb-Versuche sowie Spaltzugversuche an Asphaltprobekörpern und Frosthebungsversuche an ungebundenem Material). Korrelationen der Versuchsergebnisse mit möglichst exakt bekannten Mineralgehalten sollten die Evaluierung deren Aussagekraft ermöglichen und auf Basis der ermittelten Bewertungshintergründe den Vorschlag von Kategorien mit sinnvollen Qualitätsabstufungen zur Beurteilung der Feinanteile erlauben.

Ergänzende Messreihen an natürlichen Materialien, deren Feinanteile durch inaktives Kalksteinmehl ersetzt werden (Schüttelabrieb am Sand mit Fremdfüller), sowie Performance-Prüfungen am Asphalt sollten schließlich Aussagen zur Relevanz der Sandfraktion für die Beurteilung der Qualität der feinen Gesteinskörnung erlauben.

Ebenso sollte überprüft werden, inwieweit eine vereinfachte mineralogisch-petrographische Analyse eine für den Routine-Laborbetrieb taugliche Methode darstellt, Feinanteilqualitäten für Asphalt praxisgerecht und zeitnah zu beurteilen.

3 MATERIALIEN

3.1 Mineralische Zuschläge für Asphalt aus der Praxis

Die Auswahl der Materialien orientiert sich neben der länderspezifischen Praxisrelevanz (intensiver Einsatz im hochrangigen Straßennetz) auch an einer möglichst repräsentativen Abdeckung des vorliegenden lithologischen Spektrums (Anhaltspunkte liefern die TL Gestein-StB 04, Anhang A) unter Vermeidung von Redundanzen (bzw. sehr ähnlicher Materialien). Die Auswahl und Beschaffung erfolgte durch die einzelnen Konsortialpartner aus DACH unter Nutzung lokaler Erfahrungswerte, firmeninterner Informationen oder von Behördenkontakten. Im Endeffekt wurden 35 Materialien für dieses Projekt herangezogen. Es handelt sich überwiegend um Lieferkörnungen 0/2 mm, untergeordnet 0/5 mm.

Darüber hinaus wurde ein Referenzmaterial gewählt (frischer Diabas), das in besonderem Maße Homogenitätsanforderungen genügen musste. Die Auswahl eines geeigneten Referenzmaterials ist von großer Bedeutung, da viele der vergleichenden Untersuchungen auf der Konstanz der Sandfraktionen > 0,063 mm beruhen.

Tab. 1: Untersuchte Gesteinskörnungen (rot hinterlegt sind jene Proben, an denen im Endeffekt Performance-Untersuchungen, v.a. an Asphalt durchgeführt wurden).

Probe Nr.	Land	Gesteinsart
18_0084	A	Amphibolitbrekzie
18_0088	A	Kersantit
18_0089	A	Diabas und Grauwacke
18_0092	A	Basalt
18_0097	A	Ultrabazit
18_0101	CH	Sandstein
18_0102	CH	Kieselkalk
18_0103	CH	Kieselkalk
18_0104	Ita	Basalt
18_0105	Ita	Basalt
18_0331	A	Dolomit
18_0439	D	Granit
18_0440	D	Granit
18_0441	D	Granodiorit

18_0442	D	Rhyolith
18_0443	D	Rhyolith
18_0444	D	Andesit
18_0445	D	Latitandesit
18_0446	D	Basalt
18_0447	D	Basalt
18_0448	D	Diabas
18_0449	D	Kalkstein, Jura
18_0450	D	Kalkstein, Jura
18_0451	D	Kalkstein, Muschelkalk
18_0452	D	Kalkstein, Muschelkalk
18_0453	D	Devonischer Massenkalk
18_0454	D	Amphibolit
18_0455	D	Quarzit
18_0456	D	Kies, gebrochen
18_0457	D	Kies, ungebrochen
18_0458	D	Grauwacke
18_0459	D	Diabas
18_4024	Fra	Metamorphit (schiefrig)
18_4025	Fra	hydrothermaler Rhyolith
18_8086	Swe	vmtl. Diorit

3.1.1 Kriterien zur Auswahl der Proben für die Performance-Prüfungen

Für die Asphaltuntersuchungen sollten Proben herangezogen werden, die den gesamten Wertebereich aus den Prüfungen des Schüttelabriebs (SA) an den Sandasphalt-Probekörpern und die unterschiedlichen Petrographien widerspiegeln.

In Abb. 1 sind die an den 35 Proben der Grunduntersuchung ermittelten Ergebnisse des Schüttelabriebs an den Sandasphalt-Probekörpern dargestellt. Mit einem grünen Punkt sind die Proben gekennzeichnet, die für die Asphaltuntersuchungen ausgewählt wurden.

In Kap. 5.2.11.1 sind Anmerkungen zu Relevanz und Konsequenz der Probenauswahl in Hinblick auf die Vertrauenswürdigkeit von (v.a. mineralogischen) Abhängigkeiten angeführt.

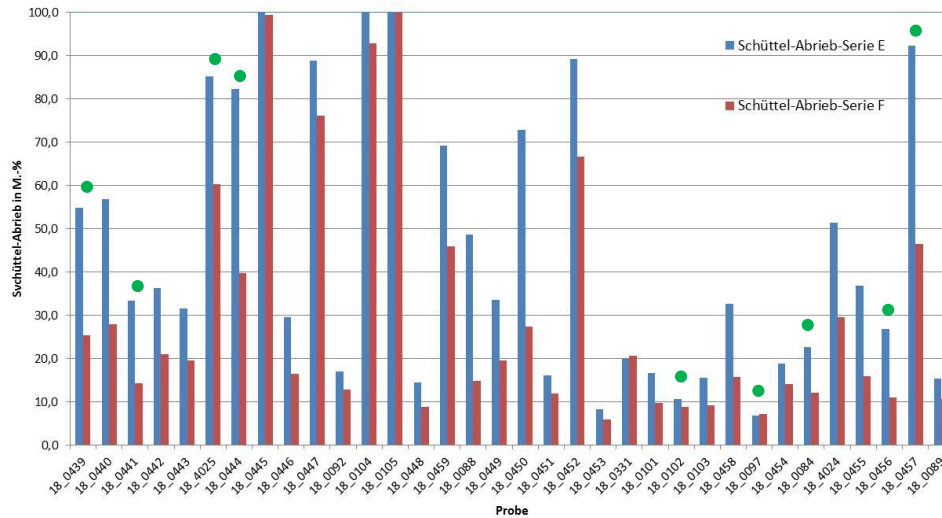


Abb. 1: Ergebnisse der Schüttelabriebprüfungen an 35 feinen Gesteinskörnungen und Kennzeichnung der für die Asphaltuntersuchungen ausgewählten Gesteinskörnungen

3.2 Mineralogische Reinphasen

Im Zuge eines mineralogischen Screenings der Feinanteile der gewählten Lieferkörnungen sollte mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) ein Überblick über die Schichtsilikatverteilung in den Feinanteilen erlangt werden. Auf Basis dessen wurde gezielt nach Mineralgemengen gesucht, welche diese Minerale in hohen Konzentrationen aufwiesen („Reinphasen“).

Folgende Reinphasen wurden letztlich herangezogen:

- Muskowit (A)
- Kaolinit (A)
- Chlorit (CH)
- Smektit, niedrig geladen (D)

Zur Erlangung vergleichbarer Oberflächen (außer Smektit) wurden Muskowit und Chlorit entsprechend lange vermahlen, bis die Sieblinien auf vergleichbarem Niveau lagen. Im Wesentlichen ist die exakte summarische Oberfläche aber insofern wenig relevant, als

- die natürliche Bandbreite viel zu groß ist, als dass diese mit einer Sieblinie repräsentativ nachgezeichnet werden könnte,
- ein Vergleich zwischen den verschiedenen Reinphasen nicht so wichtig ist wie der Vergleich unterschiedlicher Gehalte einer Reinphase im Rahmen der künstlichen Mischserien.

3.3 Referenzgestein und Mischungspartner

Als Referenzgestein für die Sand-Fraktion und die Fraktionen der groben Gesteinskörnungen, die im Zuge der Sandäquivalent-, Schüttelabriebuntersuchungen am Sand, Frosthebungsversuche und Infiltrationen sowie Asphaltversuche erforderlich sind, wurde frischer Diabas in jeweils vergleichbarer Sieblinie verwendet.

Als Mischungspartner für die mineralogischen Reinphasen innerhalb der Füller wurde Standardkalksteinmehl verwendet.

4 METHODIK

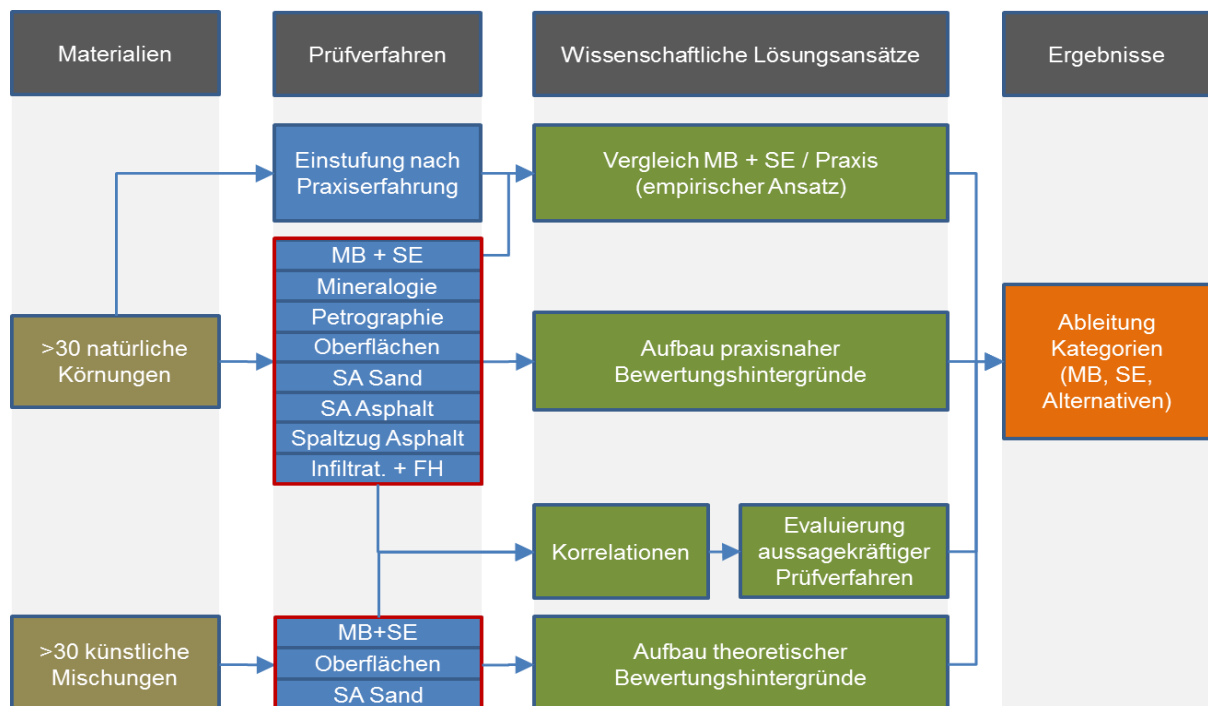
4.1 Überblick zu Strategie und Methodik

Nach Österreichischem und Schweizer Ansatz wird die Qualität von Feinanteilen, aber auch die Qualität der feinen Gesteinskörnung durch die Mineralogie und die damit assoziierten spezifischen Oberflächeneigenschaften (Flächengröße und Ladung) bestimmt. Daher kommt einer Analyse der Mineralogie in qualitativer und quantitativer Hinsicht sowie einer ergänzenden petrographischen Untersuchung nach Schweizer Vorbild große Bedeutung zu.

Ein weiterer alternativer Ansatz, die Qualität der Feinanteile zu beurteilen, ist nicht deren Mineralogie bzw. Petrographie zu erfassen, sondern deren tatsächliches Verhalten in praxisnahen Performance-Prüfungen an Asphalt-Probekörpern zu untersuchen. In Deutschland wird das Schüttelabriebverfahren als solche aussagekräftige Alternative erachtet.

Abb. 2 gibt einen Überblick zu Strategie und Methoden zur Zielerfüllung.

Abb. 2: Workflow zur Erreichung der Zielvorgaben (SA = Schüttelabrieb, Infiltrat. = Infiltrationen, FH = Frosthebungen).



Einerseits sollen zumindest 30 natürliche Straßenbaumaterialien allen vorgesehenen Analysen (MB, SE, mineralogisch-petrographische Charakterisierungen sowie Performance-Untersuchungen am Asphalt) unterzogen werden. Daraus lassen sich methodenspezifische praxisnahe Bewertungshintergründe ableiten.

Durch ergänzende Qualitätseinstufung dieser natürlichen Materialien nach Praxiserfahrungen (z.B. Schulnotensystem) und Vergleich der MB- und SE-Kennwerte könnten sich bereits Trends abzeichnen und erste Kategorisierungsmöglichkeiten für MB und SE ergeben. Neben der Subjektivität der Einstufung erschweren auch eine Abhängigkeit der Beurteilung von Klima sowie regionalspezifisch unterschiedliche Bewertung einer „zufriedenstellenden Verwendung“ (EN 13242, Anhang A) die Vergleichbarkeit, dennoch soll auf die lokalen Langzeiterfahrungswerte der Konsortialpartner (empirischer Ansatz) nicht verzichtet werden, um zumindest länder- bzw. klimaraumspezifische oder sogar tendenziell länderübergreifende Vergleiche ziehen zu können.

Andererseits werden künstliche Mineralmischungen mit Feinanteilen definiert abgestufter Gehalte schädlicher Minerale herangezogen (insgesamt mind. 30), um zumindest für MB, SE und Schüttelabrieb am Sand theoretische Bewertungshintergründe aufzubauen. Diese werden angesichts z.T. hoher Gehalte schädlicher Minerale ein weiteres Spektrum aufweisen als die praxisnahen Bewertungshintergründe.

Über Korrelationen mit definierten Mineralgehalten im Füller (bei Schüttelabrieb am Sand wird das Referenzgestein Diabas als Sand verwendet) bzw. zwischen Verfahren untereinander kann die Aussagekraft dieser Verfahren evaluiert werden. Dabei werden folgende Kriterien angewandt:

- Signifikanz des Zusammenhanges (harmonischer Verlauf, geringe Streuung)
- Wertespreizung (Abdeckung eines möglichst breiten Spektrums der Messwerte)
- Wiederholbarkeit eines Prüfwertes (Vertrauenswürdigkeit der Einzelmessung)

Nach Selektion entsprechend aussagekräftiger Verfahren kann schließlich auf Basis der Bewertungshintergründe sowie des empirischen Ansatzes die Entscheidung getroffen werden, welche sinnvollen Kategorien dafür vorzuschlagen sind (vgl. Abb. 2).

Für die künstlichen Mischungen werden folgende Minerale bzw. Mineralgruppen angesichts ihres nahezu „inerten“ Verhaltens oder ihres Schadpotenzials bei gleichzeitig weiter Verbreitung in natürlichen Straßenbaugesteinen der DACH-Länder zu Variationszwecken innerhalb der Feinanteile (10 % in 0/2 mm) in definierten künstlichen Abstufungen herangezogen:

- als Reinphasen (100 %)
 - o Kalzit
 - o Quarz
- in 5 abgestuften Anteilen (5, 10, 20, 50, 100 %), Standardkalksteinmehl als Mischungs-partner
 - o Muskowit
 - o Kaolinit
 - o Quellbare Mineralgruppen (Smektit)
 - o Chlorit

4.1.1 Relevanz der Sandfraktionen

Standardkalksteinmehl aus dem Schüttelabriebversuch ist normativ geregelt und muss für den Schüttelabrieb im Routinebetrieb als Fremdfüller die natürliche Fraktion $< 0,125$ mm ersetzen, um deren Einfluss innerhalb der feinen Gesteinskörnung aufzuzeigen. Aus diesem Grund werden bei allen Versuchen (außer den Frosthebungen) auch die Fraktionen $0,063 - 0,125$ mm aus Standardkalksteinmehl zusammengesetzt, um zu gewährleisten, dass bei Variation der Feinanteile $< 0,063$ mm deren Einflüsse auf die Messergebnisse der Gesamtproben optimal zur Geltung kommen. Das Standardkalksteinmehl wird außerdem als (inert) Mischungs-partner von mineralogischen Reinphasen in den Feinanteilen verwendet (s. oben).

Die Sandfraktionen $> 0,125$ mm werden konstant aus homogenem Referenzmaterial (Diabas) entsprechend der vorgegebenen Sieblinie gem. TP Gestein-StB, Teil 6.6.3 (sowohl für SE als auch für Schüttelabrieb am Sand) zusammengesetzt. Ergänzend wird ein (in der Norm nicht definierter) Gehalt der Feinanteile von 10 % der Fraktion $0/2$ mm festgelegt. Dieser Wert entspricht dem maximal zulässigen Gehalt an Feinanteilen beim SE-Versuch. Durch diese Vorgehensweise ist optimale Vergleichbarkeit der SE- und Schüttelabrieb-Werte am Sand gewährleistet. Obwohl die Forschungspartner die Feinanteile ($< 0,063$ mm) als die maßgeblichen Träger der Eigenschaften der feinen Gesteinskörnungen (< 2 mm) für die gegenständliche Fragestellung erachtet, werden auch die Sandfraktionen ($0,063 - 2$ mm) in ihrer Bedeutung in Relation zu den Feinanteilen beurteilt. Dazu werden beim Schüttelabrieb am Sand die Serien E und F (Austausch der natürlichen Fraktion $< 0,125$ mm gegen inaktiven Fremdfüller in Form von Standardkalksteinmehl, vgl. Kap. 4.3.10) zumindest an allen 35 ausgewählten Materialien durchgeführt. Dadurch können nicht nur die Unterschiede der Serien E und F gezeigt werden (Einflüsse der Füller) sondern auch innerhalb der Serien F durch Konstanthaltung der Fraktionen $< 0,125$ mm in Form von Standardkalksteinmehl Unterschiede der Sandfraktionen der

zumindest 30 natürlichen Materialien erfasst werden. Die Intensität des evtl. relevanten Einflusses der Sandfraktionen soll im Rahmen von mineralogischen und petrographischen Untersuchungen erklärt werden. Auch der MB-Versuch wird exemplarisch ergänzend an den Sandfraktionen (differenziert nach engen Kornklassen) durchgeführt, um den diesbezüglichen Anteil des Einflusses der Sandfraktion innerhalb der feinen Gesteinskörnung abzuschätzen.

4.2 Fraktionsabhängiger methodischer Überblick

Folgende Prüfverfahren zielen auf die Qualität der entsprechenden Prüfkörnungen ab:

- Charakterisierung der Feinanteile < 0,063 mm
 - o MB
 - o komplexe mineralogisch-petrographische Charakterisierung
 - o oberflächenspezifische Kennwerte
- Charakterisierung der Sandfraktionen 0,063 – 2 mm
 - o MB (exemplarisch)
 - o Komplexe mineralogisch-petrographische Charakterisierung
 - o Schüttelabrieb an Sandasphaltpörnern (Serien F)
- Charakterisierung der gesamten feinen Gesteinskörnung 0/2 mm
 - o SE
 - o Schüttelabrieb an Sandasphaltpörnern
 - o Schüttelabrieb und Spaltzugversuche an Asphaltprobekörnern mit Größtkorn 11 mm
 - o Performance-Prüfungen am Baustoffgemisch 0/X mm
 - o Frosthebungsprüfungen und Infiltrationen 0/32 mm

4.3 Spezielle Methodik

4.3.1 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung der feinen Gesteinskörnung wird mittels Siebung, jene der Feinanteile < 0,063 mm mittels Laser-Partikel-Sizer (Analysette) erfasst. Bei letzterer werden ca. 70 mg Probe in 30 ml Calgonlösung (20g/1l) im Zentrifugenröhrchen vorsuspendiert und auf die optimale Konzentration in die mit destilliertem Wasser gefüllte Probenkammer zudosiert.

4.3.2 Geochemische Analytik

XRF-Analysen wurden an Schmelzlingen der nicht geglühten Proben < 0,063 mm mittels eines WDXRF-Gerätes (Axios, Fa. Panalytical) durchgeführt. Die Erfassung der Masse der flüchtigen Bestandteile im Zuge des Schmelzvorganges (v.a. Hydroxidgruppen der Tonminerale und Karbonate) erfolgte durch Glühverluste bei 1050°C über 120 min unter Berücksichtigung des Wassergehaltes, der bei 105°C (Trocknung über Nacht im Trockenschrank) ermittelt wurde. Die Auswertung der Haupt- und Nebenelemente wurde mittels der Software WROXI (Fa. Panalytical) durchgeführt.

4.3.3 Thermoanalytik

Für die thermoanalytische Untersuchungen im Rahmen der simultanen Thermoanalyse (STA) wurden 50 mg Probe < 0,063 mm (ggf. auch < 0,002 mm) in einen Pt-Rh-Tiegel eingewogen und in einer kontrollierten Atmosphäre mit 50 ml/min Luft und 15 ml/min N₂ bis 1000 °C erhitzt. Die Erhitzungsgeschwindigkeit betrug 10 °C/min.

4.3.4 Mineralanalytik

4.3.4.1 Überblick

Als analytisches Standardverfahren zur Identifizierung des Mineralbestandes gilt seit Jahrzehnten die Röntgendiffraktometer (XRD)-Analyse, in den letzten Jahren hat sich das Rietveld-Verfahren (Rietveld, H.M. 1967 und 1969) als Stand der Technik für die XRD etabliert. Es berücksichtigt jeden einzelnen Impuls des gemessenen Röntgendiagramms und über Strukturmodelle können dann standardfrei quantitative Aussagen über die in der Probe vorhandenen Mineralphasen getätigt werden. Derzeit gibt es auf diesem Gebiet intensive Entwicklungsarbeiten für neue Strukturmodelle, die ersten für Tonminerale und Mixed Layer Minerale werden derzeit getestet. Die zukünftige Gesteins- und Mineralanalytik wird ohne diese Methode

nicht auskommen, besonders gute Ergebnisse sind vorerst nur mit frischem Gesteinsmaterial zu erwarten. Bei Materialien mit fortgeschrittener Verwitterung ist es hingegen vorteilhaft, wie bisher Methodenkombinationen anzuwenden. Kugler, H. (2002) etwa hat gezeigt, dass durch geochemische Verrechnung von Röntgenfluoreszenz (XRF)-Messwerten deutlich vertrauenswürdiger Ergebnisse erzielt werden können als durch die XRD allein. Daher wird in diesem Vorhaben für die Quantifizierung der Minerale ergänzend zur XRD eine ganze Reihe relevanter Methoden angewandt, allen voran die geochemische Analyse mittels XRF und thermische Analyseverfahren. XRF-Analysen geben die Element(oxid)verteilung einer Probe wieder und zeichnen sich durch ihre sehr gute Wiederholbarkeit und hohe Vertrauenswürdigkeit besonders für Haupt- und Nebenelemente aus (Detektionsgrenzen meist deutlich < 100 ppm). Thermische Analyseverfahren liefern ergänzende Informationen über die (ton)mineralogische Zusammensetzung einer Probe. Die zu untersuchenden Substanzen werden dabei kontinuierlich erhitzt und simultan die Gewichtsveränderung (TG Thermogravimetrie) sowie der Wärmefluss (DSC Differenzialkalorimetrie) gemessen. Tonminerale enthalten unterschiedliche Mengen an Hydroxylgruppen, die sich unter Temperatureinwirkung zersetzen. Sowohl Dehydroxilierung als auch Umkristallisationen können detektiert werden und sind charakteristisch für verschiedene Tonminerale (Mackenzie, R. C., 1964; Smykatz-Kloss, W., 1974; Wilson, M.J., 1987). Smekтите und Vermikulite enthalten hohe Anteile an Zwischenschichtwasser, die im Temperaturbereich von 100°C-220°C abgegeben werden. Dieser Massenverlust eignet sich für die Quantifizierung dieser quellfähigen Tonminerale und ermöglicht eine Absicherung der Ergebnisse aus den röntgenanalytischen Verfahren. Diese Simultane Thermoanalyse ist auch speziell für die quantitative Bestimmung von Kalzit, Dolomit, Eisenhydroxiden, Gips und Sulfiden (z.B. Pyrit) sehr gut geeignet und daher eine hilfreiche Ergänzung zu XRD und XRF-Analysen. Für eine noch plausiblere Mineralquantifizierung wurde zusätzlich eine Karbonatbestimmung gem. ÖNORM L 1084 durchgeführt.

4.3.4.2 Gesamtmineralbestand

Die untersuchten Proben wurden folgendermaßen aufbereitet:

Die einzelnen Proben wurden getrocknet, in einer Scheibenschwingmühle analysenfein vermahlen und nach dem Backloading Verfahren präpariert. Die Messung erfolgte in einem Panalytical X'Pert Pro MPD Diffraktometer mit automatischem Divergenzschlitz, Cu LFF Röhre 45 kV, 40 mA, und einem X'Celerator Detektor. Die Messzeit war 25 s, mit einer Schrittweite

von $0,017^\circ$ von 2° bis $70^\circ 2\Theta$. Aus diesen Aufnahmen wurde der qualitative Mineralbestand ermittelt.

Mittels des Auswertprogrammes X'Pert HighScore Plus der Firma Panalytical, Almelo Niederlande wurde mittels Rietveldverfeinerung der semiquantitative Mineralbestand ermittelt.

4.3.4.3 Tonmineralbestand

Die Probenaufbereitung erfolgte nach den bei Whittig (1965) und Tributh (1991) beschriebenen Methoden. Zur Dispergierung der Proben und Zerstörung der organischen Substanz wurde 10 %-iges Wasserstoffperoxid verwendet. Die Tonfraktion ($< 2 \mu\text{m}$) wurde durch Abzentrifugieren (5 Minuten bei 1000 rpm) aus der kleiner 20 μm gesiebten Probe gewonnen.

Der Sorptionskomplex der Tonfraktion wurde durch Schütteln mit 4 N MgCl_2 - bzw. 4 N KCl -Lösung mit Magnesium- bzw. Kaliumionen belegt. Jeweils 20 mg Ton wurden auf poröse Keramikplättchen aufgebracht (Kinter & Diamond, 1956).

Diese Texturpräparate wurden über Nacht in einem Exsikkator über gesättigter NH_4NO_3 -Lösung getrocknet und anschließend geröntgt. Danach wurden alle Plättchen zur Bestimmung quellfähiger Tonminerale (Smektit, Vermikulit) in eine mit Ethylenglykol gesättigte Atmosphäre gegeben. Die kaliumbelegten Plättchen wurden nach dieser Messung zur Identifizierung von gut kristallisiertem Kaolinit zusätzlich mit Dimethylsulfoxid behandelt. Danach wurden die Plättchen zum Nachweis von primärem Chlorit bei 300°C und 550°C für jeweils 2 Stunden getempert. Nach jeder Behandlung wurden die Proben geröntgt. (K- und Mg-Plättchen von 2° bis $40^\circ 2\Theta$, mit Ethylenglykol behandelte Plättchen von 2° bis $32^\circ 2\Theta$, mit Dimethylsulfoxid behandelte von 2° bis $26^\circ 2\Theta$ und getemperte von 2° bis $14^\circ 2\Theta$).

Die Messung der Tonmineralpräparate erfolgte mit dem gleichen Gerät wie für die Gesamtmineralogie.

Die Identifizierung der Tonminerale erfolgte nach Thorez (1975), Brindley & Brown (1980), Moore & Reynolds (1997) und Wilson (1987). Für die semiquantitative Auswertung wurden die Flächen charakteristischer Peaks und empirische Korrekturfaktoren verwendet (Riedmüller 1978).

Der Rest der unbehandelten Tonfraktion wurde gefriergetrocknet. Aus der homogenisierten Probe wurde analog zur Gesamtmineralbestimmung ergänzend ein Pulverpräparat angefertigt und geröntgt.

4.3.5 Petrographie

EN 932-3 bietet eine Basis, wie bei einer einfachen Petrographie vorzugehen ist. In Ergänzung dazu fließen die Erfahrungen aus der Schweiz in Form von SN 670 115 und SN 670 116 ein. Diese beiden Normen helfen, die Eignung von Gesteinen, von Füllern und von Gesteinskörnungen im Hinblick auf konkrete Verwendungszwecke zu beurteilen. Sie dienen der genaueren gesteinskundlichen Ansprache (makroskopisch und mikroskopisch) und gehen über reine XRD-Analysen hinaus, weil diese keine Aussage darüber zulassen, ob Schichtsilikate frei oder in anderen Mineralen gebunden vorliegen. Ein Schweizer Forschungsprojekt (Röthlisberger, F. 2008) als Basis für die Revision der Norm SN 670 116 hat gezeigt, dass die europäischen Prüfverfahren, die nicht bzw. eingeschränkt auf Schichtsilikate abzielen, für die geologischen Verhältnisse in der Schweiz (und damit zumindest auch für allen anderen Länder des Alpenraumes) nicht geeignet sind. Die Verfahren sind zu wenig aussagekräftig, um den Einfluss der Schichtsilikate zu testen, die Dauerhaftigkeit von Asphalten zu bestimmen sowie die Risiken einer frühzeitigen Alterung des Asphaltmörtels zu erkennen. Es wurden gezielt Füller aus Asphalten mit frühzeitigen Alterungserscheinungen analysiert und quellfähige Schichtsilikate nachgewiesen. Diese Forschung hat Empfehlungen für die Anpassung der Schweizer Normen gegeben und Grenzwerte für unterschiedliche Arten von Tonmineralen und Schichtsilikaten in den Füllern für Asphalt sowie für die Feinanteile im Beton vorgeschlagen.

4.3.6 MB

Beim MB-Versuch nach EN 933-9 werden einer wässrigen Suspension der Messprobe nacheinander kleine Mengen Methylenblau-Lösung zugegeben. Um die Anwesenheit freien Farbstoffes nachzuweisen, wird nach jeder Zugabe der Lösung ihre Adsorption durch die Messprobe geprüft, indem auf Filterpapier ein Färbeversuch durchgeführt wird (Abb. 3). Der Methylenblauwert entspricht dem adsorbierten Farbstoff in Gramm je Kilogramm der geprüften Kornklasse.

Der Methylenblauwert wurde sowohl am Material im Originalzustand (0/2 mm im Anlieferungszustand = $MB_{(original)}$), als auch im getrockneten Zustand (= $MB_{(trocken)}$), um eine etwaige Beeinflussung der kritischen Bestandteile festzustellen) sowie am Füller (0/0,125 mm = $MB_{(f)}$) bestimmt.



Abb. 3: Methylenblauversuch nach EN 933-9.

4.3.7 SE (10)

Die SE-Werte werden normgemäß nach EN 933-8 ermittelt, wobei aus Referenzmaterial exakt die gleiche Sieblinie wie bei den Schüttelabrieben am Sand zusammengesetzt wurde.

Bei der Bestimmung des Sandäquivalentes wird eine Einzelmessprobe der Gesteinskörnung der Kornklasse 0/2 mm mit einem maximalen Feinanteil von 10 % (entweder natürlich vorkommend oder durch entsprechende Anpassung der Korngrößenverteilung erhalten) und eine geringe Menge der Wasch- und Flockungsmittellösung in einen Messzylinder gegossen und geschüttelt, um von den größeren Körnern der Messprobe die anhaftenden Tonbestandteile abzulösen. Die Gesteinskörnung wird anschließend unter Zugabe von weiterem Wasch- und Flockungsmittel ausgewaschen, wodurch die sehr feinen Partikel über der feinen Gesteinskörnung in Suspension gebracht wurden (Abb. 4). Nach einer bestimmten Dauer wird der Sandäquivalent-Wert (SE (10)) als Anteil der Höhe der Sedimentschicht in Prozent der Gesamthöhe des Sediments und der Suspension im Messzylinder berechnet.

Die Bestimmung des Sandäquivalentes erfolgte als SE (10) nach EN 933-8 und als SE4 nach EN 933-8, Anhang A. Zusätzlich wurde SE nach TP Gestein-StB bestimmt.



Abb. 4: Sandäquivalentverfahren nach EN 933-8

4.3.8 Spezifische Oberfläche

Neben der Qualifizierung und Quantifizierung von Tonmineralen wurde auch den damit assoziierten Eigenschaften, v.a. spezifische Oberfläche und Oberflächenladung Bedeutung beigegeben. Zur Bestimmung der spezifischen Oberfläche (Quotienten aus Oberfläche und Masse des Festkörpers) wurde die BET-Methode gem. ISO 9277 angewandt, bei der die Adsorption von Gasmolekülen an Festkörperoberflächen ausgenutzt wird. Druckabhängig ist die Menge adsorbierten Gases (N_2) proportional zur Oberfläche.

4.3.9 Zeta-Potenzial

Von mindestens ähnlich großem Interesse zur Charakterisierung von Feinanteilen ist die Oberflächenladung, die neben der spezifischen Oberfläche auch vom Ladungszustand des Minerals selbst abhängt. Eine in den letzten Jahren immer häufiger angewandte Methode ist die Messung des Zetapotenzials. Es ist jenes Potential, das beim Anlegen eines elektrischen Feldes in einer kolloidalen Dispersion zwischen dem Dispersionsmedium und der stationären

Schicht um das Partikel (an der Scherebene zwischen beweglicher und unbeweglicher Phase) auftritt. Die Höhe des Zeta-Potenzials ist von der Höhe des Nernst-Potentials (Oberflächenladungsdichte) abhängig. Unterschiede in den Oberflächenladungsdichten sind somit über Unterschiede in den Zetapotenzialen unter Voraussetzung konstanter Messbedingungen zu erkennen (MÜLLER, R. H., 1996). Das Zetapotenzial ist ein Indikator für die Stabilität einer kolloidalen Dispersion und zeigt den Grad an elektrostatischer Abstoßung zwischen benachbarten Partikeln in einer Dispersion an. Je höher das Potenzial, desto stabiler ist die Dispersion (bzw. desto unwahrscheinlicher ist eine Agglomeration bzw. Ausflockung). Somit sollte das Zetapotenzial unmittelbare Auswirkung auf das SE haben.

Die Zeta-Potenzialmessungen mittels Zeta-Sizer (Matec ZA 500) wurden an den Fraktionen < 0,063 mm durchgeführt. Um Unterschiede in der Oberflächenladungsdichte möglichst vertrauenswürdig zu bestimmen, wurde dazu ein Niedrig-Elektrolytmedium herangezogen.

Korngrößenanalysen und vergleichende Berechnungen der angenäherten spezifischen Oberfläche der Fraktionen < 0,063 mm wurden mittels Laser-Particle-sizer und Dichtebestimmungen im Pyknometer durchgeführt.

4.3.10 Schüttelabrieb

Das Schüttelabrieb-Verfahren gilt als Maß für die Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen bzw. Füllern. Als wasserempfindlich gelten Gesteinskörnungen, die bei der Anwesenheit von Wasser ihre Eigenschaften verändern. Dabei kann sich die Wasserempfindlichkeit in verschiedenen Formen, wie zum Beispiel einer Volumenzunahme (Quellung), einer Reduzierung der Festigkeit oder einer Erhöhung des Schüttelabriebs äußern.

Als aussagekräftiges alternatives Verfahren zu SE und MB (und Wasserempfindlichkeit nach EN 1744-4) wird in Deutschland das Schüttelabriebverfahren nach den TP Gestein-StB, Teil 6.6.3 gesehen. Das Schüttelabriebverfahren wurde ursprünglich in den USA entwickelt, Feix brachte das Verfahren in den 70er Jahren nach Deutschland, wo seitdem Erfahrungen gesammelt werden und das Verfahren sukzessive weiterentwickelt wird (TL & TP Gestein-StB; Feix, R. (1979); Schellenberg, K. & al., 2007; Grönniger, J., Wistuba, M.P.; Völkl, J., (2016) (Abb. 5).

Mittlerweile existieren mit der Prüfung am Sandasphaltprobekörper (Abb. 6) und am Marshall-Probekörper (Abb. 7) zwei Verfahren zur Bestimmung des Schüttelabriebs, welche z.T. auch im deutschen Regelwerk verankert sind. Die Prüfung am Sandasphaltprobekörper nach TP Gestein-StB, Teil 6.6.3 dient primär der Charakterisierung von feinen Gesteinskörnungen im

Anwendungsbereich Asphalt (sie wird auch an Probekörpern aus Asphaltmischgut für Dünne Asphaltdeckschichten in Kaltbauweise (DSK) angewendet (DIN EN 12274-7), die Prüfung am Marshall-Probekörper zielt auf die Beurteilung von Asphaltmischungen ab. Beim Schüttelabriebverfahren nach TP Gestein-StB, Teil 6.6.3 werden Sandasphaltprobekörper mit definierter Zusammensetzung hergestellt (definierte Zusammensetzung der Korngrößenverteilung, Bindemittelgehalt in Abhängigkeit der Rohdichte). Mit dem Schüttelabriebverfahren lassen sich sowohl feine Gesteinskörnungen, als auch Füller charakterisieren. Bei der feinen Gesteinskörnung erfolgt die Prüfung an einer Serie mit Eigenfüller (Serie E) und einer Serie mit Fremdfüller (Serie F). Diese Vorgehensweise ermöglicht sowohl eine Beurteilung der Qualität des Füllers, als auch der Qualität des Sandanteils. An den Sandasphaltprobekörpern werden Wasseraufnahme, Quellung und Schüttelabrieb bestimmt. Die Zusammenschau der drei Parameter dient der Charakterisierung der Qualität der geprüften Gesteinskörnung. Darüber hinaus liefert der Schüttelabrieb wertvolle Hinweise auf Bindemittelanspruch, Dauerhaftigkeit, Haftverhalten, Volumenstabilität und Mineralogie und ist zudem sehr gut geeignet, die Gleichmäßigkeit von feinen Gesteinskörnungen zu überprüfen.

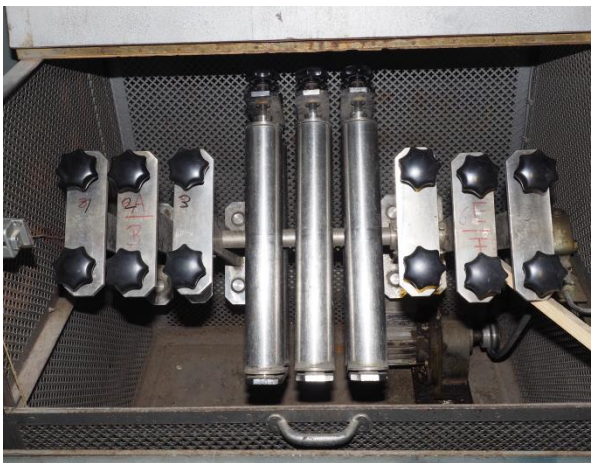


Abb. 5: Apparatur zum Schüttelabrieb.



Abb. 6: Schüttelabrieb am Sandasphaltprobekörper



Abb. 7: Schüttelabrieb am Marshallprobekörper

4.3.11 Wasserempfindlichkeit an Asphalt-Probekörpern

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollte auch untersucht werden, ob sich die an den feinen Gesteinskörnungen ergebenden Erkenntnisse zur Wasserempfindlichkeit auch an Asphalt-Probekörpern, die unter Verwendung von zehn unterschiedlichen Gesteinskörnungen hergestellt wurden, widerspiegeln.

Die Asphaltprüfungen wurden an einem AC 11 D S durchgeführt, da dieser Asphalt einen hohen Sandanteil (40 bis 50 M.-%) aufweist, sodass die Auswirkungen der Qualität der Feianteile und der feinen Gesteinskörnung einen großen Einfluss auf die Untersuchungsergebnisse erwarten lassen. Für die Zusammensetzung des Asphaltmischgutes werden im Bereich > 2 mm einheitliche Gesteinskörnungen in Form des Referenzmaterials in gleicher Sieblinie eingesetzt, um hierdurch den Einfluss der feinen Gesteinskörnung eindeutig darstellen zu können.

Die Wasserempfindlichkeit von Asphalt kann mit genormten Verfahren nur nach EN 12697-12 geprüft werden. Obwohl Bedenken zur Aussagekraft dieser Methode bestehen, sollen die Versuche durchgeführt werden, um Klarheit zur Sinnhaftigkeit dieser europäischen Prüfung für die gegebene Fragestellung zu schaffen. Hierbei werden Marshall-Probekörper mit einer reduzierten Verdichtungsarbeit (2 x 35 Schlägen) hergestellt. Eine Probekörperserie wird trocken, eine zweite nass gelagert und nach der Lagerung die Spaltzugfestigkeit nach EN 12697-23 ermittelt. Die Wasserempfindlichkeit ergibt sich dann aus dem Abfall der Spaltzugfestigkeit. Die EN 12697-12 wird in den TP Asphalt-StB, Teil 12 und die EN 12697-23 in den TP Asphalt-StB, Teil 23 gespiegelt. Diese Technischen Prüfvorschriften werden bei der Prüfung herangezogen.

In dem Vorhaben sollten parallel zu der Vorgehensweise nach EN 12697 auch Bohrkerne aus Walzsektorplatten (hergestellt nach EN 12697-33) untersucht werden. Die Herstellung der

Walzsektorplatten erfolgte hierbei mit dem Hohlraumgehalt des Marshall-Probekörpers (2 x 50 Schläge) aus der Erstprüfung sowie mit erhöhtem Hohlraumgehalt entsprechend der Werte aus der Spaltzugprüfung (2 x 35 Schläge). Die Prüfungen erfolgten dann entsprechend der Vorgehensweise nach EN 12697-12 bzw. TP Asphalt-StB, Teil 12.

Ergänzend wurden mit Marshall-Probekörpern und mit aus Walzsektorplatten gewonnenen Bohrkernen Schüttelabriebprüfungen durchgeführt. Das hierbei angewandte Verfahren wurde durch Schellenberg, K. (1993) entwickelt und eignet sich zur Unterscheidung der Qualität der Feinanteile. Da in diesem Verfahren Asphalt in der Zusammensetzung, die in der Praxis Anwendung findet, geprüft wird, stellt es eine Weiterentwicklung der Sandasphaltprüfung dar und kann als Performance-Prüfung betrachtet werden. Mit dem Verfahren bietet sich die Möglichkeit, das Verhalten von feinen Gesteinskörnungen mit vermeintlich minderer Qualität im Asphalt zu prüfen und so ggf. die Möglichkeit für einen Einsatz zu schaffen.

Eine Arbeitsanleitung für die Prüfung von Walzasphalt auf Wasserempfindlichkeit mit dem Schüttelabrieb am Marshall-Probekörper findet sich im Anhang (Kap. 10.1).

4.3.11.1 Erstprüfungen an Asphalt

Für die Asphaltuntersuchungen wurde ein Asphaltbeton AC 11 D S ausgewählt, da bei diesem Asphalt die größten Anteile an feinen Gesteinskörnungen zur Anwendung kommen. Um den Einfluss der einzelnen feinen Gesteinskörnungen darstellen zu können, wurde im Bereich der groben Gesteinskörnungen (2/5 mm, 5/8 mm und 8/11 mm) einheitlich ein Diabas verwendet. Die feinen Gesteinskörnungen wurden so aufbereitet, dass in den unterschiedlichen Asphalten vergleichbare Anteile an Füller und feinen Gesteinskörnungen enthalten waren. Hierzu mussten die feinen Gesteinskörnungen im Bereich $< 0,125$ mm hinsichtlich ihrer Sieblinie gezielt zusammengesetzt werden. Bei der Asphaltkonzeption mit einem Straßenbaubitumen 50/70 wurde darauf geachtet, dass ein Hohlraumgehalt von $(2,9 \pm 0,2)$ Vol.-% erreicht werden konnte. Die Einstellung erfolgt hierbei über den Bindemittelgehalt. In Tab. 2 sind die Ergebnisse der Erstprüfungen zusammenfassend dargestellt.

Die reinen Asphaltprüfungen wurden an neun exemplarischen Materialien durchgeführt (das vorgesehene 10. Material mit sehr hohem Anteil quellbarer Schichtsilikate sowie sehr hohem MB_F -Wert wurde zwar bearbeitet, es konnten angesichts der starken Quellung jedoch keine brauchbaren Asphalt-Prüfkörper hergestellt werden).

18 -											
	0439	0441	4025	0444	0445	0102	0097	0084	0456	0457	
Schüttelabrieb E/F	54,9/25,4	33,4/14,3	85,3/60,4	82,3/39,7	100,0/99,4	10,6/8,8	6,9/7,3	22,7/12,1	26,9/11,0	92,4/46,5	
Konzeption	Diabas 8/11 mm	27									
	Diabas 5/8 mm	7									
	Diabas 2/5 mm	19									
	Sand 0/2 mm	47									
Anteil fGK mit E _{CS} 35	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	
Verteilung	> 8,0	22,5									
	> 2,0	52,1									
	0,063 - 2,0	40,1									
	< 0,125	11,6	11,0	10,7	10,5	10,7	10,6	12,0	10,4	11,7	11,3
< 0,063	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	
Bindemittelgehalt (gesamt)	M.-%	6,6	6,3	7,2	7,1	7,5	6,2	6,1	5,8	6,0	7,0
errechneter Mindestbindemittelgehalt	M.-%	5,9	5,8	5,7	5,8	5,9	5,8	5,8	5,5	5,8	5,8
Rohdichte Gesteinskörnungsgemisch	g/cm ³	2,763	2,794	2,821	2,775	2,742	2,794	2,811	2,921	2,766	2,797
Rohdichte Asphaltmischgut	g/cm ³	2,481	2,513	2,502	2,462	2,436	2,513	2,537	2,626	2,503	2,485
Raumdichte Marshall-Probekörper	g/cm ³	2,411	2,436	2,424	2,389	2,277	2,438	2,464	2,554	2,434	2,409
Hohlraumgehalt Marshall-Probekörper	Vol.-%	2,8	3,1	3,1	3,0	6,5	3,0	2,9	2,7	2,8	3,1
Fiktiver Hohlraumgehalt	Vol.-%	18,3	18,0	20,1	19,4	23,1	17,7	17,5	17,1	16,9	19,4
Hohlraumfüllungsgrad	%	84,6	82,9	84,5	84,7	71,8	83,1	83,5	84,0	83,7	84,3
Bindemittelvolumen	Vol.-%	15,9	15,4	17,5	17,0	17,7	15,1	15,0	14,8	14,6	16,9

Tab. 2: Ergebnisse der Erstprüfungen für einen Asphaltbeton AC 11 D S mit zehn unterschiedlichen feinen Gesteinskörnungen (Probe (18_)0445 konnte in weiterer Folge nicht weiterbearbeitet werden).

Tab. 2 zeigt wie Abb. 8 deutlich auf, dass die unterschiedlichen feinen Gesteinskörnungen einen deutlich unterschiedlichen Bindemittelbedarf aufweisen. Um den gewünschten Hohlraumgehalt zu erzielen, mussten Bindemittelgehalte gewählt werden, die bis zu 1,3 M.-% über dem Mindest-Bindemittelgehalt liegen. Lediglich bei der Probe 18_0445 konnte kein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt werden. Hier wurden bei einem Bindemittelgehalt von 7,5 M.-% immer noch Hohlraumgehalte über 6 Vol.-% ermittelt. Diese Probe wurde daher von den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen, da mit ihr kein gebrauchsfähiger Asphalt hergestellt werden konnte.

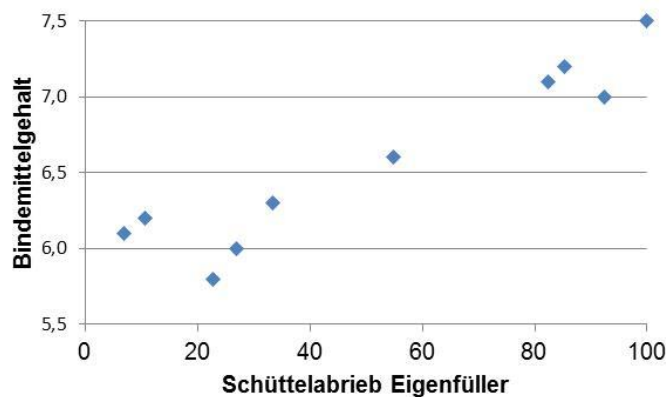


Abb. 8: Zusammenhang zwischen Schüttelabrieb und Bindemittelbedarf zur Erzielung des gewünschten Hohlraumgehaltes.

Die volumetrischen Kennwerte (fiktiver Hohlraumgehalt, Hohlraumfüllungsgrad, Bindemittelvolumen, Hohlraumgehalt) der konzipierten Asphalte zeigen sehr gut vergleichbare Werte auf.

4.3.12 Frosthebung und Infiltration

Frosthebungsprüfungen werden an den gleichen zumindest zehn exemplarischen Materialien analog den Asphaltprüfungen durchgeführt. Die Versuchsdurchführung erfolgt gem. ÖNORM B 4810. Die Fraktionen > 0,063 mm bis 31,5 mm werden aus Referenzmaterial (frischer Diabas) in gleicher Sieblinie künstlich zusammengesetzt. Dadurch können die Einflüsse unterschiedlicher natürlicher Feinanteile optimal studiert und die Ergebnisse mit Messwerten anderer Versuche verglichen werden.

Ergänzende werden Infiltrationsverfahren gem. TP Gestein-StB, Teil 8.3.1 und Teil 8.3.2 durchgeführt.

4.3.13 Nicht berücksichtigte Methoden

Sogenannte gebrauchsverhaltensorientierende (GVO) Performance-Prüfungen an Asphaltkörpern zielen in erster Linie auf das Verformungsverhalten unter thermischer oder dynamischer Belastung ab. Diese Verfahren wurden als nicht geeignet eingestuft, die Fragestellung befriedigend zu beantworten. Mechanische Ermüdungsversuche in Röthlisberger, F. (2008) haben etwa gezeigt, dass die Schichtsilikate nur wenig, oder sogar keinen negativen Einfluss haben.

In letzter Zeit wird auch verstärkt versucht, Asphaltmörtel mit dem Dynamischen Scherrheometer (DSR) zu untersuchen. Mit diesen Prüfungen kann man Aussagen z.B. zur versteifenden Wirkung eines Füllers, zum Einfluss des Füller-Bitumen-Verhältnisses und vergleichbare Kennwerte erhalten. Die Wasserempfindlichkeit als Folge von Quellfähigkeit enthaltener Minerale kann mit diesem Verfahren jedoch nicht untersucht werden, da die Einbettung der feinen Gesteinskörnungen in Bitumen einen Wasserzutritt verhindert und somit eine Reaktion zwischen Wasser und schädlichen Bestandteilen nicht ermöglicht. Zudem resultiert aus der geringen Wiederholbarkeit eine größere Prüfwertstreuung als aus Unterschieden der Mineralogie (Röthlisberger, F., 2008).

Prüfungen gem. EN 1744-4 bestimmen zwar lt. Titel der Norm die Wasserempfindlichkeit von Füllern in bitumenhaltigen Mischungen, indem eine Mischung aus Füller und Bitumen in heißem Wasser gerührt wird und abgeschiedener Füller durch Filtrierung gewonnen werden kann. Tatsächlich hängt bei diesem Versuch die Abscheidung von Füller viel mehr von der Bitumenaffinität und damit vom Umhüllungsgrad als von der Wasserempfindlichkeit ab. Daher wird dieser Versuch in der Praxis nicht angefragt (in Österreich besteht hinsichtlich dieser Prüfung auch keine Anforderung) und war im Vorhaben daher auch nicht vorgesehen.

5 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

5.1 Untersuchungen an den mineralogischen Reinphasen

Zur Prüfung, ob und in welcher Intensität MB_F , SE (10) und Schüttelabrieb S_E von verschiedenen in den natürlichen Gesteinskörnungen auftretenden Schichtsilikaten gesteuert werden, wurden Reinphasen in definiert abgestuften Gehalten innerhalb der Füller untersucht. Die Resultate sind in Tab. 3 angeführt.

Tab. 3: Untersuchungsergebnisse an den Mischungsstufen mit mineralogischen Reinphasen im Füller (Mischungspartner Standardkalksteinmehl). W_E = Wasseraufnahme, Q_E = Quellung (jeweils im Zuge der S_E - Schüttelabriebprüfung-Serie E).

	Anteil	MB_F	W_E	Q_E	S_E	SE (10)
	[M.-%]	[g/kg]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[Vol.-%]
Quarz	100	1,7	17,0	0,1	6,7	61
Kalzit	100	1,7	16,7	0,2	7,3	63
Glimmer G	5	1,7	16,5	0,3	7,1	65
	10	1,7	16,5	0,2	7,8	63
	20	3,3	15,9	0,8	9,7	57
	50	5,0	15,5	0,8	13,5	46
	100	8,3	15,5	0,8	26,1	31
Kaolinit K	5	1,7	16,4	0,7	8,8	63
	10	3,3	17,5	0,7	10,3	59
	20	3,3	16,4	0,8	13,9	51
	50	5,0	16,3	1,0	29,5	32
	100	10,0	16,1	1,7	72,5	24
Smektit S	5	7,3	17,0	1,2	13,2	64
	10	11,7	17,0	2,0	16,5	62
	20	23,3	17,6	3,0	27,7	59
	50	65,8	17,9	6,3	60,0	42
	100	135,8	18,6	12,2	94,0	27
Chlorit C	5	1,7	17,0	0,3	8,7	67
	10	1,7	16,9	0,2	9,2	65
	20	1,7	16,8	0,3	8,7	67
	50	1,7	16,6	0,6	9,7	62
	100	3,3	16,8	0,7	13,6	59
Mischungen gemessen	50G:50C	5,0	16,0	0,4	18,0	47,0
	47,5 G : 47,5 C : 5 S	8,3	15,7	1,2	20,1	44,0
Mischungen berechnet	50G:50C	5,8	16,2	0,8	19,9	45,0
	47,5 G : 47,5 C : 5 S	12,3	16,3	1,3	23,6	44,1

Dabei zeigt sich, dass die Versuche MB_F, S_E und SE (10) auf unterschiedliche Schichtsilikatanteile im Füller meist hochsignifikant mit angenähert linearen Abhängigkeiten ansprechen und sich die Messwerte v.a. bei höheren Schichtsilikatanteilen klar von der Mischungsstufe 0 % (entspricht 100 % Standardkalksteinmehl) abheben (Abb. 9 bis Abb. 11).

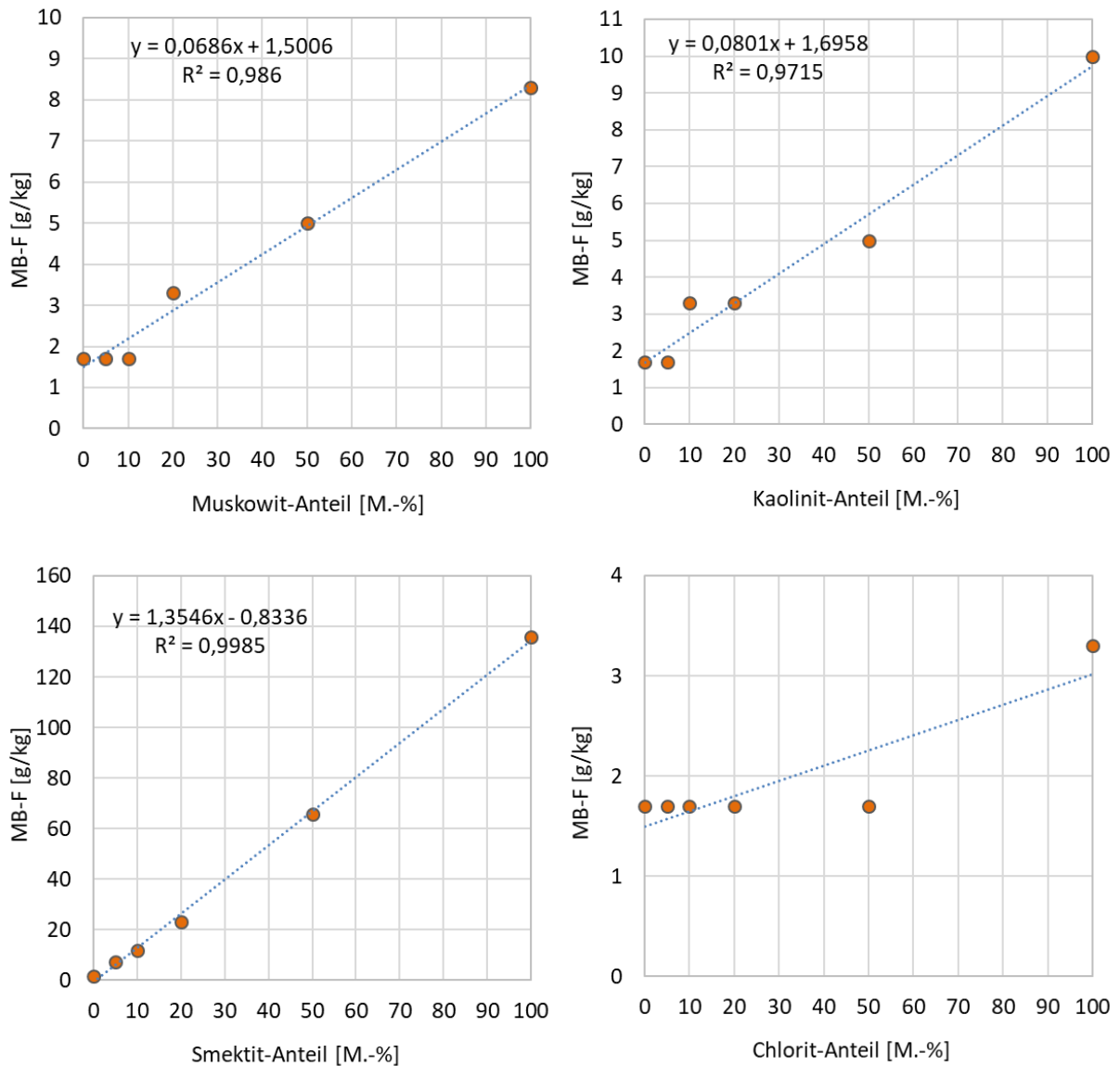


Abb. 9: Korrelation MB_F mit unterschiedlichen Anteilen an mineralogischen Reinphasen im Füller.

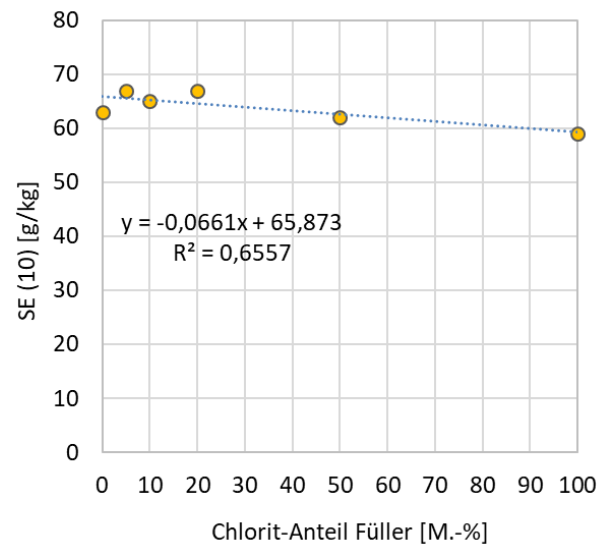
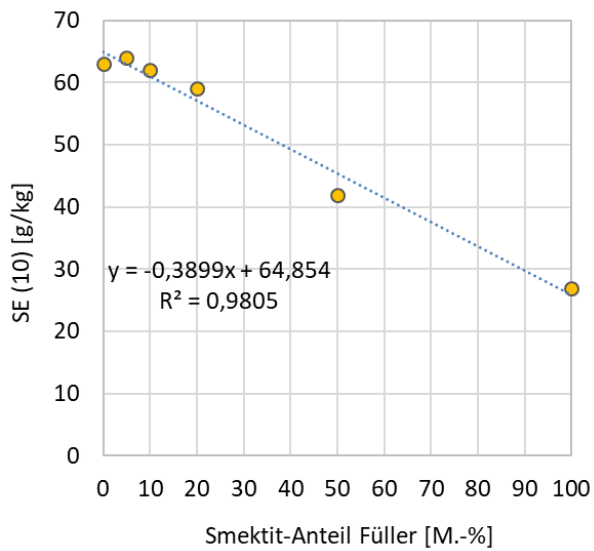
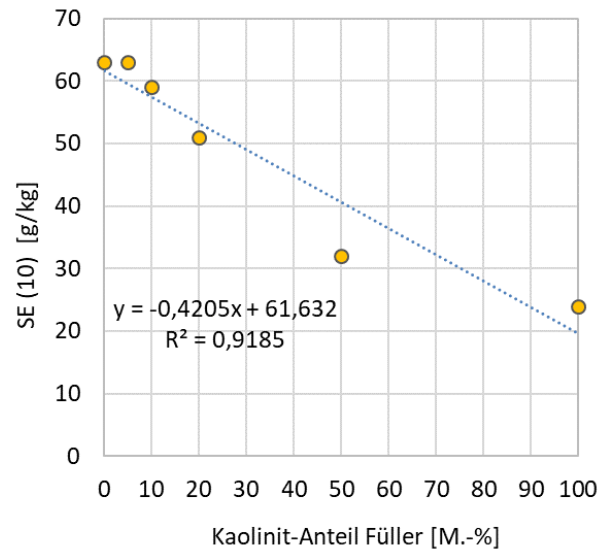
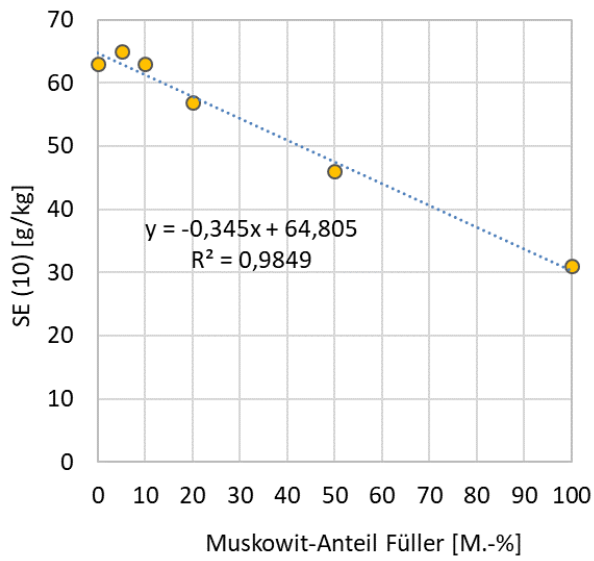


Abb. 10: Korrelation SE (10) mit unterschiedlichen Anteilen an mineralogischen Reinphasen im Füller.

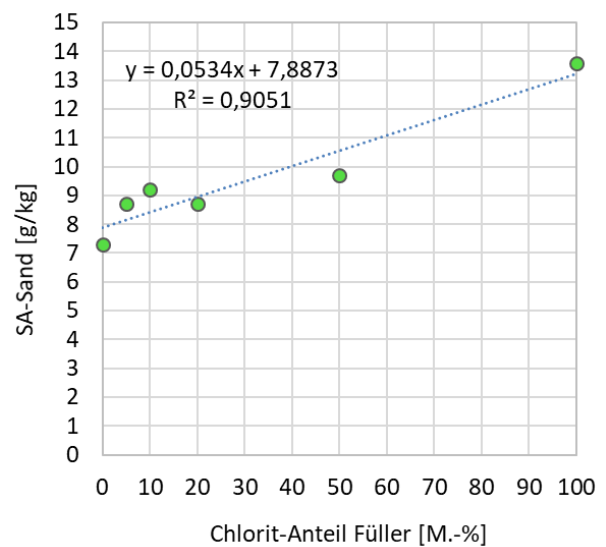
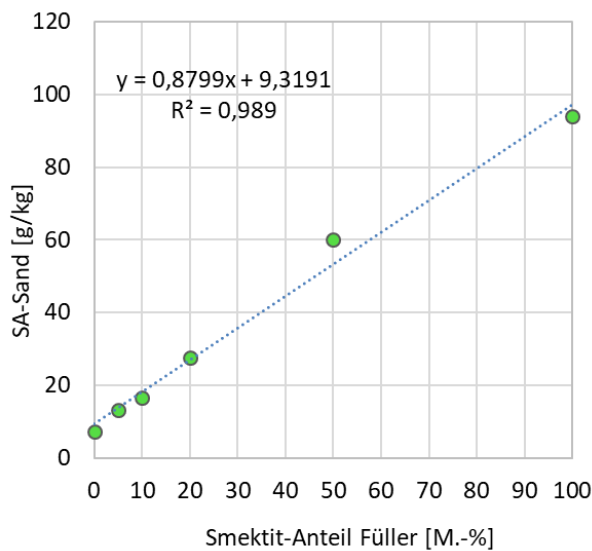
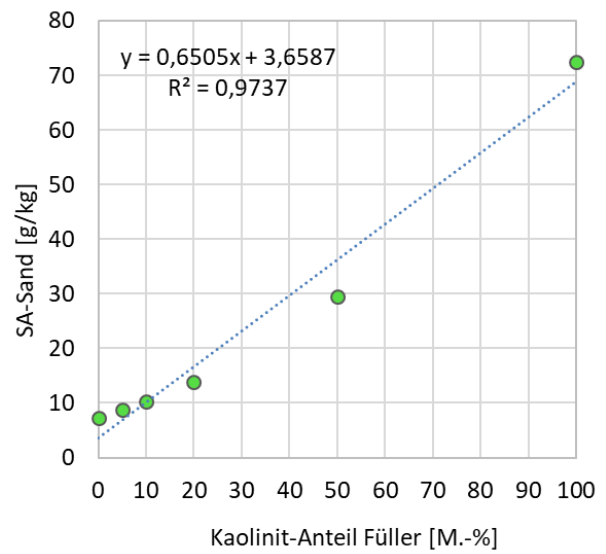
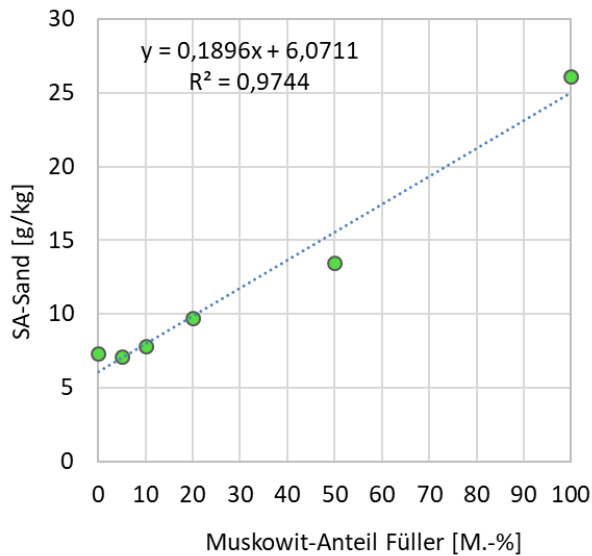


Abb. 11: Korrelation SA-Sand (Schüttelabrieb am Sand bei Variation Reinphasen im Füller unter Konstanthaltung des Referenzsand) mit unterschiedlichen Anteilen an mineralogischen Reinphasen im Füller.

Die mit Abstand schwächsten Zusammenhänge und geringsten Wertespreizungen zeigen sich durchgängig beim verwendeten Chlorit. Smektit zeigt im Gegensatz dazu die größten Wertespreizungen und gleichzeitig die besten Zusammenhänge (v.a. bei MB).

Die Korrelationen von MB_F zeigen eindeutige mineralogische Abhängigkeiten und wären unter Anwendung feiner abgestufter Titrationsen sogar noch weiter zu verbessern (Vermeidung von titrationsbedingten Stufen gleicher MB-Werte).

Die Korrelationen von S_E (10) zeigen erwartungsgemäß negative Zusammenhänge, wenngleich die Bestimmtheitsmaße vergleichsweise etwas geringer sind und besonders die niedrigen Mischungsstufen kaum Unterschiede zum reinen Standardkalksteinmehl im Füller zeigen. Dies ist vermutlich auf eine vergleichsweise geringe Wiederholbarkeit der Versuchsdurchführung zurückzuführen.

Beim Schüttelabrieb S_E am Sand treten obige Probleme in weit geringerem Ausmaß auf, so dass deutlich harmonischere Verläufe erkennbar werden. Nicht-lineare Zusammenhänge (z.B. potenzielle bei Muskowit und Kaolinit) sind nicht auszuschließen, bedürften aber genauerer Abstufungen.

Die vermutliche Linearität der Zusammenhänge ermöglicht es, theoretische Messwerte von Mischungen aus Reinphasen zu berechnen, indem die jeweiligen Anteile einer Reinphase in der Mischung (z.B. 5 % Smektit, und jeweils 47,5 % Glimmer und Chlorit) als Prozentwerte der Messwerte bei 100% herangezogen und einfach summiert werden. Die exemplarischen Berechnungen in Tab. 3 zeigen überwiegend eine sehr gute Übereinstimmung mit den ermittelten Messwerten. Daher besteht zudem die Möglichkeit, die Prüfwerte bei 100% Reinphasen heranzuziehen, um Prüfungs-spezifische Gewichtungsfaktoren für die untersuchten Reinphasen zu ermitteln. Diese Gewichtungsfaktoren sind in Tab. 4 für die Versuche mit den besten Zusammenhängen (M_{BF} und S_E) angeführt (in Hinblick auf S_E (10) haben sich Gewichtungsfaktoren als nicht zielführend herausgestellt). Die Gewichtungsfaktoren sollen dazu dienen, etwaige mineralogische Zusammenhänge der natürlichen Materialien mit den zu untersuchenden Methoden zu verifizieren.

Tab. 4: Gewichtungsfaktoren in Abh. v. den Resultaten der Reinphasen bei M_{BF} und S_E .

	Glimmer	Chlorit	Kaolinit	Smektit
Schüttelabrieb-Gewichtungsfaktoren gem. Korrel. Reinphasen mit S_E	0,28	0,14	0,77	1
M_{BF} -Gewichtungsfaktoren gem. Korrel. Reinphasen mit M_{BF}	0,06	0,02	0,07	1

Die Wasseraufnahme W_E zeigt lediglich bei Smektit einen klaren Zusammenhang, die anderen Reinphasen reagieren darauf überhaupt nicht, weshalb dieser Parameter für die Füllerqualität keine Aussagekraft besitzt.

Die Quellung Q_E zeigt hingegen neben dem Smektit auch bei Kaolinit (und tendenziell sogar bei Chlorit) eindeutige mineralogische Abhängigkeiten (Abb. 12, links), sodass die Quellung als ein durchaus aussagekräftiger Parameter einzustufen ist. Ähnliche Zusammenhänge zeigen sich erwartungsgemäß auch zwischen der Quellung und MB_F , zumindest in Hinblick auf Smektit (Abb. 12, rechts). Grundsätzlich könnte die Quellung im Zuge des Schüttelabrieb-Versuches den MB-Versuch zumindest in Hinblick auf quellbare Tonminerale ersetzen, einschränkend ist aber anzumerken, dass der MB-Versuch eine deutlich bessere Wertespreizung sowie signifikantere Zusammenhänge zu anderen Reinphasen aufweist.

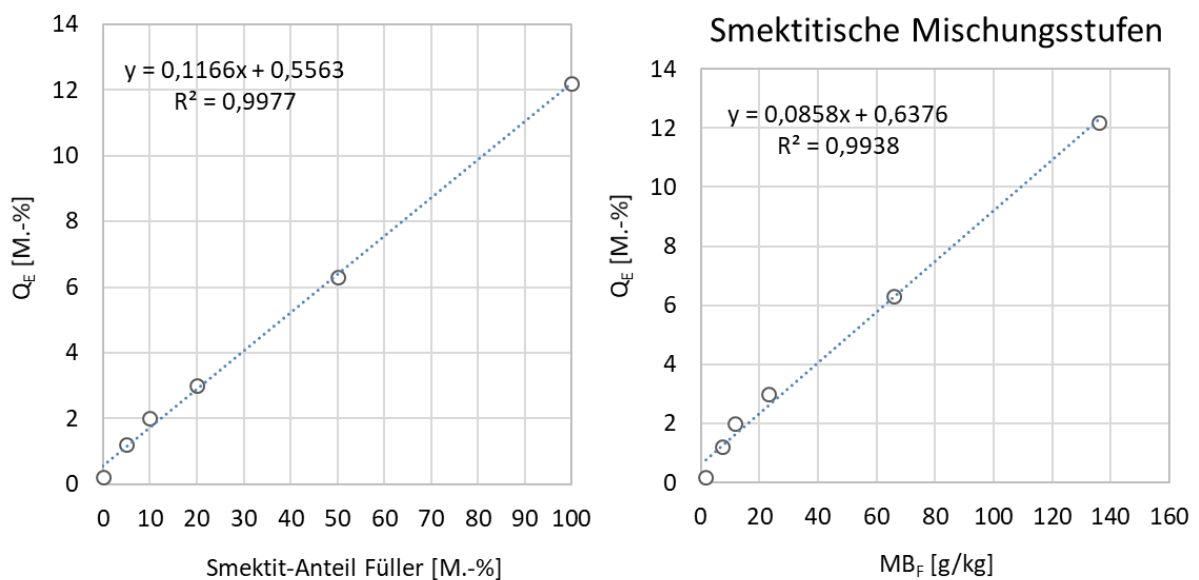


Abb. 12: Korrelationen der Quellung Q_E mit Smektitanteil im Füller (links) und mit MB_F bez. Smektit (rechts).

Bei den nachfolgenden übrigen Gegenüberstellungen der Versuche MB_F , S_E , Q_E und SE (10) von jeweils gleichen Mischungsstufen in den Abb. 13 bis Abb. 16 (jeweils mit Bezug auf die smektitischen Mischungsstufen links und allen Mischungsstufen rechts) zeigt sich ein sehr ähnliches Bild: ein hochsignifikanter Zusammenhang zwischen allen Versuchen bei den smektitischen Mischungsstufen und ein 2-ästiges Diagramm bei Betrachtung aller

Mischungsstufen. Letzteres ist auf die bedeutend geringere Reaktivität von nicht-smektitischen Reinphasen in Relation zu Smektit bei einem der beiden in den jeweiligen Korrelationen gegenübergestellten Versuchen zurückzuführen (z.B. zeigen sich hohe S_E -Werte auch bei nicht-smektitischen Mischungsstufen, wohingegen die MB_F - oder Q_E -Werte sehr niedrig liegen). Daraus lässt sich eine relative Rangreihung der versuchsspezifischen Wertspreizungen für nicht-smektitische Reinphasen ableiten, welche die Rangreihung an den natürlichen Materialien (angesichts des dominanten Auftretens nicht-smektitischer Tonminerale) bestätigt (vgl. Kap. 5.2.12):

$$S_E > SE(10) > MB_F \sim Q_E.$$

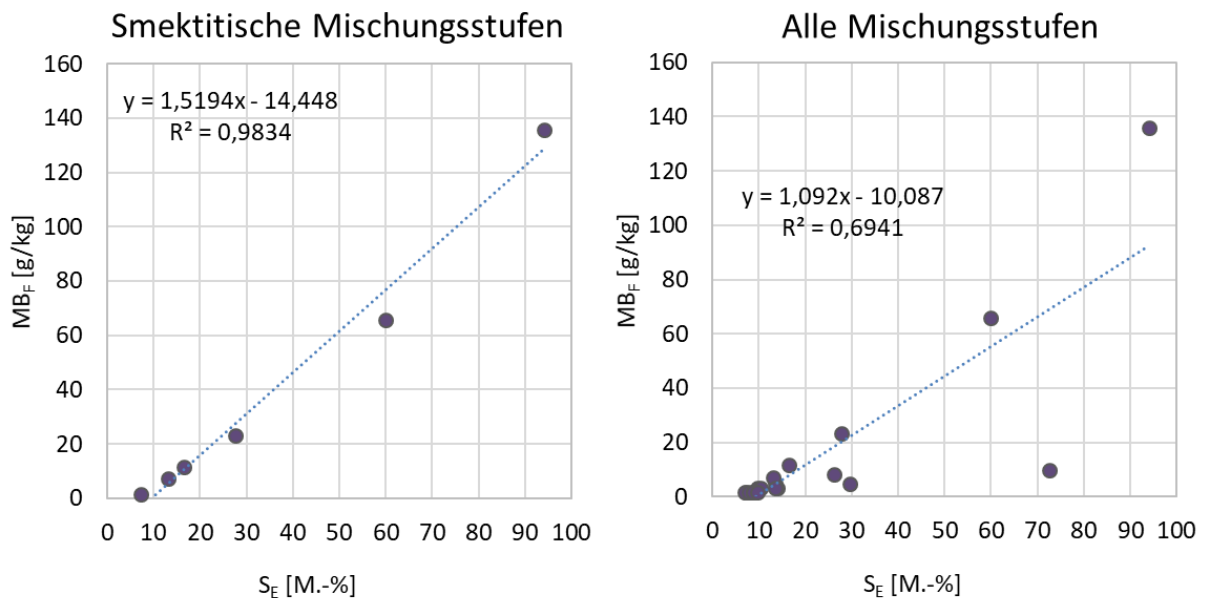


Abb. 13: Korrelation von jeweils gleichen Mischungsstufen zwischen MB_F und S_E (Schüttelabrieb am Sand-Serie E). Links: bez. der Mischungsstufen mit Smektit, rechts: bez. aller Mischungsstufen mit allen Mineralen.

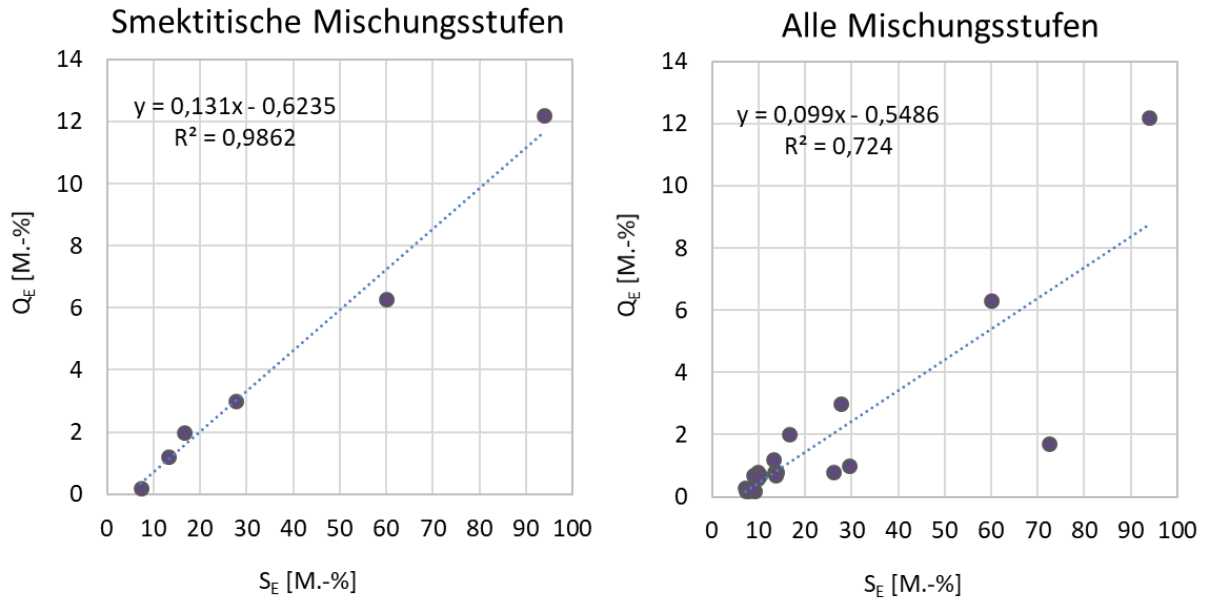


Abb. 14: Korrelation von jeweils gleichen Mischungsstufen zwischen MB_F und Q_E (Quellung im Zuge von Schüttelabrieb am Sand-Serie E). Links: bez. der Mischungsstufen mit Smektit, rechts: bez. aller Mischungsstufen mit allen Mineralen.

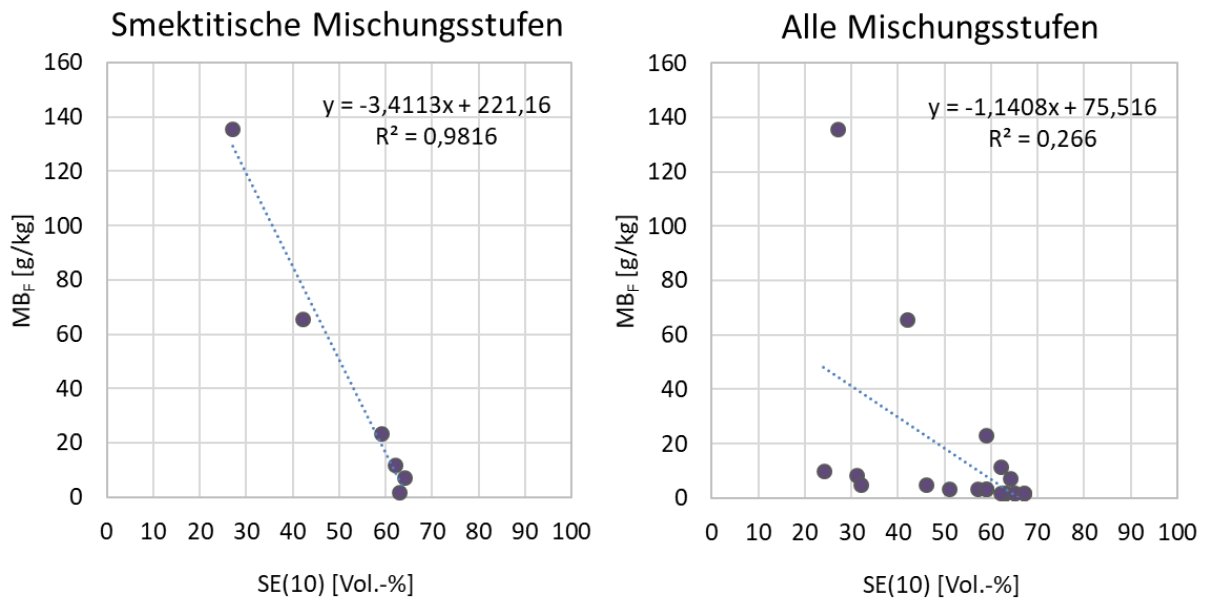


Abb. 15: Korrelation von jeweils gleichen Mischungsstufen zwischen MB_F und SE (10). Links: bez. der Mischungsstufen mit Smektit, rechts: bez. aller Mischungsstufen mit allen Mineralen.

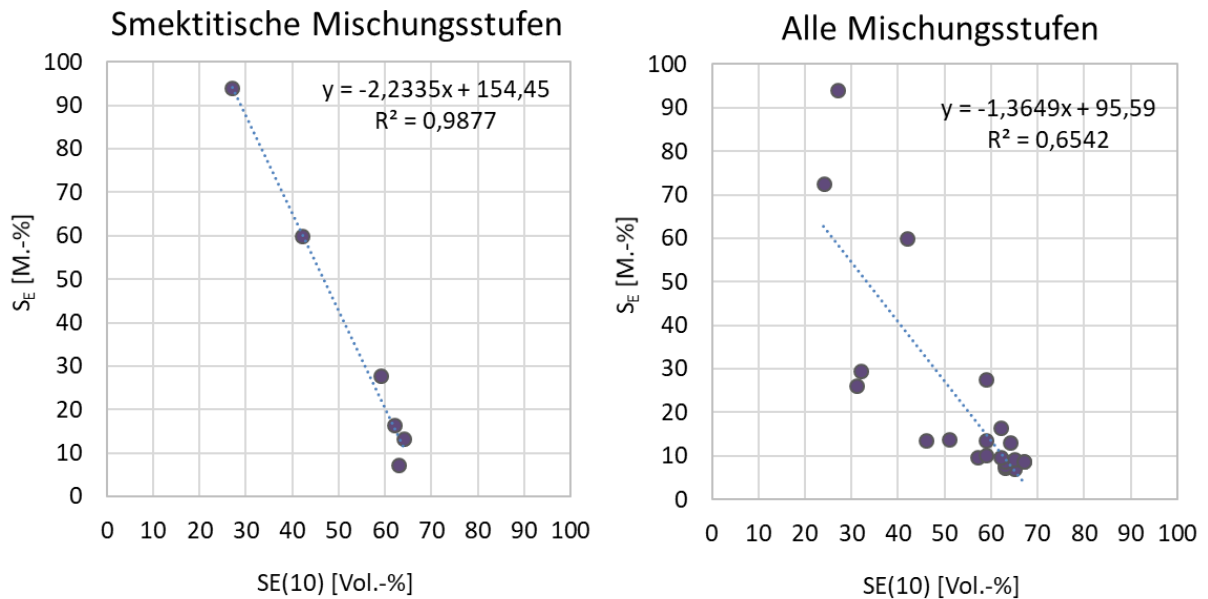


Abb. 16: Korrelation von jeweils gleichen Mischungsstufen zwischen S_E (Schüttelabrieb am Sand-Serie E) und SE (10). Links: bez. der Mischungsstufen mit Smektit, rechts: bez. aller Mischungsstufen mit allen Mineralen.

5.2 Untersuchungen der natürlichen Materialien sowie deren mineralogisch-petrographischen Abhängigkeiten

5.2.1 KGV

Die Korngrößenverteilungen nach Siebung sowie der Tonanteil ($< 0,002$ mm) innerhalb der Feinanteile als einer der für die Qualität der Feinanteile wesentlichsten granulometrischen Parameter sind in Tab. 20 angeführt.

5.2.2 Geochemische Zusammensetzung

In Tab. 21 (Anhang) sind die Elementoxidverteilungen der untersuchten Proben sowie deren Glühverluste (LOI) dargestellt.

5.2.3 Thermoanalytik

In Tab. 22 (Anhang) sind die Gewichtsverluste [M.-%] im Rahmen der STA (Simultanen Thermoanalytik), differenziert nach Temperaturbereichen, angegeben. Die angeführten Temperaturbereiche können mit folgenden Mineralen assoziiert werden (Umrechnungen in Mineralgehalte sind unter Heranziehung durchschnittlicher bzw. üblicher Mineralchemismen möglich):

- 90-220 °C: Zwischenschichtwasser von quellfähigen Tonmineralen (Voraussetzung: langsame Trocknung bei 90°C bis zur Massenkonstanz); selten können in diesem Bereich auch andere Minerale entwässern (z.B. Zeolithe, amorphe Schichtsilikate)
- 220-400 °C: Fe-Hydroxide (und Organik)
- 400-650 °C: Dehydroxilation von Illit, Kaolinit, Chlorit, Vermikulit und Smektit
- 650-1000 °C: Karbonate

Die ermittelten Gewichtsverluste können unter Zugrundelegung geochemischer Daten in Mineralgehalte umgerechnet werden. Auf Grund der variablen Chemismen, insbesondere der quellfähigen Phasen, wird in der Praxis mit Wertebereichen gerechnet. Die sich daraus ergebenden Bereiche an (Ton)Mineralen müssen mit den aus anderen Methoden ermittelten Gehalten in plausible Übereinstimmung gebracht werden. Die ermittelten gesamten Gewichtsverluste stimmen sehr gut mit den Glühverlusten aus den geochemischen Analysen (vgl. LOI, Tab. 21) im Sinne linearer Korrelation mit ausgezeichnetem Bestimmtheitsmaß überein (Abb. 17, links). Dies trifft in gleichem Maße auf den Karbonatgehalt zu, der aus den STA-Analysen sowie nach Scheibler (vgl. Kap. 5.2.4.2) bestimmt wurde (Abb. 17, rechts). Beide Diagramme geben wichtige Hinweise für die Plausibilität der Ergebnisse aller drei Verfahren.

Minimale Abweichungen im niedrigen Bereich liegen an der Wiederholbarkeit und der Genauigkeit der Versuchsdurchführungen bei STA und LOI. Obwohl diese Abweichungen gering erscheinen, bedürfen diese einer eingehenden Ursachenforschung, weil gerade diese Werte von nicht-karbonatischen Proben stammen, deren thermische Gewichtsverluste überwiegend auf Schichtsilikate bzw. Tonminerale zurückzuführen sind. In den meisten Fällen sind ungenügende und/oder zu rasche Trocknung durch zu hohe Aufheizungsraten im Zuge der STA-Analyse oder Ungenauigkeiten bei der LOI-Bestimmung im Muffelofen verantwortlich.

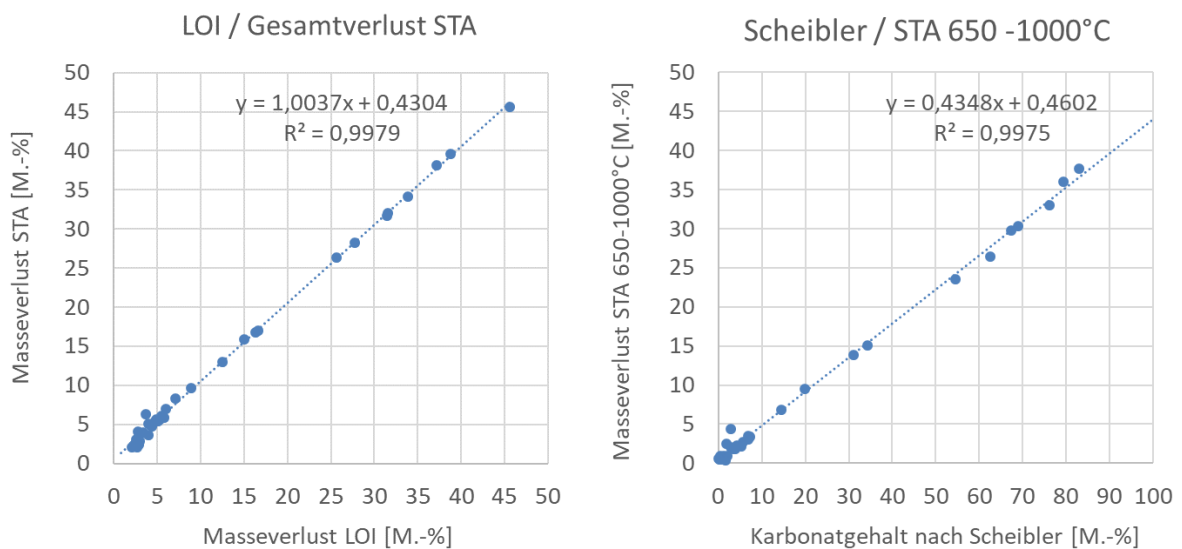


Abb. 17: Korrelation gesamte Gewichtsverluste STA mit LOI aus der geochemischen Analytik (links) sowie Korrelation Gewichtsverlust STA 650-1000°C mit Karbonatgehalt nach Scheibler.

Von besonderer Bedeutung sind die Gewichtsverluste zwischen etwa 90-220° C, weil diese Verluste wichtige Hinweise zum Gehalt quellfähiger Minerale liefern. Als problematisch haben sich diesbezüglich die Abgrenzung zum Adsorptionswasser herausgestellt, sowie der Umstand, dass v.a. bei basaltischen Gesteinskörnungen wahrscheinlich röntgenamorphe (und daher mittels XRD kaum fassbare bzw. quantifizierbare) Phasen eine nicht unbedeutende Rolle spielen. Bei jenen Proben, die bei Routinemessungen fließende Übergänge zwischen Gewichtsverlust durch Adsorptionswasser und jenem durch Zwischenschichtwasser zeigten, wurden Wiederholungsmessungen mit sehr langsamen Aufheizungsraten zur Verbesserung der Auflösung gefahren.

5.2.4 Mineralogie

5.2.4.1 Workflow

Der grundsätzliche Workflow der mineralogischen Auswertung der Feinanteile umfasste angesichts der vorliegenden mineralogischen Verteilungen folgende Arbeitsschritte:

- XRD < 0,002 mm (Tonmineralogie inkl. Abschätzung gesamter Tonmineralgehalt in < 0,002 mm)
- Heranziehung Anteil < 0,002 mm in < 0,063 mm aus Sieblinien, daraus zusammen mit gesamter Tonmineralgehalt in < 0,002 mm (unter Berücksichtigung der Verringerung der Gesamt-Tonmineralgehalte durch gesteinsbildende Mineralanteile) Ableitung theoretischer Maximalanteil Tonminerale in < 0,063 mm
- STA-Analysen zur Abschätzung der Minima und Maxima von aufgetretenen Tonmineralen gem. XRD (besonders quellfähiger Tonminerale)
- XRD < 0,063 mm und Auswertung mittels Rietveld
- geochemische Verrechnung der Rietveld-Verteilung unter Berücksichtigung der theoretischen Maximalgehalte an Tonmineralen gem. obiger Schritte (XRD und Sieblinie) bzw. des möglichen Wertebereiches gem. STA.

In einigen Fällen ist es zu Diskrepanzen zwischen den aus STA-Auswertungen abgeleiteten maximalen Tonmineralgehalten (v.a. quellbaren -) und Tonmineralanalysen mittels XRD unter Berücksichtigung der Sieblinie gekommen. Dabei handelte es sich meist um sehr geringe Tonmineralanteile << 5%, bei denen trotzdem relevante Anteile gem. STA interpretierbar gewesen wären, was sich mit großer Wahrscheinlichkeit auf Minerale rückführen ließ, die an gleicher Stelle wie quellfähige Tonminerale entwässern. Dieser Umstand führte dazu, dass einige Materialien zwischen 90-200 °C Entwässerungen zeigten, gleichzeitig mittels XRD aber keinerlei quellbare Tonminerale identifiziert und daher (korrekter Weise) auch nicht verrechnet werden konnten (vgl. Abb. 18).

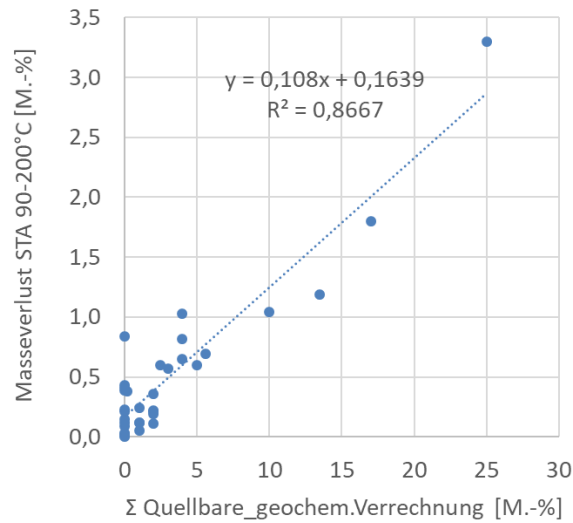


Abb. 18: Gegenüberstellung Masseverluste nach STA bei 90-200°C mit Quellbaren nach geochemischer Verrechnung.

Die STA an den Füllerfraktionen wurde letztlich in erster Linie zur Einschätzung von Minimal- und Maximalgehalten an quellbaren Tonmineralen, aber auch zur Verifizierung der Karbonatgehalte nach Scheibler herangezogen (vgl. Abb. 17, rechts).

5.2.4.2 Karbonatgehalt nach Scheibler

Die Karbonatgehalte nach Scheibler (berechnet als Kalzit) sind zur Vergleichbarkeit mit den STA-Werten bei 650-1000 °C in Tab. 22 (Spalte ganz rechts) dargestellt. Eine entsprechende Korrelation zeigt Abb. 17, rechts in Kap. 5.2.3.

5.2.4.3 Tonmineralogie

Die relativen Tonmineralgehalte innerhalb der Tonfraktionen (die Summe aller identifizierten Tonminerale wurde auf 100 % bezogen) sind in Tab. 23 (Anhang) angeführt.

5.2.4.4 Gesamtmineralogie

Die Gesamtmineralogien unter Berücksichtigung der Tonmineralogien, der Tonfraktionsanteile innerhalb der Feinanteile, der Karbonatbestimmungen, der thermoanalytischen Ergebnisse sowie der geochemischen Analysen als Basis für die geochemische Verrechnungen sind in Tab. 24 (Anhang) angeführt.

In Abb. 19 ist eine Rangreihung der untersuchten Feinanteile nach der Summe aus Glimmer und Chlorit wiedergegeben, weil diese beiden Mineralgruppen zusammen bei den meisten Feinanteilen die Hauptmasse an Schichtsilikaten umfassen. Es ist zu erkennen, dass die untersuchten Materialien ein weites Spektrum an Mineralgehalten abdecken und auch, dass 22 Füller quellbare Minerale (in einem Bereich zwischen < 1 bis 25 %) beinhalten.

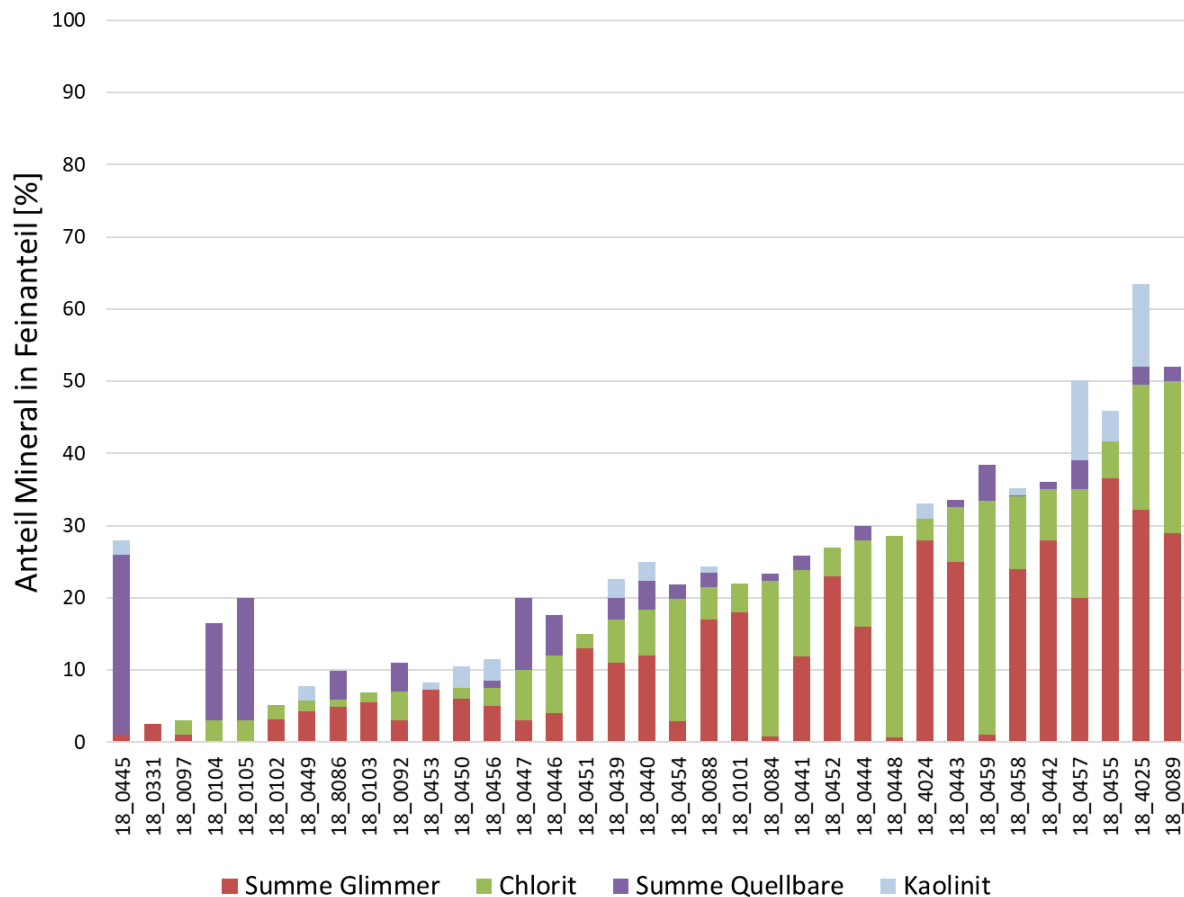


Abb. 19: Rangreihung der untersuchten Feinanteile nach der Summe aus Glimmer und Chlorit.

5.2.5 Petrographie

Die Anforderungen an Sand bzw. an Füller für (hochwertigen) Asphalt gem. den Schweizer Normen sind in Tab. 5 und in Tab. 6 angegeben.

Tab. 5: Anforderungen an Sand für (hochwertigen) Asphalt.

Asphalt	SN 670 115 (Sand)	Petrografisch ungeeignete Körner	maximal freie Schichtsilikate	Mindestmenge [M.-%] harte Körner (höherwertiger Asphalt)
	Deckschichten	≤ 6	≤ 2	≥ 60
	Binder- und Tragschichten	≤ 10	≤ 5	≥ 60

Tab. 6: Anforderungen an Füller für Asphalt (Biotit: derzeit nicht in der Norm verankert, aber vorgesehene Anpassung bei der nächsten Revision der Norm).

Asphalt	SN 670 116 (Füller)	Maximaler Anteil im Füller [Masse-%]
	Gesamtanteil an Schichtsilikaten	≤ 15
	Quellfähig	≤ 0.5
	Muskowit (saure gebrochene Kristallingesteine)	≤ 2
	Biotit (saure gebrochene Kristallingesteine)	≤ 7
	Glimmer (sonstige Gesteine)	≤ 7
	Kaolinit	≤ 7
	Chlorit	≤ 7

Die Petrographien wurden an fast allen Materialien durchgeführt, wobei 0,25/0,5 mm und 0,063/0,125 mm (unter dem Polarisationsmikroskop) untersucht, aber nur 0,25/0,5 mm als für den Sand repräsentative Fraktion ausgewertet wurde. Unter Zugrundelegung der Anforderungen an den Sand gem. Tab. 5 bzw. SN 670 115 können die untersuchten Materialien folgendermaßen eingestuft werden:

Tab. 7: Einstufung gem. Anforderungen SN 670 115 (0,063 – 2 mm) nach petrographischer Analyse der Sandfraktionen 0,25/0,5 mm. **Rote** Unterlegung bedeutet Grenzwertüberschreitung, **orange** Unterlegung bedeutet, dass weitere Untersuchungen für die definitive Beurteilung nötig sind. **Grüne** Unterlegung erfüllt die Anforderungen.

Probe Nr.	Anteil an [Masse-%]			Anforderung für		
	harte Körner ≥ 60 für H und S	ungeeignete Körner Deckschichten ≤ 6 Tragschichten ≤ 10	davon Schicht-silikate Deckschichten ≤ 2 Tragschichten ≤ 5	Beläge H und S (hochbeansprucht)	N und L (Normalbeläge)	Binder- und Tragschichten
18_0084	98	< 6	< 2	erfüllt	erfüllt	erfüllt
18_0088	71	29	29	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
18_0089	80	20	20	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
18_0092	98	< 2	< 2	erfüllt	erfüllt	erfüllt
18_0097	52	48	47	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
18_0101	82	< 6	< 2	erfüllt	erfüllt	erfüllt
18_0102	> 90	<< 6	<< 2	erfüllt	erfüllt	erfüllt
18_0103	80	< 2	< 2	erfüllt	erfüllt	erfüllt
18_0104	84	13	13	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
18_0105	87	9	9	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
18_0331	0	2	2	nicht erfüllt	erfüllt	erfüllt
18_0439	93	7	7	nicht erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt
18_0440	83	17	17	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
18_0441	63	37	37	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
18_0442	> 95	< 2	< 2	erfüllt	erfüllt	erfüllt
18_0443	> 95	< 2	< 2	erfüllt	erfüllt	erfüllt
18_0444	96	< 2	< 2	erfüllt	erfüllt	erfüllt
18_0445	76	24	24	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
18_0446	> 95	< 6	< 2	erfüllt	erfüllt	erfüllt
18_0447	75	12	12	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
18_0448	> 95	<< 6	< 2	erfüllt	erfüllt	erfüllt
18_0449	0	>> 10	< 2	nicht erfüllt	nicht erfüllt	?
18_0450	0	>> 10	< 2	nicht erfüllt	nicht erfüllt	?
18_0451	0	> 6	< 2	nicht erfüllt	?	erfüllt
18_0452	0	> 6	< 2	nicht erfüllt	?	erfüllt
18_0453	0	> 6	< 2	nicht erfüllt	?	erfüllt
18_0454	90	< 2	< 2	erfüllt	erfüllt	erfüllt
18_0455	95	< 2	< 2	erfüllt	erfüllt	erfüllt
18_0456	99	1	1	erfüllt	erfüllt	erfüllt
18_0457	87	< 2	< 2	?	?	erfüllt
18_0458	99	1	1	erfüllt	erfüllt	erfüllt
18_0459	84	16	16	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
18_4024	84	16	16	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
18_4025	0	41	41	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
18_8086	< 60	45	45	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt

Die Grenzwertüberschreitungen stimmen nicht immer etwa mit hohen Schüttelabrieben überein. Diese Diskrepanz kann damit erklärt werden, dass die in den SN angeführten Grenzwerte nicht nur in Hinblick auf Haftverhalten festgelegt wurden (wesentlicher Fokus der Schüttelabriebe), sondern auch mangelnde Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beanspruchung (z.B. in Hinblick auf PSV, Los Angeles usw.), zu hohe Anteile an weichen und/oder unbeständigen Körnern, aber auch Bestandteile, welche die Verarbeitbarkeit erschweren, nicht zulässige, gefährliche Minerale wie Asbest, usw. berücksichtigen.

Unter Zugrundelegung der Anforderungen an den Füller gem. Tab. 6 bzw. SN 670 116 können die untersuchten Materialien mineralogisch-petrographisch eingestuft werden. Die SN umfasst Quellfähige, Glimmer von sauren gebrochenen Kristallingesteinen, Glimmer (in sonstigen Gesteinen), sowie Kaolinit und Chlorit. Nach mündl. Mitt. von F. Röthlisberger wird künftig auch Biotit Einzug in die SN halten (vgl. Tab. 6). Die SN sieht dabei in verrechnungstechnischer Hinsicht vor, für die jeweilige Mineralgruppe den im Füller ermittelten Gesamtschichtsilikatgehalt mit der relativen Mengenverteilung [%] in der Tonfraktion (gem. Moore & Reynolds 1989) zu multiplizieren. Hintergrund dieser Vorgangsweise ist die sehr hohe Relevanz der Tonfraktion und deren relative Tonmineralverteilung. Die Gesamtmenge an Schichtsilikaten im Füller bleibt dadurch natürlich erhalten.

Die petrographische Auswertung bzw. Einstufung der Füller gem. SN 670 116 ist in Tab. 8 angeführt. In der ganz rechten Spalte werden die Resultate der Schüttelabriebe am Füller sowie deren Einstufungen dargestellt, um die beiden Methoden hinsichtlich ihrer Grenzwertdefinitionen zu vergleichen. Dabei zeigt sich, dass nur 6 Materialien divergent eingestuft werden, was umgekehrt bedeutet, dass 83 % in gleicher Weise als geeignet oder ungeeignet klassifiziert werden. Dies ist positiv zu bewerten, da es sich bei den beiden Verfahren um sehr unterschiedliche Herangehensweisen zur Beurteilung der Füllerqualität handelt.

Hinsichtlich der SN stellt sich die Frage, ob nicht das Ausmaß der Grenzwertüberschreitung sowie die Anzahl der überschrittenen Parameter in die Beurteilung der Eignung einfließen könnte bzw. ob nicht mehrere mineralspezifische Kategorien Sinn hätten (als Ersatz für eine einzelne Grenze). Letztere werden im folgenden Kap. 5.2.5.1 vorgeschlagen.

Analoges gilt für die Grenzwerte für den Schüttelabrieb, auch hier könnten weitere Abstufungen bzw. Qualitätskategorien angedacht werden.

Erwähnenswert ist darüber hinaus der Umstand, dass bei Serpentiniten extrem hohe Schichtsilikat-Gehalte (v.a. Serpentinegruppe, aber ggf. auch Talk) ermittelt werden und daher hinsichtlich der Gesamtschichtsilikat-Gehalte gem. SN eigentlich als nicht geeignet qualifiziert werden müssten. Wahrscheinlich sind aber die Serpentine anderen Schichtsilikaten in ihren negativen Auswirkungen bei Kontakt mit Wasser und Bitumen nicht gleichzusetzen. Die positiven Resultate sämtlicher Schüttelabriebe am Sandasphalt (sowie auch des MB_F -Wertes) der Probe 18_0097 deuten dies an.

Tab. 8: Einstufung gem. Anforderungen SN 670 116 (Füller). Rote Unterlegung bedeutet Grenzwertüberschreitung. In den rechten beiden Spalten sind zum Vergleich die resultierende Beurteilung gem. SN sowie die Beurteilung der Ergebnisse der Schüttelabriebe am Füller dargestellt. Rosa unterlegt sind Füller, deren Chemismen eher als intermediär einzustufen sind (daher nicht rot, weil sich der Grenzwert auf „saure“ Kristallingesteine bezieht).

	Probe Nr.	Muskowit (saure gebrochene Kristallingesteine)	Biotit	Chlorit	Kaolinit	Gesamt-Glimmer	Gesamt-Schicht-silikate	Gesamt-Quellbare	Einstufung SN	Beurteilung S _A <45
Amphibolitbrekzie	18_0084	0,7	0,0	22,4	0,0	0,7	23,3	0,2		47
Kersantit	18_0088	0,0	13,4	4,4	2,2	13,4	24,3	4,4		51,4
Diabas und Grauwacke	18_0089	14,6	0,0	36,9	0,0	14,6	52,0	0,5		35,3
Basalt	18_0092	0,0	2,0	3,5	0,0	2,0	11,0	5,5		27,5
Ultrabazit	18_0097	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3*	0,0		38,5
Sandstein	18_0101	16,7	0,0	5,3	0,0	16,7	22,0	0,0		42,2
Kieselkalk	18_0102	4,0	0,0	1,2	0,0	4,0	5,2	0,0		38,2
Kieselkalk	18_0103	6,8	0,0	0,1	0,0	6,8	6,9	0,0		39,1
Basalt	18_0104	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	16,5	15,0		91,5
Basalt	18_0105	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	20,0	19,2		95,3
Dolomit	18_0331	2,4	0,0	0,0	0,2	2,4	2,5	0,0		41,3
Granit	18_0439	8,8	0,0	7,5	2,5	8,8	22,6	3,8		66,5
Granit	18_0440	9,5	0,0	8,0	2,8	9,5	25,0	4,8		64,2
Granodiorit	18_0441	0,0	3,4	18,3	0,0	3,4	25,8	4,1		54,0
Rhyolith	18_0442	22,3	0,0	12,6	0,0	22,3	36,0	1,1		50,1
Rhyolith	18_0443	21,4	0,0	11,1	0,0	21,4	33,5	1,0		49,2
Andesit	18_0444	10,2	0,0	18,3	0,0	10,2	30,0	1,5		71,5
Latitandesit	18_0445	0,0	2,0	0,0	1,4	2,0	28,0	24,6		97,1
Basalt	18_0446	0,0	0,9	3,3	0,0	0,9	17,6	13,4		48,8
Basalt	18_0447	0,0	0,8	2,6	0,0	0,8	20,0	16,6		62,3
Diabas	18_0448	1,1	0,0	27,5	0,0	1,1	28,6	0,0		37,6
Kalkstein, Jura	18_0449	5,7	0,0	0,0	2,1	5,7	7,8	0,0		53,6
Kalkstein, Jura	18_0450	7,4	0,0	0,0	3,2	7,4	10,5	0,0		67,3
Kalkstein, Muschelkalk	18_0451	13,4	0,0	1,7	0,0	13,4	15,0	0,0		39,5
Kalkstein, Muschelkalk	18_0452	24,6	0,0	2,4	0,0	24,6	27,0	0,0		64,1
Devonischer Massenkalk	18_0453	5,0	0,0	0,1	3,1	5,0	8,2	0,0		36,9
Amphibolit	18_0454	1,5	0,0	19,9	0,0	1,5	21,9	0,4		46,1
Quarzit	18_0455	43,1	0,0	1,4	1,4	43,1	45,9	0,0		48,3
Kies, gebrochen	18_0456	4,1	0,0	1,8	4,0	4,1	11,5	1,5		52,9
Kies, ungebroschen	18_0457	8,0	0,0	0,0	23,5	8,0	50,1	18,5		91,4
Grauwacke	18_0458	21,1	0,0	13,7	0,0	21,1	35,2	0,4		51,2
Diabas	18_0459	0,4	0,0	28,4	0,0	0,4	38,4	9,6		69,5
Metamorpher Schiefer	18_4024	0,0	27,39**	4,0	1,7	27,4	33,0	0,0		60,4
hydrothermaler Rhyolith	18_4025	19,0	0,0	12,7	19,0	19,0	63,4	12,7		84,5
vmtl. Diorit	18_8086	0,0	2,5	1,3	0,0	2,5	9,9	6,1		55,7

sauer, SiO ₂ -Gehalt >63 Gew.-%
intermediär, SiO ₂ -Gehalt 52-63 Gew.-%
basisch, SiO ₂ -Gehalt 45-52 Gew.-%
ultrabasisch, SiO ₂ -Gehalt <45 Gew.-%

* Serpentin und Talk nicht gezählt

** Biotit bei 18_4024: Glimmerzusammensetzung nicht geklärt

5.2.5.1 Korrelationen petrographischer Einstufungen

Die in den Tab. 5 und Tab. 6 angeführten Schweizerischen Grenzwerte wurden als Basis herangezogen, um weitere nach Experten-Einschätzung der BearbeiterInnen dieses Berichtes sinnvolle Abstufungen vorzunehmen und dem österreichischen Schulnotensystem zuzuordnen (Tab. 9). Ziel war es, die mineralogische Eignung von Sand und Füller in Hinblick auf Quellvermögen bzw. Wasserempfindlichkeit und Bitumenhaftung abzuschätzen. Dazu wurden die Anteile an Quellfähigen, Muskowit, Biotit, Chlorit und Kaolinit benotet. Der Mittelwert der Einstufungen ergibt dann grundsätzlich jeweils die Gesamtnote für den Füller (vgl. Tab. 26). Ausnahme sind allerdings jene 3 Materialien (18_0445, 18_0104 und 18_0105), deren Anteil an Quellbaren weit oberhalb jener der anderen Materialien liegt, diese Materialien als gänzlich ungeeignet einzustufen sind und daher mit der Note 5 versehen werden.

Tab. 9: Zuordnung von Schulnoten zu den vorgeschlagenen Grenzwerten (Maximalgehalten) der jeweiligen Minerale im Füller.

Schulnote	Anteil Quellfähige	Anteil Muskowit	Anteil Biotit	Anteil Chlorit	Anteil Kaolinit
1	0	0	0	0	0
2	2	2	2	2	2
3	5	5	7	7	7
4	10	7	15	15	12
5	>10	>7	>15	>15	>12

Hinsichtlich des Sandes wurde ähnlich vorgegangen, wobei die Anteile an Karbonat sowie an freiem Muskowit / Biotit / Chlorit (im Sinne der SN) nach Tab. 10 benotet wurden. Aus dem Mittelwert der Gesamtnoten für den Füller und den Sand wurde eine Note für Sand und Füller ermittelt (vgl. Tab. 26).

Tab. 10: Zuordnung von Schulnoten zu den vorgeschlagenen Grenzwerten (Maximalgehalten) der jeweiligen Minerale im Sand (Fraktion 0,25-0,5 mm).

Schulnote	Anteil Karbonate	Anteil freien Muskowits	Anteil freien Biotits	Anteil freien Chlorits
1	50	0	0	0
2		2	2	2
3	25	6	6	6
4		10	10	10
5	<25	>10	>10	>10

Die solchermaßen auf petrographischer Basis benoteten Materialien wurden mit den verschiedenen Versuchen korreliert.

In Abb. 20 sind Füllereinstufungen mit MB_F , $SE(10)$ und S_A korreliert, wobei sich die außerordentlichen Eigenschaften von den 3 Materialien mit den höchsten Anteilen an Quellbaren (18_0445, 18_0104 und 18_0105) deutlich zeigen. Unter Ausschluss dieser Materialien zeigt sich ein zumindest mäßiger Zusammenhang zu S_A . Zu MB_F und $SE(10)$ bestehen nur sehr schwache Trends).

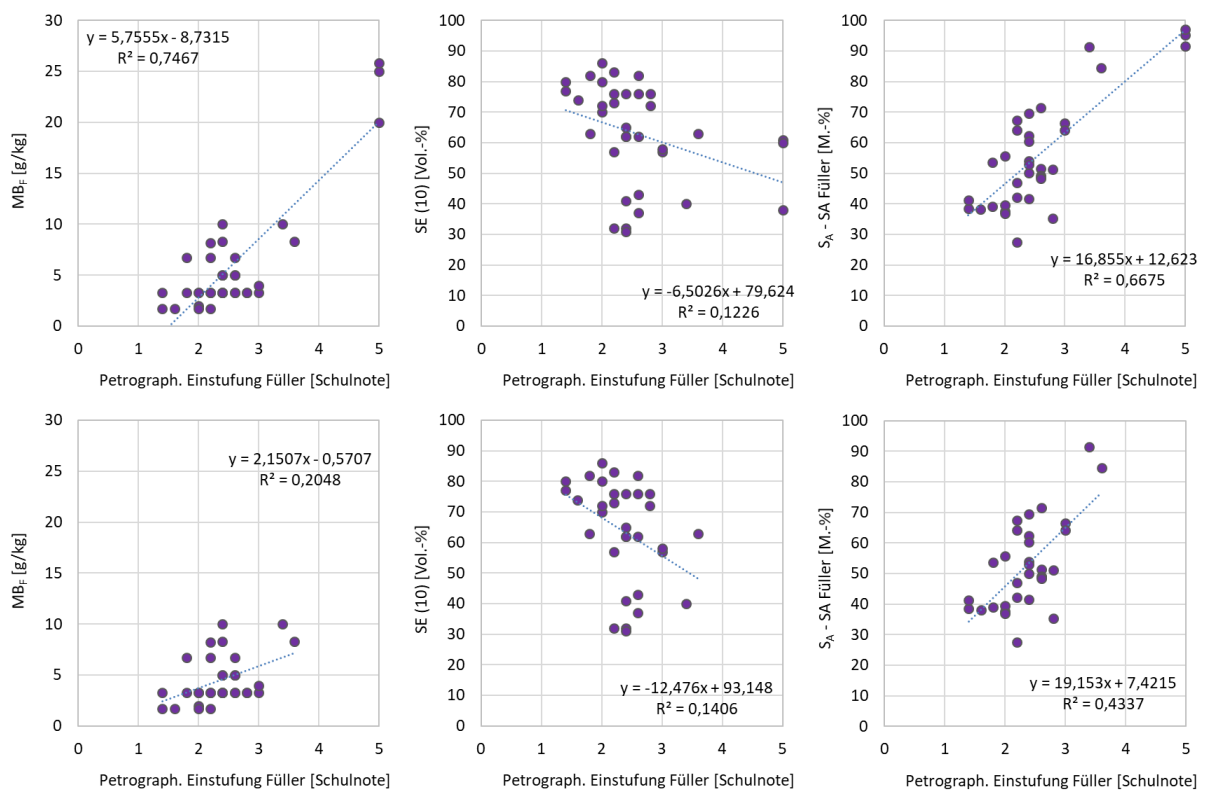


Abb. 20: Gegenüberstellung der petrographischen Füllereinstufungen mit MB_F , $SE(10)$ und S_A . Oben mit allen Materialien, unten unter Ausschluss von 18_0445, 18_0104 und 18_0105.

In Abb. 21 sind Gegenüberstellungen der petrographischen Noten für Füller (oben), Sand (Mitte) sowie Sand+Füller (unten) mit S_A und S_F angeführt. Es ist zu erkennen, dass die Einstufungen der Füller einen durchaus brauchbaren Zusammenhang mit S_E (und auch mit S_F) zeigen, wohingegen die Benotungen des Sandes und von Sand+Füller keine bzw. deutlich geringere Zusammenhänge zeigen.

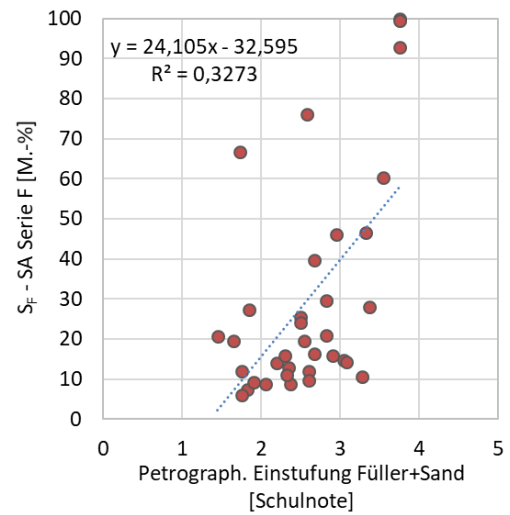
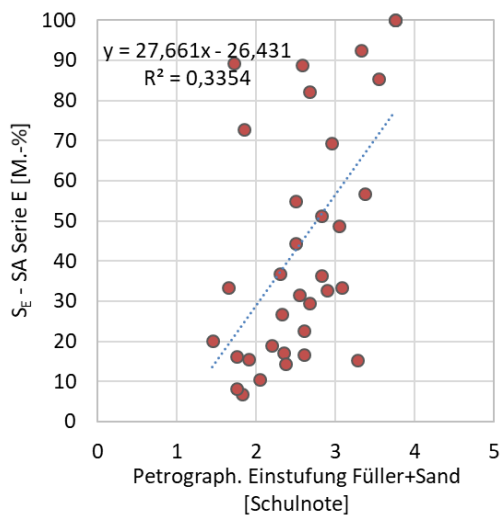
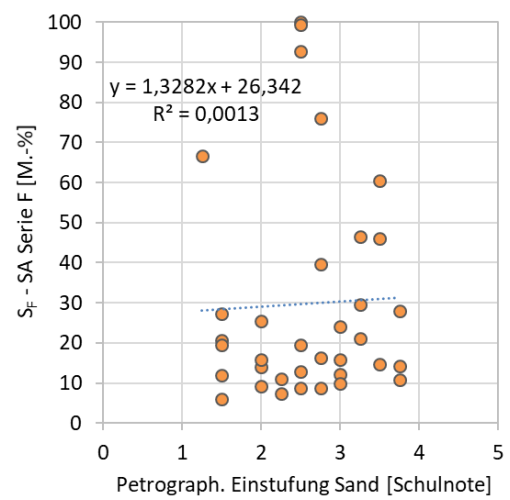
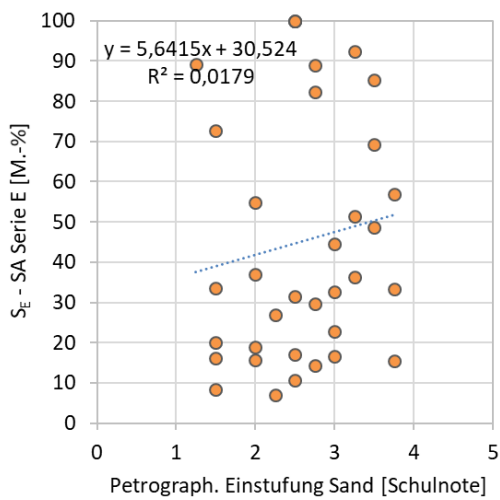
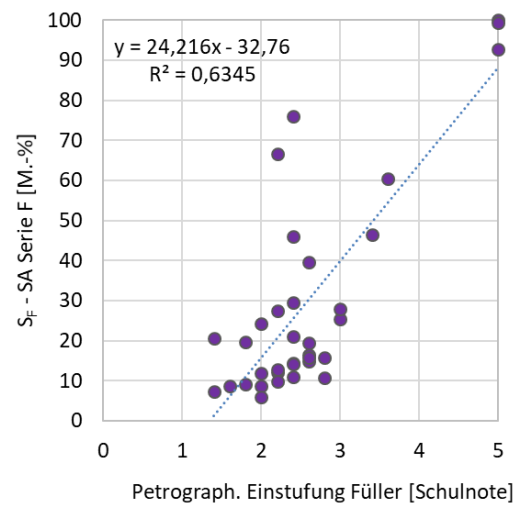
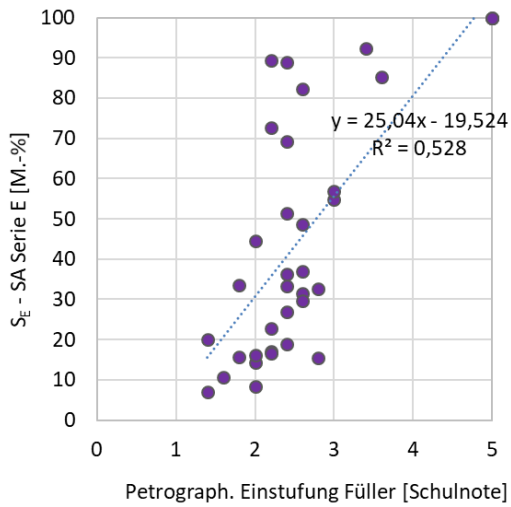


Abb. 21: Gegenüberstellungen der petrographischen Noten für Füller (oben), Sand (Mitte) sowie Sand+Füller (unten) mit S_A und S_F .

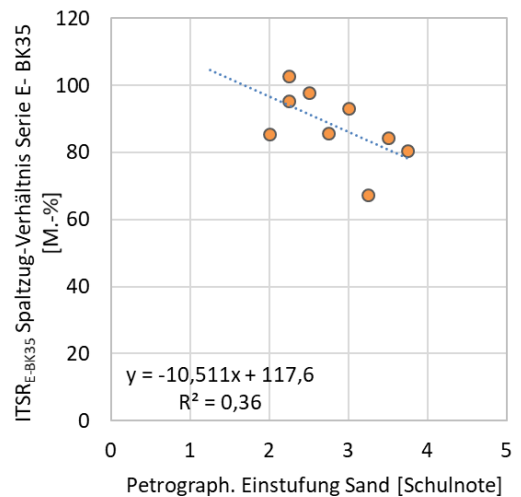
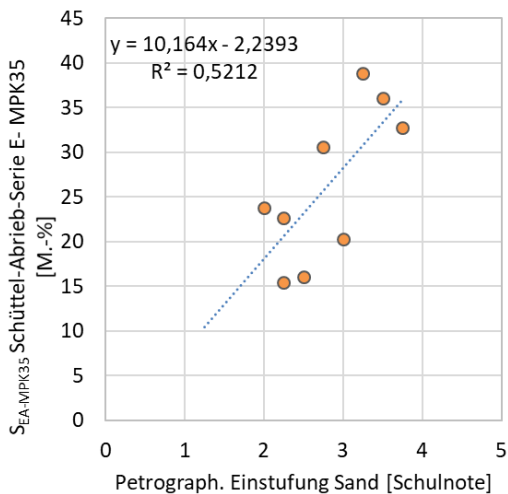
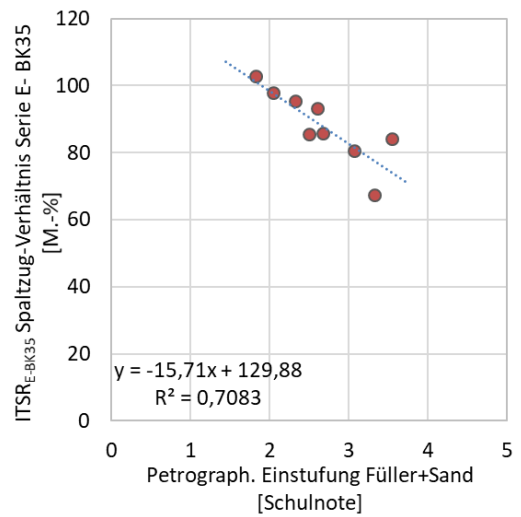
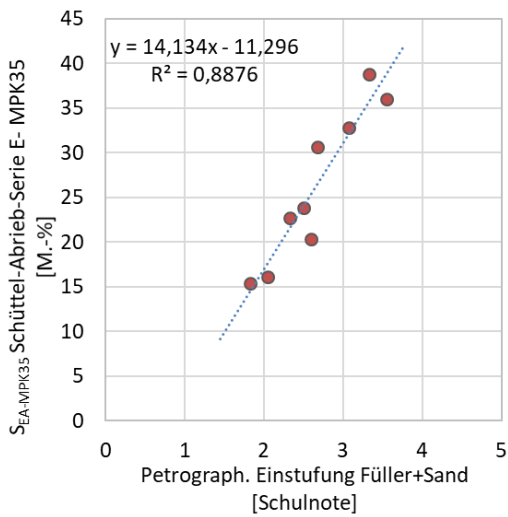
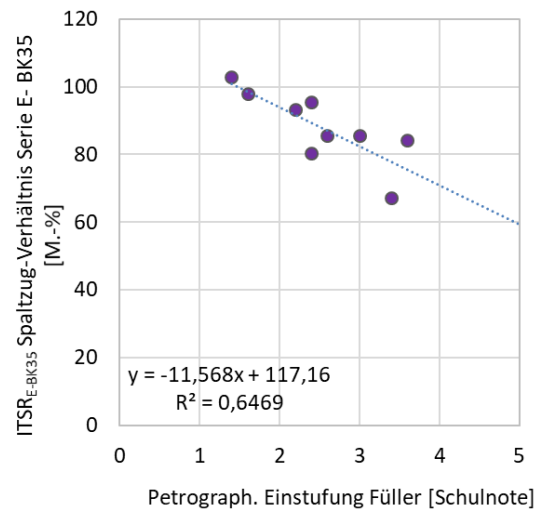
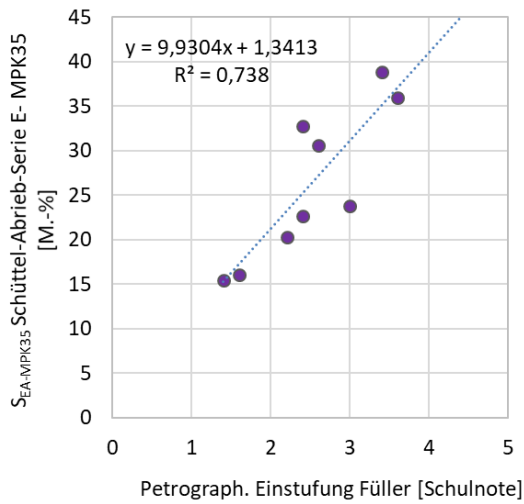


Abb. 22: Gegenüberstellungen der petrographischen Noten für Füller (oben), Sand (Mitte) sowie Sand+Füller (unten) mit je einem Vertreter des Schüttelabrieb am Asphalt sowie mit ITSR am Asphalt.

In Abb. 22 sind Gegenüberstellungen der petrographischen Noten für Füller (oben), Sand (Mitte) sowie Sand+Füller (unten) mit je einem Vertreter des Schüttelabrieb am Asphalt sowie mit ITSR am Asphalt angeführt. Es zeigen sich erstaunlich gute Zusammenhänge der petrographischen Benotungen der Füller bzw. der Sande+Füller mit den Asphaltuntersuchungen. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Schweizer Grenzwerte bzw. die im Rahmen dieser Arbeit ergänzend vorgeschlagenen petrographischen Kategorien eher auf die gesamtweitliche Asphaltperformance abzielen. Die Schüttelabriebversuche am Füller und Sand lassen hingegen wenig Aussagekraft in Bezug auf Festigkeiten zu.

5.2.6 MB

Die MB-Messwerte der untersuchten Proben sind in Tab. 25 (Anhang) zusammen mit den SE-Messwerten, den spezifischen Oberflächen und den Zeta-Potenzialen zum direkten Vergleich angeführt, weil alle Analysen von ähnlichen Eigenschaften (Oberfläche und/oder Ladung) gesteuert werden.

Zur Verifizierung der Aussagekraft des MB-Wertes am Füller wurden an zwei unterschiedlichen Materialien auch Sandfraktionen getestet (Tab. 11). Es zeigt sich, dass der überwiegende Teil der Adsorption innerhalb der feinen Gesteinskörnung im Füller passiert und somit die Untersuchung am Füller hohe Aussagekraft für die feine Gesteinskörnung besitzt (vgl. auch Abb. 23). Im Falle der Probe 18_0445 mit extrem hohem MB-Wert im Füller gibt es auch relevante Adsorptionen in den gröberen Fraktionen, was auf deren Verwitterung und der daraus resultierenden Mineralogie zurückzuführen ist. Die MB-Analysen am Sand könnten somit grundsätzlich zu dessen Qualitätsbeurteilung beitragen, allerdings vermutlich erst auf stark verwittertem Niveau.

Tab. 11: MB-Werte an unterschiedlichen Fraktionen [mm] zweier feiner Gesteinskörnungen.

Probe Nr. TPA-intern	Gesteinsart	Methylen-Blau-Wert				
		MB_F	MB(0,063/0,125)	MB(0,125/0,25)	MB(0,25/0,63)	MB(0,63/2,0)
		g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg
18_0441	Granodiorit	3,3	0,9	0,6	0,5	0,3
18_0445	Latitandesit	25,8	16,4	11,3	10,0	7,8

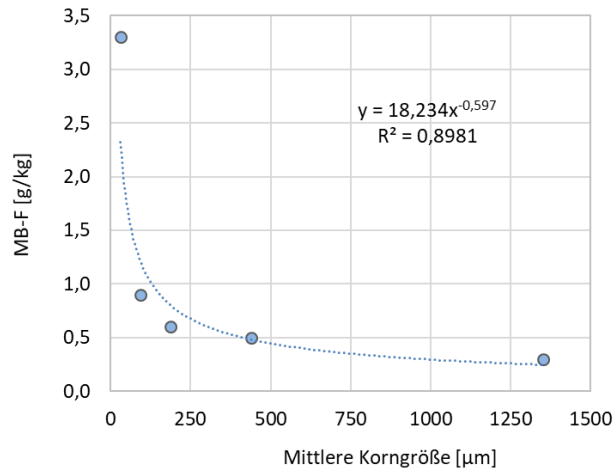


Abb. 23: Abhängigkeit der MB-Adsorption von der mittleren Korngröße der untersuchten Fraktionen (Probe 18_0441).

Bei Gegenüberstellung von MB_{trocken} und MB_{original} (Abb. 24, links) zeigt sich eine hoch signifikante Korrelation, die einerseits die Ähnlichkeit der Werte und des Wertenniveaus darlegt und andererseits die Methodik bestätigt.

Bei Gegenüberstellung von MB_{trocken} und MB_F (Abb. 24, rechts) zeigt sich eine etwas geringer signifikante Korrelation und andere Wertenniveaus, was darauf zurückzuführen ist, dass MB_F an der Fraktion $< 0,125$ mm durchgeführt wurde, in der deutlich höhere Schichtsilikatanteile und spezifische Oberflächen vorliegen. Darüber hinaus spielen die Sandfraktionen eine z.T. nicht unwesentliche Rolle, da Sandkörner verwittert und von Tonmineralen durchsetzt sein können und dadurch auch in unterschiedlichem Ausmaß zur MB-Adsorption beitragen.

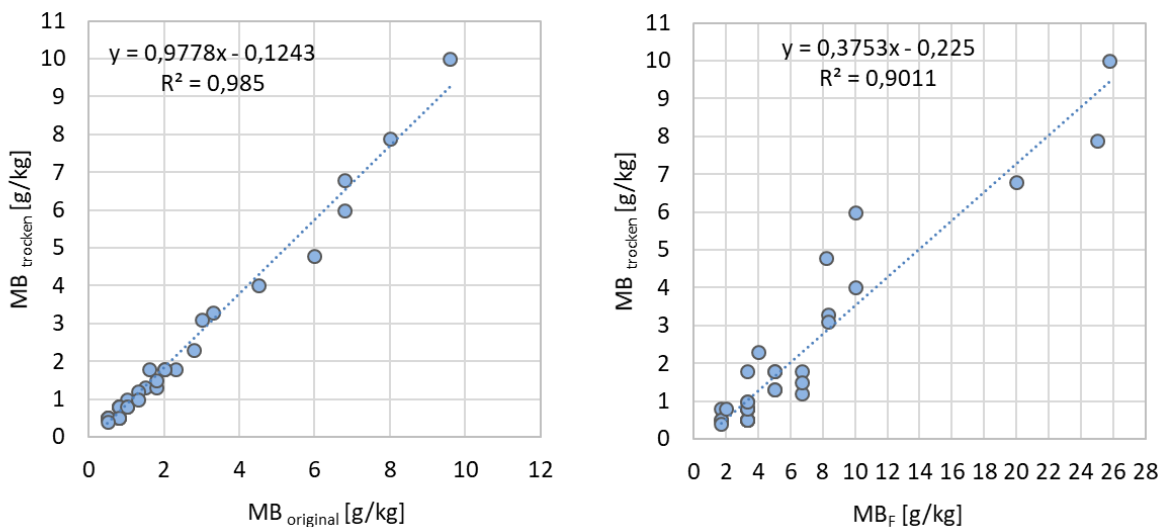


Abb. 24: Korrelation von MB_{trocken} mit MB_{original} (links) und MB_F (rechts).

Die Untersuchungen aller natürlichen Füller dieses Projektes zeigt nur eingeschränkte mineralogische Aussagekraft. Wie aus den Versuchen mit den Reinphasen bekannt ist (Kap. 5.1), besteht eine höchst signifikante und v.a. dominante Korrelation zu quellfähigen Phasen. Die hohe Signifikanz zu anderen Schichtsilikaten besteht zwar auch, allerdings auf deutlich geringeren (und zudem unterschiedlichen) Niveaus, sodass es nicht möglich ist, mittels eines MB-Wertes auf die mineralogische Zusammensetzung einer Probe zu schließen. Dies kann durch Abb. 25 bestätigt werden. Durch die unterschiedlichen Schichtsilikat-Gemische in den Füllern kann eine Mineralgruppe allein keine Abhängigkeit des MB-Wertes erklären (z.B. Muskowit), sogar die Summe aller Tonminerale zeigt keinen Zusammenhang. Eindrucksvoll ist dabei der Umstand, dass viele Füller trotz sehr unterschiedlicher Mineralgehalte einen (titrationsbedingt) gleichen MB-Wert aufweisen (vgl. auch Abb. 37, Kap. 5.2.12). Die meisten Füller zeigen MB-Werte < 10 , die Füller ≥ 10 umfassen vorwiegend basische Vulkanite und einen ungebrochenen Kies.

Lediglich die quellfähigen Phasen generieren angesichts ihres dominanten Adsorptionsverhaltens eine klare Abhängigkeit. Aber auch hier zeigt sich deutlich, dass es Proben gibt, die keine quellfähigen Phasen beinhalten und trotzdem MB-Werte zwischen 3,3 und 8,2 aufweisen, weil andere Tonminerale in größeren Mengen enthalten sind, die ebenfalls MB-Lösung adsorbieren. Dennoch ist die Dominanz der Quellfähigen so hoch, dass selbst eine Gewichtung der identifizierten Tonminerale gem. Tab. 4 (Kap. 5.1) keine relevante Verbesserung des Zusammenhanges bewirkt.

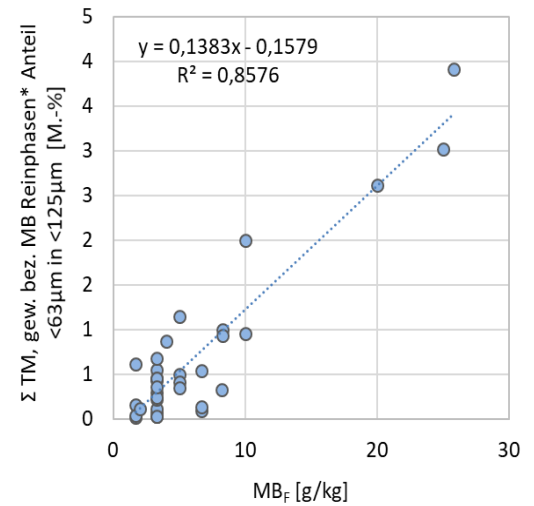
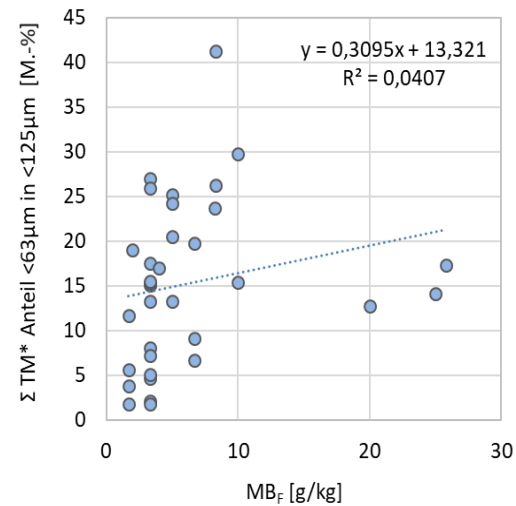
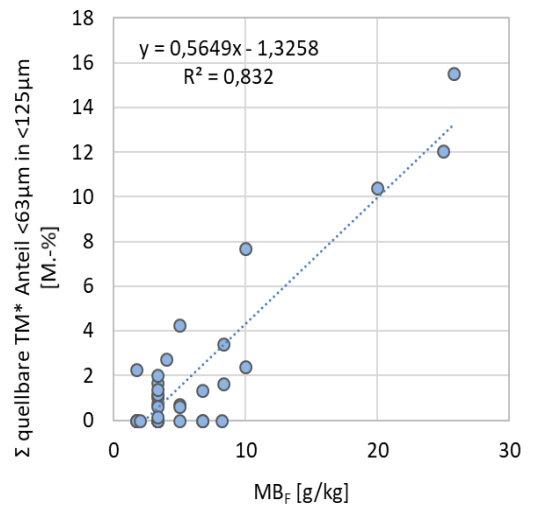
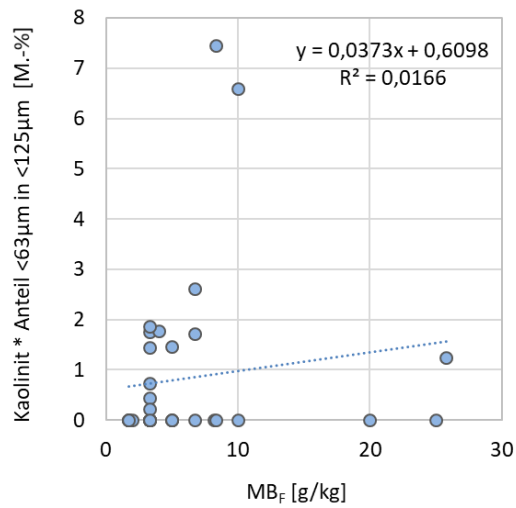
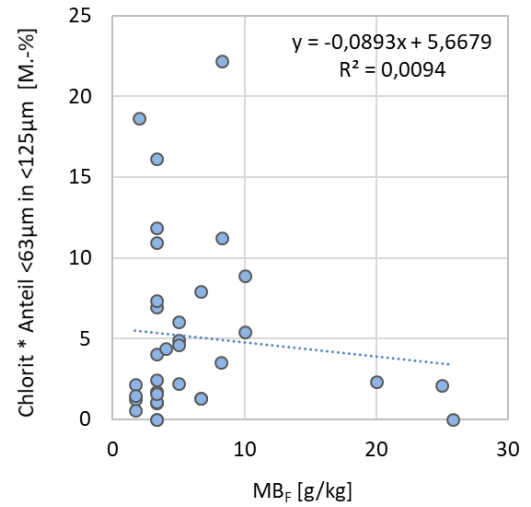
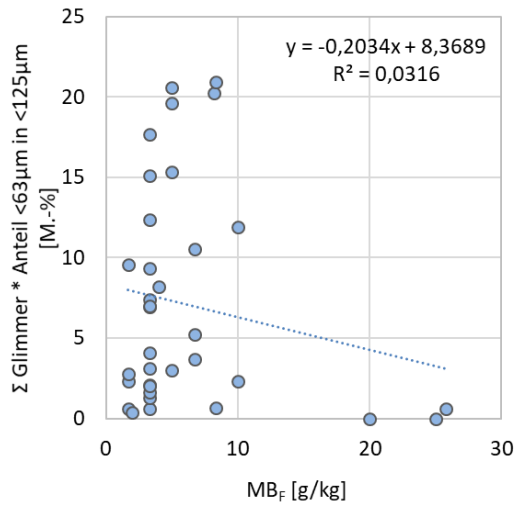


Abb. 25: Mineralogische Abhängigkeiten des MB_F -Wertes.

5.2.7 SE (10)

Die SE-Messwerte der untersuchten Proben sind in Tab. 25 (Anhang) angeführt, relevante mineralogische Abhängigkeiten in Abb. 26 dargestellt. Die Integration eines SE (10) spezifischen Gewichtungsfaktors entsprechend der Ergebnisse an den Reinphasen hat sich angesichts der eher geringen mineralspezifischen Unterschiede als nicht zielführend herausgestellt.

Beim SE (10)-Versuch zeigt sich ein mäßiger, aber dennoch erkennbarer Zusammenhang zur Summe aller Schichtsilikate, die quellfähigen Anteile alleine scheinen weniger gewichtig zu sein. Im Vergleich mit MB_F und den Schüttelabriebversuchen zeigt der SE (10)-Versuch den vergleichsweise besten Zusammenhang mit der Summe aller Schichtsilikate (ohne mineral-spezifische Gewichtung).

Bei Betrachtung jener Materialien mit den höchsten Anteilen quellfähiger Minerale (Abb. 26, Mitte, rechts) fällt auf, dass sich drei von vier dieser Materialien im unauffälligen Mittelfeld der SE (10)-Werte befinden. Dies legt nahe, dass der SE-Versuch nicht geeignet ist, diese hochreaktiven Materialien zu identifizieren, die bei MB und Schüttelabrieb hingegen die höchsten Messwerte zeigen.

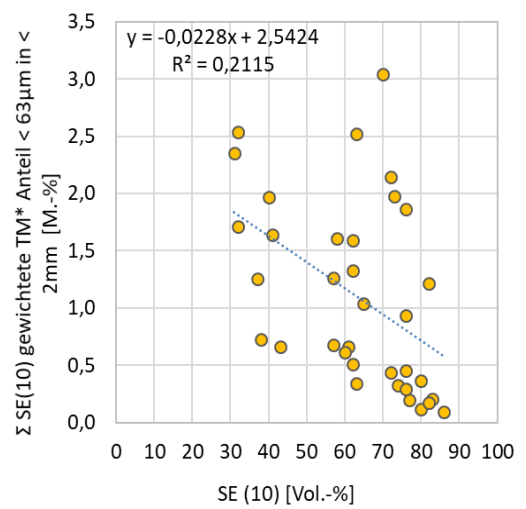
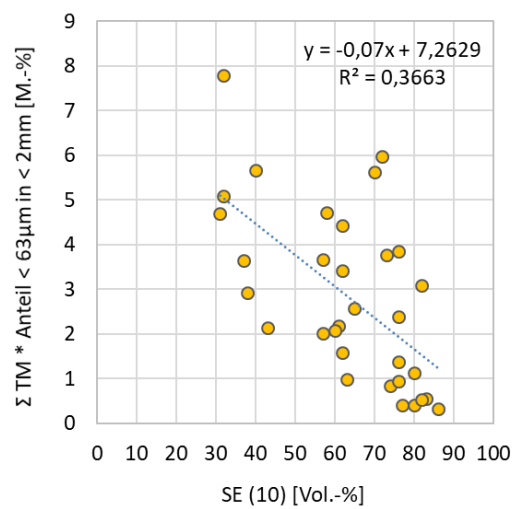
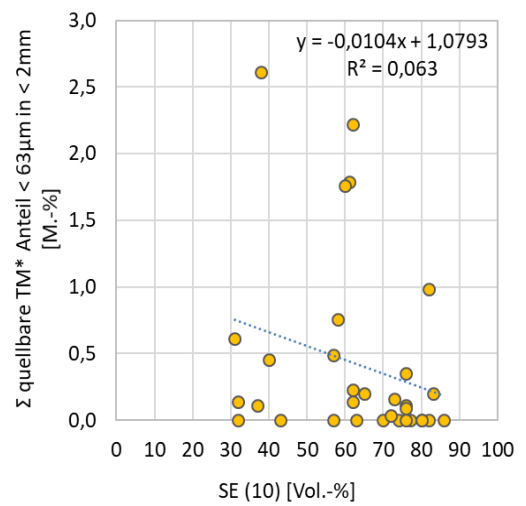
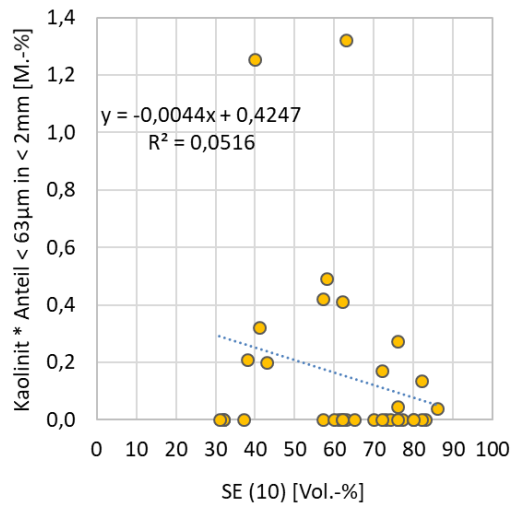
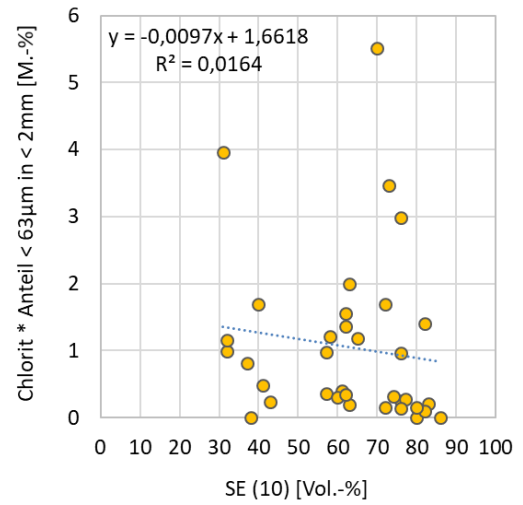
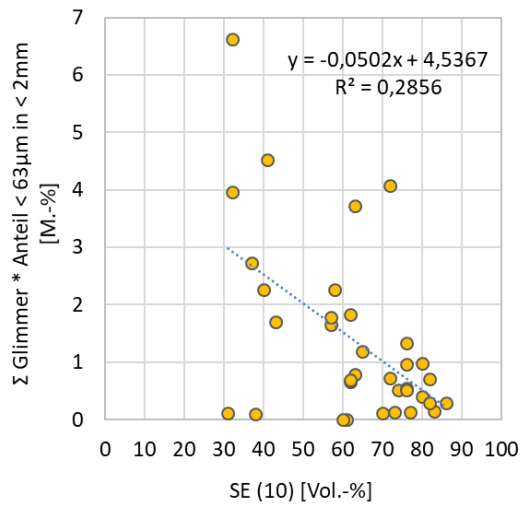


Abb. 26: Mineralogische Abhängigkeiten des SE (10)-Wertes.

5.2.8 Spezifische Oberfläche (BET)

Die spezifischen Oberflächen der untersuchten Proben schwanken zwischen 2,5 und 27 (Mittel 10,8) m²/g und sind in Tab. 25 (Anhang) angeführt.

In mineralogischer Hinsicht zeigen sich keine Zusammenhänge mit Gehalten einzelner gesteinsbildender Mineralgruppen, kaum erkennbare Zusammenhänge mit der Summe aller Schichtsilikate und nur schwache Zusammenhänge mit der Summe quellfähiger Minerale (Abb. 27), allerdings weisen auch Proben ohne Quellfähige größere Oberflächen auf.

Eine signifikante Abhängigkeit der spezifischen Oberfläche allein von bestimmten Mineralgruppen oder quellfähigen Phasen liegt somit nicht vor. Auf Grund der unterschiedlichen spezifischen Oberflächen verschiedener Tonminerale (abhängig von Art und Korngröße) und der großen mineralogischen Variationsbreite der untersuchten Proben kann mittels BET-Methode somit keine direkte Aussage zum spezifischen Mineralgehalt getroffen werden. Werden die Schichtsilikat-Gehalte mit den Faktoren gem. Tab. 4 (Kap. 5.1) gewichtet, ergeben sich deutlich bessere Zusammenhänge als mit den reinen Schichtsilikatanteilen. Dennoch sind auch diese Zusammenhänge nur schwach. Die Ähnlichkeit zwischen der Korrelation mit den Quellbaren und jener mit der Summe der Schichtsilikate, gewichtet um die Ergebnisse der MB-Versuche an den Reinphasen, zeigt die Bedeutung der quellfähigen Tonminerale für die Gesamtheit der spezifischen Oberfläche im Füller.

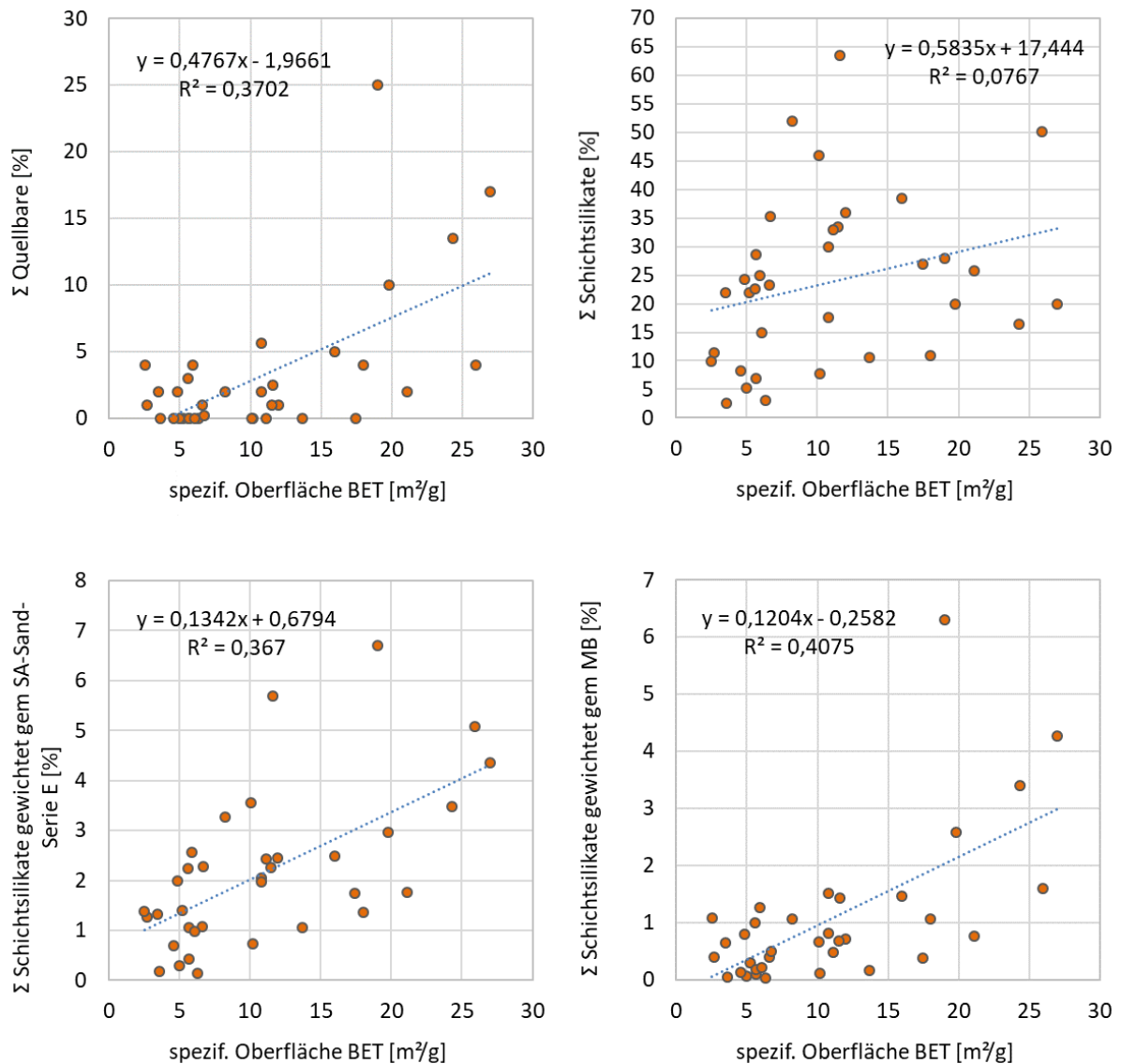


Abb. 27: Mineralogische Korrelationen mit den spezifischen Oberflächen.

5.2.9 Zeta-Potenzial

Die Zeta-Potenziale der untersuchten Proben sind in Tab. 25 (Anhang) angeführt. Sie zeigen Messwerte zwischen -2 und -131,9 (im Mittel -78,1) mV.

In Abb. 28 sind die Zeta-Potenziale in Abhängigkeit von der Mineralogie dargestellt. Der relativ beste Zusammenhang wurde mit der Summe an Glimmer- und Chlorit-Mineralen ermittelt. Bei der Gegenüberstellung mit der Summe aller Tonminerale wird der Zusammenhang schlechter. Dies ist augenscheinlich mit dem Zeta-Potenzial der quellfähigen Tonminerale zu erklären: Bei

Korrelation der Summe Quellbarer aller Füller sind zwei Äste im Diagramm zu erkennen. Ein Ast scheint von quellfähigen Tonmineralen gesteuert zu sein, der andere Ast zeigt, dass auch Füller ohne jegliche Quellbare ähnliche Zeta-Potenziale aufweisen können (offenbar bedingt durch die sonstigen Schichtsilikate). Das Diagramm rechts daneben zeigt die Korrelation der Zeta-Potenziale mit ausschließlich jenen Füllern die quellbare Tonminerale enthalten. Dabei ist ein signifikanter Zusammenhang zu erkennen. Nachdem jedoch die Zusammenhänge der Zeta-Potenziale zu den quellfähigen Mineralen und jene zu Glimmer und Chlorit gegenläufig sind, ist der Zusammenhang bei Betrachtung aller Füller mit allen Tonmineralen schlechter als jener mit den oben betrachteten Mineralgruppen.

Daher wäre eine Qualitätskontrolle z.B. in Hinblick auf quellfähige Tonminerale durch die Bestimmung des Zeta-Potenzials denkbar, für die rasche Analyse der Summe aller auftretenden Schichtsilikate im Füller ist die Methode allerdings nicht geeignet.

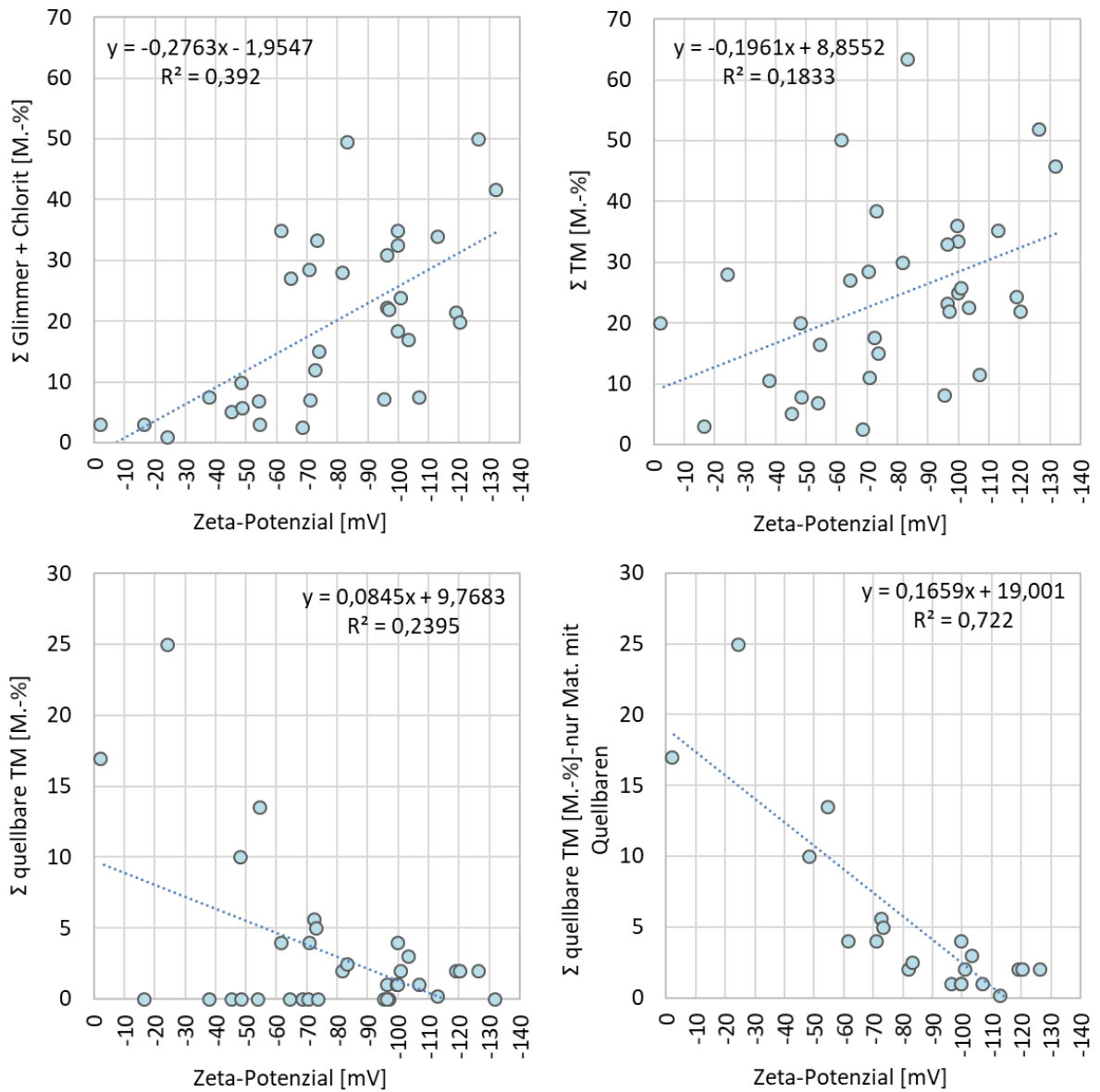


Abb. 28: Zeta-Potentiale in Abhängigkeit von der Mineralogie.

5.2.10 Schüttelabrieb an Füller und Sand

5.2.10.1 Überblick

Einen Überblick zu den Schüttelabrieben an Füller und Sand sowie deren Einstufung gem. in Bayern gültiger Grenzwerte gibt. Tab. 27 im Anhang.

5.2.10.2 Wasserempfindlichkeit von Füller mit dem Schüttelabriebverfahren

Beim Schüttelabrieb am Füller wird der zu prüfende Füller mit einem inerten Sandanteil 0,063/2 mm geprüft. In Abb. 29 sind die relevanten mineralogischen Abhängigkeiten des S_A angeführt. Glimmer und Chlorit zeigen keinen erkennbaren Trend, wohingegen sich bei Kaolinit ein Trend abzeichnet. Analog dem Phänomen der Zeta-Potenziale der quellfähigen Tonminerale (Abb. 28, links unten) tritt bei Kaolinit ein 2-ästiges System in Erscheinung, das aus einer Gruppe von Füllern besteht, die Kaolinit enthalten und deren Schüttelabrieb mit zunehmendem Kaolinitgehalt steigt und aus einer anderen Gruppe von Füllern (ohne Kaolinit), deren Schüttelabriebe von anderen Mineralen gesteuert werden. Der Umstand, dass Kaolinit an erstem Ast relativ deutlich Abhängigkeiten erkennen lässt, Glimmer und Chlorit hingegen nicht, lässt sich gut mit den Erkenntnissen aus den Versuchen mit mineralogischen Reinphasen in Deckung bringen, wo Kaolinit deutlich höhere Schüttelabriebe verursacht hat als Glimmer oder Chlorit (vgl. Abb. 11). Die Summe quellbarer Tonminerale zeigt - analog zu den Reinphasen - die besten Zusammenhänge, u.a. anderem auch deshalb, weil der Großteil der untersuchten Füller solche Minerale enthielt, deren Wirkung dann auch im Schüttelabrieb zur Geltung kommen konnte.

Bei Betrachtung aller Schichtsilikate zeigt sich wie bei den meisten Versuchen eine Verschlechterung des Zusammenhanges, weil die Füller mineralogisch sehr heterogen sind und mineralspezifische Unterschiede in den Abhängigkeiten vorliegen. Unter Anwendung mineralspezifischer Gewichtungsfaktoren, die aus den Abhängigkeiten mit den Reinphasen abgeleitet werden konnten (Tab. 4, Kap. 5.1) verbessert sich der Zusammenhang hingegen deutlich. Dies belegt den grundsätzlichen mineralspezifischen Einfluss auf den Schüttelabrieb am Füller.

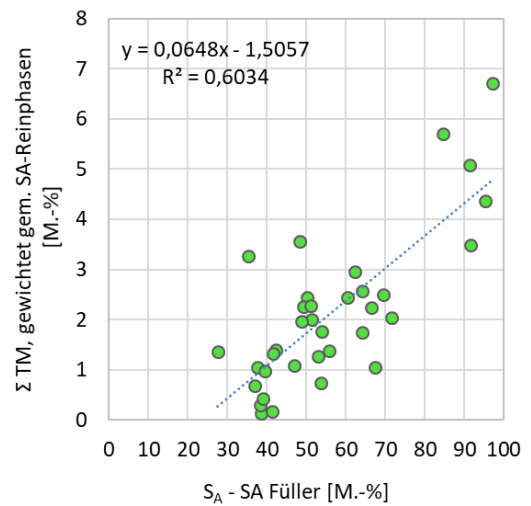
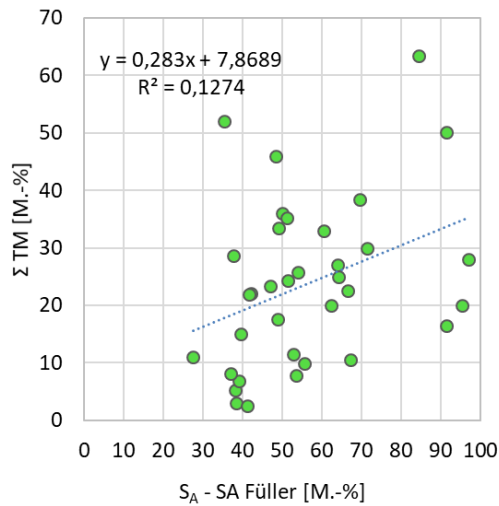
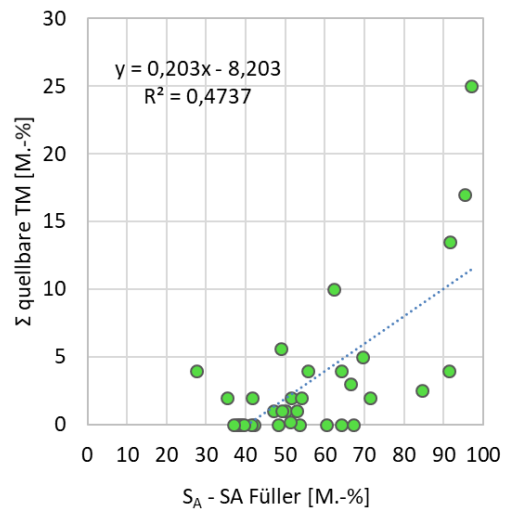
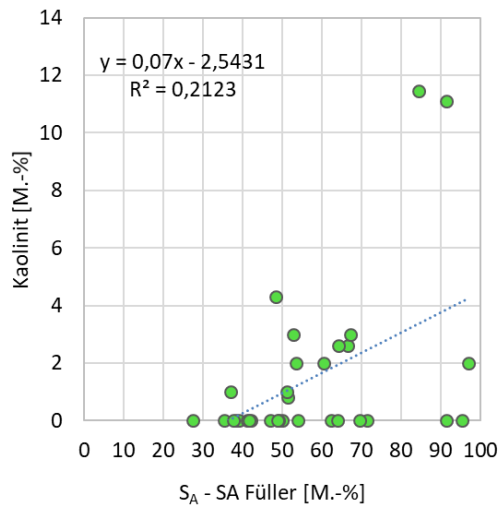
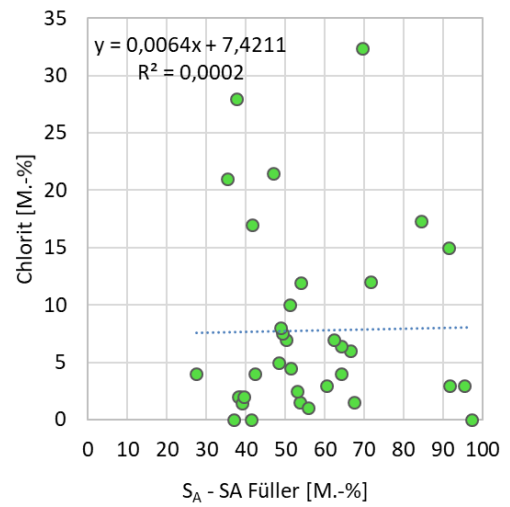
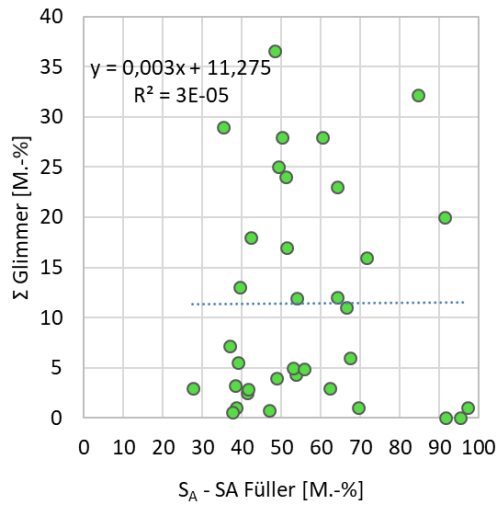


Abb. 29: Mineralogische Abhängigkeiten des S_A .

5.2.10.3 Schüttelabrieb am Sandasphalt

Beim Schüttelabrieb am Sandasphaltpörper kann neben dem Füller auch der Sand von Bedeutung für den mechanischen Widerstand des Prüfkörpers sein. Dies wird durch Vergleich der Serien E und F beurteilt.

Die relevanten mineralogischen Abhängigkeiten des S_E (Schüttelabrieb am Sand mit Eigenfüller - Serie E) sind in Abb. 30 wiedergegeben. Im Wesentlichen lassen sich die gleichen Aussagen wie beim Schüttelabrieb am Füller (Kap. 5.2.10.2) treffen, allerdings mit etwas geringer signifikanten Zusammenhängen. Dies deutet darauf hin, dass der Einfluss des Füllers auch im Sandasphaltpkörper (mit Eigenfüller) dominant ist und bestätigt sich auch bei Gegenüberstellung von S_E und S_F (vgl. Abb. 54 oben).

Die relevanten mineralogischen Abhängigkeiten des S_F (Schüttelabrieb am Sand mit Fremdfüller (Kalksteinmehl) - Serie F) sind in Abb. 31 wiedergegeben. Im Wesentlichen gilt auch hier Analoges zu S_A und S_E . Was auf den ersten Blick den Eindruck von Nonsens-Korrelationen erweckt, weil die Mineralogie des Füllers mit Materialien korreliert wird, deren Füller durch gleiches, „inertes“ Standardkalksteinmehl ersetzt wurden, ergibt auf den zweiten Blick doch Sinn. Dies ist damit zu begründen, dass die Minerale aus dem Eigenfüller aus den gröberen Fraktionen (u.a. auch Sand) entstanden sind. Daher liegt meist eine enge mineralogische Verwandtschaft zwischen Füller und Sand vor. Nicht selten können Sandkörner überwiegend verwittert sein und trotz gewisser Restfestigkeit (mechanische Beständigkeit des Sandkornes) eine sehr ähnliche Mineralogie aufweisen wie die daraus entstandenen (und entstehenden) Füller. Daher sind ähnliche mineralogische Abhängigkeiten wie bei S_E durchaus zu erwarten, die sich auch in der Korrelation mit S_E widerspiegeln. Aus dieser Gegenüberstellung können überproportional reaktive Sande identifiziert werden (vgl. Abb. 54 oben). Glimmer und Kaolinit vermitteln sogar den Eindruck eines klareren 2-ästigen Systems, d.h. wenn ein signifikanter Einfluss dieser Minerale allein vorläge, würden nicht Füller mit v.a. hohen quellfähigen Anteilen die Einflüsse überdecken.

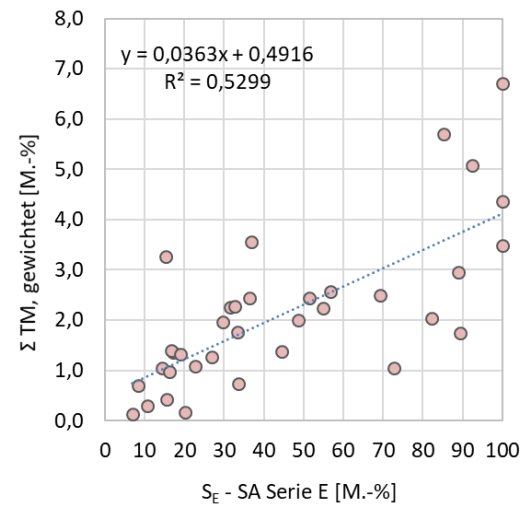
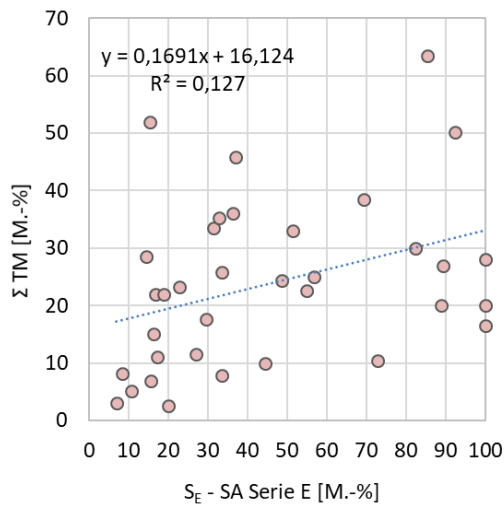
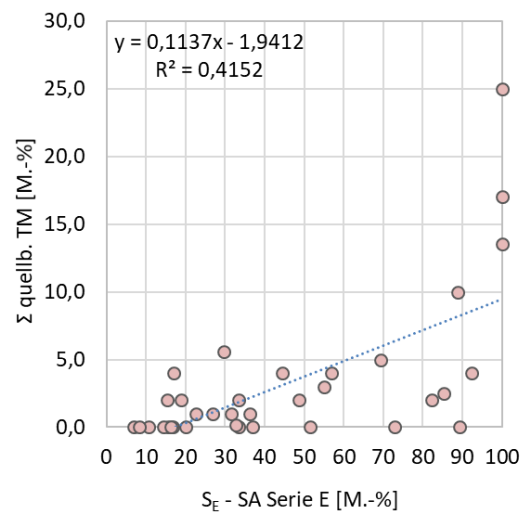
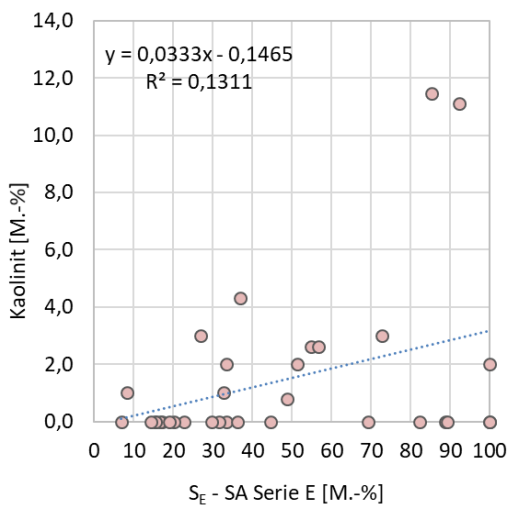
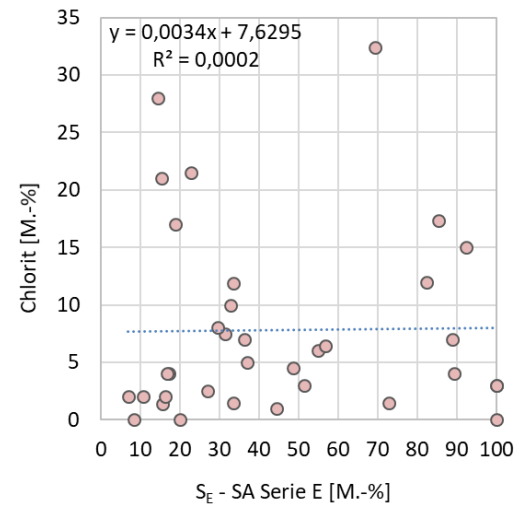
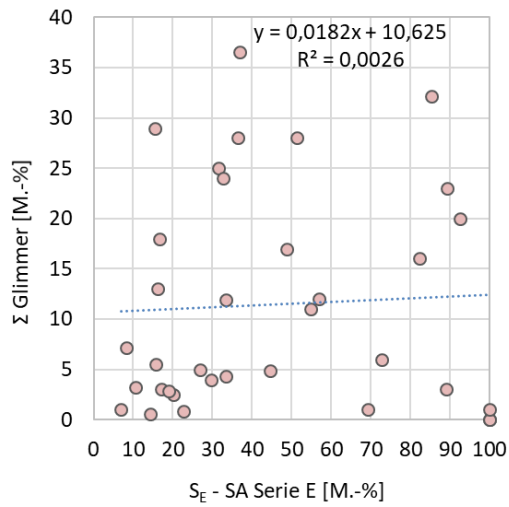


Abb. 30: Mineralogische Abhängigkeiten des S_E (Schüttelabrieb am Sand-Serie E).

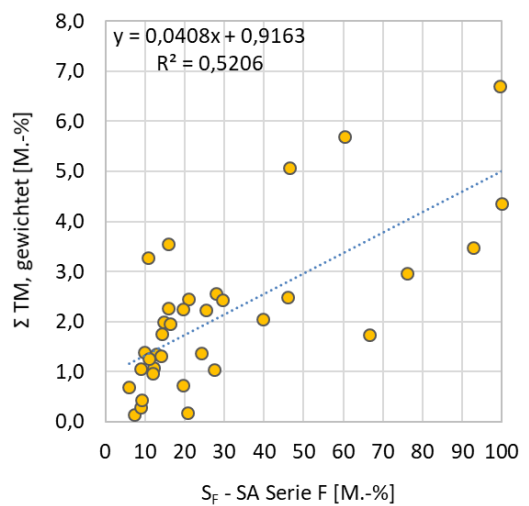
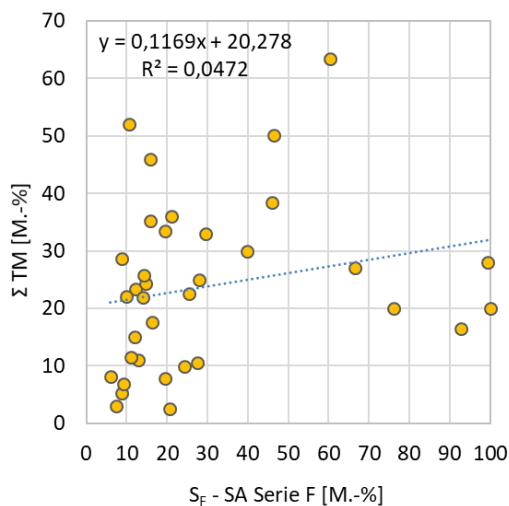
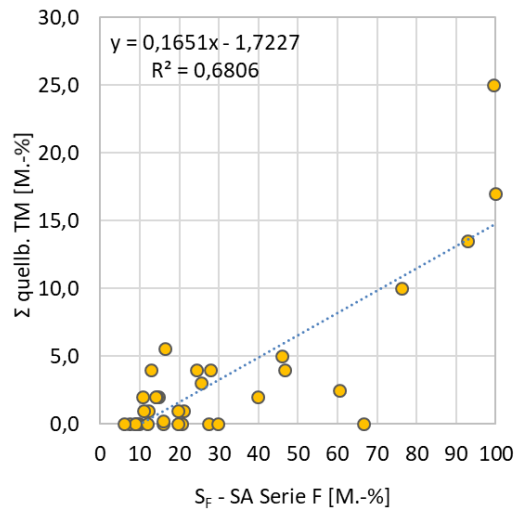
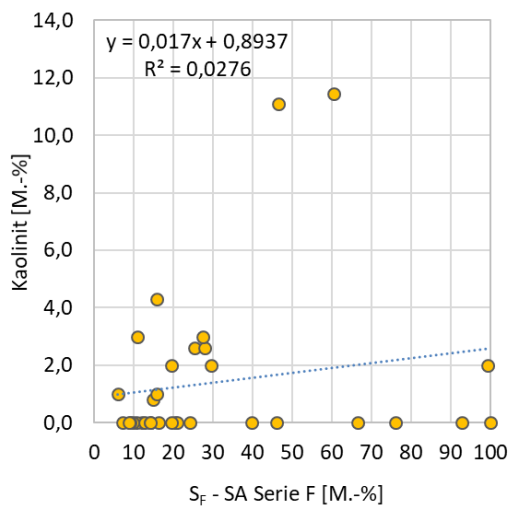
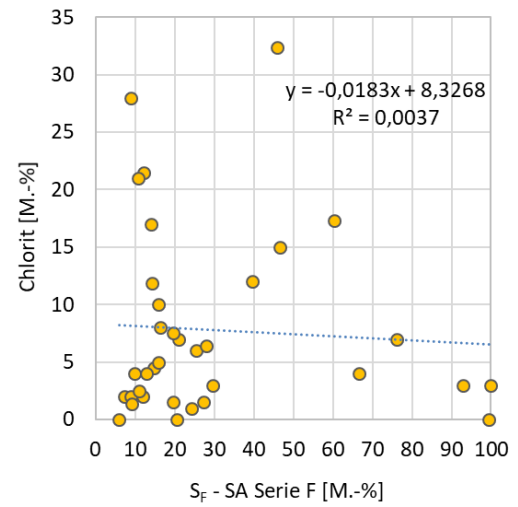
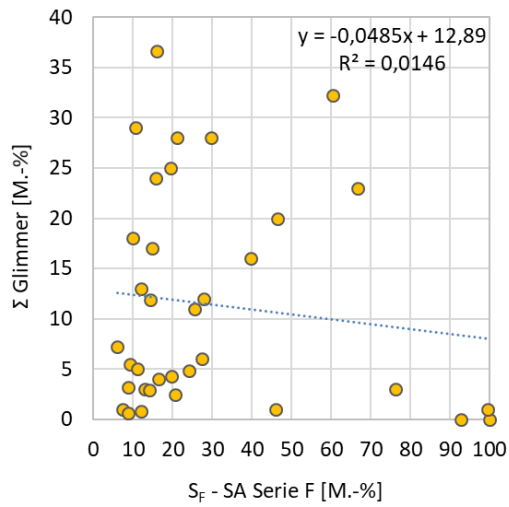


Abb. 31: Mineralogische Abhängigkeiten des S_F (Schüttelabrieb am Sand-Serie F).

5.2.11 Asphaltprüfungen

5.2.11.1 Eigenschaften der ausgewählten Materialien und kritische Anmerkungen

In Tab. 12 wird ein Überblick zu den wesentlichen Eigenschaften der ausgewählten Füller für die Asphaltprüfungen gegeben.

Tab. 12: Überblick zu den wesentlichen Eigenschaften der ausgewählten Füller für die Asphaltprüfungen.

Messwert	Spannweite
S _A [M.-%]	38-91
S _E [M.-%]	7-92
S _F [M.-%]	7-60
MB _F [g/kg]	1,7-10
MB _{trocken} [g/kg]	0,5-4
SE (10) [V.-%]	40-77
Σ Schichtsilikate im Füller [M.-%]	3-63
Σ quellbare Schichtsilikate im Füller [M.-%]	1-4

Die Spektren der Schüttelabrieb-Prüfungen mit Eigenfüller (S_A und S_E) umfassen bewusst sehr weite Bereiche. Mit einem ursprünglich vorgesehenen Material (18_0445) mit extrem hohem MB_F-Wert = 25,8 und 100 % Schüttelabrieb konnte aufgrund der hohen quellbaren Anteile und dem damit verbundenen hohen Bindemittelanspruch kein praxisgerechter Asphalt hergestellt werden. Dies führt dazu, dass nur jene Materialien Asphaltuntersuchungen unterzogen wurden, deren Prüfkörper im Zuge der Schüttelabrieb-Prüfung nicht vollständig zerstört wurden. Hierdurch war auch eine einwandfreie Korrelation mit anderen Parametern möglich, da bei Schüttelabrieb-Werten von 100% nie bekannt ist, wann der Prüfkörper im Zuge der Prüfung vollständig zerfallen ist. Gleichzeitig übersteigt keines der Materialien MB_F = 10, weil höchste Schüttelabriebe (100%) mit extrem hohen MB-Werten assoziiert sind (vgl. Abb. 39). Der positive Nebeneffekt ist, dass dadurch gleichzeitig Materialien ausgeschlossen wurden, die fern jeglicher praktischen Anwendbarkeit liegen.

Durch die Einschränkung der nunmehr neun ausgewählten Sande sind auch die Anteile quellfähiger Phasen auf max. 4 % beschränkt. Dies wiederum hat zur Konsequenz, dass der bei vielen Korrelationen beobachtete 2. Ast (verursacht durch hohe Anteile quellfähiger Tonminerale) wegfällt und Korrelationen mit diesen neun Sanden in vielen Fällen deutlich signifikanter sind als bei Betrachtung aller Sande. Dies trifft besonders auf mineralogische Korrelationen

mit einzelnen Tonmineralgruppen bzw. mit der Summe aller (z.T. versuchsspezifisch gewichteten) Tonminerale zu, eine deutliche Verschlechterung tritt hingegen meist bei Korrelationen mit Quellbaren auf (Ausnahme z.B. SE (10)). Ein Beispiel dafür ist in Abb. 32 angeführt, wo aus Nicht-Korrelationen signifikante Abhängigkeiten werden. Dieser Umstand ist somit v.a. bei den mineralogischen Korrelationen mit den Asphaltprüfungen zu beachten, zumal sich doch überraschend viele (vermeintlich) hoch signifikante Zusammenhänge darstellen lassen.

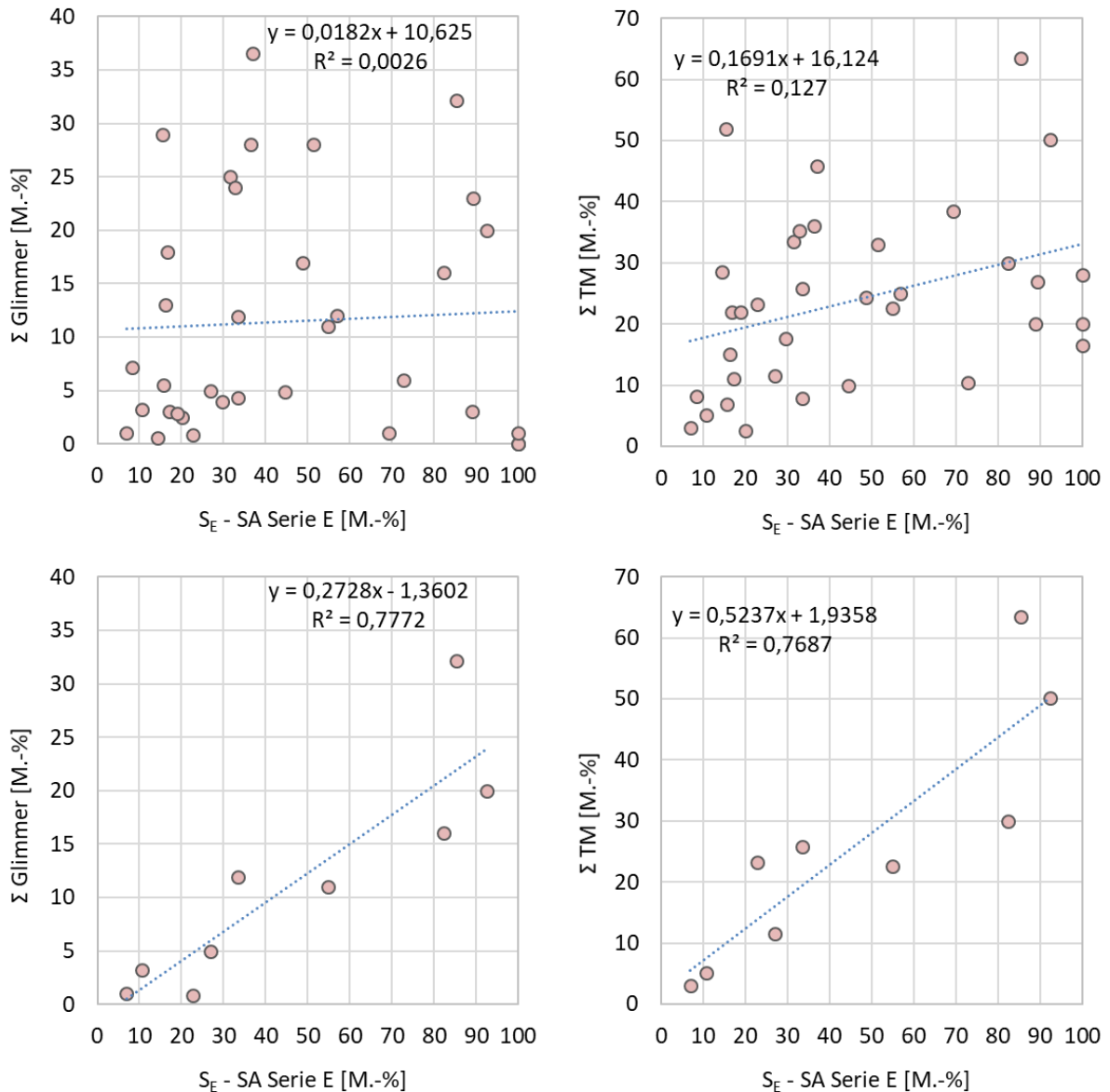


Abb. 32: Korrelationen von SE mit Glimmer und der Summe aller Tonminerale bei Betrachtung aller Füller (oben) und bei Betrachtung der für die Performance-Prüfungen selektierten Füller (unten).

5.2.11.2 Schüttelabrieb an Asphalt-Probekörpern

In Abb. 33 werden die Schüttelabriebe an Asphalt-BK (50) in Abhängigkeit von der Mineralogie als Vertreter der Asphaltuntersuchungen mit den höchsten Korrelationen dargestellt. Wie oben erwähnt sind die guten mineralogischen Zusammenhänge vor dem Hintergrund der Probenauswahl zu interpretieren (Nicht-Berücksichtigung von Proben mit extremen Schüttelabrieben bzw. MB-Werten, die allerdings ohnehin keine praktische Anwendungsrelevanz haben).

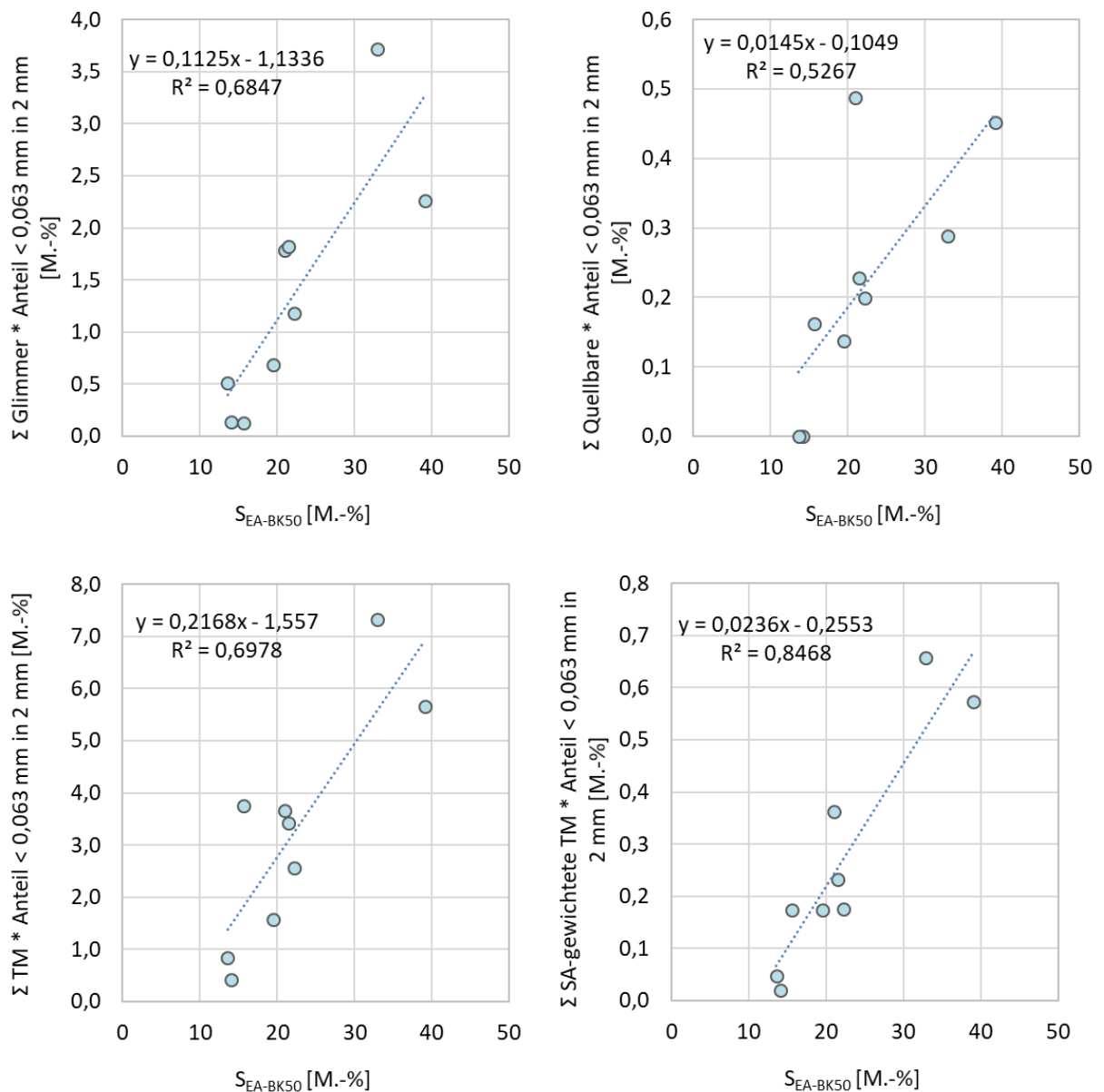


Abb. 33: Schüttelabrieb an Asphalt-BK (50) in Abhängigkeit von der Mineralogie.

5.2.11.3 Untersuchungen mit Haftverbesserern

Um den Nachweis einer Verbesserung der Mörtel­eigenschaften durch Zugabe von Haftverbesserern zu führen, wurden in einer Versuchsserie Untersuchungen mit dem Schüttelabriebverfahren an drei Gesteinsarten mit einem handelsüblichen flüssigen Haftverbesserer (TIB Chemie, Promuk Addibit L 100) durchgeführt. Die Gesteinsarten unterscheiden sich hinsichtlich der Wasserempfindlichkeit (Schüttelabrieb und Quellung) und Petrographie (quarzreicher gebrochener Kies, Rhyolith und Amphibolitbrekzie).

Die ausgewählten Gesteinsarten zeigten bei den vorherigen Untersuchungen im Hinblick auf die Quellung am Sandasphaltprobekörper kaum Unterschiede zwischen der Serie mit Eigen- und Fremdfüller, was bedeutet, dass sowohl im Füller- als auch im Sandbereich quellfähige Tonminerale enthalten sind. Bei allen drei Gesteinsarten wirkt sich der Ersatz des Eigenfüllers durch ein qualifiziertes Kalksteinmehl aber deutlich (positiv) auf das Haftverhalten (Schüttelabrieb) aus. Dies lässt den Schluss zu, dass die problematischen Bestandteile vorwiegend im Fülleranteil angereichert sind.

Die Zugabemenge des Haftverbesserers betrug in einer Serie 2 Promille und in einer zweiten Serie 5 Promille, jeweils bezogen auf die Bindemittelmenge. In den Tab. 13 und Tab. 14 sind die Ergebnisse zusammen mit jenen ohne Haftverbessererzugabe angegeben. Hier ist neben der Serie mit Eigenfüller (die Untersuchungen mit Haftverbessererzugabe wurden ausschließlich mit Eigenfüller durchgeführt) auch die Serie, bei der der Eigenfüller durch ein qualifiziertes Kalksteinmehl ersetzt wird, aufgeführt.

Tab. 13: Vergleich der Schüttelabriebe mit und ohne Haftverbesserer sowie mit Fremdfüller (Kalksteinmehl).

Gesteinsart	Probe	Zugabe Haftverbesserer in Promille (zu Bindemittelmenge)			
		0	2	5	0
		Schüttel-Abrieb Serie E			Schüttel-Abrieb Serie F
		S _E			S _F
		M.-%			M.-%
Rhyolith	18_4025	85,3	73,0	71,1	60,4
Amphibolitbrekzie	18_0084	22,7	21,4	17,0	12,1
Kies, gebrochen	18_0456	26,9	25,7	21,5	11,0

Tab. 14: Vergleich der Quellungen mit und ohne Haftverbesserer sowie mit Fremdfüller (Kalksteinmehl).

Gesteinsart	Probe	Zugabe Haftverbesserer in Promille (zu Bindemittelmenge)			
		0	2	5	0
		Quellung Serie E S _E M.-%			Quellung Serie F S _F M.-%
Rhyolith	18_4025	5,3	5,0	5,2	5,1
Amphibolitbrekzie	18_0084	0,7	0,8	0,7	0,8
Kies, gebrochen	18_0456	0,1	0,2	0,1	0,1

Die Zugabe des Haftverbesserers führt im Hinblick auf die Quellung am Sandasphaltprobekörper zu keiner signifikanten Änderung der Ergebnisse gegenüber der Serie ohne Haftverbessererzugabe. Beim Schüttel-Abrieb zeigt sich mit zunehmender Zugabemenge eine Verbesserung. Diese Verbesserung ist aber im Vergleich zu Serie F, bei der der Fülleranteil durch ein qualifiziertes Kalksteinmehl ersetzt wurde, als nur gering zu bezeichnen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass für die untersuchten feinen Gesteinskörnungen eine Zugabe des verwendeten Haftverbesserer die Wasserempfindlichkeit nicht nennenswert positiv beeinflusst. Hier erscheint der Ersatz des Fülleranteils durch ein qualifiziertes Kalksteinmehl wesentlich zielführender.

5.2.12 Frosthebungsprüfung und Infiltration

In Abb. 34 sind die Frosthebungen und Infiltrationen der untersuchten Materialien dargestellt. Keines der Materialien hat den Grenzwert für Frosthebung von 15 mm überschritten, alle gelten daher als frostsicher.

Es kann kein Zusammenhang zu den Infiltrationsraten hergestellt werden, ebenso wenig kann eine mineralogische Abhängigkeit identifiziert werden. Lediglich schwache Zusammenhänge zu den Wasseraufnahmen im Zuge der Schüttelabriebversuche können erahnt werden.

Zu den Infiltrationen konnten keine Zusammenhänge zu Mineralogie, Sieblinie oder anderen indirekten Versuchen hergestellt werden.

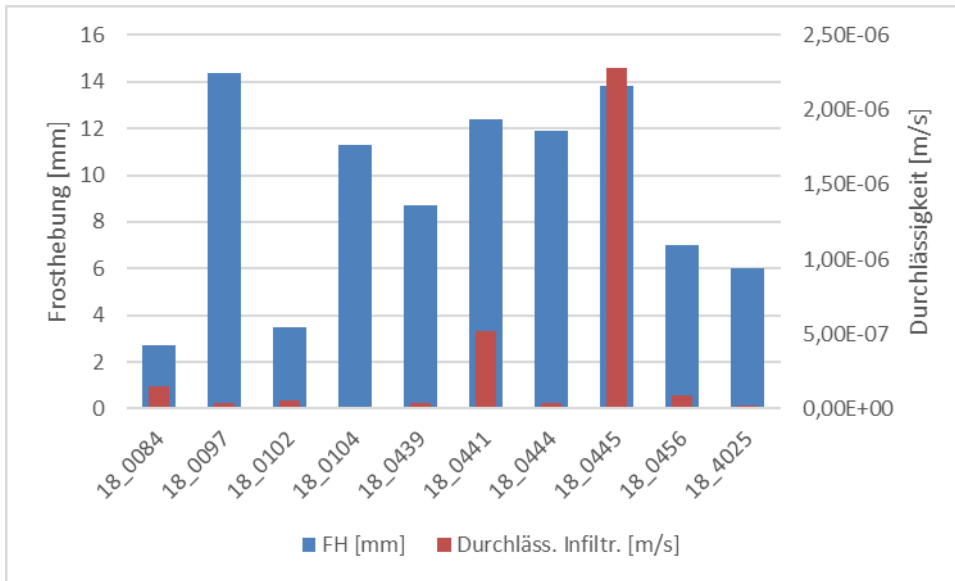


Abb. 34: Frosthebungen und Infiltrationen der untersuchten Materialien.

5.3 Bewertungshintergründe und Wertespreizungen im Überblick

In Abb. 35 sind die Wertespreizungen der untersuchten Materialien bez. MB_F, SE (10) und den Schüttelabrieben an Füller und Sand (mit Eigen- und Fremdfüller) unter Verwendung der gleichen Ordinatenkalierung angeführt. Es ist dadurch gut zu erkennen, dass MB die geringste Wertespreizung aufweist, wohingegen SE und die Schüttelabriebe deutlich höhere Wertespreizungen zeigen. Werden die fünf höchsten und niedrigsten Werte exkludiert („Extrema“), zeigt sich ein realitätsnäheres Bild der Wertespreizungen der verschiedenen Versuche (Abb. 36). Dabei zeigt sich sogar ein noch größerer Unterschied zwischen MB und den anderen Versuchen.

MB ist daher am wenigsten in der Lage, zwischen verschiedenen Materialien klar zu differenzieren, vielmehr weisen sogar 14 von 35 Proben (40%) denselben Messwert von 3,3 g/kg auf (bei Exklusion der Extrema sogar 56%), obwohl diese Proben von sehr unterschiedlicher Mineralogie (s. Abb. 37) und gleichzeitig auch hinsichtlich SE und Schüttelabrieb deutlich unterscheidbar sind.

In Abb. 38 sind die Wertespreizungen der Asphaltuntersuchungen dargestellt, die erwartungsgemäß deutlich unter jenen von SE und Schüttelabrieb liegen, da der Sandanteil maximal 50 M.-% des Gesamtgemisches ausmacht.

Bundesamt für Strassen ASTRA

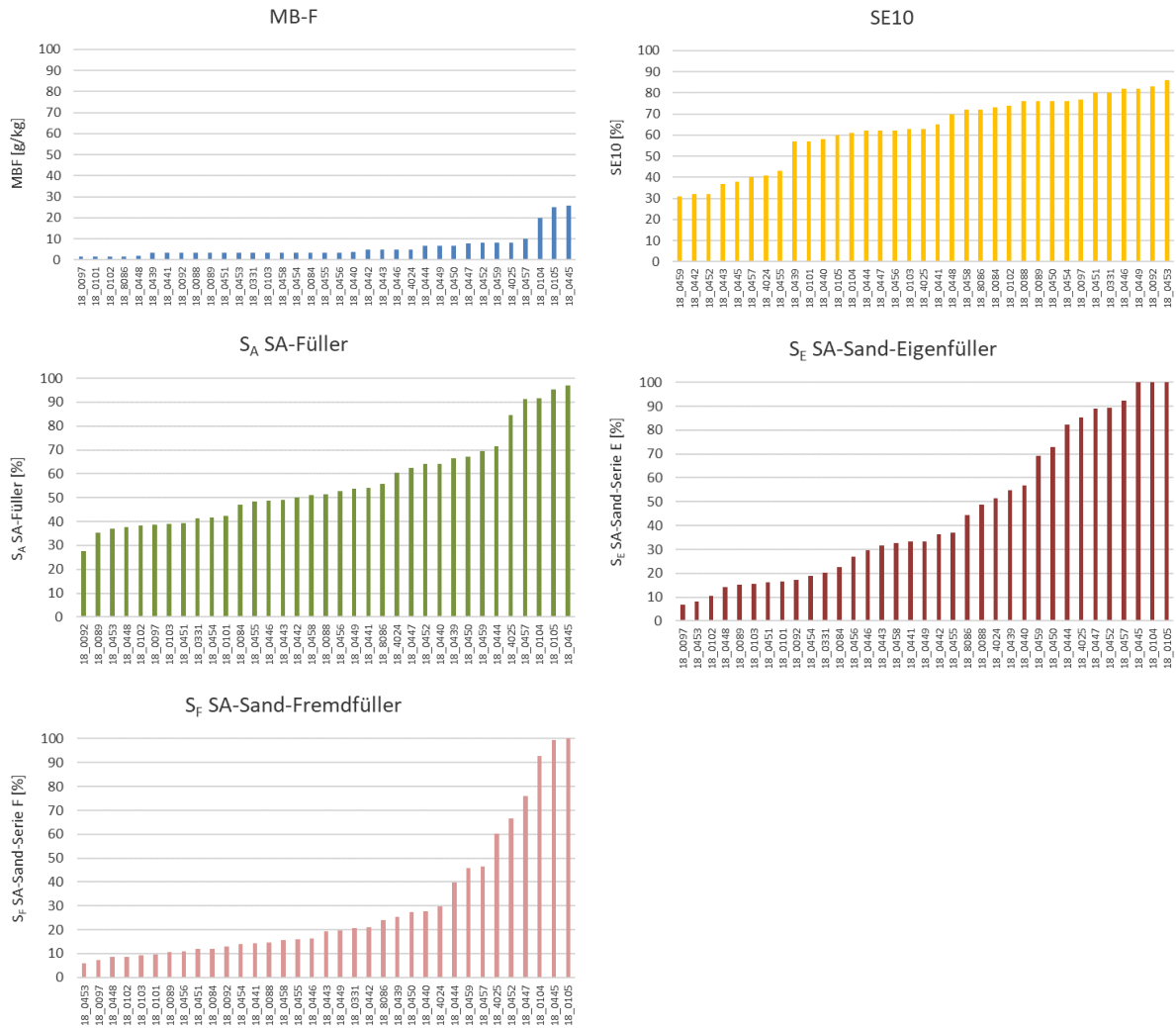


Abb. 35: Überblick zu den Wertespreizungen der untersuchten Materialien bez. MB_F, SE (10) und den Schüttelabtrieben an Füller und Sand (mit Eigen- und Fremdfüller) bei gleicher Ordinaten-skalierung.

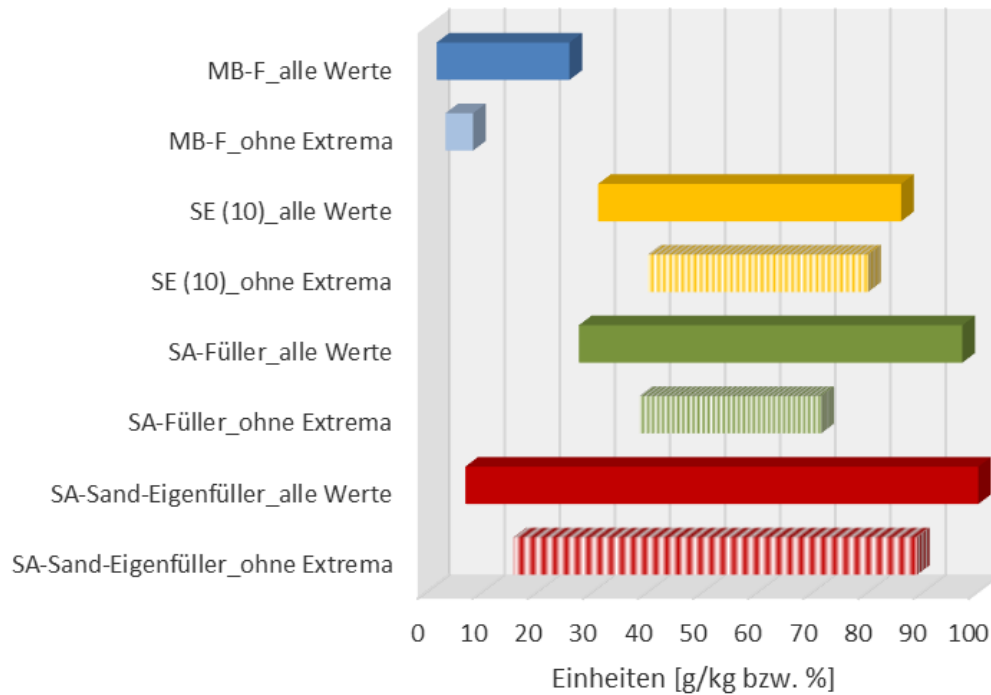


Abb. 36: Kompilierte Darstellung der Wertespreizungen aus Abb. 35 (mit Füllerbezug) und ergänzend der verringerten Wertespreizungen (schraffiert) nach Ausschluss der Extrema (5 höchste und 5 niedrigste Werte).

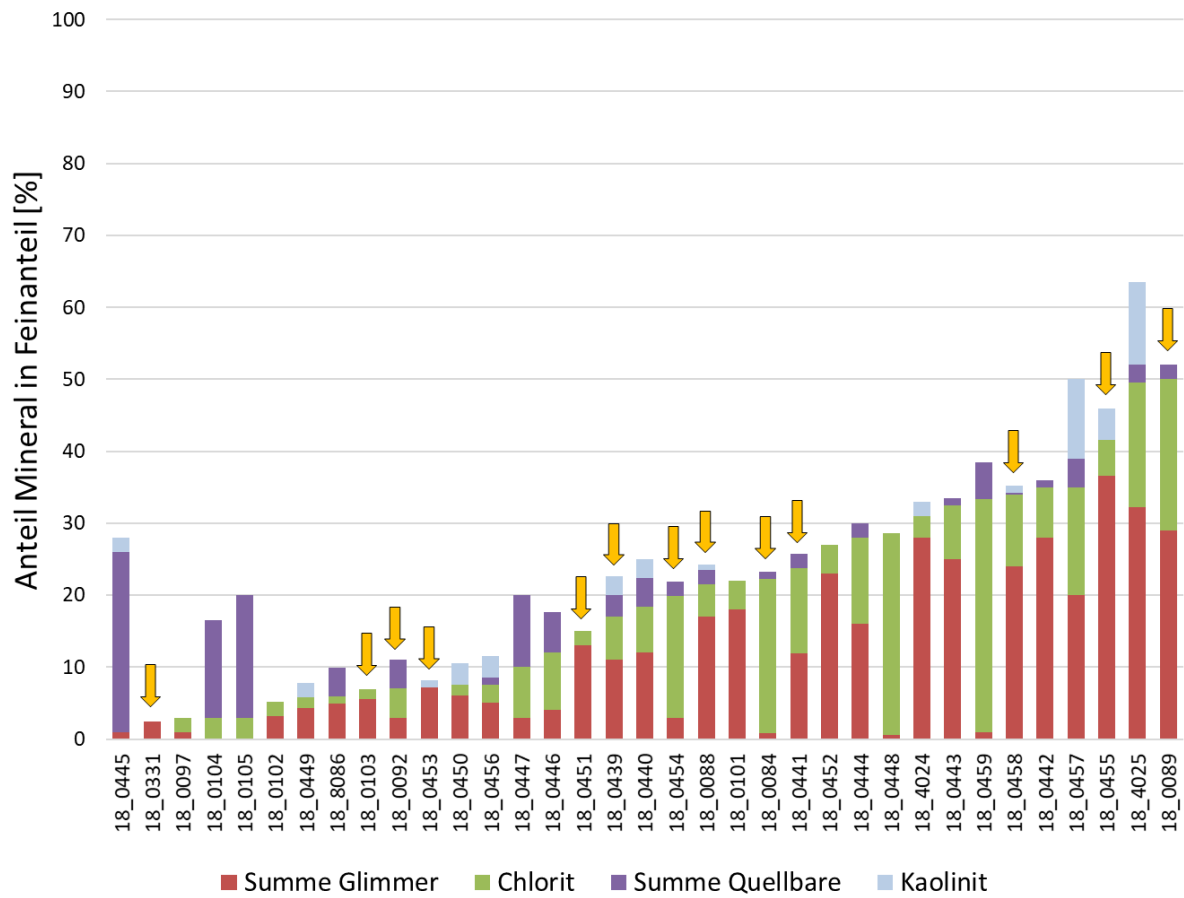


Abb. 37: Darstellung, welche Proben den gleichen MB-Wert von 3,3 aufweisen (gelbe Pfeile).

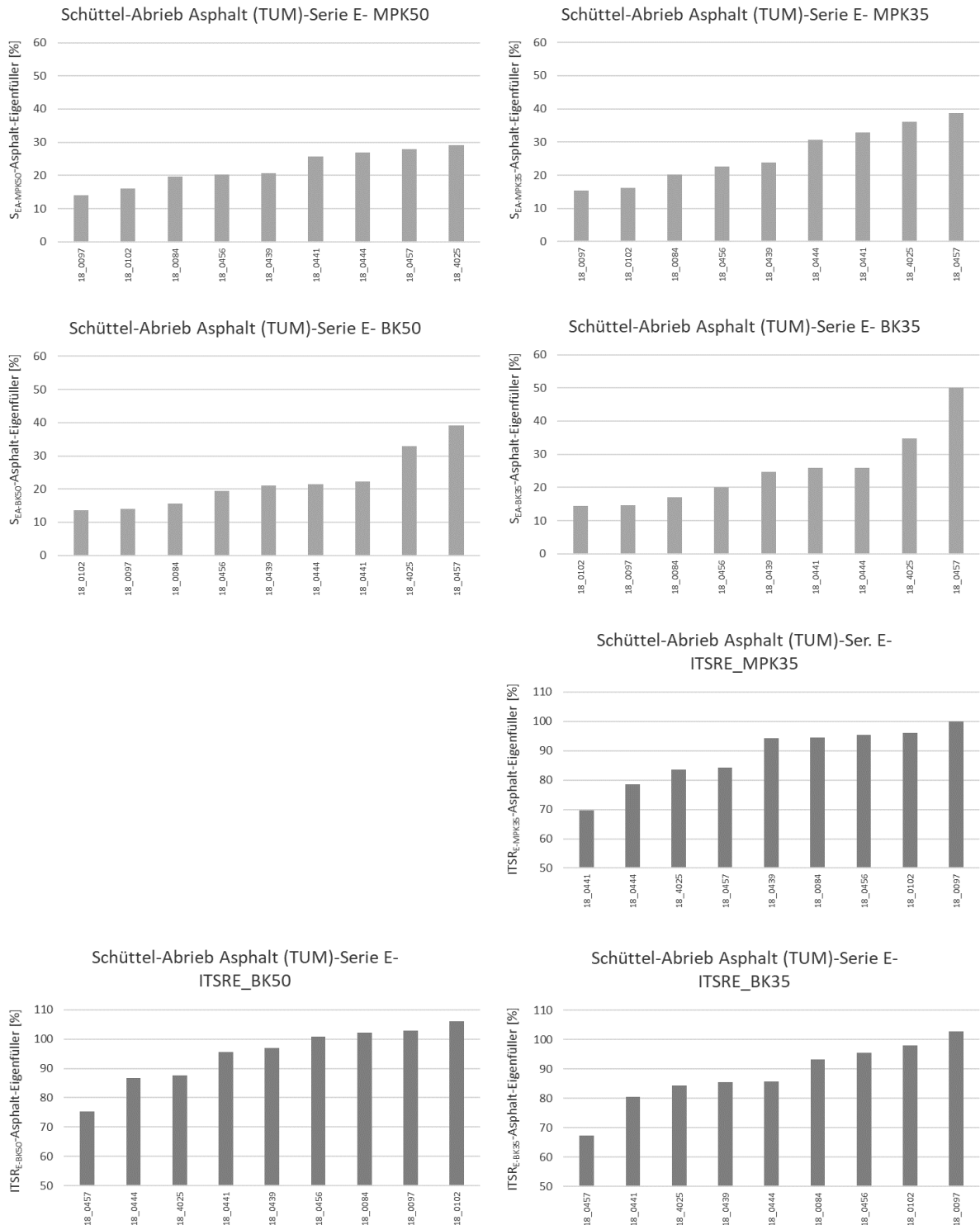


Abb. 38: Überblick zu den Wertespreizungen der untersuchten Materialien bez. Asphaltprüfungen: Schüttelabrieb am MPK und BK (grau) sowie Spaltzugversuche mit ITSR-Werten (dunkelgrau).

5.4 Korrelationen zwischen den Verfahren zur Qualitätsbeurteilung

5.4.1 Überblick

Ergänzend zu den (überwiegend) mineralogischen Korrelationen der vorigen Kapitel wurden Korrelationen zwischen denjenigen Versuchen durchgeführt, die nicht direkt bestimmte Mineralgruppen bestimmen können. Nachdem auf Basis der Erkenntnisse mit den Reinphasen (Kap. 5.1) von linearen Zusammenhängen ausgegangen werden kann, wurden letztlich 276 lineare Korrelationen durchgeführt, deren Bestimmtheitsmaße (gerundet auf 0,01) in Tab. 15 angegeben sind. Zur Gewinnung eines Überblicks sind die Bestimmtheitsmaße nach deren Höhe farblich abgestuft (oben) sowie durch Symbole kategorisiert (unten).

Tab. 15: Bestimmtheitsmaße (gerundet auf 0,01) linearer Korrelationen (oben: farbliche Abstufung der Bestimmtheitsmaße, unten: Kategorisierung durch Symbole, Legende s. dort).

	MB (trocken)	MB (original)	Zeta -P.	BET	SE (10)	W	Q	S _A	W _E	Q _E	S _E	W _F	Q _F	S _F	S _{EA} - MPK50	S _{EA} - MPK35	S _{EA} - BK50	S _{EA} - BK35	ITSR _E - MPK35	ITSR _E - BK50	ITSR _E - BK35	FH	Durch- läss.
MB _F	0,90	0,85	0,33	0,55	0,12	0,09	0,87	0,68	0,31	0,90	0,61	0,70	0,83	0,85	0,75	0,78	0,87	0,86	0,24	0,92	0,66	0,18	0,49
MB _(trocken)		0,99	0,32	0,56	0,21	0,06	0,72	0,68	0,28	0,83	0,69	0,68	0,71	0,93	0,55	0,65	0,90	0,89	0,10	0,85	0,64	0,19	0,55
MB _(original)			0,31	0,57	0,23	0,04	0,68	0,67	0,24	0,79	0,73	0,64	0,68	0,93	0,50	0,61	0,87	0,89	0,08	0,85	0,67	0,19	0,52
Zeta-P.				0,22	0,00	0,02	0,38	0,15	0,00	0,22	0,14	0,19	0,37	0,28	0,20	0,12	0,02	0,02	0,14	0,01	0,10	0,19	0,16
BET					0,18	0,11	0,48	0,45	0,25	0,39	0,52	0,33	0,44	0,56	0,48	0,66	0,56	0,65	0,55	0,60	0,76	0,29	0,18
SE(10)						0,02	0,05	0,25	0,05	0,09	0,26	0,08	0,04	0,20	0,46	0,59	0,73	0,82	0,14	0,73	0,78	0,16	0,61
W							0,09	0,04	0,64	0,02	0,03	0,09	0,09	0,04	0,44	0,59	0,69	0,74	0,17	0,71	0,63	0,32	0,29
Q								0,57	0,29	0,94	0,49	0,62	0,97	0,73	0,61	0,65	0,74	0,69	0,22	0,77	0,49	0,20	0,36
S _A									0,26	0,51	0,88	0,51	0,47	0,75	0,77	0,81	0,88	0,86	0,24	0,89	0,72	0,12	0,23
W _E										0,29	0,24	0,47	0,27	0,27	0,84	0,84	0,68	0,65	0,50	0,81	0,60	0,32	0,34
Q _E											0,52	0,58	0,99	0,80	0,59	0,55	0,53	0,48	0,24	0,63	0,34	0,19	0,33
S _E												0,49	0,44	0,82	0,79	0,77	0,75	0,75	0,30	0,87	0,66	0,12	0,15
W _F													0,59	0,69	0,57	0,43	0,22	0,19	0,43	0,40	0,18	0,31	0,57
Q _F														0,71	0,44	0,38	0,39	0,30	0,14	0,39	0,18	0,19	0,38
S _F															0,71	0,68	0,73	0,65	0,21	0,73	0,47	0,14	0,30
S _{EA} -MPK50																0,95	0,70	0,66	0,66	0,74	0,71	0,01	0,06
S _{EA} -MPK35																	0,84	0,82	0,63	0,82	0,83	0,03	0,11
S _{EA} -BK50																		0,97	0,25	0,86	0,77	0,00	0,00
S _{EA} -BK35																			0,26	0,91	0,86	0,01	0,01
ITSR _E -MPK35																				0,34	0,47	0,12	0,43
ITSR _E -BK50																					0,79	0,09	0,00
ITSR _E -BK35																						0,02	0,21
FH																							0,17
Durchläss.																							

	MB (trocken)	MB (original)	Zeta -P.	BET	SE (10)	W	Q	S _A	W _E	Q _E	S _E	W _F	Q _F	S _F	S _{EA} - MPK50	S _{EA} - MPK35	S _{EA} - BK50	S _{EA} - BK35	ITSR _E - MPK35	ITSR _E - BK50	ITSR _E - BK35	FH	Durch- läss.
MB _F	++	+	-	o	-		+	o	-	+	o	o	+	+	+	+	+	+	-	++	o	-	o
MB _(trocken)		++	-	o	-		+	o	-	+	o	o	+	++	o	o	++	+	-	+	o	-	o
MB _(original)			-	o	-		o	o	-	+	+	o	o	++	o	o	+	+	-	+	o	-	o
Zeta-P.							-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BET							-	-	o	o	-	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	+	-
SE(10)															o	o	+	+	-	+	+	-	o
W											o				o	o	o	+	-	+	o	-	-
Q									o	-	++	o	o	++	+	o	o	+	o	-	+	o	-
S _A										-	o	+	o	o	+	+	+	+	-	+	+	-	-
W _E											-	-	o	-	+	+	o	o	o	+	o	-	-
Q _E												o	o	++	+	o	o	o	o	-	o	-	-
S _E												o	o	+	+	+	+	+	-	+	o	-	-
W _F													o	o	o	o	-	-	o	o	-	-	o
Q _F														+	o	-	-	-	-	-	-	-	-
S _F															+	o	+	o	-	+	o	-	-
S _{EA} -MPK50																++	o	o	o	+	+		
S _{EA} -MPK35																	+	+	o	+	+		-
S _{EA} -BK50																		++	-	+	+		
S _{EA} -BK35																				++	+		
ITSR _E -MPK35																					-	o	o
ITSR _E -BK50																						+	
ITSR _E -BK35																							-
FH																							-
Durchläss.																							

	MB (trocken)	MB (original)	Zeta -P.	BET	SE (10)	W	Q	S _A	W _E	Q _E	S _E	W _F	Q _F	S _F	S _{EA} - MPK50	S _{EA} - MPK35	S _{EA} - BK50	S _{EA} - BK35	ITSR _E - MPK35	ITSR _E - BK50	ITSR _E - BK35	FH	Durch- läss.
MB _F	++	+	-	o	-		+	o	-	+	o	o	+	+	+	+	+	+	-	++	o	-	o
MB _(trocken)		++	-	o	-		+	o	-	+	o	o	+	++	o	o	++	+	-	+	o	-	o
MB _(original)			-	o	-		o	o	-	+	+	o	o	++	o	o	+	+	-	+	o	-	o
Zeta-P.							-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BET							-	-	o	o	-	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	+	-
SE(10)															o	o	+	+	-	+	+	-	o
W											o				o	o	o	+	-	+	o	-	-
Q									o	-	++	o	o	++	+	o	o	+	o	-	+	o	-
S _A										-	o	+	o	o	+	+	+	+	-	+	+	-	-
W _E											-	-	o	-	+	+	o	o	o	+	o	-	-
Q _E												o	o	++	+	o	o	o	o	-	o	-	-
S _E												o	o	+	+	+	+	+	-	+	o	-	-
W _F													o	o	o	o	-	-	o	o	-	-	o
Q _F														+	o	-	-	-	-	-	-	-	-
S _F															+	o	+	o	-	+	o	-	-
S _{EA} -MPK50																++	o	o	o	+	+		
S _{EA} -MPK35																	+	+	o	+	+		-
S _{EA} -BK50																		++	-	+	+		
S _{EA} -BK35																				++	+		
ITSR _E -MPK35																					-	o	o
ITSR _E -BK50																						+	
ITSR _E -BK35																							-
FH																							-
Durchläss.																							

Auf Basis der Bestimmtheitsmaße können in den folgenden Kapiteln Aussagen zu sinnvollen und signifikanten Zusammenhängen getroffen werden.

5.4.2 MB

MB_F (an 0/0,125 mm) zeigt sehr ähnliches Verhalten wie MB an 0/2 mm (Dominanz der Feinanteile sowie größtenteils ähnliche Mineralogie in den Sandfraktionen). MB_F korreliert besser mit den **Quellungen aus den Schüttelabrieben** als MB am Sand.

Die **Gegenüberstellungen mit BET** (spezifische Oberflächen) zeigen mittlere Signifikanzen (vgl. Kap. 5.4.4), deutliche Wertespreizung bei BET stehen auch hier gleichen MB-Werten gegenüber (vgl. Schüttelabriebe unten).

Bei **Korrelation mit den Schüttelabrieben** zeigt die Gegenüberstellung mit S_F die besten Zusammenhänge (Abb. 39). Dies kann damit erklärt werden, dass MB deutlich stärker auf quellbare Tonminerale anspricht (in Relation zu den übrigen Schichtsilikaten) als dies beim Schüttelabrieb der Fall ist (vgl. Kap. 5.1). Die Verbesserung des Zusammenhanges von S_E zu S_F erklärt sich damit, dass der Anteil an Quellbaren in Relation zu den übrigen Schichtsilikaten innerhalb der Sandfraktion üblicher Weise deutlich reduziert wird (und sich nur mehr auf verwitterte Sandkörner beschränkt), wodurch Proben mit hohen Anteilen an Quellbaren stärkere Reduktionen an Schüttelabrieb-Werten erfahren als andere (der hohe Anteil an restlichen Schichtsilikaten kommt stärker zum Tragen). Der Zusammenhang zu S_F ist bei MB_{trocken} sogar noch höher (Abb. 40), offensichtlich weil auch MB_{trocken} an der Sandfraktion durchgeführt wird. Trotz des sehr signifikanten Zusammenhanges zeigt sich aber auch hier ein oft beobachtetes Phänomen, dass zumindest einige Proben mit gleichem MB-Wert eine recht deutliche Wertespreizung beim Schüttelabrieb aufweisen. Generell sei hinzugefügt, dass korrekter Weise jene Proben mit 100 % Schüttelabrieb (s. S_E und S_F) nicht an der Korrelation teilnehmen sollten, weil unklar ist, wann sich die Prüfkörper völlig aufgelöst haben, denn wenn sie dies nicht ganz am Ende der Versuchsdurchführung getan haben, müssten eigentlich theoretische Schüttelabrieb-Werte $> 100\%$ herauskommen, was den Korrelationen zu gut käme. Ein Ausweg zu diesem nicht lösbaren Dilemma wäre (ohne die Prüfdauer des Schüttelabriebs zu verkürzen und damit Bewertungshintergründe zu verändern) die Gültigkeit von Zusammenhängen zwischen Schüttelabrieb und MB auf $MB_F \leq 10$ (vgl. Abb. 39, links und Mitte) bzw. $MB_{\text{trocken}} \leq 6$ (vgl. Abb. 40, rechts bzw. Mitte) zu begrenzen. Unter Ausschluss von Werten MB_F -Werten > 10 und/oder MB_{trocken} -Werten > 6 (Klassifikation solcher Materialien als per se für Asphalt nicht geeignet) würde dies brauchbare signifikante Zusammenhänge erlauben.

Bei den **Gegenüberstellungen mit Asphaltversuchen** zeigen sich sehr gute Zusammenhänge mit den Schüttelabrieben, aber auch mit den Spaltzugversuchen (ITSR) (Abb. 41).

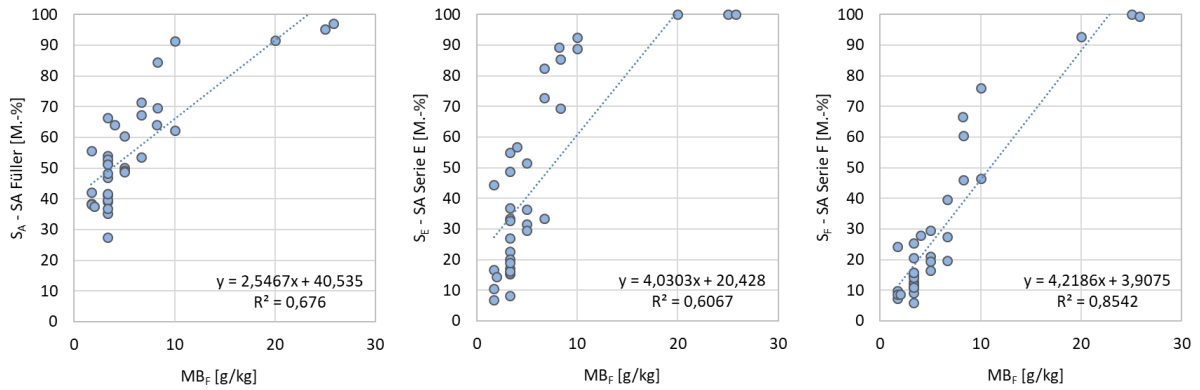


Abb. 39: Korrelationen von MB_F mit den Schüttelabrieben: S_A , S_F und S_E .

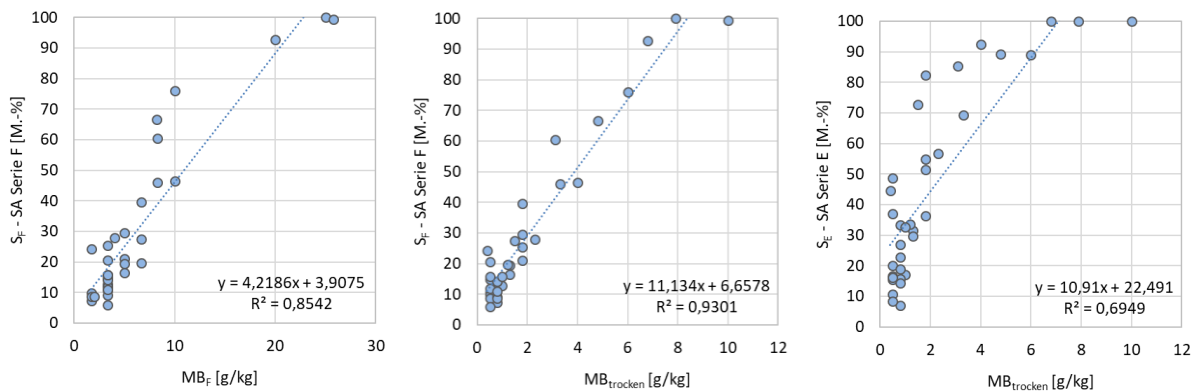


Abb. 40: Korrelationen von S_F mit MB_F (links) und $MB_{trocken}$ (Mitte) sowie von S_E mit $MB_{trocken}$ (rechts).

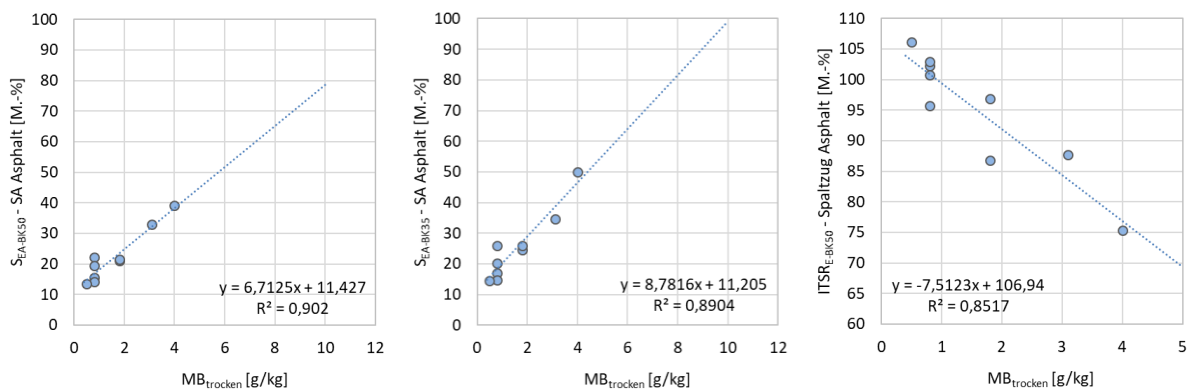


Abb. 41: Korrelationen von $MB_{trocken}$ mit Asphaltversuchen: $S_{EA-BK50}$, $S_{EA-BK35}$ und $ITSR_{E-BK50}$.

5.4.3 Zeta-Potenzial

Es zeigen sich lediglich schwache Zusammenhänge zu den Quellungen im Rahmen der Schüttelabrieb-Versuche.

5.4.4 Spezifische Oberfläche (BET)

Bei **Gegenüberstellung mit dem SE** zeigt sich nur geringer negativer Trend, wohingegen die Korrelationen **mit MB** deutlich besser sind (Abb. 42). Der Zusammenhang zwischen spezifischer Oberfläche und MB_F ist trotz der erkennbaren Titrationsstufen beim Spektrum der MB-Werte besser als der Zusammenhang zur Mineralogie. Dies kann damit begründet werden, dass unterschiedliche Schichtsilikate auf unterschiedlichen Wertenniveaus liegen (vgl. Reinphasen, Kap. 5.1), und beide Versuche daher nicht in der Lage sind, Zusammenhänge zu Gehalten an bestimmten Schichtsilikaten herzustellen, sobald es sich um unterschiedliche Mischungen handelt. Nachdem dies aber auf beide Versuche zutrifft, ist es plausibel, dass beide Versuche dennoch ähnliche Aussagekraft hinsichtlich der Gesamtheit der Schichtsilikate aufweisen. Auch hier zeigt sich, dass die quellbaren Tonminerale überproportionale MB-Adsorptionen in Relation zu den anderen Mineralen aufweisen, welche bei den BET-Messungen nicht im gleichen Ausmaß zu verzeichnen sind.

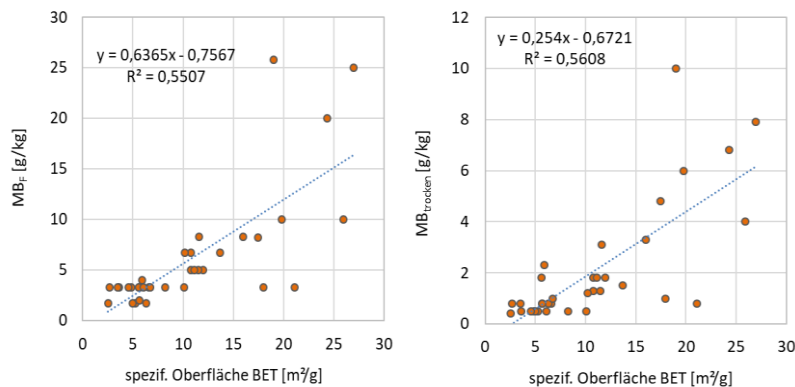


Abb. 42: Korrelation spezifische Oberfläche / MB_F (links) und - / $MB_{trocken}$ (rechts).

Die Korrelationen **mit den Schüttelabrieben** (Abb. 43) zeigen mittlere Signifikanzen, was belegt, dass ein Einfluss gegeben ist, der Schüttelabrieb aber nicht nur von der Größe der spezifischen Oberfläche abhängt.

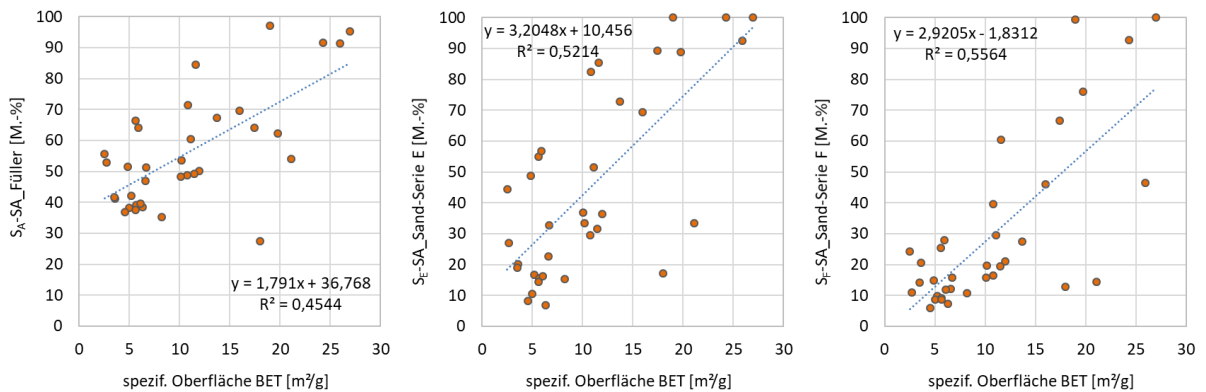


Abb. 43: Korrelation spezifische Oberfläche mit den Schüttelabrieben: S_A (links), S_E (Mitte) und S_F (rechts).

Bei Gegenüberstellung der spezifischen Oberflächen **mit Asphaltversuchen** (Schüttelabrieb Abb. 44 und Reduktion der Spaltzugfestigkeit Abb. 45) zeigen sich grundsätzlich klare Zusammenhänge. Dabei fällt auf, dass jene Prüfkörper mit geringerer Verdichtungsarbeit bzw. nur 35 Schlägen („35“) offenbar auf Grund besserer Wasserzugänglichkeit höhere Wertespreizungen und Bestimmtheitsmaße aufweisen. Die BK zeigen überdies im Vergleich zu den MPK tendenziell signifikantere Zusammenhänge, was vermutlich auf die wasserzugänglichen Gesteinsoberflächen an den Schnittflächen der BK (im Gegensatz zu den MPK) zurückzuführen ist.

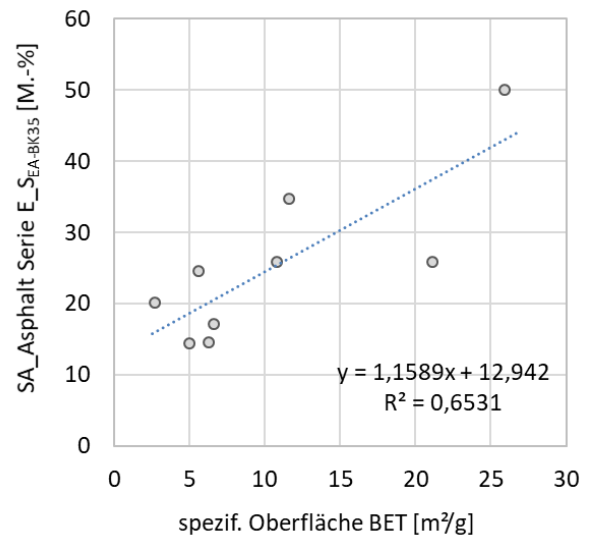
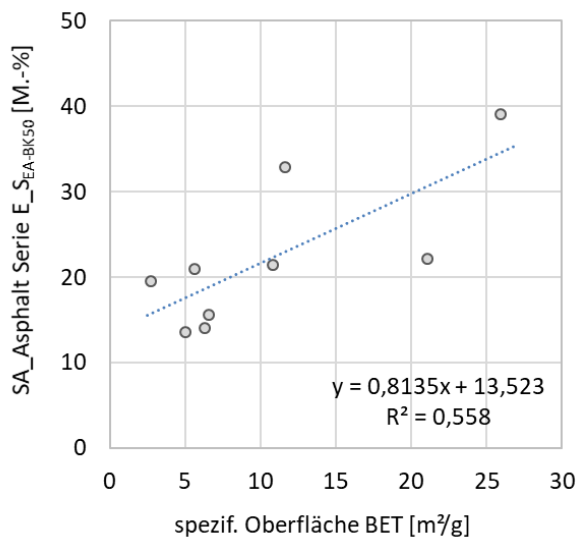
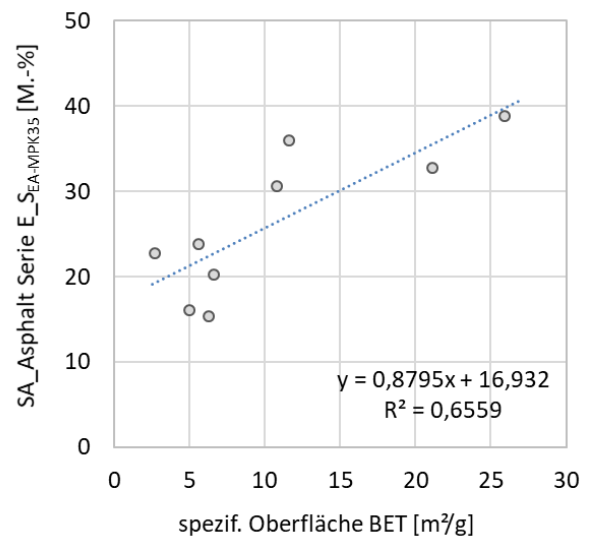
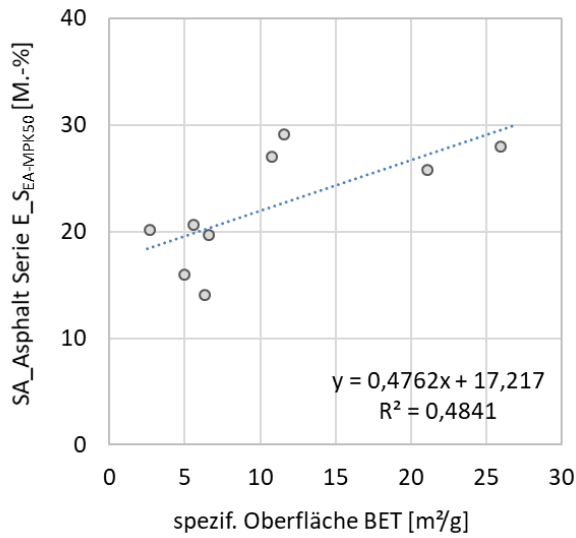


Abb. 44: Korrelationen zwischen spezifischer Oberfläche und Schüttelabrieb am Asphalt mit Eigenfüller (oben MPK, unten BK).

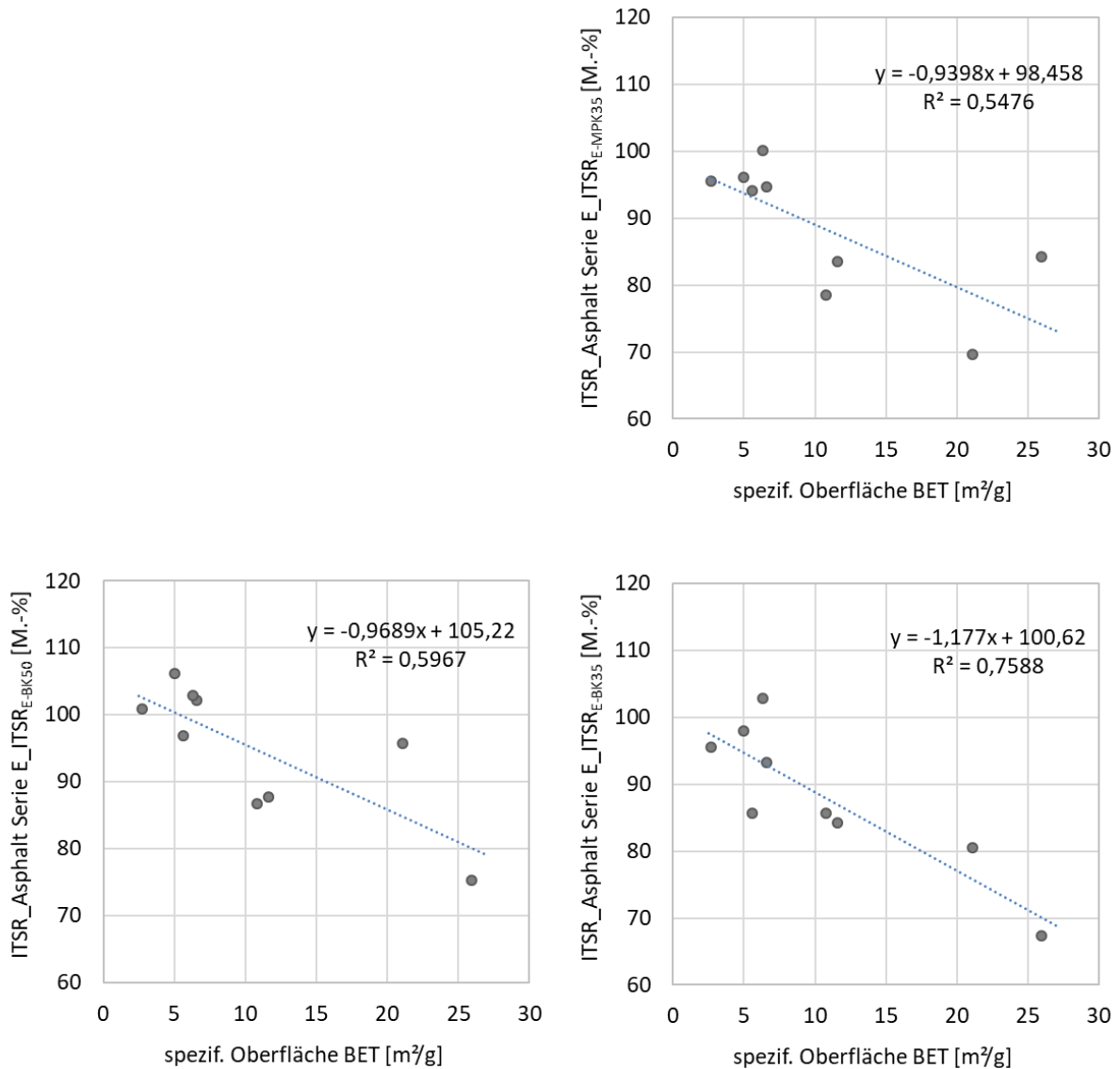


Abb. 45: Korrelationen zwischen spezifischer Oberfläche und ITSR (Reduktion der Spaltzugfestigkeit) am Asphalt mit Eigenfüller (oben MPK, unten BK).

5.4.5 SE (10)

Das SE zeigt keine relevanten Korrelationen zu **MB** oder den Schüttelabrieben.

Bei Gegenüberstellung mit den **Asphaltversuchen** hingegen können mittlere bis sogar hoch signifikante Zusammenhänge festgestellt werden. Aus Abb. 46 ist ersichtlich, dass die Schüttelabriebe am BK zu deutlich besseren Korrelationen führen als jene am MPK, wobei

gleichzeitig die Prüfkörper mit geringerer Verdichtungsarbeit jeweils höhere Signifikanzen aufweisen.

Abb. 47 zeigt die Korrelationen von SE (10) mit ITSR (Spaltzugrelationen) am Asphalt, wo gleiche Trends auftreten wie bei den Schüttelabrieb-Versuchen.

Diese Erkenntnisse aus den Korrelationen zwischen SE (10) und den Asphaltversuchen hinsichtlich Wertespreizung und Signifikanz decken sich somit im Wesentlichen mit jenen zwischen spezifischer Oberfläche und Schüttelabrieb am Asphalt (Kap. 5.4.4).

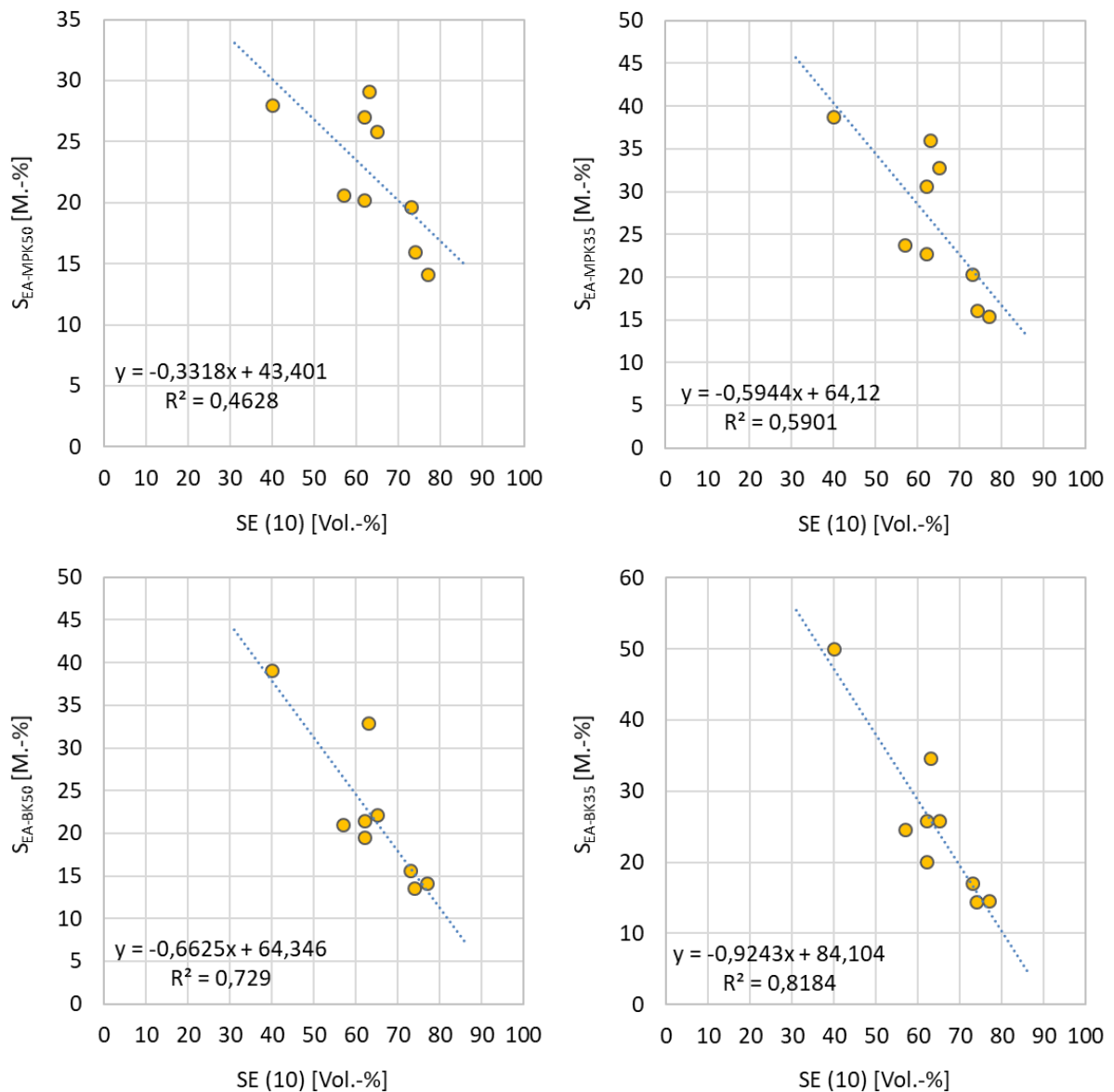


Abb. 46: Korrelationen von SE (10) mit Schüttelabrieb am Asphalt (oben: MPK, unten BK).

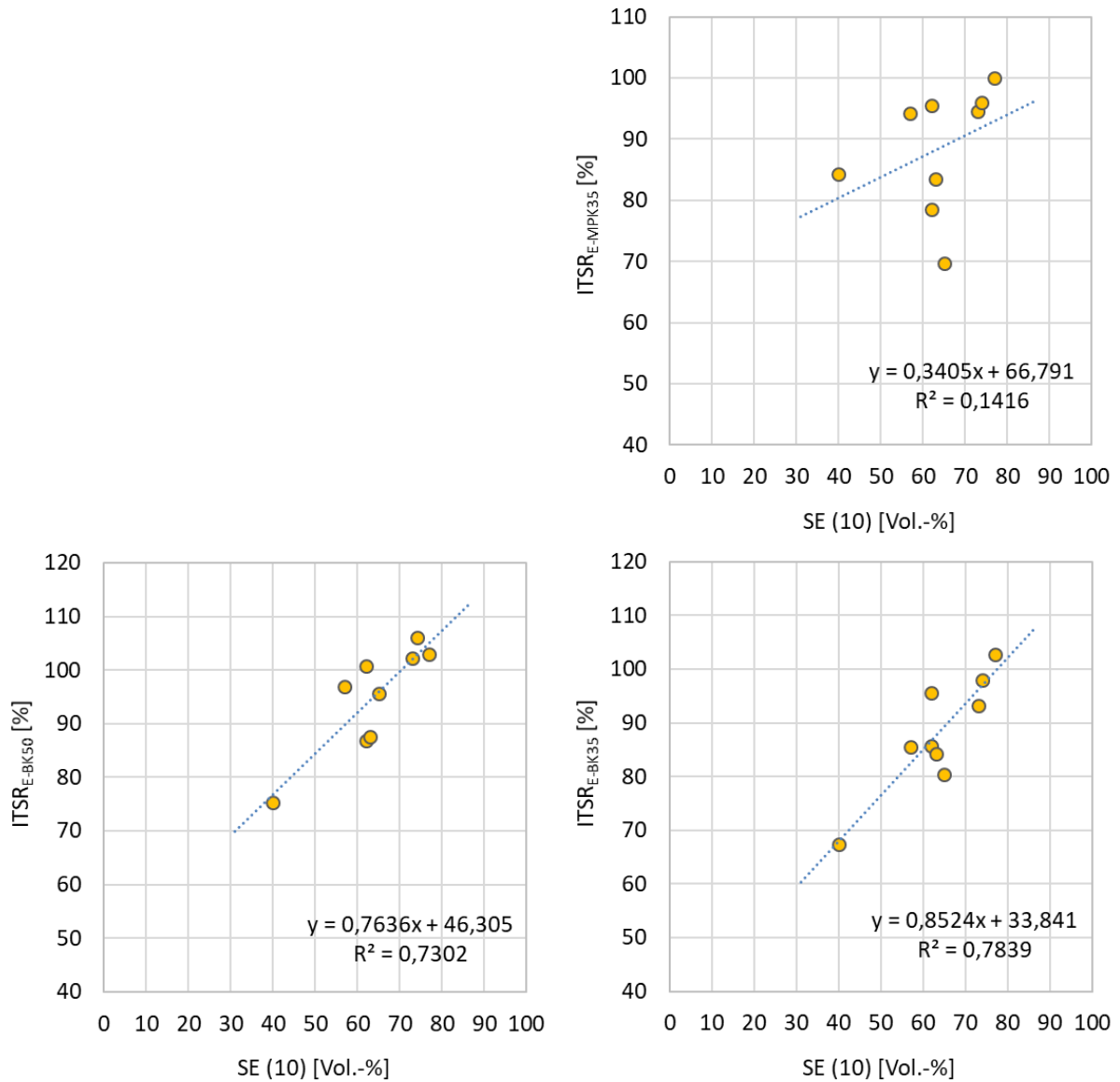


Abb. 47: Korrelationen von SE (10) mit Spaltzugrelation am Asphalt (oben: MPK, unten BK).

5.4.6 Schüttelabriebe an Füller und Asphalt

Die **Wasseraufnahme W** spielt bei den meisten Korrelationen keine Rolle, lediglich bei Gegenüberstellungen mit den Asphaltuntersuchungen zeigen sich z.T. hoch signifikante Zusammenhänge. Angesichts des Umstandes, dass W praktisch keine relevanten Zusammenhänge mit anderen Parametern der Schüttelabriebversuche an Füller und Sand zeigt (Ausnahme

Korrelation W_F / S_F), ist mit großer Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass auch kein relevanter Zusammenhang mit dem Schüttelabrieb am Asphalt besteht und die hohen Bestimmtheitsmaße eher Zufall sind.

Die **Quellungen Q** aus den Schüttelabriebversuchen an Füller und Sand zeigen zueinander sehr enge Beziehungen (Abb. 48), besonders der Zusammenhang zwischen Serie E und Serie F (ohne Eigenfüller) beeindruckt und zeigt, welches Schadpotenzial auch im Sand enthalten ist.

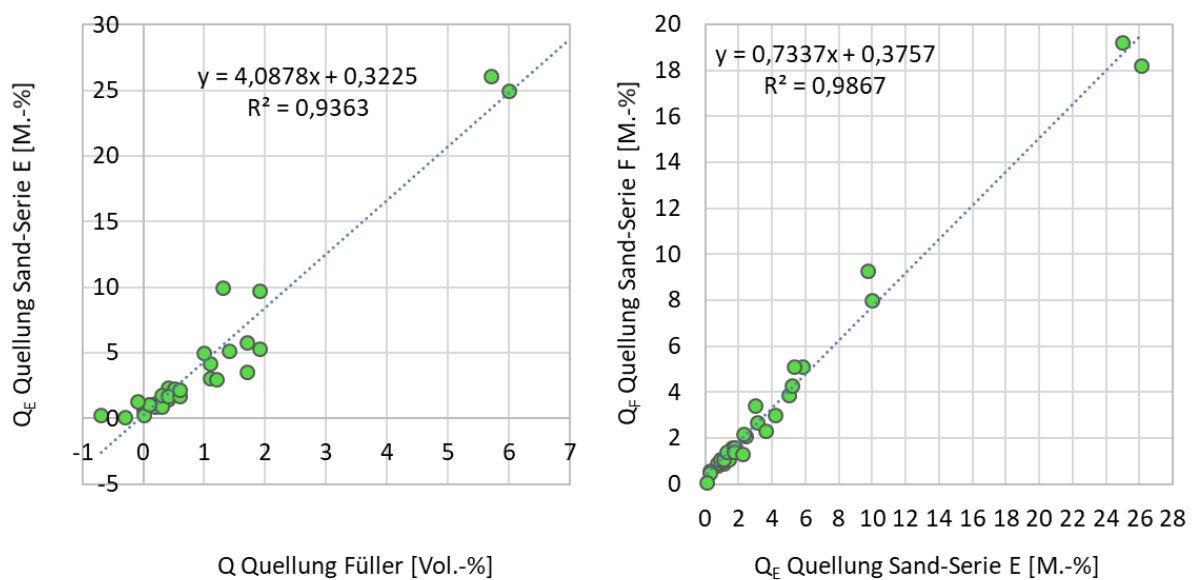


Abb. 48: Korrelationen zwischen Quellungen aus den Schüttelabriebversuchen an Füller und Sand.

Die Quellungen zeigen auch gute Zusammenhänge zu den Schüttelabriebe an Füller und v.a. an Sand (Abb. 49). Diese verbessern sich deutlich, wenn die drei höchsten Quellungen am Füller (die auch bei den neun Füllern für die Asphaltuntersuchungen fehlen) exkludiert werden (Abb. 50). Wenn nur die neun Füller für die Asphaltuntersuchungen betrachtet werden (vgl. Abb. 51), ergeben sich zwar etwas höhere Bestimmtheitsmaße, aber sehr ähnliche Regressionsgleichungen wie in Abb. 50. Dies bedeutet, dass die Selektion der neun Proben zu keiner relevanten Verschiebung der Regression zwischen Quellung (am Füller) und den Schüttelabriebe an Füller und Sand führt. Dadurch scheint es legitim, auch zwischen Q und den Schüttelabriebe am Asphalt signifikante Zusammenhänge zu erwarten (sofern es diese gibt), die nicht Produkte des Zufalls sind (wie so manche mineralogischen Zusammenhänge). Abb. 52 zeigt die besten Zusammenhänge mit dem Schüttelabrieb am Asphalt sowie mit ITSR-

Versuchen. Es fällt auf, dass die Wertespreizungen deutlich geringer ausfallen als bei den Schüttelabrieben am Sand (unter Betrachtung der gleichen neun Proben, vgl. Abb. 51). Die Quellungen im Zuge der Schüttelabrieb-Versuche an Sandasphaltpörpern zeigen im Vergleich zu Q geringere Zusammenhänge mit den Asphalten.

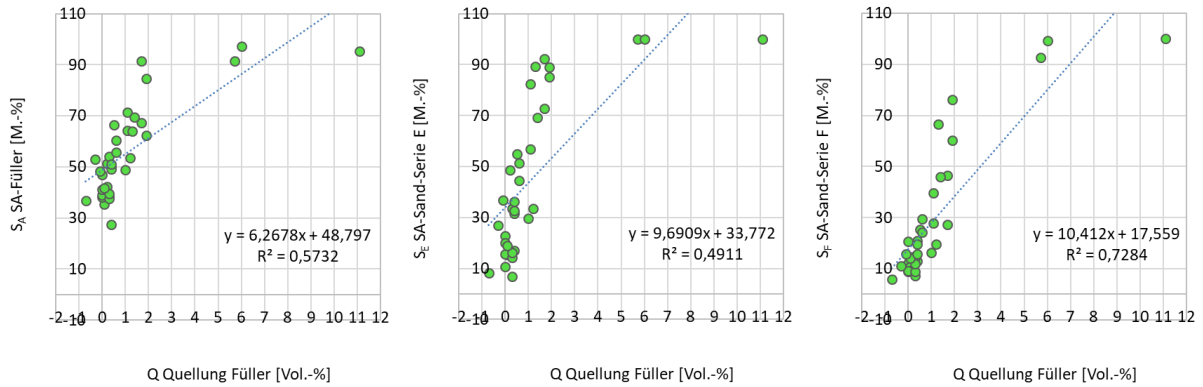


Abb. 49: Korrelationen zwischen Q am Füller mit Q an den Schüttelabrieben an Füller und Sand.

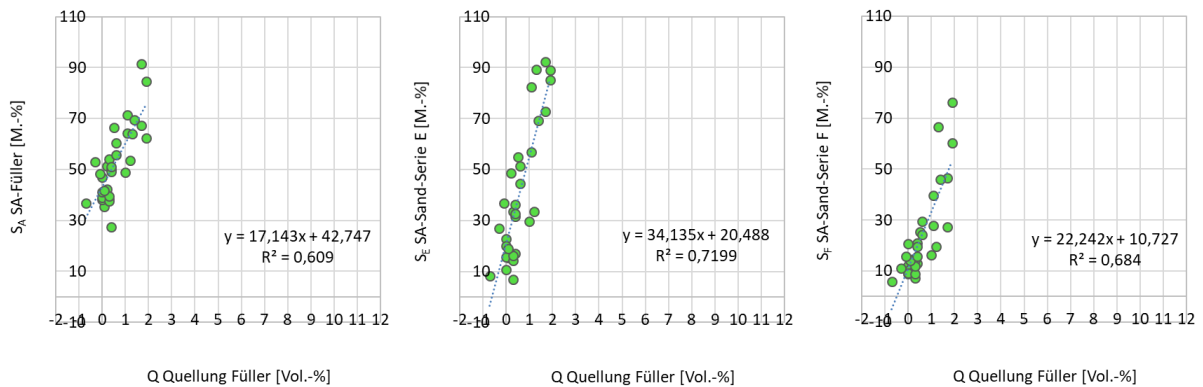


Abb. 50: wie Abb. 49, aber ohne die drei höchsten Quellungen am Füller.

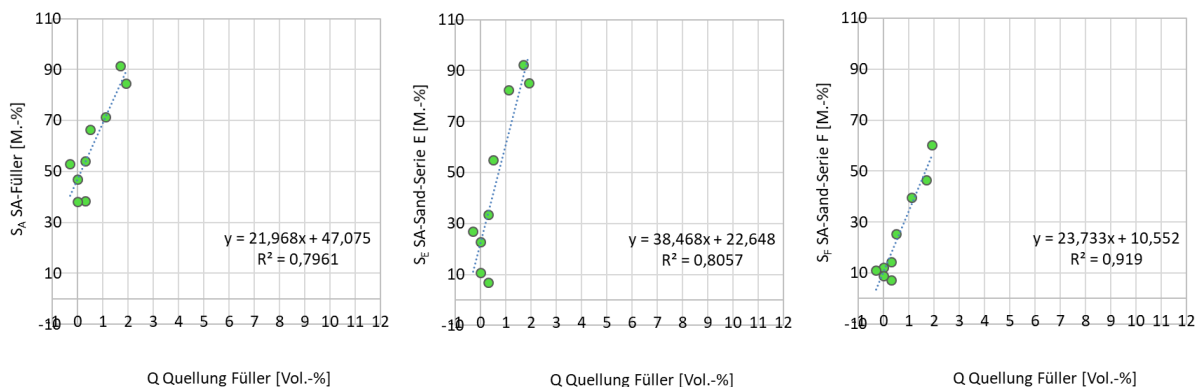


Abb. 51: wie Abb. 49, aber nur die 9 Füller für die Asphaltprüfungen.

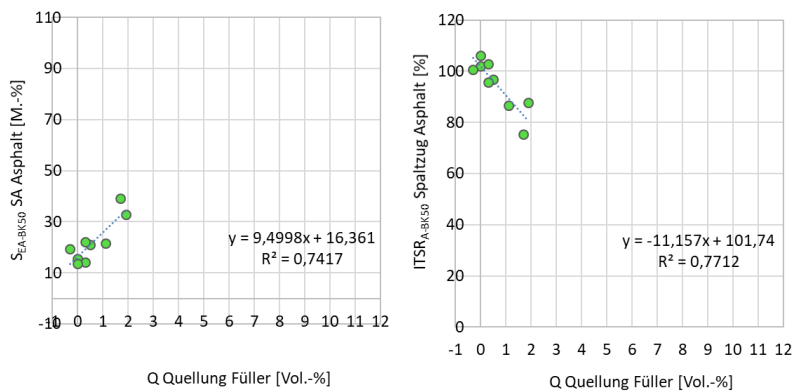


Abb. 52: Korrelationen zwischen Q am Füller und Schüttelabrieb Asphalt (BK50, links) sowie Spaltzugversuchen (ITSR, BK50, rechts). Die Skalierung für Q ist die gleiche wie in den Abb. oben.

Die Schüttelabriebe an Füller und Sand zeigen hohe bis sogar sehr hohe Zusammenhänge mit MB (s. Kap. 5.4.2) und erwartungsgemäß sehr gute Korrelationen untereinander (Abb. 53 und Abb. 54). S_A korreliert naturgemäß etwas besser mit S_E als mit S_F . Dies liegt daran, dass bei S_F kein Eigenfüller enthalten ist. Dennoch ist abzuleiten, dass auch der Sand großes Schadpotenzial in sich trägt. Sande mit besonders hohen Verwitterungserscheinungen können bei Gegenüberstellung durch S_F mit S_E identifiziert werden (vgl. Abb. 53, blaue Markierung oben). Diese Sande zeigen (meist) auch tatsächlich die eindeutig höchsten Anteile an quellbaren Tonmineralen oder an freien (sauren) Glimmern, die im Rahmen der mineralogisch-petrographischen Analysen identifiziert wurden.

In Abb. 53 und Abb. 54 wurden jeweils die gleichen Korrelationen für alle Materialien (oben) und für die neun Materialien für die Asphaltuntersuchungen (unten) vergleichend dargestellt. Dabei zeigt sich besonders für die Korrelation S_A / S_E (Abb. 53, linke Diagramme) ein sehr vergleichbarer Kurvenverlauf. Daher ist es analog zur Q auch für S_A legitim, mit den neun Asphalten Zusammenhänge zu untersuchen und zu erwarten, sofern es diese gibt. Abb. 55 zeigt die diesbezüglich besten (hohen) Zusammenhänge, wobei wiederum ins Auge sticht, dass die Wertespreizungen am Asphalt deutlich hinter jenen am Füller und v.a. hinter jenen am Sand (mit Eigenfüller) zurückbleiben.

Auf Grund der Ähnlichkeiten zwischen S_A und S_E (bzw. auch zu S_F) ist es auch legitim, S_E (und S_F) mit den Schüttelabriebe an den neun Asphalten zu korrelieren (vgl. Kap. 5.4.7.1).

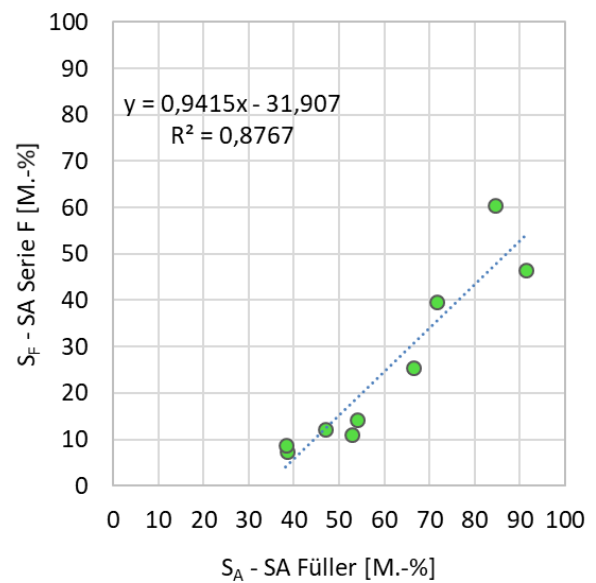
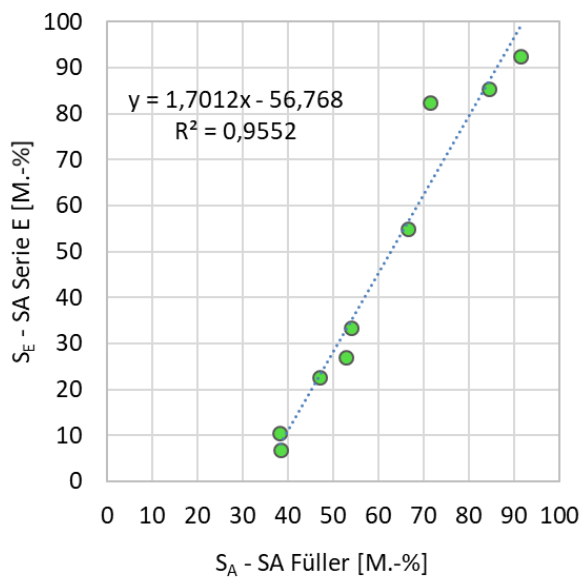
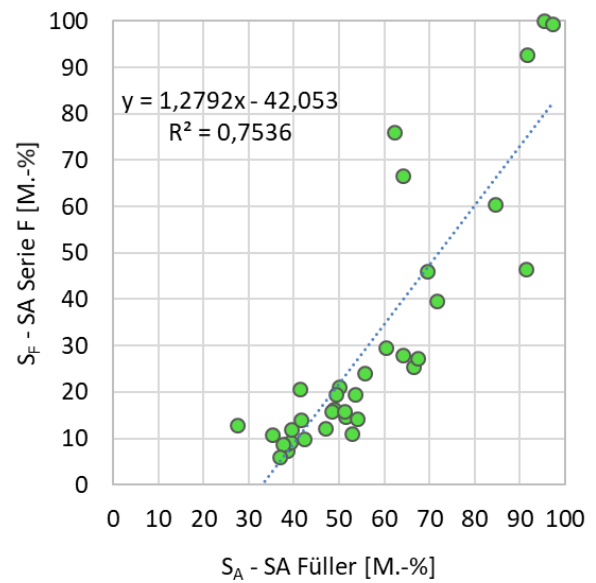
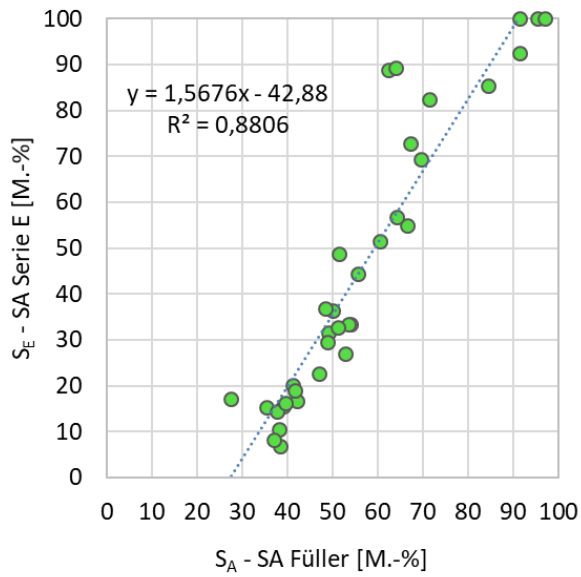


Abb. 53: Korrelationen von S_A mit S_E (links) und S_F (rechts), oben alle Materialien, unten nur die neun Materialien für die Asphaltuntersuchungen.

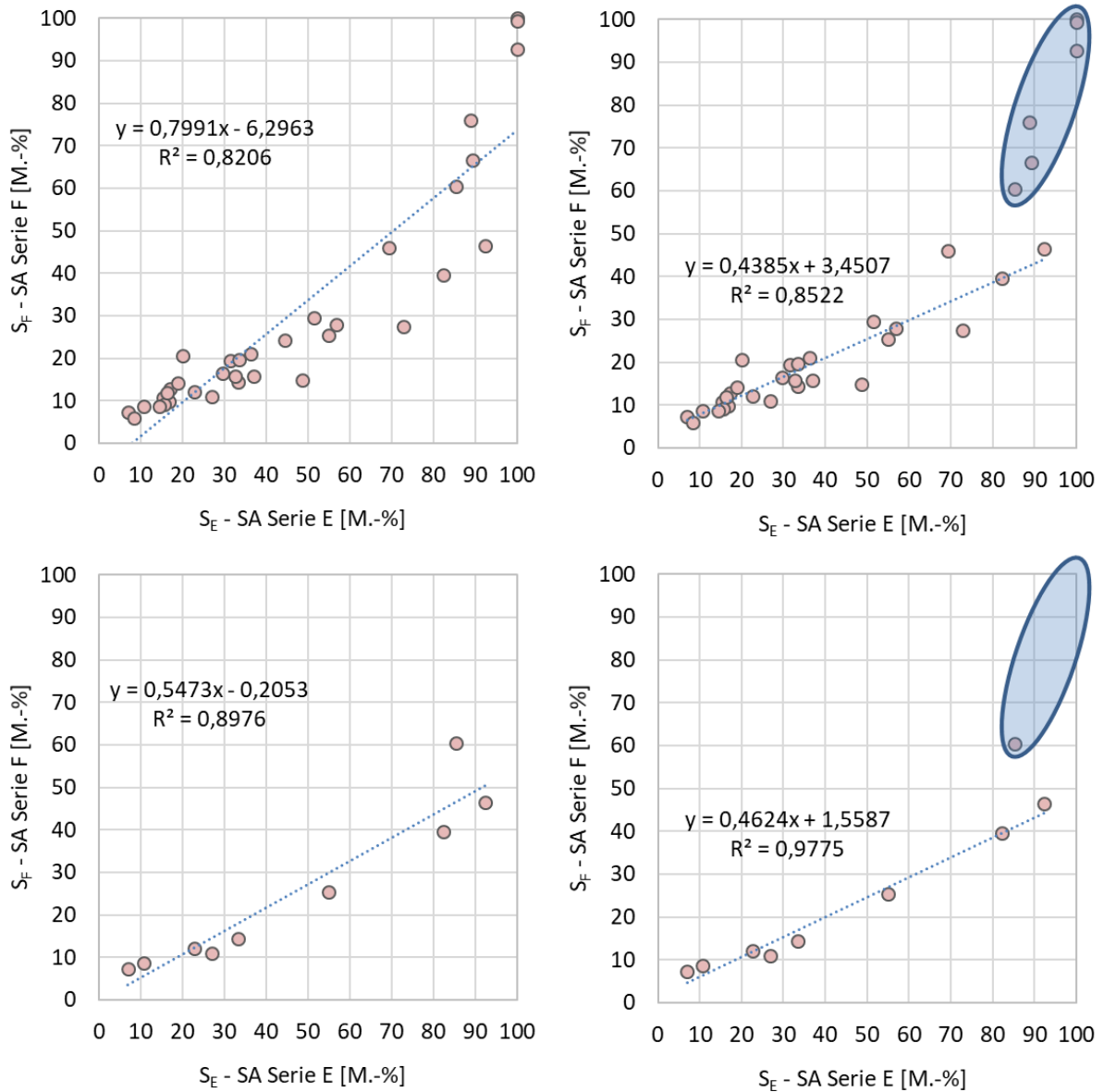


Abb. 54: Korrelation S_E / S_F , oben alle Materialien, unten nur die 9 Materialien für die Asphaltuntersuchungen. Die blaue Markierung im rechten Diagramm zeigt jene Materialien, deren Sande in Relation zu den übrigen Materialien deutlich höhere Schüttelabriebe verursachen. Die Regression im rechten oberen Diagramm bezieht sich auf die Proben unter Ausschluss der blau markierten Proben.

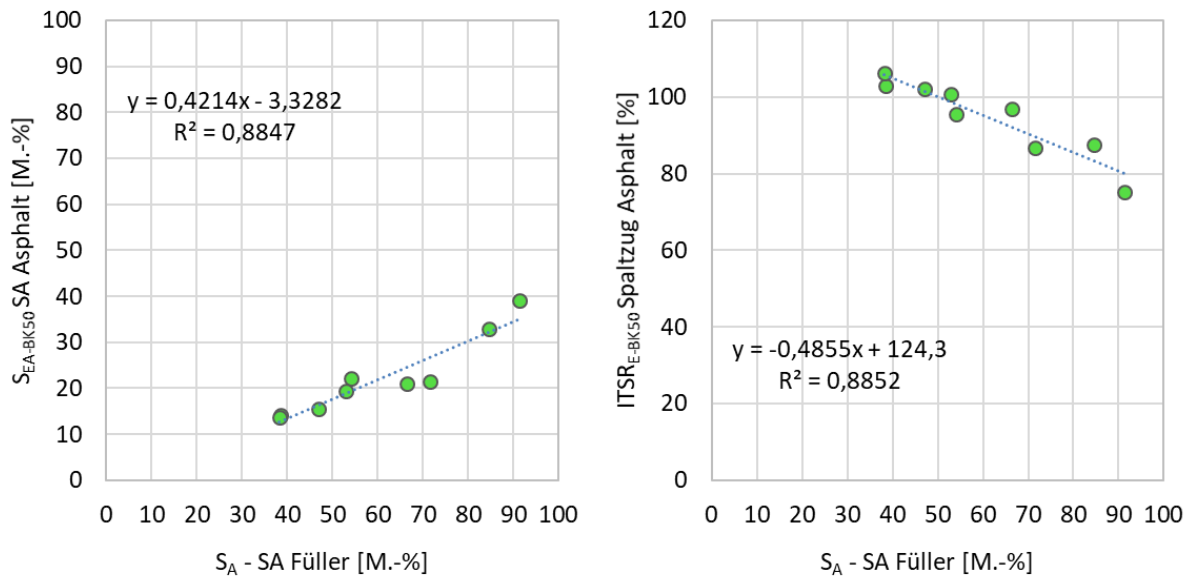


Abb. 55: Korrelationen zwischen S_A und Schüttelabrieb am Asphalt (BK50, links) sowie Spaltzugversuchen (ITSR, BK50, rechts). Die Skalierung für S_A ist die gleiche wie in den Abb. oben.

5.4.7 Asphaltprüfungen

5.4.7.1 Interpretation der Asphaltuntersuchungen

In Kap. 5.4.6 wurden bereits aus Sicht der Verfasser argumentiert, warum Korrelationen zwischen Q , S_A und auch S_E und S_F mit den Asphaltuntersuchungen legitim sind. Das Ergebnis der Korrelationen mit Q und S_A waren Zusammenhänge hoher Signifikanzen bei allerdings geringeren Wertespreizungen der Asphalte.

In Tab. 16 und Abb. 56 sind die Ergebnisse bzw. Korrelationen zw. **Schüttelabrieb an Sandasphalt- und Asphalt-Probekörpern** im Überblick dargestellt.

Tab. 16: Ergebnisse des Schüttelabriebs an Asphalt-Probekörpern für die vier Probenserien (MPK35, MPK50, BK35 und BK50) in Abhängigkeit vom Schüttelabrieb der Sandasphaltproben mit Eigen- und mit Fremdfüller.

Probe	Schüttelab- rieb Eigenfüller	Schüttelab- rieb Fremdfüller	Schüttelabrieb Asphalt			
			MPK50	MPK35	BK50	BK35
18_0084	22,7	12,1	19,7	20,3	15,6	17,1
18_0097	6,9	7,3	14,1	15,4	14,1	14,6
18_0439	54,9	25,4	20,6	23,8	21,0	24,6
18_0457	92,4	46,5	28,0	38,8	39,1	50,0
18_0102	10,6	8,8	16,0	16,1	13,6	14,4
18_0441	33,4	14,3	25,8	32,8	22,2	25,9
18_0456	26,9	11,0	20,2	22,7	19,5	20,1
18_0444	82,3	39,7	27,0	30,6	21,5	25,9
18_4025	85,3	60,4	29,1	36,0	32,9	34,7

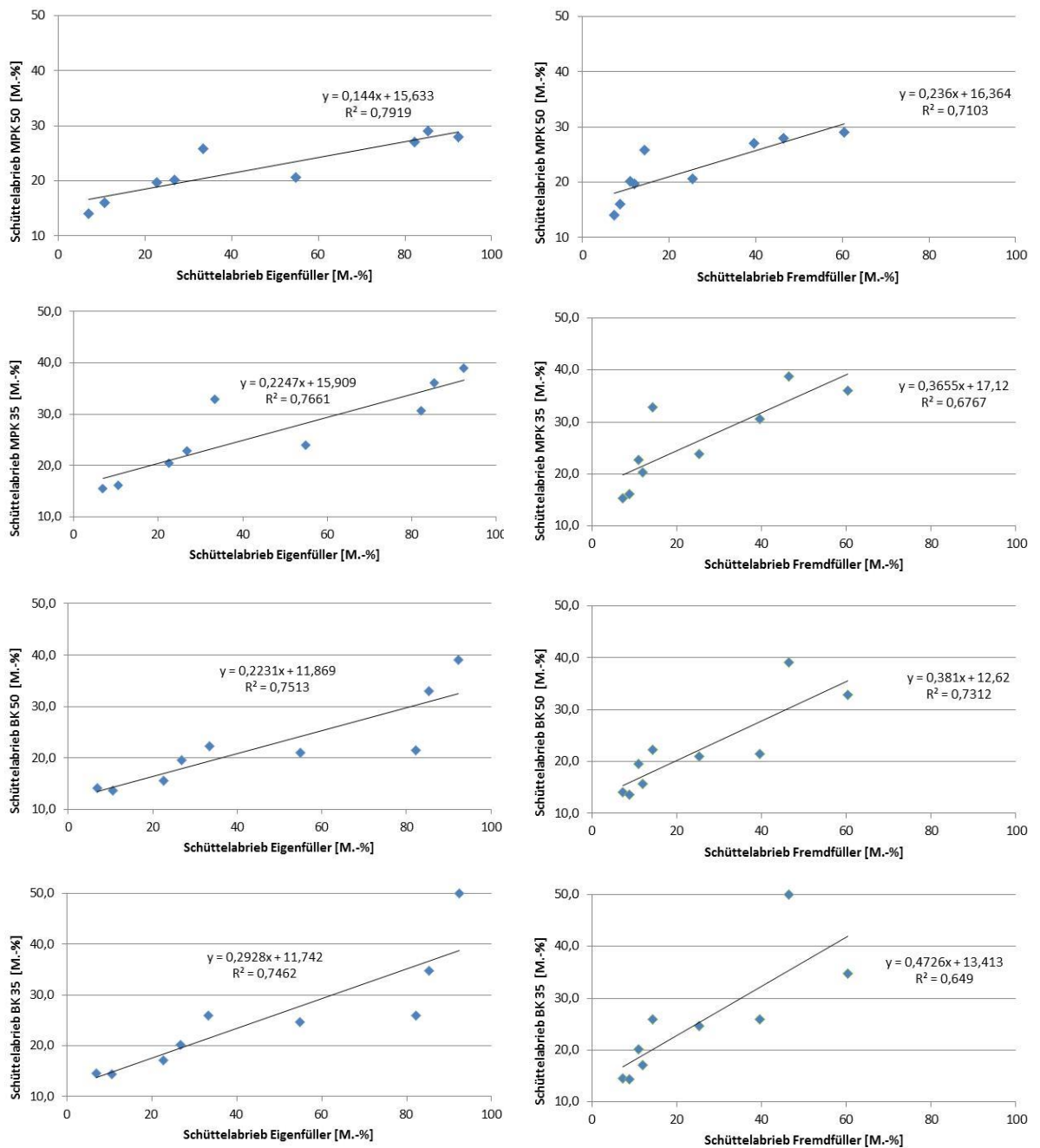


Abb. 56: Ergebnisse des Schüttelabriebs an Asphalt-Probekörpern für die vier Probenserien (MPK35, MPK35, BK35 und BK50) in Abhängigkeit vom Schüttelabrieb der Sandasphaltproben mit Eigen- (links) und mit Fremdfüller (rechts).

Die in Abb. 56 dargestellten Korrelationen zeigen auf, dass sich bei den Marshall-Probekörpern (MPK) im Vergleich zu den Bohrkernen (BK) aus den WSV-Platten meist geringfügig höhere Bestimmtheitsmaße ergeben. Zudem ist festzustellen, dass die Ergebnisse für den Schüttelabrieb mit Eigenfüller besser mit den ermittelten Schüttelabrieben am Asphalt korrelieren. Dies ist wohl wiederum darauf zurückzuführen, dass die Asphalte im Labor ausschließlich mit Eigenfüller hergestellt worden sind.

Die dichteren, d.h. mit größerer Energie verdichteten Proben zeigen geringfügig höhere Bestimmtheitsmaße.

Die Ergebnisse zum **Abfall der Spaltzugfestigkeit (ITSR)** sind in Tab. 17 und Abb. 57 dargestellt. Die Zunahme der Spaltzugfestigkeit nach Wasserlagerung tritt bei wenigen der untersuchten Proben ein, i.d.R. ist der erwartete Abfall der Spaltzugfestigkeit zu verzeichnen.

Die in Abb. 57 dargestellten Korrelationen zeigen auf, dass sich bei den Proben mit höherem Hohlraumgehalt (Marshall-Probekörper MPK35, Bohrkern BK35) analog zu den Schüttelabrieben am Asphalt (vgl. oben) schlechtere Korrelationskoeffizienten ergeben. Zudem ist festzustellen, dass die Ergebnisse für den Schüttelabrieb mit Eigenfüller besser mit den ermittelten Abfällen der Spaltzugfestigkeit korrelieren. Dies ist wohl auch darauf zurückzuführen, dass die Asphalte im Labor ausschließlich mit Eigenfüller hergestellt worden sind.

Insgesamt ist aber festzustellen, dass die Bestimmtheitsmaße der Korrelationen zwischen Schüttelabrieben und Spaltzugversuchen ungünstiger als die zwischen Schüttelabriebversuche an Asphalt und Sandasphalt zu bewerten sind.

Tab. 17: Ergebnisse der Schüttelabriebe der Proben mit Eigen- und mit Fremdfüller sowie des Abfalls der Spaltzugfestigkeit für die drei Probenserien MPK35 und die Bohrkern BK35 bzw. BK50).

Probe	Schüttelabrieb Eigenfüller	Schüttelabrieb Fremdfüller	Abfall Spaltzugfestigkeit		
			MPK35	BK50	BK35
18_0084	22,7	12,1	94,6	102,2	93,3
18_0097	6,9	7,3	100,0	102,9	102,8
18_0439	54,9	25,4	94,2	96,8	85,6
18_0457	92,4	46,5	84,2	75,3	67,3
18_0102	10,6	8,8	96,1	106,1	98,0
18_0441	33,4	14,3	69,7	95,7	80,5
18_0456	26,9	11	95,5	100,8	95,5
18_0444	82,3	39,7	78,5	86,8	85,7
18_4025	85,3	60,4	83,5	87,6	84,3

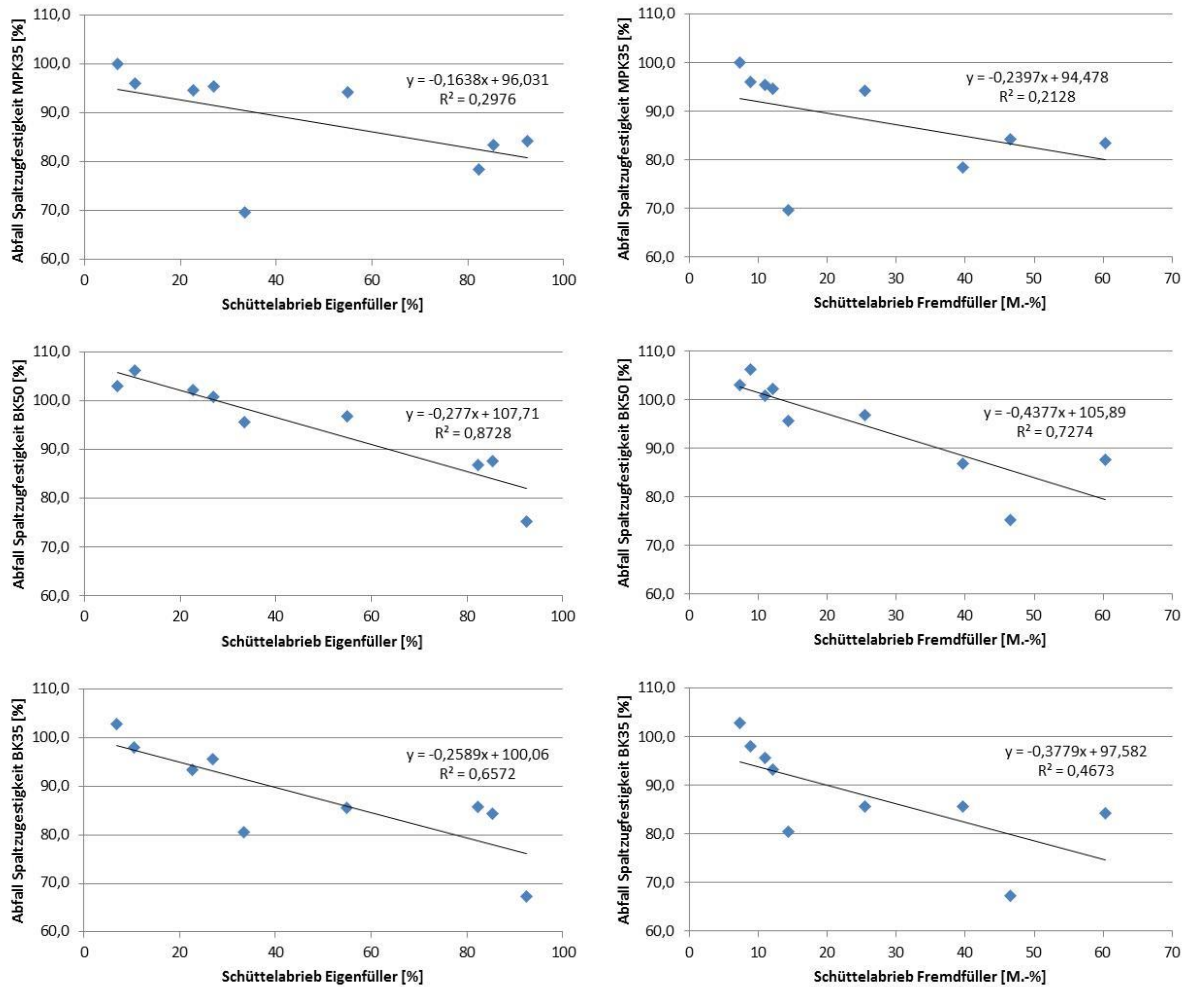


Abb. 57: Korrelationen aus Tab. 17.

In Abb. 58 sind Korrelationen der Bestimmtheitsmaße von Asphaltuntersuchungen mit anderen Versuchen aus Tab. 15 dargestellt. Sie geben einen raschen Überblick, ob und wie die durchgeführten Asphaltuntersuchungen zusammenhängen. Daraus ist abzuleiten, dass die Schüttelabriebe mit unterschiedlichen Verdichtungsenergien sehr gut zusammenhängen, wobei die Verwendung von BK offensichtlich versuchstechnisch am vertrauenswürdigsten ist (geringere Streuung zwischen den Verdichtungsenergien). Bei den Relationen zum Spaltversuch (ITSR) gibt es deutlich größere Variabilitäten zwischen den beiden Verdichtungsenergien, was für geringere Wiederholbarkeit bzw. größere versuchstechnische Streuung spricht. Bemerkenswert ist der vergleichsweise geringe Zusammenhang zwischen den Bestimmtheitsmaßen (aus Korrelationen mit anderen Versuchen) zwischen den Schüttelabrieben an MPK (50) und

an BK (50). Nachdem die Bestimmtheitsmaße von BK meist höher sind (v.a. für MB, SE und S_A) bzw. sich die die Bestimmtheitsmaße von Schüttelabrieben an den Sanden kaum voneinander unterscheiden, wäre daher dem BK prüftechnisch der Vorzug zu geben. Die Spaltzugversuche am MPK (ITSR_{E-MPK35}) zeigen von den Asphaltuntersuchungen die mit Abstand geringsten Zusammenhänge zu anderen Versuchen, weshalb dieses Verfahren als ungeeignet einzustufen ist.

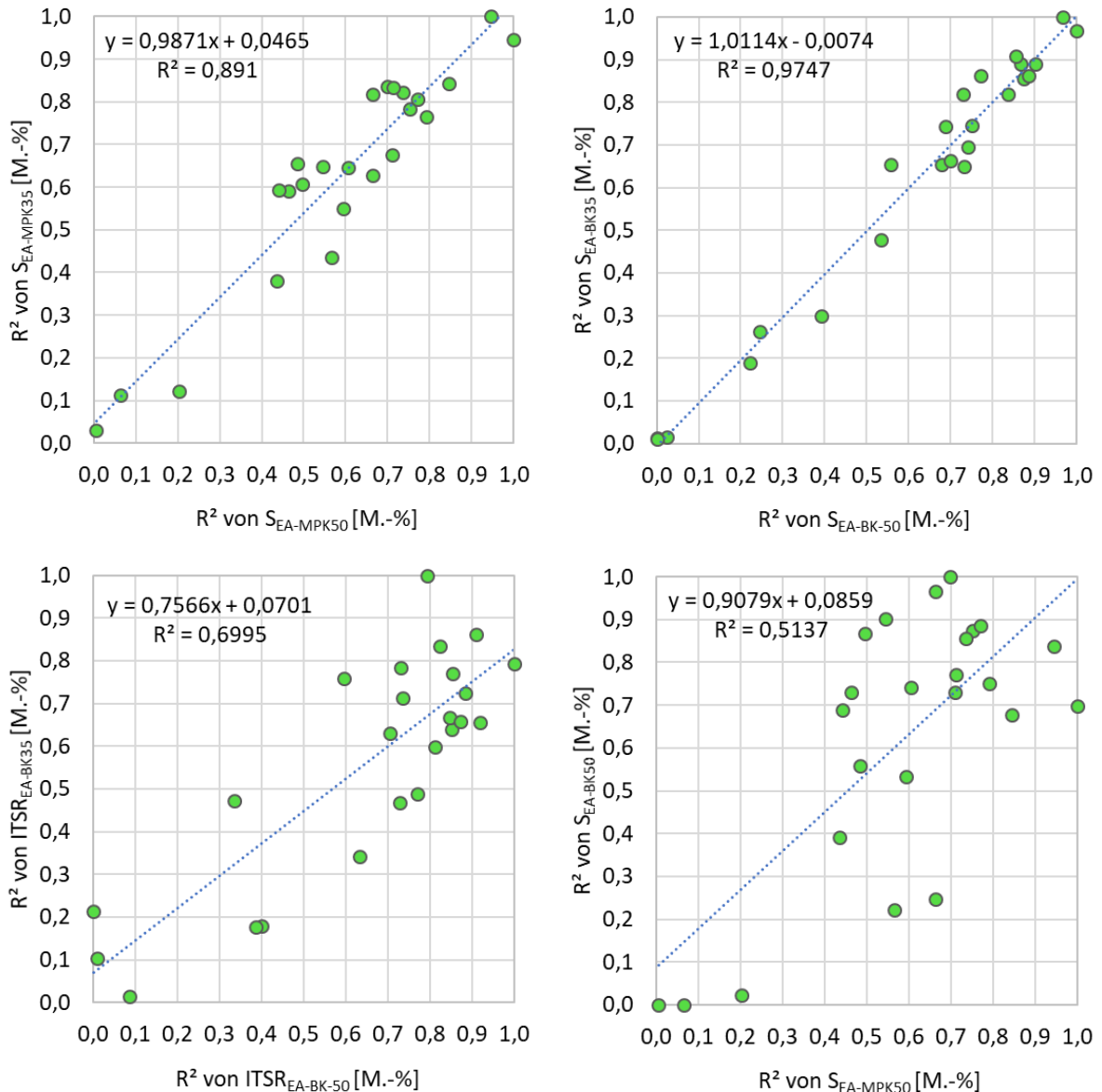


Abb. 58: Korrelationen der Bestimmtheitsmaße von Asphaltuntersuchungen mit anderen Versuchen aus Tab. 15.

5.4.7.2 Zusammenfassung Asphaltprüfungen

Die an den Sanden ermittelten Ergebnisse zur Wasserempfindlichkeit können durch die Asphaltuntersuchungen bestätigt werden. Sowohl beim Abfall der Spaltzugfestigkeit als auch beim Schüttelabrieb an Asphaltprobekörpern ergeben sich Korrelationen mit annehmbaren Bestimmtheitsmaßen. Grundsätzlich ist aber festzuhalten, dass mit den Schüttelabriebversuchen am Sand Prognosen für das Verhalten der damit hergestellten Asphalte möglich sind.

Sollen Untersuchungen am Asphalt durchgeführt werden, so sind Schüttelabriebversuche an im Labor hergestellten Platten mit einem höheren Hohlraumangebot zu empfehlen. Spaltzugversuche erbringen ähnliche Ergebnisse, sie erscheinen aber wegen des Einflusses der Probekörperherstellung auf die Bestimmtheitsmaße und der geringeren Wertespreizung in der Praxisanwendung weniger geeignet.

5.4.8 Frosthebung und Infiltration

Es konnten keine relevanten Korrelationen zu den Ergebnissen anderer Versuche festgestellt werden. Bestimmtheitsmaße mittlerer Signifikanz auf Seiten der Infiltrationen beruhen auf einem einzelnen weit von einer Punktwolke entfernten Punkt (1 Material mit vergleichsweise hoher Durchlässigkeit). Zusammenhänge sind daher wahrscheinlich „zufällig“.

5.5 Evaluierung der Versuche

Eine Qualitätsbeurteilung der untersuchten Materialien an Hand von Praxiserfahrungen hat sich als zu komplex bzw. subjektiv herausgestellt. Auf Grund der Vielzahl an möglichen Schadensursachen konnten Materialien in den meisten Fällen nicht seriös als für Asphalt geeignet oder ungeeignet klassifiziert werden.

Daher wurde zur Evaluierung der wesentlichen Versuche MB_F , SE (10), S_A und S_E eine Beurteilungsmatrix hinsichtlich Signifikanz des mineralogischen Zusammenhanges sowie der Wertespreizung nach dem Prinzip des österreichischen Schulnotensystems erstellt (Tab. 18: 1 = sehr gut bis 5 = sehr schlecht). Die Noten geben einerseits eine Einschätzung der absoluten Aussagekraft der einzelnen Verfahren auf Basis der Ergebnisse und Korrelationen in den Kap. 5.1 bis 5.4 wieder, andererseits ermöglichen sie relative Vergleiche der Versuche zueinander. Ausschlaggebend für die Benotung hinsichtlich der Mineralogie sind neben dem Bestimmtheitsmaß die gleichmäßige Verteilung der Messwerte um die Regressionsgerade sowie bei den Reinphasen die kontinuierliche Steigerung der Messwerte mit zunehmendem Anteil. Dies ist bei MB_F (wegen Titrationsstufen) und SE (10) besonders bei den geringen Mischungsanteilen nicht immer gegeben.

Hinsichtlich der nicht-quellfähigen Reinphasen wurden nur Muskowit und Kaolinit in die Vergleiche miteinbezogen. Chlorit weist auf Grund der eher gröberen Sieblinie und der damit in Zusammenhang stehenden relativ geringen spezifischen Oberfläche erst bei 100%-Anteil im Füller erhöhte Messwerte auf und ist dadurch in dieser Form wenig geeignet, feine Unterschiede zwischen den Verfahren zu erkennen.

Die grün hinterlegten Zeilen in Tab. 18 zeigen differenzierte gemittelte Noten der Verfahren in Bezug auf die mineralogischen Reinphasen und die natürlichen Mineralgemische sowie Gesamtnoten aus allen Parametern. Dabei ist zu erkennen, dass bei Verwendung der Reinphasen die Schüttelabriebe an Füller und Sand am aussagekräftigsten sind. Dies spiegelt sich auch in der Gesamtnote wieder, weil die Aussagekraft der Verfahren in Bezug auf Mineralogie natürlicher Gemische nur sehr begrenzt und wenig unterschiedlich ist.

Einer der maßgeblichsten Parameter zur Differenzierung der Aussagekraft der untersuchten Verfahren ist deren Wertespreizung und die dadurch definierbaren Bewertungshintergründe. Das MB zeigt diesbezüglich eindeutig die geringste Eignung.

In Tab. 19 sind weitere Einstufungen der Versuche angeführt, welche ebenso die Schüttelabriebe gegenüber MB_F und SE (10) bevorzugen.

Die Schüttelabriebversuche stellen somit im Vergleich mit MB und SE die geeignetsten Verfahren zur Beurteilung der Qualitäten feiner Gesteinskörnungen dar.

Tab. 18: Beurteilungsmatrix zur Eignung der Verfahren (Prinzip österr. Schulnotensystem).

Eignung des Versuches in Bezug auf:		MB _F	SE (10)	S _A (Füller)	S _E (Sand)*	Anmerkung
Reinphasen	Quellbare TM-Anteile (Reinphase Smektit) im Füller	1	2	1,5**	1,5	SE (10) nur Note 2, weil keine kontinuierliche Steigerung der Messwerte im niedrigen Bereich
	Quellbare TM-Anteile (Reinphase Smektit) im Füller ohne 100%-Wert	1	2,5	1**	1	
	Nicht-quellbare TM-Anteile (Reinphasen Muskowit und Kaolinit) im Füller	2,5	3	2**	2	
	Nicht-quellbare TM-Anteile (Reinphasen Muskowit und Kaolinit) im Füller ohne 100%-Wert	3	2	1,5**	1,5	
	Wertespreizung quellbare TM-Anteile (Reinphase Smektit) im Füller	1	3	1,5**	1,5	
	Wertespreizung nicht-quellbare TM-Anteile (Reinphasen Muskowit und Kaolinit) im Füller	4	2	2**	2	MB _F : nur Note 4 wegen geringem Wertebereich und Titrationsstufen
Natürliche Füllergemische	Quellbare TM in natürlichen Füllergemischen	3	5	4,5	4,5	Mindestaussage S _A : ab 5 % Quellbare S _A > 45 % zu erwarten; Mindestaussage S _E : ab 10 % Quellbare S _E > 90 % zu erwarten; MB _F : trotz R ² =0,83 nur Note 3, weil schwacher Zusammenhang bei Exklusion der höchsten 3 Werte
	Σ TM in natürlichen Füllergemischen	5	4	5	5	SE (10): schwacher Zusammenhang und relativ kompakte Punktwolke (Möglichkeit umhüllender Funktionen) rechtfertigen Note 4
	Wertespreizung natürlicher Füllergemische	4	2	2	1	Gleiche Note für S _A und SE (10), weil Rangreihung der beiden Verfahren von Exklusion der (5) niedrigsten und (5) höchsten Messwerte abhängt
Mittlere Note bez. mineralogische Aussagekraft Reinphasen		2,1	2,4	1,6	1,6	
Mittlere Note in Hinblick auf mineralogische Aussagekraft auf Basis der natürlichen Mischungen (letzten 3 Zeilen)		4,0	3,7	3,8	3,5	
Gesamtnote		2,7	2,8	2,3	2,2	

* Verwendung von gleichem Referenzsand (kein Eigensand)

** nicht durchgeführt (plausible Einschätzung auf Basis von S_E)

Tab. 19: Weitere Einstufungen der Versuche.

Weitere Einstufungen der Versuche	MBF	SE (10)	S _A (Füller)	SE (Sand)*	Anmerkung
Praxisnähe der Versuchsanordnung (Performance-Charakter)	4	4	2	2	
Experteneinstufung der Eignung als Füller auf Basis bestehender und ergänzter petrographischer Grenz- werte	4	5	3	3,5	
Experteneinstufung der Eignung als Sand+Füller auf Basis bestehender und ergänzter petrographischer Grenzwerte	-	5	-	3,5	
Haftung Bitumen am Sand	-	-	-	+	
Kornfestigkeit Sand	-	-	-	+	

6 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Grundlagen und Zielsetzung:

In der Vergangenheit wurde der Qualität von feinen Gesteinskörnungen (< 2 mm, Sand) im Anwendungsbereich Asphalt nur eine untergeordnete Bedeutung zugewiesen. Aktuelle Forschungsprojekte und Erfahrungen haben jedoch gezeigt, dass die Qualität eines Asphaltes maßgeblich von der Qualität der feinen Gesteinskörnung (Feinanteil – Kornanteil kleiner 0,063 mm und Sandanteil - Kornbereich zwischen 0,063 und 2 mm) mitbestimmt wird.

Die Tatsache, dass der Qualität der feinen Gesteinskörnung u. a. im Anwendungsbereich Asphalt bisher keine große Bedeutung zugeordnet wurde, spiegelt sich auch im aktuellen Regelwerk wider. Im Rahmen der Europäischen Produktnorm EN 13043 ist eine Kennzeichnung der Qualität der Feinanteile in Gesteinskörnungen durch das Methylenblau (MB)-Verfahren nach EN 933-9 nur dann gefordert, wenn die Feinanteile einen Gehalt von 3 M.-% überschreiten. EN 13242 lässt neben dem MB-Verfahren auch das Sandäquivalent (SE)-Verfahren nach EN 933-8 zu. Die Weiterführung der Europäischen Normung wird künftig Kategorien für die beiden Prüfverfahren beinhalten. Somit können durch den Hersteller Festlegungen zur Qualitätseinstufung dieser Kennwerte getroffen werden.

In Deutschland besteht für die beiden Europäischen Prüfverfahren kein Bewertungshintergrund. Lediglich für den Feinanteil von feinen Gesteinskörnungen und Füller für Asphalt liegen Daten vor. Ein Zusammenhang der Ergebnisse der beiden Prüfverfahren mit baustoffspezifischen Eigenschaften oder Schadensfällen besteht nicht. In Österreich und der Schweiz erfolgt die Bewertung über mineralogische Untersuchungen. Auch hier liegt nur eingeschränkt ein Zusammenhang mit baustoffspezifischen Eigenschaften vor. Beide im europäischen Regelwerk verankerten Prüfverfahren sind nach dem derzeitigen Wissensstand nur begrenzt geeignet, die Qualität von feinen Gesteinskörnungen hinreichend zu beschreiben. Um dieses Manko zu beheben, werden derzeit unterschiedliche alternative Ansätze in den DACH-Ländern verfolgt. Österreich und Schweiz versuchen die Qualität der feinen Gesteinskörnungen über direkte mineralogische Untersuchungen zu erfassen, Deutschland baut auf das Schüttelabtriebsverfahren. Dieses Prüfverfahren basiert auf der Europäischen Prüfnorm EN 12274-7 und wird als Chance gesehen, feine Gesteinskörnungen zielführend zu bewerten und ressourcenschonend einzusetzen. In Bayern wird dies bereits seit Jahrzehnten erfolgreich praktiziert.

Mit diesem Forschungsprojekt soll mit geeigneten Methoden die Aussagekraft von MB und SE verifiziert und praxismgerechte Qualitätseinstufungen vorgenommen oder besser geeignete Alternativen vorgeschlagen werden, um hiermit die Weiterentwicklung der Europäischen Normung voranzutreiben.

Vorgehensweise:

Um die Aussagekraft von MB und SE zu evaluieren, wurden künstlich zusammengesetzte Gemische mit bautechnisch problematischen Mineralen hergestellt und geprüft. Dazu wurden die wesentlichen Schichtsilikate, die in natürlichen Straßenbaumaterialien enthalten sind, als Reinphasen zu den Untersuchungen mit definiert abgestuften Gehalten herangezogen.

Zur Festlegung und Einstufung von Qualitätskategorien für MB und SE (bzw. für alternative Methoden) wurden praxisnahe Bewertungshintergründe aufgebaut. Dafür wurden aus allen drei DACH-Ländern sowie Italien, Frankreich und Schweden 35 natürliche, repräsentative Materialien mit bekanntem Praxisverhalten beschafft und den vorgesehenen Untersuchungen unterzogen. Diese Untersuchungen sollten neben MB und SE auch umfassende mineralogisch-petrographische Charakterisierungen nach dem Stand der Technik beinhalten (mit besonderem Bezug zu den Erfahrungen in Österreich und Schweiz) sowie exemplarische Performance-Versuche einschließen (deutsches Schüttelabriebverfahren, Wasserempfindlichkeit über Spaltzugversuche an Asphaltprobekörpern, Frosthebungsversuche an ungebundenem Material). Korrelationen der Versuchsergebnisse mit möglichst exakt bekannten Mineralgehalten sollten die Evaluierung deren Aussagekraft ermöglichen und auf Basis der ermittelten Bewertungshintergründe den Vorschlag von Kategorien mit sinnvollen Qualitätsabstufungen zur Beurteilung der Feinanteile erlauben.

Ergänzende Messreihen an natürlichen Materialien, deren Feinanteile durch inaktives Kalksteinmehl ersetzt werden (Schüttelabrieb am Sand mit Fremdfüller), sowie Performance-Prüfungen am Asphalt sollten schließlich Aussagen zur Relevanz der Sandfraktion für die Beurteilung der Qualität der feinen Gesteinskörnung erlauben.

Ebenso sollte überprüft werden, inwieweit eine vereinfachte mineralogisch-petrographische Analyse eine für den Routine-Laborbetrieb taugliche Methode darstellt, Feinanteilqualitäten für Asphalt praxismgerecht und zeitnah zu beurteilen.

Ergebnisse:

Die Untersuchungsergebnisse zu den mineralischen Reinphasen (Muskowit, Kaolinit, Chlorit und Smektit) zeigen deutlich, dass das MB-Verfahren, das SE-Verfahren und auch das Schüttelabrieb-Verfahren hochsignifikante Korrelationen zu definierten Mineralgehalten aufweisen und daher theoretisch alle geeignet sind, die Qualität der Feinanteile zu beurteilen. Es konnte somit die große Abhängigkeit der Messwerte von Art und Gehalt bestimmter Minerale (besonders quellfähiger Tonminerale) dargelegt werden.

Daher kam einer umfangreichen mineralogisch-petrographischen Untersuchung der 35 natürlichen Materialien zur Verifizierung der Abhängigkeiten unter praxisnahen Verhältnissen große Bedeutung zu. Gleichzeitig wurden die natürlichen Füllergemische zum Aufbau von Bewertungshintergründen für die untersuchten Verfahren herangezogen.

Dabei stellte sich heraus, dass sowohl MB als auch SE für die Charakterisierung der Feinanteile natürlicher Gesteinskörnungen nicht geeignet sind. Diese Verfahren lassen keine eindeutigen Aussagen zur mineralogischen Zusammensetzung zu. Ursächlich dafür verantwortlich ist die Überlagerung der unterschiedlichen Wirkungen der in variierenden Anteilen enthaltenen Minerale bzw. deren Verwitterungszustände im Sand. Die extrem starke Abhängigkeit des MB-Wertes von quellfähigen Mineralen lassen den MB-Versuch aber für rasche Erstuntersuchungen zur Abklärung von Extremwerten geeignet erscheinen. Die höchsten MB_F -Werte (> 10) konnten eindeutig mit den höchsten Anteilen an quellfähigen Tonmineralen in Verbindung gebracht werden, sodass dadurch eindeutig nicht geeignete Füllergemische rasch identifiziert werden können. Füllergemische mit MB_F -Werten ≤ 2 wiederum zeigen gleichzeitig niedrige Schüttelabriebe am Sand unterhalb der in Bayern existierenden Grenzwerte (vgl. Kap. 5.4.2, Abb. 39 bzw. Tab. 27 im Anhang).

Der SE (10)-Versuch zeigt im Vergleich zu den MB- und Schüttelabrieb-Versuchen den vergleichsweise besten Zusammenhang mit der Summe aller Schichtsilikate (ohne mineralspezifische Gewichtung) sowie auch eine gute Wertespreizung. Bei Betrachtung jener Materialien mit den höchsten Anteilen quellfähiger Minerale (Abb. 26, Mitte, rechts) fällt allerdings auf, dass sich drei von vier dieser Materialien im unauffälligen Mittelfeld der SE (10)-Werte befinden. Dies zeigt, dass der SE-Versuch nicht geeignet ist, diese hochreaktiven Materialien zu identifizieren, die bei MB und Schüttelabrieb hingegen die höchsten Messwerte zeigen. Dieser unbefriedigende Umstand deckt sich mit der schlechtesten Gesamtnote dieses Versuches im

Rahmen der Evaluierung der Aussagekraft (Kap. 5.5). Daher ist der Versuch, für den ermittelten Bewertungshintergrund auch Qualitätskategorien zu definieren, nicht zielführend.

Eine ausschließliche Bewertung über mineralogische Untersuchungen erwies sich auch nicht als zielführend, weil das Praxisverhalten des Asphalts ein Resultat des komplexen Zusammenwirkens aller mineralogischen Komponenten ist, die in Kombination nur begrenzt Aussagen zum Verhalten zulassen (durch Gewichtung der einzelnen Mineralgruppen auf Basis der Untersuchungen an Reinphasen lassen sich Verbesserungen der Aussage erzielen). Obwohl eine Gegenüberstellung der mineralogisch-petrographischen Einstufungen mit jenen gem. Schüttelabrieb am Füller durchaus gute Übereinstimmungen erbrachten, kann die mineralogische Zusammensetzung allein die Auswirkung auf die Qualität der Feinanteile und das Verhalten der Asphalte derzeit (noch) nicht praxisnah prognostizieren. Es lassen sich jedoch zahlreiche Ergebnisse der physikalischen Versuche mit der mineralogischen Zusammensetzung sowie der Petrographie plausibel interpretieren, so z.B. die Ursachen für ungewöhnlich hohe S_F -Werte in Relation zu S_E -Werten, die durch verwitterte Sande verursacht werden.

Eingehende mineralogisch-petrographische Analysen können außerdem maßgeblich dazu beitragen, eine Verbesserung der Qualität der feinen Gesteinskörnung durch gezielte Aufbereitungsmaßnahmen zu erreichen. Dies hilft überdies, durch tendenzielle Verringerung quellbarer Anteile im Zuge von Aufbereitungsmaßnahmen den Bitumenbedarf zu verringern und Kosten zu sparen.

Das Schüttelabriebverfahren eignet sich (besonders im Vergleich zu MB- und SE-Verfahren) deutlich besser zur Bewertung der Qualität von Feinanteilen. Bei der in Kap. 5.5 durchgeführten Evaluierung der Aussagekraft der untersuchten Verfahren zeigt sich klar, dass der Schüttelabrieb in Relation zu MB und SE am geeignetsten ist, die Qualität der feinen Gesteinskörnung zu beurteilen. Beim Schüttelabrieb handelt es sich zudem um eine Performance-Prüfung (an Asphaltprobekörpern), die in erster Linie auf die Wasserempfindlichkeit von feiner Gesteinskörnung im Kontakt mit Bitumen abzielt. Der Schüttelabrieb zeigt außerdem eine große Wertespreizung und somit deutlich bessere Differenzierungsmöglichkeit verschiedener natürlicher Füller als dies v.a. bei MB der Fall ist. Das Verfahren überzeugt darüber hinaus neben seiner größeren Praxisnähe durch seine vielseitige Anwendbarkeit. So können neben der Qualität des Feinanteils u.a. auch die Qualität des Sandanteils oder des Bitumens beurteilt werden.

Für das Schüttelabriebverfahren spricht außerdem der gute Zusammenhang zu den Asphaltkennwerten (Spaltzugfestigkeit bzw. Schüttelabrieb am Asphalt-Probekörper, s. Abb. 56 und Abb. 57) und somit zu den baustoffspezifischen Eigenschaften. Im Vergleich zu den Asphaltuntersuchungen differenziert das Schüttelabriebverfahren am Sandasphaltprobekörper sogar besser, was vermutlich auf den geringeren Anteil an Sand im Asphalt zurückzuführen ist. Da sich das Schüttelabriebverfahren auf die Mörtelphase von Asphalt bezieht, ist es gegenüber reinen Asphaltprüfungen labortechnisch auch deutlich einfacher zu handhaben.

Letztlich deuten die Untersuchungen zum Schüttelabrieb an, dass die Qualität der Feinanteile und deren Auswirkungen auf die Wasserempfindlichkeit des Asphalts neben der Gesteinsart und deren mineralogischer Zusammensetzung außerdem auch vom Verwitterungszustand und der Art der Aufbereitung nicht unmaßgeblich abhängen. Einfache Korrelationen von groben Einstufungen der Qualität der Aufbereitung (abhängig von Selektivität des Abbaues, Anzahl Brechstufen, Siebung und Wäsche / Sichten) zeigen passable Zusammenhänge mit dem Schüttelabrieb, hingegen keine Zusammenhänge mit MB oder SE.

Durch ergänzende Messreihen für das Schüttelabriebverfahren an natürlichen feinen Gesteinskörnungen (Schüttelabrieb am Sand durch Ersatz des Feinanteils durch ein qualifiziertes Kalksteinmehl – „Fremdfüller“) sowie Performance-Prüfungen am Asphalt konnte bestätigt werden, dass neben der Qualität des Feinanteils auch die des Sandanteils von großer Bedeutung für die Beurteilung der Qualität der feinen Gesteinskörnung ist. Im Zuge dessen konnte durch exemplarische Versuche zur Verbesserung der Qualität der Feinanteile nachgewiesen werden, dass für den Korngrößenbereich $< 0,063$ mm qualifiziertes Kalksteinmehl deutlich effektiver wirken kann als ein handelsüblicher Haftverbesserer. Eine mögliche Erklärung für die verminderte Wirkung des verwendeten Haftverbesserers am Feinanteil könnte in der Tatsache begründet sein, dass dieser für die groben Gesteinskörnungen konzipiert wurde und sich feine und grobe Gesteinskörnungen auch unter Berücksichtigung des Oberflächenangebotes offensichtlich unterschiedlich verhalten. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass bei der Asphaltherstellung durch zumindest teilweisen Austausch des Feinanteils durch ein qualifiziertes Kalksteinmehl auf einfache Art und Weise eine Verbesserung des Asphaltmischgutes erzielt wird. Dies geht im Regelfall auch mit einer Verringerung der Bindemittelmenge einher. Jedenfalls steht mit dem Schüttelabrieb ein geeignetes Instrumentarium zur Verfügung, die Effektivität von Haftverbesserern im Vergleich zu Füllerersatz zu verifizieren und ermöglicht es zudem, deren Dosis zu optimieren.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass mittels der derzeit in der Europäischen Normung verankerten Prüfverfahren - MB-Versuch und SE-Verfahren - die Qualität der Feinanteile nicht hinreichend beschrieben werden kann. Auch die mineralogische Zusammensetzung allein kann dies nicht hinreichend genau bewerkstelligen. Das Schüttelabriebverfahren, welches seit Jahrzehnten mit Anforderungskriterien erfolgreich in Bayern zur Anwendung kommt, stellt hingegen eine vielversprechende Alternative dar, die weitergeführt und normativ auf europäische Ebene gehoben werden sollte.

Basierend auf den Resultaten der gegenständlichen Arbeit werden in Hinblick auf die Beurteilung der feinen Gesteinskörnung für den Anwendungsbereich Asphalt folgende Schlussfolgerungen gezogen:

- Das SE-Verfahren ist nicht geeignet und sollte aus der europäischen Normung gestrichen werden.
- Das MB-Verfahren kann angesichts der hohen Sensibilität und damit Aussagekraft in Bezug auf die für die Fragestellung sehr wichtigen quellbaren Tonminerale dafür eingesetzt werden, mit Sicherheit geeignete oder mit Sicherheit ungeeignete Materialien rasch und kostengünstig zu identifizieren. Als Kriterium für sicher geeignete Materialien wird ein MB_F -Wert von ≤ 2 , für sicher ungeeignete Materialien ein MB_F -Wert von > 10 vorgeschlagen.
- Sollte der MB_F -Wert dazwischen liegen (oder als Prüfung vom Auftraggeber gar nicht gewünscht sein), sollten Schüttelabriebversuche am Sandasphalt entsprechend den vorliegenden deutschen Regelwerken bzw. der vorliegenden Forschungsarbeit durchgeführt werden. Auf Grund der langjährigen Erfahrungen in Deutschland mit dem Schüttelabriebverfahren sollten die bisherigen Grenzwerte bis auf Weiteres beibehalten werden.
- Auf Grund der guten Korrelationen mineralogisch-petrographischer Qualitätseinstufungen (Kap. 5.2.5.1) mit den Schüttelabriebs am Sandasphalt, aber auch mit den Asphaltprüfungen (vgl. Abb. 20 bis Abb. 22) auf Basis der in dieser Arbeit vorgeschlagenen mineralogisch-petrographischen Grenzwerte könnten diese künftig zur Absicherung der Ergebnisse des Schüttelabriebs beitragen. Eine weitere Datensammlung zur Verifizierung der Zusammenhänge wird empfohlen.
- Ergänzende mineralogisch-petrographische Untersuchungen können im Fall ungewöhnlicher oder unerwarteter Messwerte einer Erklärung dienen und dazu beitragen, ggf. Aufbereitungsoptionen zu optimieren. Petrographische Untersuchungen nach dem Schweizer Vorbild ggf. unter Modifikation bzw. Erweiterung der Grenzwerte sollten

begleitend zu den Schüttelabrieben durchgeführt werden, wenn die feinen Gesteinskörnungen auch mechanischen Beanspruchungen hochbelasteter Straßen genügen müssen.

7 QUELLENVERZEICHNIS

- BALLMANN, P. (1999): Einfluss unterschiedlicher Sande auf die Griffigkeit von Fahrbahnen aus Asphaltbeton (Versuchsstrecke Rottweil). Interner BAST-Bericht vom November 1999.
- BRINDLEY, G.W. & BROWN, G. (1980): Crystal Structures of Clay Minerals and their X-Ray Identification. - Mineralogical Society, 495 S., London.
- DIN EN 12274-7 Dünne Asphaltsschichten in Kaltbauweise -Teil 7: Schüttel- Abriebprüfung.
- EN 12697-6 (2012): Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 6: Bestimmung der Raumdichte von Asphalt-Probekörpern.
- EN 12697-12 (2015): Asphalt - Prüfverfahren - Teil 12: Bestimmung der Wasserempfindlichkeit von Asphalt-Probekörpern.
- EN 12697-23 (2018): Asphalt - Prüfverfahren - Teil 23: Bestimmung der indirekten Zugfestigkeit von Asphalt-Probekörpern.
- EN 12697-33 (2007): Asphalt — Prüfverfahren für Heiasphalt — Teil 33: Probestückvorbereitung durch Rollenverdichtungsgerät.
- EN 13043: Gesteinskörnungen für Asphalt und Oberflächenbehandlungen für Straßen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen (deutsche Fassung).
- EN 13242: Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für den Ingenieur- und Straßenbau (deutsche Fassung).
- EN 1744-4 (2005): Prüfverfahren für chemische Eigenschaften von Gesteinskörnungen. Teil 4: Bestimmung der Wasserempfindlichkeit von Füllern in bitumenhaltigen Mischungen.
- EN 932-3: Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen. Teil 3: Durchführung und Terminologie einer vereinfachten petrographischen Beschreibung.
- EN 933-8 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 8: Beurteilung von Feinanteilen - Sandäquivalent-Verfahren

EN 933-9 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 9: Beurteilung von Feinanteilen - Methylenblau-Verfahren.

FEIX, R.: Entwicklung eines Prüfverfahrens für die Hitzebeständigkeit von Naturgestein. Bericht über den Forschungsauftrag Nr. 9.29. Technische Universität München, München 1975.

Feix, R: Untersuchungen von Sanden zur Ermittlung der auf die Qualität bituminöser Mörtel wirksamen Einflussfaktoren. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft Nr. 275, Bundesministerium für Verkehr, Bonn. 1979.

Graf, K. & Vassiliou, K.: Auswirkungen der Eigenschaften von Sand und Füller auf den Mörtel von Walzasphalt (Splittmastixasphalt / Asphaltbeton). Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft Nr. 964, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn. 2007.

Grönniger, J., Wistuba, M.P.: Einfluss der feinen Gesteinskörnungen und des Asphaltmörtels auf die Gebrauchseigenschaften von Asphalt. Schlussbericht zu FE 06.0090/2008/DGB.

ISO 9277: 2010 09 01: Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption - BET method

KINTER, E.B. & DIAMOND, S. (1956): A new Method for preparation and treatment of orientied - aggregate specimens of soil clays for X-Ray diffraction analysis. - Soil Sci. 81, 111-120, Baltimore.

KUGLER, H. (2002): Frostsicherheit im Straßenbau – Ein verbessertes Mineralkriterium. Dissertation am Inst. f. Angewandte Geologie, Univ. f. BOKU Wien.

MACKENZIE, R. C., 1964. The thermal investigation of soil clays. In: RICH, C. I. & KUNZE, G. W. (eds.). Soil clay mineralogy – A symposium. The University of North Carolina Press, Raleigh, North Carolina, 200 – 244

Moore, D.M. & Reynolds, R.C., Jr., 1997: X – Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. Oxford Univ. Press, 378 p, New York.

MÜLLER, R. H. (1996): Zetapotential und Partikelladung in der Laborpraxis. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH Stuttgart.

ÖNORM B 4810 (2013): Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen. Frostsicherheit von Gemischen für ungebundene Tragschichten im Straßen- und Flugplatzbau.

ÖNORM L 1084 (2016): Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung von Carbonat unter Berücksichtigung von Luftdruck und Temperatur.

Riedmüller, G., 1978: Neoformations and Transformations of Clay Minerals in Tectonic Shear Zones. - *TMPM Tschermaks Min. Petr. Mitt.* 25, 219-242

Rietveld, H.M. 1967: Line profiles of neutron powder-diffraction peaks for structure refinement. *Acta Crystallogr.*, 22, 151-152

Rietveld, H.M. 1969: A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. *J. Appl Crystallogr.*, 2, 65-71

Röthlisberger, F. 2008: Einfluss von Schichtsilikaten für die Verwendung im Straßenbau. Forschungsbericht VSS ASTRA 1999/276.

SHELLENBERG, K. (1993): Entwicklung eines Prüfverfahrens für die mechanische Festigkeit von Sanden in Asphaltmischungen. Abschlussbericht zum Forschungsauftrag Nr. 7.005 G 73 E. Institut für Materialprüfung Dr. Schellenberg Rottweil, Rottweil 1993.

Schellenberg, P., Schneider M. & Jumpertz, M. (2007): Abschließende Messungen auf der bestehenden Sandversuchstrecke im Zuge der B14, Umgehung Rottweil. – *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft Nr. 966, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn.

SMYKATZ-KLOSS, W. (1974): *Differential Thermal Analysis, Application and Results in Mineralogy*, Springer Verlag, 185S, Berlin, Heidelberg, New York.

SN 670 115 (2004): Gesteinskörnungen. Qualitative und quantitative Mineralogie und Petrographie.

SN 670 116 (2012): Füller. Mineralogie, Petrographie und quellfähige Tonmineralien.

Thorez, J., 1975: *Phyllosilicates and clay minerals - a laboratory handbook for their x-ray diffraction analysis.* - Editions G. Lelotte, 579 S., Liege.

- TL Gestein-StB 04: „Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Ausgabe 2004, Fassung 2007“ (mit Änderung im April 2016). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- TP Asphalt-StB-Teil 6: Technische Prüfvorschrift für Asphalt. Raumdichte von Asphalt-Probekörpern (2007).
- TP Asphalt-StB-Teil 12: Technische Prüfvorschrift für Asphalt. Wasserempfindlichkeit von Asphalt-Probekörpern.
- TP Asphalt-StB-Teil 23: Technische Prüfvorschrift für Asphalt. Spaltzugfestigkeit von Asphalt-Probekörpern (2007).
- TP Asphalt-StB-Teil 30: Technische Prüfvorschrift für Asphalt. Herstellung von Asphalt-Probekörpern mit dem Marshall-Verdichtungsgerät (MVG) (2007).
- TP Gestein-StB, Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Teil 6.6.3: Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen - Schüttelabrieb-Verfahren.
- TP Gestein-StB, Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Teil 8.3.1: Bestimmung des Infiltrationsbeiwertes mit dem Standrohr-Infiltrometer – Laborverfahren.
- TP Gestein-StB, Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Teil 8.3.2: Bestimmung des Infiltrationsbeiwertes mit dem Modifizierten Standrohr-Infiltrometer – in situ Verfahren.
- Tributh, H.,1991: Notwendigkeit und Vorteil der Aufbereitung von Boden- und Lagerstättentonen. - In: Tributh, H. & Lagaly, G. [Hrsg.] : Identifizierung und Charakterisierung von Tonmineralen, Berichte der DTTG, 1, 29-33, Giessen.
- Völkl, J.: Bestimmung der Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen mit dem Schüttel-Abriebverfahren – Durchführung eines Ringversuchs zur Ermittlung der Präzision unter Vergleichsbedingungen für feine Gesteinskörnungen einschließlich Bestimmung eines nationalen Bewertungshintergrundes. – FGSV 3/09. FGSV Datensammlung gesteintechnische Eigenschaften von feinen

Gesteinskörnungen (Füller und Sand) – Erstellt vom AK 6.1.2 Füller und Sandeigenschaften, 2016.

WESTINER, E; NEIDINGER, S.; WÖRNER, TH.; SCHELLENBERG, K.: Sand: Qualitätseigenschaften und Auswirkungen auf Asphalt. Gesteinstagung 2007. Schriftenreihe der Arbeitsgruppe „Gesteinskörnungen, Ungebundene Bauweisen“. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2008. ISBN 978-3-939715-66-5.

Whittig, L.D., 1965: X-ray diffraction techniques for mineral identification and mineralogical composition. In: Black, C.A. [editor.]: Methods of Soil Analysis, 671-698. 1. Amer. Soc. Agron., Madison, Wisconsin.

WILSON, M.J. (1987): A handbook of determinative methods in clay mineralogy. – Verlag Blackie, 308S, Glasgow and London.

8 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Ergebnisse der Schüttelabriebprüfungen an 35 feinen Gesteinskörnungen und Kennzeichnung der für die Asphaltuntersuchungen ausgewählten Gesteinskörnungen.....	15
Abb. 2: Workflow zur Erreichung der Zielvorgaben (SA = Schüttelabrieb, Infiltrat. = Infiltrationen, FH = Frosthebungen).	17
Abb. 3: Methylenblauversuch nach EN 933-9.	25
Abb. 4: Sandäquivalentverfahren nach EN 933-8	26
Abb. 5: Apparatur zum Schüttelabrieb.	28
Abb. 6: Schüttelabrieb am Sandasphaltprobekörper	29
Abb. 7: Schüttelabrieb am Marshallprobekörper	29
Abb. 8: Zusammenhang zwischen Schüttelabrieb und Bindemittelbedarf zur Erzielung des gewünschten Hohlraumgehaltes.....	31
Abb. 9: Korrelation MB_F mit unterschiedlichen Anteilen an mineralogischen Reinphasen im Füller.	35
Abb. 10: Korrelation $SE(10)$ mit unterschiedlichen Anteilen an mineralogischen Reinphasen im Füller.....	36
Abb. 11: Korrelation SA-Sand (Schüttelabrieb am Sand bei Variation Reinphasen im Füller unter Konstanthaltung des Referenzsand) mit unterschiedlichen Anteilen an mineralogischen Reinphasen im Füller.	37
Abb. 12: Korrelationen der Quellung Q_E mit Smektitanteil im Füller (links) und mit MB_F bez. Smektit (rechts).....	39
Abb. 13: Korrelation von jeweils gleichen Mischungsstufen zwischen MB_F und S_E (Schüttelabrieb am Sand-Serie E). Links: bez. der Mischungsstufen mit Smektit, rechts: bez. aller Mischungsstufen mit allen Mineralen.....	40
Abb. 14: Korrelation von jeweils gleichen Mischungsstufen zwischen MB_F und Q_E (Quellung im Zuge von Schüttelabrieb am Sand-Serie E). Links: bez. der Mischungsstufen mit Smektit, rechts: bez. aller Mischungsstufen mit allen Mineralen.	41
Abb. 15: Korrelation von jeweils gleichen Mischungsstufen zwischen MB_F und $SE(10)$. Links: bez. der Mischungsstufen mit Smektit, rechts: bez. aller Mischungsstufen mit allen Mineralen.	41
Abb. 16: Korrelation von jeweils gleichen Mischungsstufen zwischen S_E (Schüttelabrieb am Sand-Serie E) und $SE(10)$. Links: bez. der Mischungsstufen mit Smektit, rechts: bez. aller Mischungsstufen mit allen Mineralen.	42

Abb. 17: Korrelation gesamte Gewichtsverluste STA mit LOI aus der geochemischen Analytik (links) sowie Korrelation Gewichtsverlust STA 650-1000°C mit Karbonatgehalt nach Scheibler.	44
Abb. 18: Gegenüberstellung Masseverluste nach STA bei 90-200°C mit Quellbaren nach geochemischer Verrechnung.	46
Abb. 19: Rangreihung der untersuchten Feinanteile nach der Summe aus Glimmer und Chlorit.	47
Abb. 20: Gegenüberstellung der petrographischen Füllereinstufungen mit MB _F , SE (10) und S _A . Oben mit allen Materialien, unten unter Ausschluss von 18_0445, 18_0104 und 18_0105.	54
Abb. 21: Gegenüberstellungen der petrographischen Noten für Füller (oben), Sand (Mitte) sowie Sand+Füller (unten) mit S _A und S _F	55
Abb. 22: Gegenüberstellungen der petrographischen Noten für Füller (oben), Sand (Mitte) sowie Sand+Füller (unten) mit je einem Vertreter des Schüttelabrieb am Asphalt sowie mit ITSR am Asphalt.	56
Abb. 23: Abhängigkeit der MB-Adsorption von der mittleren Korngröße der untersuchten Fraktionen (Probe 18_0441).	58
Abb. 24: Korrelation von MB _{trocken} mit MB _{original} (links) und MB _F (rechts).	58
Abb. 25: Mineralogische Abhängigkeiten des MB _F -Wertes.	60
Abb. 26: Mineralogische Abhängigkeiten des SE (10)-Wertes.	62
Abb. 27: Mineralogische Korrelationen mit den spezifischen Oberflächen.	64
Abb. 28: Zeta-Potenziale in Abhängigkeit von der Mineralogie.	66
Abb. 29: Mineralogische Abhängigkeiten des S _A	68
Abb. 30: Mineralogische Abhängigkeiten des S _E (Schüttelabrieb am Sand-Serie E).	70
Abb. 31: Mineralogische Abhängigkeiten des S _F (Schüttelabrieb am Sand-Serie F).	71
Abb. 32: Korrelationen von SE mit Glimmer und der Summe aller Tonminerale bei Betrachtung aller Füller (oben) und bei Betrachtung der für die Performance-Prüfungen selektierten Füller (unten).	73
Abb. 33: Schüttelabrieb an Asphalt-BK (50) in Abhängigkeit von der Mineralogie.	74
Abb. 34: Frosthebungen und Infiltrationen der untersuchten Materialien.	77
Abb. 35: Überblick zu den Wertespreizungen der untersuchten Materialien bez. MB _F , SE (10) und den Schüttelabrieben an Füller und Sand (mit Eigen- und Fremdfüller) bei gleicher Ordinaten-skalierung.	79

Abb. 36: Kompilierte Darstellung der Wertespreizungen aus Abb. 35 (mit Füllerbezug) und ergänzend der verringerten Wertespreizungen (schraffiert) nach Ausschluss der Extrema (5 höchste und 5 niedrigste Werte).	80
Abb. 37: Darstellung, welche Proben den gleichen MB-Wert von 3,3 aufweisen (gelbe Pfeile).	81
Abb. 38: Überblick zu den Wertespreizungen der untersuchten Materialien bez. Asphaltprüfungen: Schüttelabrieb am MPK und BK (grau) sowie Spaltzugversuche mit ITSR-Werten (dunkelgrau).	82
Abb. 39: Korrelationen von MB_F mit den Schüttelabrieben: S_A , S_F und S_E	86
Abb. 40: Korrelationen von S_F mit MB_F (links) und $MB_{trocken}$ (Mitte) sowie von S_E mit $MB_{trocken}$ (rechts).	86
Abb. 41: Korrelationen von $MB_{trocken}$ mit Asphaltversuchen: $S_{EA-BK50}$, $S_{EA-BK35}$ und $ITSR_{E-BK50}$	86
Abb. 42: Korrelation spezifische Oberfläche / MB_F (links) und - / $MB_{trocken}$ (rechts).	87
Abb. 43: Korrelation spezifische Oberfläche mit den Schüttelabrieben: S_A (links), S_E (Mitte) und S_F (rechts).	88
Abb. 44: Korrelationen zwischen spezifischer Oberfläche und Schüttelabrieb am Asphalt mit Eigenfüller (oben MPK, unten BK).	89
Abb. 45: Korrelationen zwischen spezifischer Oberfläche und ITSR (Reduktion der Spaltzugfestigkeit) am Asphalt mit Eigenfüller (oben MPK, unten BK).	90
Abb. 46: Korrelationen von SE (10) mit Schüttelabrieb am Asphalt (oben: MPK, unten BK).	91
Abb. 47: Korrelationen von SE (10) mit Spaltzugrelation am Asphalt (oben: MPK, unten BK).	92
Abb. 48: Korrelationen zwischen Quellungen aus den Schüttelabriebversuchen an Füller und Sand.	93
Abb. 49: Korrelationen zwischen Q am Füller mit Q an den Schüttelabrieben an Füller und Sand.	94
Abb. 50: wie Abb. 49, aber ohne die drei höchsten Quellungen am Füller.	94
Abb. 51: wie Abb. 49, aber nur die 9 Füller für die Asphaltprüfungen.	94
Abb. 52: Korrelationen zwischen Q am Füller und Schüttelabrieb Asphalt (BK50, links) sowie Spaltzugversuchen (ITSR, BK50, rechts). Die Skalierung für Q ist die gleiche wie in den Abb. oben.	95
Abb. 53: Korrelationen von S_A mit S_E (links) und S_F (rechts), oben alle Materialien, unten nur die neun Materialien für die Asphaltuntersuchungen.	96

Abb. 54: Korrelation S_E / S_F , oben alle Materialien, unten nur die 9 Materialien für die Asphaltuntersuchungen. Die blaue Markierung im rechten Diagramm zeigt jene Materialien, deren Sande in Relation zu den übrigen Materialien deutlich höhere Schüttelabriebe verursachen. Die Regression im rechten oberen Diagramm bezieht sich auf die Proben unter Ausschluss der blau markierten Proben.....	97
Abb. 55: Korrelationen zwischen S_A und Schüttelabrieb am Asphalt (BK50, links) sowie Spaltzugversuchen (ITSR, BK50, rechts). Die Skalierung für S_A ist die gleiche wie in den Abb. oben.	98
Abb. 56: Ergebnisse des Schüttelabriebs an Asphalt-Probekörpern für die vier Probenserien (MPK35, MPK35, BK35 und BK50) in Abhängigkeit vom Schüttelabrieb der Sandasphaltproben mit Eigen- (links) und mit Fremdfüller (rechts).	100
Abb. 57: Korrelationen aus Tab. 17.....	102
Abb. 58: Korrelationen der Bestimmtheitsmaße von Asphaltuntersuchungen mit anderen Versuchen aus Tab. 15.....	103
Abb. 59: Maschine für den Schüttelabrieb	127
Abb. 60: Vermaßung des Gerätes.....	127
Abb. 61: Schüttelzylinder mit Anbauteilen.....	128

9 TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1: Untersuchte Gesteinskörnungen (rot hinterlegt sind jene Proben, an denen im Endeffekt Performance-Untersuchungen, v.a. an Asphalt durchgeführt wurden).	13
Tab. 2: Ergebnisse der Erstprüfungen für einen Asphaltbeton AC 11 D S mit zehn unterschiedlichen feinen Gesteinskörnungen (Probe (18_)0445 konnte in weiterer Folge nicht weiterbearbeitet werden).	31
Tab. 3: Untersuchungsergebnisse an den Mischungsstufen mit mineralogischen Reinphasen im Füller (Mischungspartner Standardkalksteinmehl). W_E = Wasseraufnahme, Q_E = Quellung (jeweils im Zuge der S_E - Schüttelabriebprüfung-Serie E).	34
Tab. 4: Gewichtungsfaktoren in Abh. v. den Resultaten der Reinphasen bei MB_F und S_E	38
Tab. 5: Anforderungen an Sand für (hochwertigen) Asphalt.	48
Tab. 6: Anforderungen an Füller für Asphalt (Biotit: derzeit nicht in der Norm verankert, aber vorgesehene Anpassung bei der nächsten Revision der Norm).	48
Tab. 7: Einstufung gem. Anforderungen SN 670 115 (0,063 – 2 mm) nach petrographischer Analyse der Sandfraktionen 0,25/0,5 mm. Rote Unterlegung bedeutet Grenzwertüberschreitung, orange Unterlegung bedeutet, dass weitere Untersuchungen für die definitive Beurteilung nötig sind. Grüne Unterlegung erfüllt die Anforderungen.	49
Tab. 8: Einstufung gem. Anforderungen SN 670 116 (Füller). Rote Unterlegung bedeutet Grenzwertüberschreitung. In den rechten beiden Spalten sind zum Vergleich die resultierende Beurteilung gem. SN sowie die Beurteilung der Ergebnisse der Schüttelabriebe am Füller dargestellt. Rosa unterlegt sind Füller, deren Chemismen eher als intermediär einzustufen sind (daher nicht rot, weil sich der Grenzwert auf „saure“ Kristallingesteine bezieht).	52
Tab. 9: Zuordnung von Schulnoten zu den vorgeschlagenen Grenzwerten (Maximalgehalten) der jeweiligen Minerale im Füller.	53
Tab. 10: Zuordnung von Schulnoten zu den vorgeschlagenen Grenzwerten (Maximalgehalten) der jeweiligen Minerale im Sand (Fraktion 0,25-0,5 mm).	53
Tab. 11: MB-Werte an unterschiedlichen Fraktionen [mm] zweier feiner Gesteinskörnungen.	57
Tab. 12: Überblick zu den wesentlichen Eigenschaften der ausgewählten Füller für die Asphaltprüfungen.	72
Tab. 13: Vergleich der Schüttelabriebe mit und ohne Haftverbesserer sowie mit Fremdfüller (Kalksteinmehl).	75
Tab. 14: Vergleich der Quellungen mit und ohne Haftverbesserer sowie mit Fremdfüller (Kalksteinmehl).	76

Tab. 15: Bestimmtheitsmaße (gerundet auf 0,01) linearer Korrelationen (oben: farbliche Abstufung der Bestimmtheitsmaße, unten: Kategorisierung durch Symbole, Legende s. dort).	84
Tab. 16: Ergebnisse des Schüttelabriebs an Asphalt-Probekörpern für die vier Probenreihen (MPK35, MPK35, BK35 und BK50) in Abhängigkeit vom Schüttelabrieb der Sandasphaltproben mit Eigen- und mit Fremdfüller.	99
Tab. 17: Ergebnisse der Schüttelabriebe der Proben mit Eigen- und mit Fremdfüller sowie des Abfalls der Spaltzugfestigkeit für die drei Probenreihen MPK35 und die Bohrkern aus WSV-Platten (BK35 bzw. BK50).....	101
Tab. 18: Beurteilungsmatrix zur Eignung der Verfahren (Prinzip österr. Schulnotensystem).	106
Tab. 19: Weitere Einstufungen der Versuche.....	107
Tab. 20: Korngrößenverteilung nach Siebungen sowie der Anteil < 0,002 mm in den Feinanteilen (Spalte ganz rechts).....	130
Tab. 21: Darstellung der Elementoxidverteilung sowie des Glühverlustes (LOI).....	131
Tab. 22: Gewichtsverluste [M.-%] im Rahmen der STA, differenziert nach Temperaturbereichen sowie der Gesamt-Karbonatgehalt nach Scheibler (Spalte ganz rechts).	132
Tab. 23: Tonmineralverteilung (bezogen auf 100% Schichtsilikate) innerhalb der Fraktionen < 0,002 mm.....	133
Tab. 24: Gesamtmineralverteilung (Rechenwerte gerundet auf 1, außer Gehalte ≤ 0,5%).	134
Tab. 25: Zeta-Potenzial, Spezifische Oberfläche nach BET, MB- und SE-Messwerte.....	135
Tab. 26: Petrographische Beurteilung von Füller und Sand nach dem Schulnotensystem (1=sehr gut – 5 = sehr schlecht)	136
Tab. 27: Überblick zu den Schüttelabriebe an Füller und Sand und Einstufung gem. in Bayern gültiger Grenzwerte (Überschreitung rot).	137

10 ANHANG

10.1 Arbeitsanleitung für die Prüfung von Walzasphalt auf Wasserempfindlichkeit mit dem Schüttelabrieb am Marshall-Probekörper

Kurzbeschreibung des Verfahrens

Bewertung der Wasserempfindlichkeit von Walzasphalten durch Bestimmung des Masseverlusts an Marshall-Probekörpern nach mechanischer Beanspruchung in Gegenwart von Wasser (Schüttelabrieb).

Geräte

- Gerät für Herstellung von Marshall-Probekörpern nach DIN EN 12679-30 (bzw. TP Asphalt-StB, Teil 30),
- Messvorrichtung für Raumdichtebestimmung gemäß DIN EN 12679-6 (bzw. TP Asphalt-StB, Teil 6), Verfahren B,
- thermostatisch geregelte Wasserbäder zum Temperieren von Probekörpern bei + 50 °C und bei + 25 °C.

Die Wasserbäder müssen mit einem Zwischenboden ausgerüstet sein, der auf Abstandhalten über dem Boden angeordnet wird; das Fassungsvermögen der Wasserbäder muss ausreichen, um sicherzustellen, dass sich die Oberseiten der Probekörper während der Wasserlagerung mindestens 20 mm unterhalb der Wasseroberfläche befinden

Vakuumkammer mit einem gelochten Zwischenboden

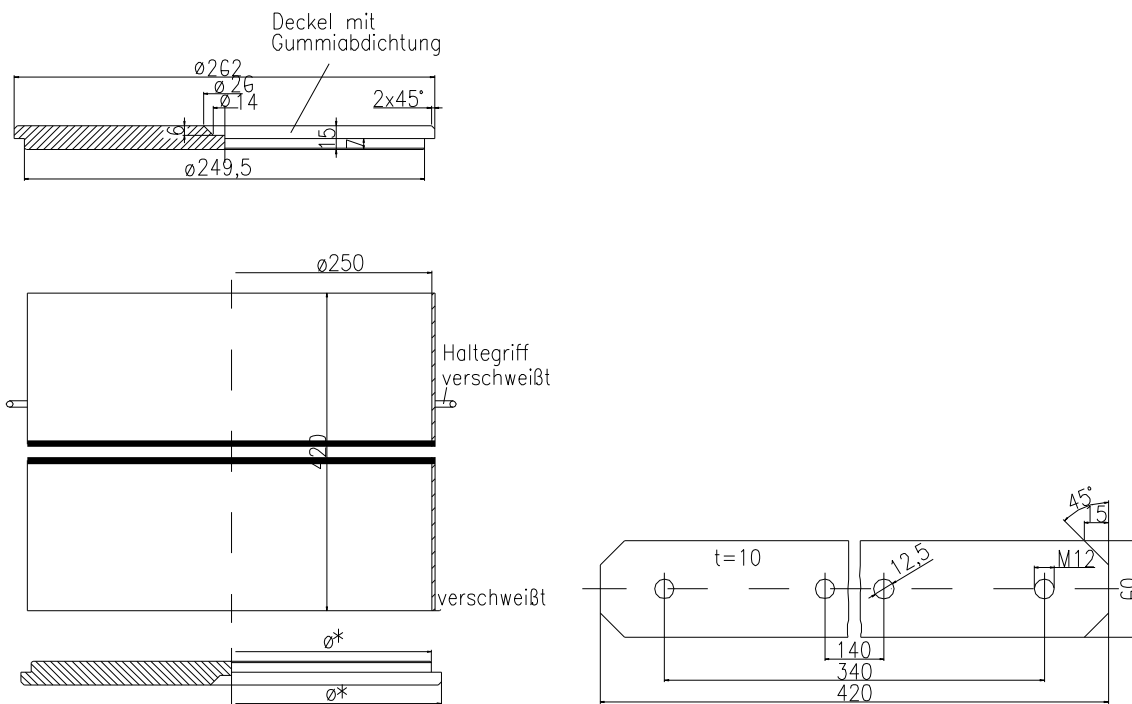
Vakuumanlage, die in der Lage ist, die Vakuumkammer innerhalb von 10 Minuten auf einen Restdruck von 6,7 kPa zu evakuieren und diesen Druck 30 min lang aufrecht zu erhalten

Schüttelmaschine mit mind. 2 Schüttelzylindern (Abb. 59 und Abb. 60)

Kunststoffbürste



Abb. 59: Maschine für den Schütteltrieb



* \varnothing dem Rohr angepasst

Abb. 60: Vermaßung des Gerätes

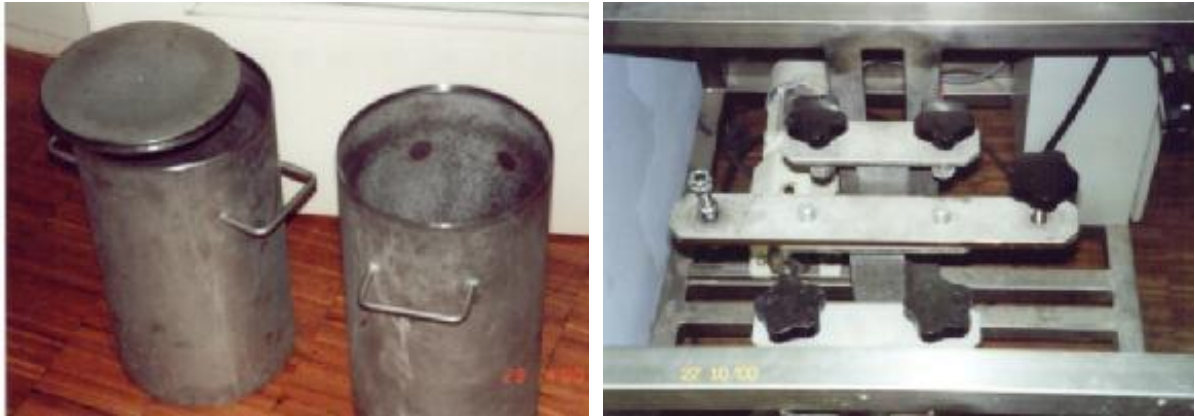


Abb. 61: Schüttelzylinder mit Anbauteilen

Zusammensetzung der Marshall-Probekörper

Es werden Marshall-Probekörper, hergestellt nach DIN EN 12679-30 (bzw. TP Asphalt-StB, Teil 30) mit der für den Einbau empfohlenen Mischgutzusammensetzung auf Grundlage einer Erstprüfung geprüft.

Für die Bewertung des Einflusses des Sandes und/oder des Füllers auf die Wasserempfindlichkeit wird die Herstellung und Prüfung von Marshall-Probekörpern nach DIN EN 1744-4, Anhang A empfohlen. Für die Bestimmung des Schüttelabriebs ist - falls keine weiteren Prüfungen wie z. B. Bestimmung des Stabilitätsverlusts oder des Spaltzugfestigkeitsabfalls durchgeführt werden - die Herstellung und Prüfung von drei Marshall-Probekörpern erforderlich.

Vor Beginn der Beanspruchung sind die Probekörper mindestens neun Stunden, jedoch höchstens 24 Stunden lang bei Raumtemperatur zu lagern.

Prüfung

An den Probekörpern wird zunächst die Raumdichte gemäß DIN EN 12697-6 (bzw. TP Asphalt-StB, Teil 6), Verfahren B (SSD- Verfahren) bestimmt.

Die Probekörper sind anschließend auf den Zwischenboden der Vakuumkammer zu legen, die so hoch mit destilliertem und auf + 1 °C temperiertem Wasser gefüllt ist, dass die Probekörper mindestens 20 mm überdeckt sind. Die Vakuumkammer ist innerhalb von 30 Minuten auf einen Restdruck von 25 mbar zu evakuieren. Das Vakuum ist 150 Minuten lang aufrecht zu erhalten. Danach ist in der Vakuumkammer innerhalb 60 Minuten wieder atmosphärischer Druck aufzubauen. Die Probekörper sind weitere 30 Minuten lang vollständig eingetaucht im Wasser zu lagern. Nach der Wassersättigung werden die Probekörper 24 Stunden lang im Wasserbad

bei + 50 °C gelagert. Unmittelbar vor der Schüttelbeanspruchung werden die Probekörper 90 Minuten lang unter Wasser bei + 25 °C gelagert.

Bei Prüfung von Probekörpern aus offenporigen Asphalten kann nach Bestimmung der Raumdichte gemäß DIN EN 12697-6 (bzw. TP Asphalt-StB, Teil 6), Verfahren D auf die Wassersättigung verzichtet werden. Diese Probekörper können direkt im Wasserbad bei +50 °C gelagert werden.

Die rotierende Beanspruchung der Probekörper erfolgt in den mit 15 Liter Wasser gefüllten Zylindern bei 20 Umdrehungen pro Minute und einer Dauer von drei Stunden. Für das Befüllen der Zylinder wird das auf + 25 °C temperierte Wasser aus dem Wasserbad verwendet. Nach Abschluss der Beanspruchung werden die Probekörper mit einer Kunststoffbürste von losem Material befreit, bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und gewogen.

Auswertung

Der Schüttelabrieb errechnet sich als prozentuale Differenz der Masse des Probekörpers vor und nach der Schüttelbeanspruchung, bezogen auf die Masse des Probekörpers vor der Schüttelbeanspruchung. Die Masse des Probekörpers vor der Schüttelbeanspruchung ist aus der Bestimmung der Raumdichte bekannt.

Der Schüttelabrieb ist auf 0,1 M.-% als arithmetisches Mittel aus drei Einzelwerten anzugeben.

10.2 Ergebnistabellen

Auf den nachfolgenden Seiten sind im Text erwähnte Ergebnistabellen angeführt.

Tab. 20: Korngrößenverteilung nach Siebungen sowie der Anteil < 0,002 mm in den Feinanteilen (Spalte ganz rechts).

	Siebdurchgang [M.-%] bei mm gem. DIN EN 933-1														Messwerte Analysette
	8,0	5,6	5,0	4,0	2,8	2,0	1,0	0,71	0,50	0,25	0,125	0,09	0,063	0,063 bez. auf 2 mm	Anteil < 2µ in <63µ
18_0084	100,0	100,0	100,0	100,0	99,6	91,0	55,9	44,7	36,7	26,3	19,6	17,3	14,7	16,2	20,2
18_0088	100,0	100,0	100,0	100,0	99,8	94,7	61,8	48,9	38,2	20,6	9,7	7,3	5,3	5,6	9,2
18_0089	100,0	100,0	100,0	100,0	99,1	89,5	57,6	45,3	35,0	18,5	7,9	5,7	4,1	4,6	26,3
18_0092	100,0	100,0	100,0	100,0	99,7	91,8	58,6	46,5	36,8	22,1	11,1	7,7	4,7	5,1	16,2
18_0097	100,0	100,0	100,0	100,0	99,7	92,1	60,7	50,5	43,0	31,8	21,1	17,0	12,9	14,0	13,3
18_0101	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	95,2	68,6	57,3	47,1	28,2	16,4	12,4	8,7	9,2	17,5
18_0102	100,0	100,0	100,0	98,8	80,3	62,2	40,0	32,8	27,1	18,9	13,6	11,9	10,0	16,1	23,8
18_0103	100,0	100,0	100,0	100,0	99,8	92,1	61,9	49,8	40,1	26,0	18,0	15,7	13,3	14,5	28,5
18_0104	100,0	98,8	97,0	90,8	79,1	65,0	40,8	32,2	25,4	16,0	11,2	9,8	8,6	13,2	19,4
18_0105	100,0	100,0	100,0	100,0	97,5	86,6	56,8	43,8	33,5	20,0	12,7	10,6	9,0	10,4	15,4
18_0331	100,0	100,0	100,0	100,0	99,2	90,4	54,8	42,8	34,0	23,0	17,5	16,1	14,6	16,1	21,7
18_0439	100,0	99,9	99,9	99,9	99,9	97,8	82,4	67,7	54,8	35,6	23,6	19,6	15,9	16,2	11,3
18_0440	100,0	99,8	98,6	92,4	83,0	72,9	56,0	48,3	41,4	29,4	20,1	16,9	13,7	18,9	11,7
18_0441	100,0	100,0	100,0	100,0	99,4	94,0	69,8	58,2	48,3	29,8	16,0	12,3	9,4	10,0	12,9
18_0442	100,0	99,9	99,8	99,2	96,1	86,4	61,0	49,5	40,3	26,2	17,5	14,7	12,2	14,2	25,1
18_0443	100,0	99,9	99,4	96,8	89,7	80,1	58,6	47,9	38,7	23,8	14,3	11,3	8,7	10,9	25,6
18_0444	100,0	100,0	100,0	100,0	98,3	86,8	58,5	46,5	37,2	23,6	15,0	12,3	9,9	11,4	22,6
18_0445	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,7	75,1	58,7	45,7	27,7	16,8	13,4	10,4	10,4	22,4
18_0446	100,0	100,0	100,0	98,7	93,1	78,4	51,5	41,7	34,5	24,5	18,2	16,0	13,8	17,6	20,5
18_0447	100,0	98,4	95,0	83,2	68,3	54,7	36,7	31,0	26,6	20,3	15,7	14,1	12,1	22,2	21,2
18_0448	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	98,2	81,0	70,2	60,2	42,3	29,0	24,2	19,3	19,7	22,7
18_0449	100,0	100,0	100,0	100,0	99,5	91,1	52,2	36,2	24,0	10,4	7,2	6,7	6,2	6,8	33,1
18_0450	100,0	99,1	96,8	89,6	75,9	59,5	33,4	24,0	16,4	8,5	6,2	5,8	5,4	9,1	34,8
18_0451	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	94,6	66,0	51,2	38,2	20,7	13,3	10,1	7,2	7,6	12,4
18_0452	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	98,6	80,2	66,8	55,0	39,6	32,3	30,2	28,4	28,8	19,9
18_0453	100,0	99,7	99,3	97,9	93,7	87,4	65,3	56,0	48,4	33,7	15,7	8,5	3,5	4,0	12,4
18_0454	100,0	100,0	100,0	99,9	99,7	96,6	67,5	55,5	46,6	33,5	24,3	20,8	17,0	17,6	11,5
18_0455	100,0	100,0	100,0	100,0	99,8	98,6	84,8	70,8	58,0	32,4	13,6	8,0	4,6	4,7	15,6
18_0456	100,0	100,0	100,0	99,9	99,6	97,7	78,7	65,6	54,1	34,7	21,5	17,4	13,4	13,8	10,1
18_0457	100,0	98,8	98,6	97,4	92,7	85,5	74,2	70,1	65,4	41,4	16,3	12,3	9,7	11,3	10,9
18_0458	100,0	100,0	100,0	100,0	98,4	90,7	63,0	51,1	41,7	28,7	20,9	18,1	15,4	17,0	14,2
18_0459	100,0	100,0	100,0	100,0	99,8	96,3	69,3	57,1	46,2	28,3	17,2	14,1	11,8	12,2	20,7
18_4024	100,0	100,0	100,0	100,0	99,6	95,5	65,8	52,9	43,3	29,4	21,0	19,4	15,4	16,2	27,1
18_4025	100,0	99,1	97,7	86,1	70,6	56,2	35,8	28,7	23,3	15,3	10,0	9,0	6,5	11,5	11,9
18_8086	100,0	100,0	100,0	100,0	99,6	93,3	72,7	64,2	56,5	40,2	24,5	21,6	13,9	15,0	14,5

Tab. 21: Darstellung der Elementoxidverteilung sowie des Glühverlustes (LOI).

Probe Nr.	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	Mn3O4	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	SO3	V2O5	Cr2O3	SrO	ZrO2	BaO	NiO	CuO	ZnO	PbO	HfO2	LOI	Summe
18_0084	43,69	1,47	13,33	14,39	0,27	7,8	10,91	2,21	0,42	0,18	0,01	0,06	0,03	0	0,02	0,01	0,01	0,03	0,02	0	0,01	5,82	100,69
18_0088	51,36	1,74	18,27	11,61	0,14	5,22	3,92	1,37	3,13	0,24	0,52	0,04	0,03	0,01	0,06	0,1	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	2,26	100,09
18_0089	51,57	1	18,39	9,66	0,16	6,37	2,5	2,12	3,11	0,22	0,09	0,04	0,04	0	0,05	0,13	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	5,36	100,88
18_0092	43,76	2,2	14,66	10,56	0,21	9,63	10,18	3,82	1,63	0,77	0	0,04	0,03	0,11	0,04	0,11	0,03	0,01	0,02	0	0,01	2,58	100,40
18_0097	39,66	0,06	0,74	8,05	0,13	37,67	1,24	0,02	0,04	0,01	0,04	0,01	0,28	0	0	0	0,27	0	0,01	0,01	0	12,53	100,77
18_0101	47,87	0,41	8,71	2,50	0,06	2,32	17,55	1,09	2,26	0,10	0,52	0,01	0,02	0,04	0,02	0,06	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	16,30	99,87
18_0102	32,31	0,13	1,88	1,21	0,02	1,41	33,82	0,18	0,47	0,08	0,55	0,01	0,02	0,06	0,03	0,01	0	0	0,01	0	0,01	27,71	99,92
18_0103	24,84	0,14	2,79	0,94	0,01	3,03	35,27	0,28	0,61	0,05	0,28	0,01	0,01	0,12	0,01	0,01	0	0	0,01	0	0,01	31,51	99,93
18_0104	40,95	2,19	11,33	13,01	0,2	12,64	10,95	1,66	0,99	1,14	0,07	0,04	0,06	0,07	0,03	0,07	0,04	0	0,02	0	0,01	4,72	100,19
18_0105	40,43	2,12	10,75	12,73	0,21	12,93	11,87	1,48	0,88	0,97	0,12	0,04	0,06	0,07	0,02	0,06	0,04	0	0,02	0,01	0,01	6,06	100,88
18_0331	1,67	0,05	0,85	0,39	0,01	20,15	29,91	0,03	0,21	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0	0,01	0	0	0	0	45,55	98,92
18_0439	65,96	0,66	17,21	3,49	0,03	0,91	0,9	2,67	5,87	0,55	0,1	0,01	0,01	0	0,06	0,06	0	0	0,02	0,01	0,01	2,09	100,62
18_0440	65,34	0,59	17,56	3,59	0,03	0,97	0,91	2,36	5,84	0,52	0,26	0,01	0,01	0	0,05	0,06	0,01	0	0,02	0	0,01	2,42	100,56
18_0441	57,48	1,59	15,01	7,58	0,12	2,82	4,55	2,41	4,5	1,11	0,07	0,02	0,03	0,02	0,17	0,19	0,01	0	0,03	0	0,01	2,70	100,42
18_0442	59,86	0,77	18,29	4,97	0,1	0,92	2,8	2,69	5,22	0,26	0,13	0,01	0,02	0	0,04	0,16	0,01	0	0,02	0,01	0,01	4,05	100,34
18_0443	60,6	0,73	17,8	4,61	0,1	0,97	3,78	2,73	4,68	0,27	0	0,01	0	0	0,03	0,2	0	0	0,01	0,03	0,01	4,42	100,98
18_0444	56,73	0,68	17,16	4,83	0,18	3,07	3,93	4,31	3,43	0,27	0	0,02	0,01	0,03	0,04	0,19	0	0	0,02	0,02	0,01	5,09	100,02
18_0445	62,21	0,6	17,89	6,15	0,05	2,11	1,6	3,45	2,83	0,23	0	0,02	0,02	0,01	0,03	0,11	0,01	0	0,01	0,02	0,01	3,68	101,04
18_0446	43,12	2,1	12,2	12,3	0,22	12,77	10,89	2,78	1	0,79	0	0,04	0,07	0,1	0,03	0,09	0,06	0	0,02	0,02	0,01	2,76	101,37
18_0447	42,84	1,92	10,82	12,06	0,22	14,29	10,08	2,24	0,88	0,6	0,01	0,04	0,06	0,08	0,02	0,07	0,05	0,01	0,02	0	0,01	4,06	100,38
18_0448	28,7	3	11,31	12,12	0,17	4,16	19,68	1,27	2,12	0,43	0,29	0,04	0,01	0,04	0,04	0,03	0,01	0	0,02	0	0,01	16,61	100,06
18_0449	8,11	0,13	2,84	0,91	0,03	3,77	45,12	0,15	0,56	0,08	0	0,01	0	0,01	0	0	0	0,04	0	0,01	0,01	38,75	100,53
18_0450	10,61	0,19	3,72	1,19	0,03	3,97	42,39	0,18	0,72	0,08	0	0,01	0,01	0,01	0	0,01	0	0,01	0,01	0,01	0,01	37,17	100,33
18_0451	12,51	0,18	4,7	1,65	0,03	1,51	41,74	0,28	1,36	0,06	0,89	0,01	0,01	0,85	0,01	0,02	0	0	0	0	0,01	33,84	99,66
18_0452	26,12	0,42	9,27	3,13	0,05	1,65	30,25	0,25	2,67	0,08	0,48	0,01	0,01	0,22	0,01	0,03	0	0	0,01	0	0,01	25,65	100,32
18_0453	22,68	0,41	2,65	2,07	0,12	1,15	38,37	0,18	0,61	0,04	0,08	0,01	0,02	0,01	0,12	0,02	0,01	0	0,02	0	0,01	31,46	100,04
18_0454	49,6	0,96	16,81	9,5	0,15	9,08	8,57	2,62	0,59	0,19	0,06	0,03	0,04	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	2,91	101,22
18_0455	72,63	0,38	15,02	4,25	0,11	0,52	0,29	0,17	3,66	0,09	0,05	0,01	0,01	0	0,04	0,07	0	0	0,02	0,02	0,01	3,44	100,79
18_0456	83,99	0,21	6,13	1,94	0,03	1,27	1,58	1,04	1,13	0,13	0	0,01	0,01	0	0,01	0,02	0	0	0	0,01	0,01	2,96	100,48
18_0457	41,68	0,64	16,4	9,53	0,2	6,03	7,52	1,02	2,09	0,27	0,03	0,02	0,01	0	0,03	0,06	0,01	0	0,02	0,01	0,01	15,00	100,58
18_0458	66,58	0,85	11,69	5,23	0,13	2,96	3,11	0,83	3,14	0,11	0,04	0,02	0,04	0	0,07	0,07	0,01	0	0,01	0,01	0,01	5,53	100,44
18_0459	41,06	0,65	11,65	13,97	0,21	19,06	5,08	0,85	0,3	0,18	0,05	0,03	0,14	0,01	0,01	0,01	0,08	0,01	0,02	0	0,01	7,09	100,47
18_4024	54,56	0,29	16,42	1,89	0,05	0,66	9,31	1,98	5,13	0,38	0,01	0	0	0	0,01	0,03	0	0,23	0,02	0,02	0	8,93	99,92
18_4025	56,55	0,92	22,36	7,23	0,1	2,85	0,86	1,12	3,93	0,19	0	0,02	0,02	0	0,04	0,09	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	4,88	101,23
18_8086	61,54	1,02	16,59	5,56	0,08	2,5	5,6	4,02	2,16	0,87	0,05	0,02	0,01	0,05	0,05	0,07	0	0,04	0,02	0,01	0,01	0,89	101,16

Tab. 22: Gewichtsverluste [M.-%] im Rahmen der STA, differenziert nach Temperaturbereichen sowie der Gesamt-Karbonatgehalt nach Scheibler (Spalte ganz rechts).

Proben-Nr.	90°C- 220°C	220°C- 400°C	400°C- 650°C	650°C- 1000°C	Gesamt- verlust	Gesamtkarbonat-Gehalt [M.-%] nach Scheibler be- rechnet als Kalk
18_0084	0,12	0,16	1,86	3,51	5,90	6,9
18_0088	0,22	0,22	0,54	0,96	2,31	1,3
18_0089	0,19	0,29	2,79	1,99	5,64	2,8
18_0092	1,03	0,50	0,67	0,41	3,06	1,6
18_0097	0,84	0,89	6,08	4,33	13,03	2,9
18_0101	0,01	0,02	1,38	15,09	16,74	34,3
18_0102	0,15	0,19	1,06	26,46	28,26	62,6
18_0103	0,03	0,29	1,57	29,78	31,99	67,4
18_0104	1,19	0,32	1,39	2,21	5,31	4,3
18_0105	1,80	0,42	1,22	3,33	6,97	7,2
18_0331	0,00	0,05	0,90	44,62	45,64	100
18_0439	0,57	0,10	0,85	0,46	2,08	0,4
18_0440	0,65	0,05	1,04	0,61	2,45	0,2
18_0441	0,11	0,05	0,92	0,65	2,04	1,4
18_0442	0,12	0,03	1,24	1,76	3,58	3,5
18_0443	0,24	0,20	1,58	2,18	4,69	5,2
18_0444	0,36	0,12	1,74	2,73	5,43	5,7
18_0445	3,30	0,54	1,67	0,61	6,32	0,1
18_0446	0,69	0,59	0,91	0,92	4,06	2,0
18_0447	1,04	0,57	1,08	1,97	5,04	3,2
18_0448	0,12	0,14	2,60	13,86	16,94	31,1
18_0449	0,21	0,15	1,08	37,64	39,62	82,9
18_0450	0,23	0,16	1,43	35,98	38,21	79,5
18_0451	0,09	0,02	0,96	32,97	34,14	76,1
18_0452	0,41	0,33	1,37	23,56	26,33	54,4
18_0453	0,02	0,28	0,97	30,30	31,72	69,0
18_0454	0,21	0,00	1,58	0,45	2,35	1,0
18_0455	0,43	0,44	1,62	0,93	3,92	0,5
18_0456	0,05	0,07	0,60	1,77	2,79	3,9
18_0457	0,82	0,88	3,40	9,53	15,86	19,9
18_0458	0,38	0,91	1,99	3,05	6,10	6,9
18_0459	0,60	0,20	4,21	2,49	8,34	1,8
18_4024	0,39	0,18	1,75	6,78	9,60	14,5
18_4025	0,60	0,20	3,27	0,51	5,65	0,3

Tab. 23: Tonmineralverteilung (bezogen auf 100% Schichtsilikate) innerhalb der Fraktionen < 0,002 mm.

Proben-Nr.	Smektit	Vermikulit	Illit	Kaolinit	Chlorit	Mixed Layer	Serpentin	Summe Quellbare
18_0084	1	0	3	0	96	Sp	0	1
18_0088	9	9	55	9	18	0	0	18
18_0089	1	0	28	0	71	0	0	1
18_0092	50	0	18	0	32	0	0	50
18_0097	0	0	1	0	1	0	98	0
18_0101	0	0	76	0	24	0	0	0
18_0102	0	0	76	0	24	0	0	0
18_0103	0	0	99	0	1	0	0	0
18_0104	91	0	0	0	9	0	0	91
18_0105	96	0	0	0	4	0	0	96
18_0331	0	0	94	6	0	0	0	0
18_0439	17	0	39	11	33	0	0	17
18_0440	19	0	38	11	32	0	0	19
18_0441	16	0	13	0	71	0	0	16
18_0442	3	0	62	0	35	0	0	3
18_0443	3	0	64	0	33	0	0	3
18_0444	5	0	34	0	61	Sp	0	5
18_0445	67	21	7	5	0	0	0	88
18_0446	76	0	5	0	19	0	0	76
18_0447	84	0	4	0	13	0	0	84
18_0448	0	0	4	0	96	0	0	0
18_0449	0	0	73	27	Sp	0	0	0
18_0450	0	0	70	30	Sp	0	0	0
18_0451	0	0	89	0	11	0	0	0
18_0452	0	0	91	0	9	0	0	0
18_0453	0	0	61	38	1	0	0	0
18_0454	2	0	7	0	91	0	0	2
18_0455	0	0	94	3	3	0	0	0
18_0456	13	0	36	35	16	Sp (Corrensit)	0	13
18_0457	37	0	16	47	0	0	0	37
18_0458	1	0	60	0	39	0	0	1
18_0459	25	0	1	0	74	0	0	25
18_4024	0	0	83	5	12	Sp (Corrensit)	0	0
18_4025	16	4	30	30	20	0	0	20
18_8086	0	62	25	0	13	0	0	62

Tab. 24: Gesamtmineralverteilung (Rechenwerte gerundet auf 1, außer Gehalte $\leq 0,5\%$).

Probe Nr. TPA-intern	Quarz	Plagioklas	Kalifeldspat	Kalzit	Dolomit	Muskowit	basischer Glimmer	Chlorit	Kaolinit	Vermikulit	Smektit	Nephelein	Analcim	Sodalith	Pyroxen	Olivin	Amphibol	Ti-Mineral	Fe- (Hydr)oxid	Pyrit	Coelestin	Apatit	Sonst
18_0084	6	21	0,5	8	1	1	0	21	0	0	1	0	0	0	0	0	40	1	0	0	0	0	0
18_0088	18	12	12	0,5	2	0	17	5	1	1	1	0	0	0	0	0	14	2	4	0,5	0	0,5	*11
18_0089	15	17	3	1	2	29	0	21	0	0	2	0	0	0	0	0	6	2	2	0	0	0,5	0
18_0092	0	10	2	2	0	0	3	4	0	0	4	18	4	1	37	9	0	2	3	0	0	2	0
18_0097	0	0	0	0,5	3	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	12	3	0	6	0	0	0	**74
18_0101	30	7	5	28	7	18	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0,3	0,5	0	0	0
18_0102	29	1	2	57	6	3	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0	1	0	0	0
18_0103	20	3	2	56	13	6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0	0	0,3	0	0
18_0104	0	0	0	4	0	0	0	3	0	0	14	18	0	0	38	16	0	2	4	0	0	3	0
18_0105	0	0	0	5	0	0	0	3	0	0	17	11	0	0	40	17	0	2	3	0	0	2	0
18_0331	0,5	0	1	3	93	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0	0	0	0
18_0439	19	12	44	0,4	0	11	0	6	3	0	3	0	0	0	0	0	0	1	0	0,1	0	1	0
18_0440	19	11	43	0,4	0	12	0	6	3	0	4	0	0	0	0	0	0	1	0	0,2	0	1	0
18_0441	17	15	32	1	0	0	12	12	0	0	2	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	3	***3
18_0442	16	15	27	4	0	28	0	7	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0,1	0	1	0
18_0443	18	16	26	5	0	25	0	8	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
18_0444	12	32	18	6	0	16	0	12	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0,5	0
18_0445	13	31	21	0	0	0	1	0	2	5	20	0	0	0	3	0	0	0,5	4	0	0	0,5	0
18_0446	0	0	0	1	0	0	4	8	0	0	6	10	4	2	50	10	0	2	2	0	0	2	0
18_0447	0	0	0	2	0	0	3	7	0	0	10	11	4	1	41	16	0	2	2	0	0	2	0
18_0448	5	8	19	33	0	1	0	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0,3	0	1	0
18_0449	4	1	0,5	72	16	4	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0
18_0450	5	1	1	66	16	6	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0,5	0	0	0	0
18_0451	5	2	1	71	****5,5	13	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	2	0	0
18_0452	8	2	7	53	*****1	23	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	2	0,3	0,4	0	0
18_0453	18	1	0,4	66	5	7	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,1	0	0	0
18_0454	5	31	0,5	1	0	3	0	17	0	0	2	0	0	0	0	0	40	0,5	0	0	0	0,4	0
18_0455	52	0	0	0,5	0	37	0	5	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	2	0	0	0,2	0
18_0456	70	8	5	0,5	4	5	0	3	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0,5	1	0	0	0,3	0
18_0457	15	8	1	0,5	21	20	0	15	11	0	4	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	1	0
18_0458	45	5	5	3	4	24	0	10	1	0	0,2	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0,3	0
18_0459	0	4	1	5	0	1	0	32	0	0	5	0	0	0	33	0	13	0,4	2	0	0	0,4	****3
18_4024	18	9	24	16	0	0	28	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0	0	0	1	0
18_4025	22	5	7	0	0	32	0	17	11	0,5	2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
18_8086	17	47	11	0	0	0	5	1	0	4	0	0	0	0	0	0	12	1	0	0	0	2	0

* Sillimanit
** 67 % Serpentin; 7% Talk;
Sp Pyroaurit möglich
*** Laumontit
**** Chabasit
***** Ankerit

Tab. 25: Zeta-Potenzial, Spezifische Oberfläche nach BET, MB- und SE-Messwerte.

Proben-Nr.	Zeta-Potenzial [mV]	BET [m ² /g]	MB _F [g/kg]	MB _(trocken) [g/kg]	MB _(original) [g/kg]	SE _a [%]	SE (10) [%]	SE _(TP Gestein) [%]
18_0084	-96,1	6,6	3,3	0,8	0,8	---	73	56
18_0088	-118,9	4,9	3,3	0,5	0,5	---	76	---
18_0089	-126,3	8,2	3,3	0,5	0,5	---	76	---
18_0092	-70,8	18,0	3,3	1,0	1,0	---	83	---
18_0097	-16,4	6,3	1,7	0,8	0,8	---	77	59
18_0101	-97,0	5,2	1,7	0,5	0,5	---	57	---
18_0102	-45,2	5,0	1,7	0,5	0,5	73	74	54
18_0103	-53,9	5,7	3,3	0,8	1,0	---	63	42
18_0104	-54,4	24,3	20,0	6,8	6,8	68	61	55
18_0105	-2,0	27,0	25,0	7,9	8,0	---	60	64
18_0331	-68,6	3,6	3,3	0,5	0,8	---	80	57
18_0439	-103,2	5,6	3,3	1,8	2,3	---	57	46
18_0440	-99,6	5,9	4,0	2,3	2,8	66	58	35
18_0441	-100,8	21,1	3,3	0,8	0,8	---	65	---
18_0442	-99,6	12,0	5,0	1,8	1,6	---	32	26
18_0443	-99,7	11,5	5,0	1,3	1,5	35	37	38
18_0444	-81,6	10,8	6,7	1,8	2,0	---	62	56
18_0445	-24,1	19,0	25,8	10,0	9,6	---	38	31
18_0446	-72,5	10,8	5,0	1,3	1,8	---	82	72
18_0447	-48,2	19,8	10,0	6,0	6,8	80	62	51
18_0448	-70,5	5,7	2,0	0,8	0,8	---	70	52
18_0449	-48,5	10,2	6,7	1,2	1,3	---	82	---
18_0450	-37,7	13,7	6,7	1,5	1,8	86	76	---
18_0451	-73,7	6,1	3,3	0,5	0,8	---	80	---
18_0452	-64,4	17,4	8,2	4,8	6,0	---	32	20
18_0453	-95,2	4,6	3,3	0,5	0,5	---	86	---
18_0454	-120,3	3,5	3,3	0,8	0,8	---	76	62
18_0455	-131,9	10,1	3,3	0,5	0,8	---	43	---
18_0456	-106,8	2,7	3,3	0,8	1,0	---	62	55
18_0457	-61,3	25,9	10,0	4,0	4,5	---	40	37
18_0458	-112,8	6,7	3,3	1,0	1,3	---	72	52
18_0459	-73,1	16,0	8,3	3,3	3,3	---	31	27
18_4024	-96,3	11,1	5,0	1,8	2,0	---	41	28
18_4025	-83,2	11,6	8,3	3,1	3,0	72	63	66
18_8086		2,52	1,7	0,4	0,5	---	72	64

Tab. 26: Petrographische Beurteilung von Füller und Sand nach dem Schulnotensystem (1=sehr gut – 5 = sehr schlecht)

	Anteil Quellfähige im Füller	Anteil Muskowit im Füller	Anteil Biotit im Füller	Anteil Chlorit im Füller	Anteil Kaolinit im Füller	"Qualität" Füller	Anteil Karbonate in 0,25-0,5 mm (repräsent. für Sand)	Anteil freien Muskowits in 0,25-0,5 mm (repräsent. für Sand)	Anteil freien Biotits in 0,25-0,5 mm (repräsent. für Sand)	Anteil freien Chlorits in 0,25-0,5 mm (repräsent. für Sand)	"Qualität" Sand	"Qualität" Füll er und Sand
18_0084	2	2	1	5	1	2,2	5	1	1	5	3,0	2,6
18_0088	2	1	5	3	2	2,6	5	1	5	3	3,5	3,1
18_0089	2	5	1	5	1	2,8	5	5	1	4	3,8	3,3
18_0092	3	1	3	3	1	2,2	5	1	2	2	2,5	2,4
18_0097	1	1	2	2	1	1,4	5	1	1	2	2,3	1,8
18_0101	1	5	1	3	1	2,2	5	1	2	4	3,0	2,6
18_0102	1	3	1	2	1	1,6	5	2	1	2	2,5	2,1
18_0103	1	4	1	2	1	1,8	5	1	1	1	2,0	1,9
18_0104	5	1	1	3	1	5,0	5	2	1	2	2,5	3,8
18_0105	5	1	1	3	1	5,0	5	2	2	1	2,5	3,8
18_0331	1	3	1	1	1	1,4	1	2	1	2	1,5	1,5
18_0439	3	5	1	3	3	3,0	5	1	1	1	2,0	2,5
18_0440	3	5	1	3	3	3,0	5	4	4	2	3,8	3,4
18_0441	2	1	4	4	1	2,4	5	2	5	3	3,8	3,1
18_0442	2	5	1	3	1	2,4	5	3	2	3	3,3	2,8
18_0443	2	5	1	4	1	2,6	5	2	1	2	2,5	2,6
18_0444	2	5	1	4	1	2,6	5	2	1	3	2,8	2,7
18_0445	5	1	2	1	2	5,0	5	2	2	1	2,5	3,8
18_0446	4	1	3	4	1	2,6	5	1	3	2	2,8	2,7
18_0447	4	1	3	3	1	2,4	5	1	3	2	2,8	2,6
18_0448	1	2	1	5	1	2,0	3	1	2	5	2,8	2,4
18_0449	1	3	1	2	2	1,8	1	3	1	1	1,5	1,7
18_0450	1	4	1	2	3	2,2	1	2	2	1	1,5	1,9
18_0451	1	5	1	2	1	2,0	1	2	1	2	1,5	1,8
18_0452	1	5	1	3	1	2,2	1	2	1	1	1,3	1,7
18_0453	1	5	1	1	2	2,0	1	3	1	1	1,5	1,8
18_0454	2	3	1	5	1	2,4	5	1	1	1	2,0	2,2
18_0455	1	5	1	3	3	2,6	5	1	1	1	2,0	2,3
18_0456	2	3	1	3	3	2,4	5	1	2	1	2,3	2,3
18_0457	3	5	1	4	4	3,4	5	5	1	2	3,3	3,3
18_0458	2	5	1	4	2	2,8	5	3	1	3	3,0	2,9
18_0459	3	2	1	5	1	2,4	5	2	2	5	3,5	3,0
18_4024	1	5	1	3	2	2,4	5	5	1	2	3,3	2,8
18_4025	3	5	1	5	4	3,6	5	2	5	2	3,5	3,6
18_8086	3	1	3	2	1	2,0	5	1	5	1	3,0	2,5

Tab. 27: Überblick zu den Schüttelabrieben an Füller und Sand und Einstufung gem. in Bayern gültiger Grenzwerte (Überschreitung rot).

Probe Nr. intern	TP Gestein-StB, Teil 6.6.3, Anhang B		TP Gestein-StB, Teil 6.6.3					
	Schüttel-Abrieb Füller	Bewertung des Fülleranteils	Schüttel-Abrieb-Serie E	Bewertung des Sandes einschl. Eigenfülleranteil		Schüttel-Abrieb-Serie F	Bewertung des Sandes (Sandanteil)	
	SA		S _E	Deck- und Binderschichten	Asphalttragschichten	S _F	Deck- und Binderschichten	Asphalttragschichten
M.-%	SA (Bayern) max. 45 M.-%	M.-%	S _E (Bayern) max. 25 M.-%	S _E (Bayern) max. 60 M.-%	M.-%	S _F (Bayern) max. 25 M.-%	S _F (Bayern) max. 60 M.-%	
18_0084	47,0		22,7	+	+	12,1	+	+
18_0088	51,4		48,7		+	14,8	+	+
18_0089	35,3	+	15,4	+	+	10,7	+	+
18_0092	27,5	+	17,1	+	+	12,9	+	+
18_0097	38,5	+	6,9	+	+	7,3	+	+
18_0101	42,2	+	16,7	+	+	9,8	+	+
18_0102	38,2	+	10,6	+	+	8,8	+	+
18_0103	39,1	+	15,6	+	+	9,2	+	+
18_0104	91,5		100,0			92,8		
18_0105	95,3		100,0			100,0		
18_0331	41,3	+	20,1	+	+	20,6	+	+
18_0439	66,5		54,9		+	25,4		+
18_0440	64,2		56,8		+	27,9		+
18_0441	54,0		33,4		+	14,3	+	+
18_0442	50,1		36,3		+	21,0	+	+
18_0443	49,2		31,5		+	19,5	+	+
18_0444	71,5		82,3			39,7		+
18_0445	97,1		100,0			99,4		
18_0446	48,8		29,6		+	16,4	+	+
18_0447	62,3		88,9			76,1		
18_0448	37,6	+	14,4	+	+	8,8	+	+
18_0449	53,6		33,5		+	19,6	+	+
18_0450	67,3		72,8			27,4		+
18_0451	39,5	+	16,2	+	+	11,9	+	+
18_0452	64,1		89,3			66,6		
18_0453	36,9	+	8,3	+	+	6,0	+	+
18_0454	41,6	+	18,9	+	+	14,1	+	+
18_0455	48,3		36,9		+	15,9	+	+
18_0456	52,9		26,9		+	11,0	+	+
18_0457	91,4		92,4			46,5		+
18_0458	51,2		32,7		+	15,8	+	+
18_0459	69,5		69,3			46,0		+
18_4024	60,4		51,4			29,6		+
18_4025	84,5		85,3			60,4		
18_8086	55,7		44,5		+	24,2	+	+