

Veränderung der Performance-Eigenschaften von Walzasphalt bei Verwendung feiner Gesteinskörnungen mit unterschiedlicher Wasserempfindlichkeit

Daniel Julian Rogg

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München zur Erlangung eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Konrad Nübel

Prüfende der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen
2. Prof. Dr.-Ing. Stephan Freudenstein

Die Dissertation wurde am 28.05.2024 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 06.11.2024 angenommen.

Danksagung

Mein Dank gilt zuallererst meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Christoph Gehlen für die Betreuung und Begleitung meiner Arbeit. Mit Hilfe Ihrer Förderung und großer Unterstützung konnte ich meine Arbeit abschließen.

Ebenfalls bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Freudenstein für die Übernahme der Zweitkorrektur und für das Interesse an meiner Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Konrad Nübel danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Ein ganz besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Thomas Wörner, der mich als mein Mentor stets unterstütze. Er gab mir die Möglichkeit an der TU München mein Interesse für den Werkstoff „Asphalt“ weiter zu vertiefen und ermöglichte mir dadurch meine Dissertation zu schreiben. Durch seine professionelle und kritische Begleitung, seine wertvollen Anregungen und der stets konstruktive Austausch ist er maßgeblich am Erfolg der Dissertation beteiligt gewesen.

Gleichzeitig möchte ich mich bei allen Kollegen des cbm, insbesondere der Fachgruppe „Bitumenhaltige Baustoffe und Gesteine“, für die stete Unterstützung und der konstruktive Austausch bedanken. Ganz besonders möchte ich mich da bei Herrn Dr.-Ing. Thomas Patzak bedanken, der mir immer mit Rat und Tat zur Seite stand und ebenfalls maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beitrug. Auch eine spezielle Anerkennung gebührt Frau Dr. rer. nat. Sara Neidinger und Herrn Dr. rer. nat. Erhard Westiner, die mich durch ihre jederzeitige Diskussionsbereitschaft und wertvollen Anmerkungen stets unterstützten.

Weiter möchte ich mich bei allen Kollegen im Labor für ihre tatkräftige Hilfe und der Durchführung der Versuche bedanken. Hier zu nennen sind von Seiten des cbm, Frau Vanessa Fritz, Frau Bettina Meir und Herr Stefan Kandler, sowie von KUTTER, Herr Daniel Prestel und Herr Christian Ziegler.

Mein außerordentlicher Dank gilt auch KUTTER, die mir während meiner Tätigkeit im Unternehmen die Möglichkeit gegeben haben, an der TU München zu promovieren.

Letztlich danke ich meinen Eltern, der Familie und Freunden, die mir meine berufliche Ausbildung ermöglicht haben und somit den Grundstock für meinen akademischen Werdegang gelegt sowie auf meinem bisherigen Lebensweg stets begleitet haben.

Hinweis

Dieser Dissertation liegen Teile der im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, unter FE 06.0118/2018/CBG [8] durchgeführten Forschungsarbeit zugrunde. Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein beim Autor. Die Ausführungen zu diesem Forschungsprojekt erfolgten durch den Verfasser dieser Arbeit.

Sie enthält zudem Ergebnisse, Textteile und Auswertungen, die bei den folgenden Kongressen mit dem Titel „Modification of the performance properties of rolled asphalt by using fine aggregates with different water sensitivities“ eingereicht wurden:

- 8th International Conference Bituminous Mixtures and Pavements (Beitragsnummer: P122) [68]
- 8TH E&E Congress (Beitragsnummer.: ID 69) [69]

Inhalt

Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen	6
1. Einleitung	8
2. Zielsetzung	9
3. Überblick über Stand der Wissenschaft und Technik	9
3.1 <i>Allgemeines</i>	9
3.1.1 Asphaltmischgutzusammensetzung.....	9
3.1.2 Beanspruchungen von Asphaltbefestigungen.....	11
3.2 <i>Stand der Forschung</i>	12
3.2.1 Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen.....	12
3.2.2 Wasserempfindlichkeit von Asphalt	15
3.3 <i>Stand der Technik und Prüfmethoden</i>	22
3.3.1 Prüfsystematik zur Bestimmung der Wasserempfindlichkeit	22
von Asphalt	22
3.3.2 Prüfsystematik zur Bestimmung der Wasserempfindlichkeiten ...	23
von feinen Gesteinskörnungen	23
4. Voruntersuchungen für den Zusammenhang zwischen Praxis- und Labor- Performance	28
4.1 <i>Probenauswahl und Streckenbesichtigungen</i>	28
4.2 <i>Bestimmung der Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen nach TP Gestein-StB, Teil 6.6.3</i>	31
4.3 <i>Untersuchungen am Asphalt</i>	32
4.4 <i>Untersuchung des eingebauten Versuchsfeldes</i>	34
5. Untersuchungsprogramm	40
6. Herstellung und Untersuchung der künstlich zusammengesetzten Gesteinskörnungen	44
6.1 <i>Eigenschaften von quellfähigen Tonmineralen</i>	44
6.2 <i>Probenauswahl der Tonminerale</i>	50
6.3 <i>Untersuchungsergebnisse der ausgewählten Tonminerale</i>	51
6.4 <i>Zusammensetzung der künstlichen feinen Gesteinskörnungen</i>	53
6.5 <i>Untersuchungsergebnisse der künstlich zusammengesetzten feinen Gesteinskörnungen</i>	55
7. Herstellung und Untersuchung der künstlich zusammengesetzten Asphaltmischungen	56

7.1	<i>Definition Probenummern</i>	56
7.2	<i>Variationen in der Asphaltmischgutkonzeption</i>	57
7.3	<i>Probekörpervorbereitung und -lagerung für das Schüttel- Abriebverfahren am Marshall-Probekörper</i>	60
7.3.1	Allgemeines	60
7.3.2	Variation der Probekörpervorbereitung und -lagerung	61
7.4	<i>Ergebnisse des Schüttel-Abriebverfahrens am Marshall-Probekörper</i> ...	66
7.5	<i>Zwischenfazit nach den Ergebnissen des Schüttel-Abriebverfahrens am Marshall-Probekörper</i>	74
8.	Definition der neuen zielführenden Probekörpervorbereitung und -lagerung	75
9.	Durchführung der performance-orientierten Prüfungen an dem künstlichen Asphaltgemisch	79
9.1	<i>Dynamischer Stempleindringversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 25 A</i> 279	
9.1.1	Allgemeines	79
9.1.2	Entwicklung der neuen Prüfungsmöglichkeiten.....	81
9.1.3	Untersuchungsergebnisse.....	82
9.2	<i>Kälteverhalten – Einaxialer Zugversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 46 A</i> 91	
9.2.1	Allgemeines	91
9.2.2	Untersuchungsergebnisse.....	93
9.3	<i>Kälteverhalten – Abkühlversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 46 A</i>	95
9.3.1	Allgemeines	95
9.3.2	Untersuchungsergebnisse.....	96
10.	Erstellung einer neuen Prüfungssystematik	99
11.	Prüfung der Performance-Eigenschaften in Abhängigkeit von feinen Gesteinskörnungen mit unterschiedlicher Wasserempfindlichkeit	100
11.1	<i>Probenauswahl</i>	100
11.2	<i>Untersuchungsergebnisse</i>	102
12.	Ausblick	104
13.	Zusammenfassung	105
14.	Literatur	108
	Abbildungsverzeichnis	116
	Tabellenverzeichnis	120

Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

a) Formelzeichen

Al	Aluminium
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
B ₀	Breite des Probekörpers vor der Prüfung
BaO	Bariumoxid
Ca-Feldspat	Calcium-Feldspat
Ca-Bentonit	Calcium-Bentonit
CaO	Calciumoxid
Cr ₂ O ₃	Chrom(III)-oxid
CuO	Kupfer(II)-oxid
Fe ₂ O ₃	Eisenoxid
H ₀	Höhe des Probekörpers vor der Prüfung
HfO ₂	Hafniumoxid
K	Kalium
K ₂ O	Kaliumoxid
L ₀	Probekörperlänge bei Versuchsbeginn
L _F	Probekörperlänge bei Auftreten des Zugkraftmaximums
M	Masse Asphaltprobeplatte
MgO	Magnesiumoxid
MnO	Manganoxid
Na ₂ O	Natriumoxid
NiO	Nickel(II)-oxid
O	Sauerstoff
P ₂ O ₅	Phosphorpentoxid
PbO	Blei(II)-oxid
Si	Silizium
SiO ₂	Siliziumdioxid
SO ₃	Schwefeltrioxid
SrO	Strontiumoxid
TiO ₂	Titandioxid
V ₂ O ₅	Vanadiumoxid
ZrO ₂	Zirkoniumdioxid

ZnO	Zinkoxid
$\beta_t(T)$	Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur
$\epsilon_t(T)$	Bruchdehnung in Abhängigkeit der Temperatur
ρ_{bssd}	Raumdichte nach Verfahren B

b) Abkürzungen

0-Variante	Untersuchungsvariante ohne Tonminerale
A1 bis A3	unterschiedliche Asphaltvarianten
B 316	zusätzliche Bezeichnung eines Tonminerals
ELAtextur	Messgerät zur Bestimmung Texturtiefe der Asphaltsschicht
KG-Variante	Künstliches Gemisch, Untersuchungsvariante mit Tonminerale
LOI	Glühverlust
MB	Methylenblau-Wert 0/2
MB _F	Methylenblau-Wert Füller
MPD	Mean Profile Depth, Mittlere Profiltiefe
SE	Sandäquivalent
Serie E	Schüttel-Abriebverfahren mit Eigenfüller
Serie F	Schüttel-Abriebverfahren mit Fremdfüller
SFG	zusätzliche Bezeichnung eines Tonminerals
SG	zusätzliche Bezeichnung eines Tonminerals
T1 bis T5	unterschiedliche Trockenlagerungszeiten
T 240	zusätzliche Bezeichnung eines Tonminerals
TL Asphalt	Technische Lieferbedingungen für Asphalt
TL Gestein	Technische Lieferbedingungen für Gestein
TP Asphalt	Technische Prüfvorschrift für Asphalt
TP Gestein	Technische Prüfvorschriften für Gestein
W1 bis W4	unterschiedliche Wasserlagerungsarten
WW1 bis WW5	unterschiedliche dauerhafte Wasserlagerungszeiten
XRD-Analyse	Röntgendiffraktionsanalyse
XRF-Analyse	Röntgenfluoreszenzanalyse
ZFR	Zugfestigkeitsreserve

1. Einleitung

Um die Mobilitätsbedürfnisse unserer heutigen Gesellschaft sicherstellen zu können, wird eine Verkehrsinfrastruktur benötigt, die den Individualverkehr und insbesondere den stetig steigenden Güterverkehr auf der Straße, welcher bis Mitte des Jahrhunderts um bis zu 34 % [65] steigen wird, sicher, schnell und umweltschonend abwickelt. Der größte Anteil der Infrastruktur für den Individualverkehr ist in Asphaltbauweise ausgeführt.

In Zeiten des Klimawandels mit wechselnden Witterungsbedingungen sowie den steigenden Belastungen infolge des hohen Verkehrsaufkommens ist es essenziell, dass qualitativ hochwertige und dauerhafte Asphaltdeckschichten hergestellt werden. Die Wasserempfindlichkeit feiner Gesteinskörnungen hat dabei einen wesentlichen Anteil an den Mörtel Eigenschaften des Asphalts. Bei Anwesenheit von innerkristallinen Tonmineralen in den feinen Gesteinskörnungen kommt es bei Wasserzutritt zu Quellungserscheinungen und in deren Folge auch zu einer Volumenvergrößerung im Asphaltmischgut. Dadurch ändert sich nicht nur das Haftverhalten, sondern beeinflusst auch die Dauerhaftigkeit der Gesamtbefestigung erheblich. Obwohl diese Tatsache in Fachkreisen unbestritten ist, wird in der aktuellen Europäischen Norm die Wasserempfindlichkeit lediglich für die Lieferkörnung Füller als wesentliches Merkmal herangezogen. Auf die Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen wird weiter nicht eingegangen, sodass es auch keine Anforderungswerte gibt. Zwar konstatierte Feix bereits 1979 in [28], dass die Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen die Eigenschaften des Walzasphaltes beeinflusst, jedoch sind bis heute lediglich in Bayern Anforderungswerte für den Anteil der feinen Gesteinskörnungen definiert.

Mit den Verfahren Sandäquivalent nach DIN EN 933-8 [45] und dem Methylenblau-Wert nach DIN EN 933-9 [43] gibt es zwar zwei Prüfmethode zur Bestimmung der Qualität der Feinanteile, jedoch konnte in mehreren Forschungsprojekten, insbesondere [8] und [35], festgestellt werden, dass diese nicht geeignet sind, um die Wasserempfindlichkeit feiner Gesteinskörnungen abzubilden. Das Schüttel-Abriebverfahren nach TP Gestein-StB, Teil 6.6.3 [47] stellte sich als einzige Prüfmethode heraus, die eine praxisgerechte Beurteilung ermöglicht. Weitergehende dynamische Prüfmethode am Asphalt direkt, mit denen der Einfluss der Wasserempfindlichkeit feiner Gesteinskörnungen auf das Gebrauchsverhalten dargestellt werden kann, wurden bis heute nicht erprobt.

Um eine Aussage über den Einfluss der quellfähigen Tonminerale in den feinen Gesteinskörnungen auf den Asphalt treffen zu können, musste eine Probekörpervorbereitung definiert werden, mit der anschließende Druck-Schwell-, Abkühl- und Zugversuche die Auswirkungen der wasserempfindlichen feinen Gesteinskörnungen prüftechnisch dargestellt werden können.

2. Zielsetzung

Da das Gebrauchsverhalten des Asphaltes basierend auf der Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen im derzeitigen Regelwerk nicht ausreichend beschrieben ist, werden im Rahmen dieser Arbeit die Auswirkungen des Einflusses von Wasser anhand von Performance-Prüfungen untersucht. Ziel ist die versuchstechnische Ermittlung von Kenngrößen, mit denen die Performance-Eigenschaften von Asphalt bewertet werden können. Dafür wird eine neue Prüfsystematik entwickelt, die praxisgerechte und reproduzierbare Ergebnisse liefert. Diese erfolgt basierend auf bestehenden Zug-, Abkühl- und Druck-Schwell-Versuchen an Asphaltprobekörpern.

Von besonderer Bedeutung werden dabei die Vorbereitung und insbesondere die richtige Lagerung der Asphaltprobekörper sein. Dafür sollen bestehende Lagerungsarten modifiziert werden, um den größtmöglichen Einfluss von Wasser darstellen zu können.

Hat sich die durchgeführte, neu entwickelte und praxisorientierte Probenvorbereitung sowie die Performance-Prüfung als geeignet für die Untersuchung des Gebrauchsverhaltens hinsichtlich ihrer Wasserempfindlichkeit erwiesen, werden diese Prüfungen eine entscheidende Rolle für die Konzeption und Bewertung dauerhafter Walzasphalte spielen.

3. Überblick über Stand der Wissenschaft und Technik

3.1 Allgemeines

3.1.1 Asphaltmischgutzusammensetzung

Der Baustoff Asphalt setzt sich aus dem Gesteinskörnungsgemisch und dem bitumenhaltigen Bindemittel zusammen. In der Folge wird lediglich die Asphaltdeckschicht und deren Zusammensetzung näher betrachtet.

An die Wahl des Gesteinskörnungsgemisches werden hohe Anforderungen hinsichtlich der Witterungsbeständigkeit, der Festigkeit, der Affinität zwischen Bindemittel und Gesteinskörnungsgemisch, der Polierresistenz sowie der Farbe gesetzt. Je nach örtlicher Verfügbarkeit kommen gebrochenes Felsgestein oder gebrochene Kiese im Asphaltmischgut zum Einsatz. Bei der Asphaltmischgutherstellung werden die vorab nach Fraktionen getrennten Gesteinskörnungen wieder mit dem Bindemittel zusammengemischt. Die Wahl des Gesteinskörnungsgemisches ist dabei entscheidend, um eine ausreichende Widerstandsfähigkeit der Straße gegen bleibende Verformungen gewährleisten zu können. Das Größtkorn muss so gewählt werden, dass eine ausreichende Verdichtbarkeit und somit Verformungsbeständigkeit gewährleistet ist (siehe Verhältnis zur Schichtdicke in Abbildung 3-1). Ein optimales Tragverhalten des Walzasphaltes spiegelt sich in einer guten Spannungsverteilung innerhalb des Asphaltes wider, die durch zahlreiche Korn-zu-Korn-Kontakte geprägt sind [3]. Da der Füllergehalt aufgrund seines großen Oberflächenanteils an der Gesamtoberfläche des Asphaltes einen entscheidenden Einfluss besitzt, gibt es für diese Fraktion eigens definierte Beurteilungskriterien. Mit einem zu hohem Füllergehalt wird die Mörtelviskosität nachhaltig verändert, wodurch sich schädliche versteifende Eigenschaften einstellen.

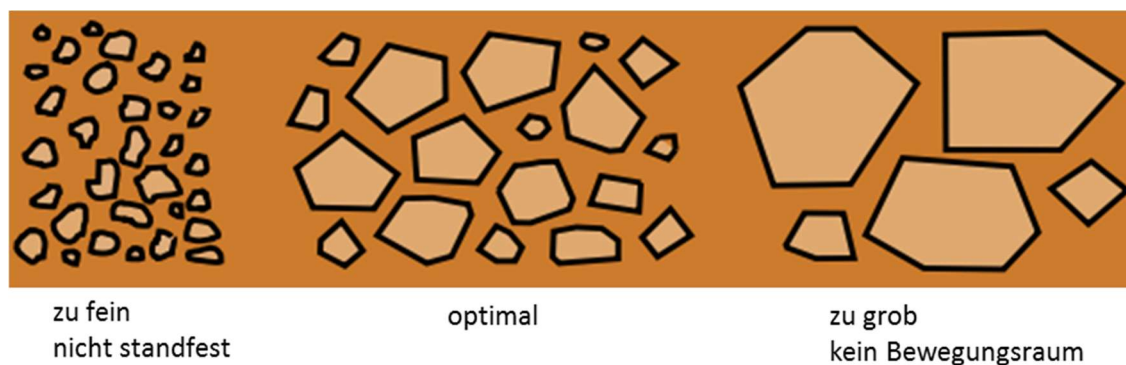


Abbildung 3-1: Verhältnis Größtkorn zu Schichtdicke [2]

Bitumen kommt in der Asphaltmischgutproduktion als Bindemittel zum Einsatz. Die Grundlage zur Herstellung von Bitumen ist Erdöl. Durch Zugabe von Polymeren kann ein Bitumen in seinem Gebrauchsverhalten deutlich verändert werden.

Nach der Trocknung und dem Erhitzen des Gesteinskörnungsgemisches sowie dem Erhitzen des Bitumens kann das Asphaltmischgut produziert werden. Nach der Herstellung muss das Asphaltmischgut mittels thermoisolierten Transportfahrzeugen auf die Baustelle gefahren

werden, um dieses dort mittels eines Straßenfertiger einzubauen. Um optimale Gebrauchseigenschaften des Walzasphaltes zu erreichen, muss das Mischgut nach dem Einbau mit dem Straßenfertiger mittels Walzen verdichtet werden.

Das Gebrauchsverhalten des Asphaltmischgutes ist von vielen Faktoren abhängig. Aus diesem Grund muss die Auswahl des Gesteins sowie des Bindemittels so definiert sein, dass es zu einem optimalen Zusammenspiel aus Gesteinskörnungsgemisch und Bitumen kommt, um eine maximale Dauerhaftigkeit zu erreichen [4].

3.1.2 Beanspruchungen von Asphaltbefestigungen

Die Beanspruchungen der Straßen nehmen aufgrund des wachsenden Verkehrsaufkommens stetig zu. Die Asphaltbefestigung muss diesen großen Herausforderungen und Belastungen gerecht werden, um eine qualitativ hochwertige und sichere Straße bieten zu können. Die Belastungen vor allem durch den LKW-Verkehr werden über deren Räder direkt in die Asphaltbefestigung weitergeleitet. In Abhängigkeit der Steifigkeit u.a. des frostsicheren Unterbaus reagiert die Asphaltbefestigung infolge dieser Belastungen mit einer Durchbiegung. Diese Biegung erzeugt insbesondere starke horizontal wirkende Biegespannungen, die an der Unter- und Oberseite des Asphaltoberbaus als Zugspannung auftreten. Diese Zugspannung durch den rollenden Verkehr wird als mechanogene Spannung bezeichnet. Des Weiteren wird durch die Belastung eine Schubspannung in der Asphaltbefestigung induziert.

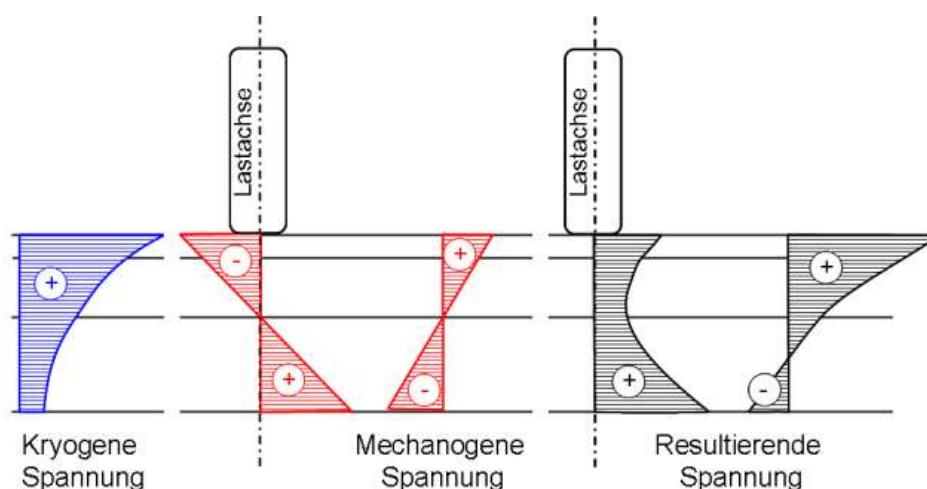


Abbildung 3-2: Superposition von kryogenen und mechanogenen Spannungen [5, 6, 7]

Jedoch unterliegt der Straßenoberbau nicht nur den Beanspruchungen durch den Verkehr, sondern auch klimabedingte Beanspruchungen spielen in Zeiten des Klimawandels eine immer größer werdende Rolle. Aufgrund z.B. der temperaturabhängigen Eigenschaften des Baustoffs Asphalt nimmt die Viskosität mit sinkender Temperatur zu. Es kommt zu einer Reduzierung des Relaxationsvermögens, wodurch die oben genannten Spannungen bei tiefen Temperaturen nur sehr langsam durch interne Fließbewegungen abgebaut werden können. Dadurch bauen sich infolge der Abkühlung und der damit verbundenen behinderten thermischen Dehnung kryogene Spannungen auf. Da Asphalt aufgrund seiner Viskosität nur sehr langsam relaxieren kann, herrschen diese Spannungen in der Asphaltbefestigung lange vor. Somit erfährt das Asphaltpaket neben den mechanogenen auch kryogene Spannungen, die die Asphaltbefestigung nachhaltig schädigen können [5, 6].

Um diesen stetig steigenden Ansprüchen an die Asphaltbefestigung gerecht zu werden, muss die Kombination aus Gesteinskörnungsgemisch und Bindemittel optimal aufeinander abgestimmt sein. Dabei muss jedoch bereits bei den jeweiligen Bestandteilen im Einzelnen angefangen werden, um den höchsten Anforderungen gerecht werden zu können. Da sich diese Arbeit insbesondere mit der Wasserempfindlichkeit feiner Gesteinskörnungen und deren Auswirkungen auf das Gebrauchsverhalten des Walzasphaltes beschäftigt, geht der folgende Stand der Forschung und Technik im Weiteren lediglich auf dieses Themengebiet genauer ein. In den folgenden Kapiteln muss grundsätzlich zwischen der Wasserempfindlichkeit von Walzasphalt und der Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen unterschieden werden.

3.2 Stand der Forschung

3.2.1 Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen

Die ersten Prüfungen der Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen erfolgten bereits 1979 durch Feix [28] an der TU München. Dieser stellte fest, dass das Verhalten des Asphaltmischgutes bei Wasserzutritt maßgeblich durch die Eigenschaften der Mineralien der feinen Gesteinskörnungen bestimmt wird. So führen insbesondere innerkristallin quellfähige Tonminerale zu Quellerscheinungen oder Adsorption mobiler Bestandteile im Bitumen. Zu den wichtigsten Eigenschaften dieser Tonminerale gehören die Korngröße, die äußere und innere Oberfläche, die für die Wasseraufnahme und das Quellvermögen verantwortliche Aufweitbarkeit des Schichtgitters, die Austauschfähigkeit der Kationen und die thermisch bedingten Oberflächen- und Schichtgitterveränderungen. Die verschiedenen Gitterstrukturen

der Tonminerale und die damit verbundene unterschiedliche Austauschfähigkeit von Kationen beeinflussen maßgeblich auch die Eigenschaften des Asphaltmischgutes hinsichtlich Quellung und Haftverhalten. Zusätzlich hängt diese Austauschfähigkeit von der chemischen Zusammensetzung der im Mischgut verwendeten groben und feinen Gesteinskörnung ab. So verursachen bereits kleinste Mengen quell- und wasserempfindlicher Tonminerale Quellungserscheinungen und vermindern die Hafteigenschaften wesentlich.

Jedoch kann bei der Analyse der Theorien über den Mechanismus und des Ablösens von Bindemittelfilmen eine alleinige Betrachtung des Einflusses der Sandqualität auf das Haftverhalten nicht hergenommen werden. Aus diesem Grund wird bei der Prüfung der Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen mittels Schüttel-Abriebverfahren [29] der Schüttel-Abrieb sowie die Quellung nach Wasserlagerung geprüft (siehe Kapitel 3.3.2). Eine entscheidende Rolle für die Qualität der feinen Gesteinskörnungen spielt die Art der Aufbereitung, was an besseren Hafteigenschaften bei mehrfach gebrochenen feinen Gesteinskörnungen festgemacht werden kann [30, 31]. Wie Abbildung 3-3 zeigt, konnte in [8] jedoch festgestellt werden, dass es innerhalb eines Jahres zu erheblichen Schwankungen gekommen ist.

Zusätzlich lagen für dieses Forschungsvorhaben Daten der Schüttel-Abrieb-Ergebnisse von einigen Lieferanten der letzten Jahre vor. Aus diesem Grund wurden die Spannweiten mit den Ergebnissen dieses Vorhabens (siehe Abbildung 3-3) verglichen. Dabei musste bei einem Vergleich der Prüfergebnisse des Forschungsvorhabens [8] festgestellt werden, dass selbst die Ergebnisse des Schüttel-Abriebs am Sandasphaltprobekörper innerhalb eines Steinbruches erheblichen Schwankungen unterliegen. So stellen die blauen Linien die Bereiche der Ergebnisse des Schüttel-Abriebverfahrens der ständig laufenden Produktionskontrolle über ein Jahr hinweg gesehen dar und rot das Prüfergebnis einer Probe, die für das Forschungsvorhaben zur Verfügung gestellt wurde.

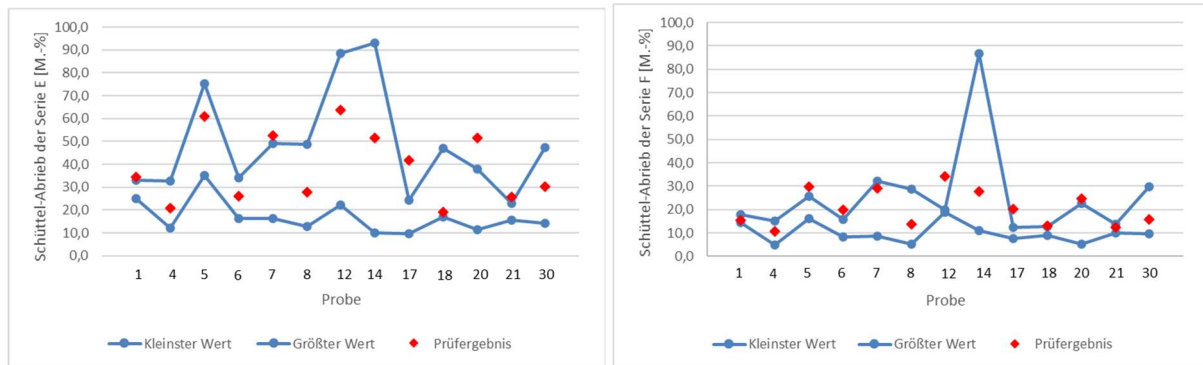


Abbildung 3-3: Gegenüberstellung der Spannweite des Schüttel-Abriebs der Serie E und F mit dem Prüfergebnis

Einen Zusammenhang zwischen der Qualität der feinen Gesteinskörnungen und deren mineralogischen Zusammensetzung wird bislang in keinem Regelwerk berücksichtigt, obwohl Kugler bereits 2002 in [33] aufzeigen konnte, dass zwischen SE (Sandäquivalent)-Werten und Tonmineralgehalten der Fraktionen $< 0,02$ mm ein Zusammenhang vorhanden ist. Er konnte beweisen, dass die beiden Prüfverfahren nur begrenzt geeignet sind, die Qualität der feinen Gesteinskörnungen ausreichend zu beschreiben. Aus diesem Grund werden derzeit in Deutschland, Österreich und der Schweiz unterschiedliche Lösungsansätze verfolgt. So setzt Österreich und die Schweiz zur Bestimmung der Qualität der feinen Gesteinskörnungen direkt auf mineralogische Untersuchungen, wohingegen Deutschland das Schüttel-Abriebverfahren bevorzugt [32, 34]. [35] beschäftigte sich anschließend mit der Fragestellung, ob der Einfluss von quellfähigen Tonmineralen und anderen sich auf das Haftverhalten auswirkenden Bestandteilen durch den Methylenblau-Wert (MB) und das Sandäquivalent (SE) beschrieben werden kann oder ob andere alternative Methoden dazu besser geeignet wären.

Jedoch stellte sich bereits bei den umfangreichen mineralogisch-petrographischen Untersuchungen heraus, dass weder MB noch SE für die Charakterisierung der Feinanteile natürlicher Gesteinskörnungen geeignet ist, da diese keine eindeutigen Aussagen zur mineralogischen Zusammensetzung zulassen. Es wird beim Methylenblau-Wert von einer zu starken Abhängigkeit des Anteils der quellfähigen Tonmineralen in den feinen Gesteinskörnungen ausgegangen, die die Ergebnisse verfälschen. Zwar zeigt das SE-Verfahren im Vergleich zum Schüttel-Abriebverfahren und dem MB-Wert den besten Zusammenhang mit der Summe aller Schichtsilikate auf, jedoch ist es nicht geeignet, um hochreaktive Materialien zu identifizieren.

Eine Bewertung der Qualität der Feinanteile ausschließlich über mineralogische Untersuchungen erweist sich entsprechend der Untersuchungsergebnisse ebenfalls als nicht zielführend, da das Praxisverhalten des Asphalt aus einem komplexen Zusammenwirken aller mineralogischen Komponenten resultiert und dieses durch alleinige mineralogische Prüfungen nicht beschrieben werden kann. Eingehende mineralogisch-petrographische Analysen können jedoch zu einer Verbesserung der Qualität der feinen Gesteinskörnungen durch gezielte Aufbereitungsmaßnahmen beitragen.

Die Ergebnisse von Qualifine [35] bestätigen die in Deutschland gewonnenen Erkenntnisse, dass das Schüttel-Abriebverfahren, welches sich mit einer großen Wertspreizung und damit Differenzierungsmöglichkeit auszeichnet, die beste Bewertung der Qualität der Feinanteile zulässt. Auch einen guten Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Wasserempfindlichkeit am Asphalt (Spaltzugfestigkeit bzw. Schüttel-Abrieb am Marshall-Probekörper) und dem Schüttel-Abriebverfahren ließ sich herstellen. Zusätzlich können durch das Schüttel-Abriebverfahren neben der Bestimmung der Qualität der Feinanteile und deren Auswirkungen auf die Wasserempfindlichkeit des Asphalt auch Abhängigkeiten aufgrund der Gesteinsart mit ihrer mineralogischen Zusammensetzung sowie der Art der Aufbereitung untersucht werden. Diese Zusammenhänge sind mit MB und SE nicht realisierbar. Des Weiteren beweisen die Ergebnisse der Schüttel-Abrieb-Prüfungen an Sandasphaltprobekörper der Serie F – Probekörper mit Fremdfüller – (siehe Kapitel 3.3), dass für den Kornbereich $< 0,063$ mm qualitativ hochwertiges Kalksteinmehl effektiver wirkt als Haftverbesserer. Das ist nach [16] darauf zurückzuführen, dass durch die Zugabe von Kalksteinmehl die Oberflächenchemie bzw. die molekulare Polarität der Gesteinsoberfläche verbessert wird und dadurch eine stärkere Haftung an der Grenzfläche zwischen Gestein und Bitumen ermöglicht werden kann.

3.2.2 Wasserempfindlichkeit von Asphalt

Um verstehen zu können, welchen schädlichen Einfluss Wasser auf den Asphalt hat, muss man sich im Klaren sein, dass die Wasserempfindlichkeit direkt mit dem Verlust der Adhäsion zwischen Bitumen und Gestein einhergeht [11].

Bei Analyse des Adhäsionsversagens muss das Haftverhalten zwischen Gestein und Bitumen genauer betrachtet werden. Die Haftung zwischen Gestein und Bitumen ist ein Kriterium, das in erheblichem Ausmaß für die Dauerhaftigkeit der Asphaltbefestigung verantwortlich ist.

Die Adhäsion von Bitumen und Gesteinskörnungsgemisch kann mit Hilfe verschiedener Modelle beschrieben werden. Nach Hirsch und Friemel-Göttlich [9] gibt es fünf unterschiedliche Adhäsionsmodelle (siehe Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Adhäsionsmodelle [9]

Modell	Wechselwirkung
Mechanisches Modell	"Verzahnung" [10]
Thermodynamisches Modell	Oberflächenenergien [12]
Elektrostatisches Modell	Potentiale [67]
Chemisches Modell	Kovalente und ionische Bindungen [9]
Filmbildung	Schichten [16]

Bereits 1924 zeigten McBain und Hopkins [10] in ihrem mechanischen Modell auf, dass die Haftung auf einer Verzahnung zwischen Gesteinskörnung und Bitumen beruht. Die Wasserempfindlichkeit eines Asphaltmischgutes wird aus mechanischer Sicht in Bezug auf das Gesteinskörnungsgemisch in hohem Maße von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Insbesondere bei porösen Gesteinen mit leicht rauen Oberflächen ist die Haftung am besten, da verminderte Grenzflächenspannungen auftreten. Glatte und runde Gesteinskörner bieten eine geringere Haftung und mechanische Verzahnung im Vergleich zu kantigen Gesteinskörnungen mit einer rauen Oberfläche. Allerdings sind zu stark kantige Gesteinskörnungsgemische oftmals ebenso nicht geeignet, um optimale Gebrauchseigenschaften zu gewährleisten, da ihre Kanten häufig den Bindemittelfilm an der Gesteinskörnungsoberfläche durchstoßen. Eine hohe Porosität und Saugfähigkeit des Gesteins gegenüber Bitumen erhöhen die Möglichkeit, dass das Bindemittel in die Poren, Spalten und Kapillare der Gesteinsoberflächen eindringen kann. Dadurch wird die mechanische Verzahnung deutlich gesteigert [15]. Der Bindemittelanspruch jedoch steigt.

Große Bedeutung wird dem Thermodynamischen Modell von Majidzadeh und Brovold [12] beigemessen. Danach geht eine höhere Anziehungskraft des Bindemittels zu der Gesteinsoberfläche von polaren Flüssigkeiten im Vergleich zu nicht polaren Flüssigkeiten aus. So verdrängt hochpolares Wasser das nicht polare und schwach negativ geladene Bitumen von der Gesteinsoberfläche. Dabei kommt es zu einer Ablösung des Bindemittelfilms. In erster Linie beruht diese Art von Ablösung auf schwachen Dispersionskräften, die aufgrund der

unterschiedlichen Ladungen entstehen. Das Vorhandensein von Wasser an der Zweiphasengrenzfläche, bestehend aus Gesteinskörnungsoberfläche und Bitumen, reduziert die freie Energie des Systems stärker als die Anziehungskraft zwischen Asphaltbindemittel und Gestein, um einen thermodynamisch stabilen Zustand mit minimierter Oberflächenenergie zu bilden. Das bedeutet, dass die Gesteinsoberfläche Wasser stärker anzieht als Bitumen und somit die Ummantelung des Gesteins mit Bitumen reduziert wird.

Das Elektrostatische Modell, welches 1992 von Labib in [67] entwickelt wurde, zeigt, dass mit Hilfe von Zeta-Potential-Messungen adhäsive Wechselwirkungen zwischen den Komponenten Gestein und Asphalt charakterisiert werden können. Dies erfolgt sowohl an dem Gestein selbst als auch an der wässrigen Bitumenemulsion. Eine möglichst gegensätzliche Ladung (hohe Potentialdifferenz), was beispielsweise bei positiv geladenem Kalkstein der Fall ist, beeinflusst die Adhäsion zur negativ geladenen Bitumenemulsionen. Gleichzeitig muss jedoch auch der pH-Wert der Gesteinskörnung betrachtet werden, da durch den pH-Wert die Ladungsverhältnisse an der Gesteinsoberfläche sowie in den Bitumenemulsionen stark verändert werden können.

Hirsch und Friemel-Göttlich fanden zudem in [9] heraus, dass bei Gesteinen, die eine längere Lagerungszeit besitzen, eine geringere Neigung zum Stripping-Effekt besteht als bei frisch gebrochenem Gestein. Dies ist anhand des Chemischen Modells zu beschreiben. Dabei entsteht durch die Lagerung des Gesteins eine Veränderung der Oberflächenenergie der Mineralien, welche durch eine Reorganisation polarer Komponenten an ihrer Oberfläche entsteht.

Die internationale Asphaltgemeinschaft bezeichnet den „Stripping“-Effekt als Ursache für Schäden infolge der Wasserempfindlichkeit [16]. Hierbei spielt der Prozess der „Verdrängung“ ebenfalls eine entscheidende Rolle. Man spricht von einer Verdrängung des Asphaltbindemittelfilms von der Oberfläche des Gesteinskörnungsgemisches, wodurch Diskontinuitäten im Bindemittelfilm entstehen. Dieser Mechanismus der Verdrängungstheorie [18] entsteht aufgrund der höheren Oberflächenspannung des Wassers gegenüber Bitumen und wird dem Modell der Filmbildung zugeordnet. Jedoch kann dies auch durch eine Änderung des pH-Werts infolge des Wasserzutritts an der Gesteinskörnungsoberfläche erfolgen. Wasser dringt in Bruchstellen ein, verändert die Art der adsorbierten polaren Gruppen und führt zu einem Aufbau von negativ geladenen elektrischen Doppelschichten zwischen der Oberfläche des Gesteinskörnungsgemisches und des Asphaltbindemittels. Nach Erreichen des Gleichgewichts wird mehr Wasser angezogen und führt zu einer physischen Trennung des

Bitumens von der Gesteinsoberfläche [19]. Das bekräftigt die Unterwanderungstheorie nach Renken [18], dass auch bei einem intakten Bitumenfilm Wasser an die Oberfläche von dem Gestein gelangen kann. Dabei wird davon ausgegangen, dass das Wasser entweder aus dem Inneren durch feuchte Gesteinskörnungen an die Grenzflächen gelangt oder durch den Bitumenfilm diffundiert. Eine weitere Theorie des Adhäsionsversagens ist die Porendrucktheorie. Dabei wird das Bitumen an der Oberfläche des Gesteins durch den entstehenden Druck, wenn Wasser durch die Reifen in den Asphalt gedrückt wird, abgelöst. Dadurch kann sich Wasser an der Grenzfläche zwischen Gestein und Bitumen anreichern und unter der „pumpenden“ Wirkung des Verkehrs kurzzeitige Porenwasserdrücke und/ oder bei Temperaturerhöhung durch Wasserdampfbildung in gesättigten Hohlräumen längerfristige Porenwasserdrücke ausüben. Dies kann bis zu einem vollständigen Verlust des Kontakts zwischen der Gesteinskörnungsoberfläche und dem Bindemittelfilm führen.



Abbildung 3-4: Modellvorstellung einer Bindemittelablösung durch die Porendrucktheorie [28]

Auch [20, 21, 22] konnten bereits feststellen, dass es Hinweise darauf gibt, dass Wasser in den Asphalt diffundieren und den Bitumenfilm schwächen kann. Dabei wird das Bindemittel häufig als umgekehrte Emulsion bezeichnet. Bei der spontanen Emulgierung verbinden sich Wasser und Asphaltbindemittel zu einer umgekehrten Emulsion aus Wassertröpfchen und Asphaltmörtel, wobei der Asphalt die kontinuierliche Phase und das Wasser die diskontinuierliche Phase darstellt. Als letzte mögliche Versagenstheorie stellt Renken [18] die Filmbruchtheorie vor, die besagt, dass Wasser durch einen mechanischen Bruch bis zur Gesteinsoberfläche eindringen kann. Sobald die Emulsion die Grenzfläche zwischen Gestein und Bitumen erreicht, kommt es zu einem Auflösen der adhäsiven Verbindung. Dieser Effekt kann durch das Vorhandensein von Emulgatoren wie Tonmineralen und anderen Asphaltzusätzen weiter verstärkt werden.

Die folgende Tabelle stellt einen Überblick über die Einflussfaktoren des ungestörten Systems auf die Adhäsion dar.

Tabelle 3-2: Einflussgrößen auf das Haftverhalten [13]

Komponente	Einflussfaktoren
Gestein	<ul style="list-style-type: none"> - Mineralogisch/ petrographische Zusammensetzung - Chemische Zusammensetzung - Oberflächenrauheit - Porosität - Verstaubung und Feuchtfilm - Lösliche Salze - Zeta-Potential
Bitumen	<ul style="list-style-type: none"> - Oberflächen-/ Grenzflächenspannung - Viskosität - Zeta-Potential - Provenienz, Säurezahl, Paraffingehalt - Alterungsverhalten - Polymere, Haftverbesserer
Wasser	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatur, Frost-Tausalz-Wechsel - Chemische Inhaltsstoffe, gelöste Salze - pH-Wert

Bei näherer Betrachtung der Kohäsion (Verlust der Festigkeit und Steifigkeit des Asphaltbindemittels) zeigt sich, dass das Vorhandensein von Wasser zu einem Verlust des inneren Zusammenhaltes des Bitumens führt. Die innere Kohäsion des Bitumens führt zu Schäden wie beispielsweise der Ablösung von Gesteinskörnungen, die ein strukturelles Versagen der gesamten Asphaltbefestigung zur Folge hat [13].

Ein weiterer wichtiger Faktor, der zum Verlust der Dauerhaftigkeit führt, ist die chemische Affinität zwischen Zuschlagstoffen und Bindemittel. Diese Affinität wird häufig als Benetzung beschrieben, welches das Verhalten von Flüssigkeiten beim Kontakt mit der Grenzfläche des Gesteinskörnungsgemisches darstellt. Dieses Verhalten wird durch die Oberflächenspannung der Flüssigkeit und des Gesteins bestimmt. Zur Beurteilung der Ausbreitung eines Tropfens an der Gesteinsoberfläche vergleicht man die Kohäsionskräfte im Bindemittel und die Adhäsionskräfte gegenüber dem Gesteinskörnungsgemisch. Überwiegen die Adhäsionskräfte, kann das Bitumen die Gesteinsoberfläche benetzen [4]. Darüber hinaus kann es zu kohäsivem Versagen infolge des Verlusts des Asphaltmörtels kommen. Diese Schwächung der gesamten

Asphaltbefestigung kann aufgrund mehrerer Phänomene wie spontane Emulgierung auftreten [24].

Bereits 2004 wurde in Schweden mit ersten Versuchen zur Bestimmung der Beziehung zwischen den Materialeigenschaften des Asphalts und seiner Neigung zu wasserbedingten Schäden in Form von Ablösungen begonnen. Dabei wurden die Auswirkungen der Gesteinskörnungen und deren Wechselwirkung mit dem Bindemittel näher untersucht. Man erkannte, dass das Vorhandensein von Ca-Feldspat und Ferromagnesiummineralen in Gesteinskörnungen eine verbesserte Beständigkeit gegen Dauerhaftigkeitsschäden durch Wasserzutritt bedingt. Darüber hinaus sind jedoch Gesteinskörnungsgemische mit hohen Anteilen an sauren unlöslichen Bestandteilen wie SiO_2 und Al_2O_3 sehr empfindlich gegenüber wasserbedingten Schäden. Wohingegen der Beitrag zu Wasserempfindlichkeitsschäden von Al_2O_3 geringer war als der durch SiO_2 . [25, 26] erkannte, dass die Wahl des Gesteins eine entscheidende Rolle für die Wasserempfindlichkeit von Asphalt spielt. Das Bitumen dagegen scheint nur geringe Auswirkungen auf die Wasserempfindlichkeit zu haben. Bestimmt werden konnte dies durch die indirekte Zugfestigkeitsprüfung [27] an Asphaltprobekörpern.

Auch [23] erkannte, dass die Anwendung von Zugkräften als geeignet für die Untersuchung und Darstellung von wasserempfindlichkeitsbedingten Schäden ist. Belastungen infolge von Druckprüfungen erbrachten nicht das gewünschte Ergebnis. Dies muss in weiteren Untersuchungen jedoch noch genauer bestimmt werden (siehe Kapitel 9.1) [23].

Wie die Ergebnisse der letzten Jahre zeigen, spielt insbesondere das Gesteinskörnungsgemisch eine entscheidende Rolle bei der Wasserempfindlichkeit von Asphalt. Überraschend dabei ist jedoch, dass Untersuchungen in Abhängigkeit der Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen und deren direkten Einfluss auf die Wasserempfindlichkeit von Walzasphalt in den letzten Jahren häufig außer Acht gelassen wurden. Lediglich Grönniger und Wistuba befassten sich in [36] mit dem Thema, welchen Einfluss die feinen Gesteinskörnungen und der Asphaltmörtel auf das Gebrauchsverhalten von Asphalt haben. In ihrem Forschungsprojekt wurde zur Identifikation dieses Einflusses drei Betrachtungsebenen genauer analysiert:

1. Füller-Bitumen-Gemisch,
2. Asphaltmörtel (Füller-Bitumen-Sand-Gemisch),
3. Asphalt.

Die untersuchten Asphaltmischguteigenschaften, die im Rahmen dieser Arbeit von besonderer Bedeutung sind, waren die Verformungsbeständigkeit, die mittels Druck-Schwellversuche am Walzasphalt und dynamische Stempel Eindringversuche am Gussasphalt geprüft wurde, sowie die Kälteflexibilität mittels Zug- und Abkühlversuchen. Das polymermodifizierte Bitumen wirkte sich im Kälteverhalten positiver auf die Dauerhaftigkeit der Asphaltbefestigung aus als ein Straßenbaubitumen. Abschließend konnte festgestellt werden, dass der Einfluss der Eigenfüllerart bzw. der Sandart sich prüftechnisch lediglich mit dem Schüttel-Abriebverfahren abbilden lässt. Die Sandart wirkte sich lediglich geringfügig auf das Kälteverhalten des Asphaltes aus.

Auffällig ist, dass sämtliche in [36] verwendeten feinen Gesteinskörnungen den in Bayern festgelegten Anforderungswert von 25 M.-% nicht einhalten können. In [36] wurden lediglich feine Gesteinskörnungen verwendet, die eine geringe Differenzierungsmöglichkeit hinsichtlich ihrer Wasserempfindlichkeit bieten – alle untersuchten Sande liegen im oberen Wertebereich (siehe Abbildung 3-5) des Schüttel-Abriebs. Aus diesem Grund müssen weitergehende Untersuchungen angefügt werden, bei denen eine deutlichere Wertespreizung vorhanden ist. Insbesondere muss somit ein Schwerpunkt auf die Qualität der feinen Gesteinskörnungen hinsichtlich ihrer Wasserempfindlichkeit gelegt werden. Dies wird im Rahmen dieser Arbeit fortgesetzt.

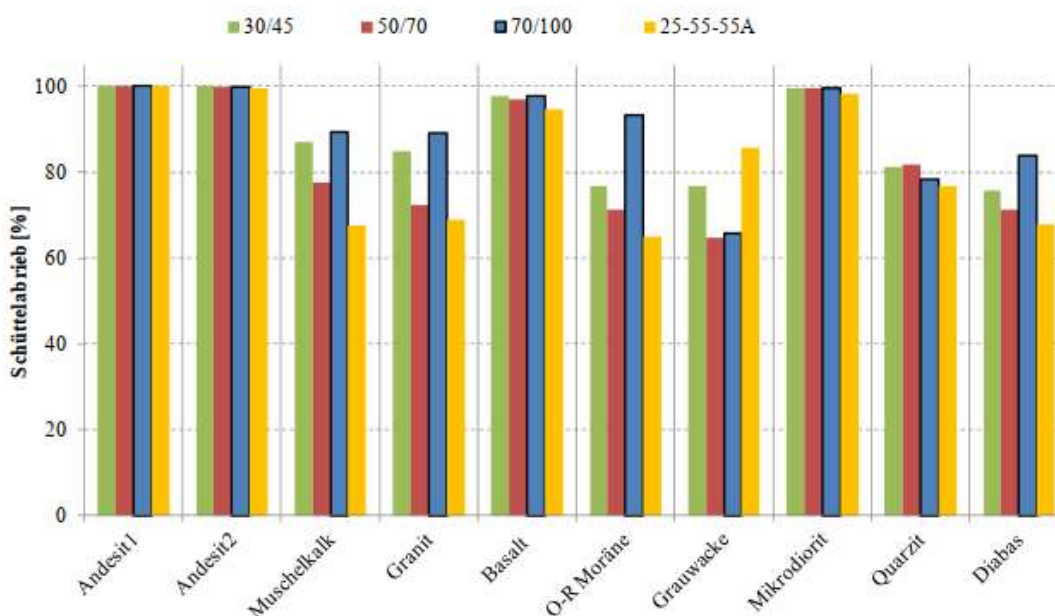


Abbildung 3-5: Ergebnisse des Schüttel-Abriebverfahrens der Serie E [36]

3.3 Stand der Technik und Prüfmethoden

3.3.1 Prüfsystematik zur Bestimmung der Wasserempfindlichkeit von Asphalt

Die Wasserempfindlichkeit von Asphalt kann mit dem Verfahren nach EN 12697-12 [27] ermittelt werden. Mit dieser Methode kann die Auswirkung von Wasser auf die Hafteigenschaften an der Grenzfläche zwischen Bitumen und Gestein angesprochen werden, jedoch ist dieses Verfahren lediglich für Asphaltmischgüter mit einem Größtkorn von maximal 22 mm – d.h. für alle Asphaltdeckschichten – geeignet. Zur Untersuchung der Wasserempfindlichkeit müssen sechs zylindrische Probekörper nach TP Asphalt-StB, Teil 12 [38] geprüft werden. Diese Prüfkörper können aus Marshall-Probekörper nach TP Asphalt-StB, Teil 30 [39] hergestellt werden oder aus Probepplatten nach TP Asphalt-StB, Teil 27 [40] gebohrt werden. Anschließend werden diese Probekörper in zwei Gruppen unterteilt und müssen für 16 Stunden bei Raumtemperatur lagern. Vor der Prüfung werden die in Gruppen unterteilten Probekörper nochmals unterschiedlich in nassem und trockenem Zustand konditioniert. Dabei wird insbesondere bei der Lagerung unterschieden, wobei die Probekörper für den nassen Zustand mehrere Wasserlagerungsphasen durchlaufen müssen.

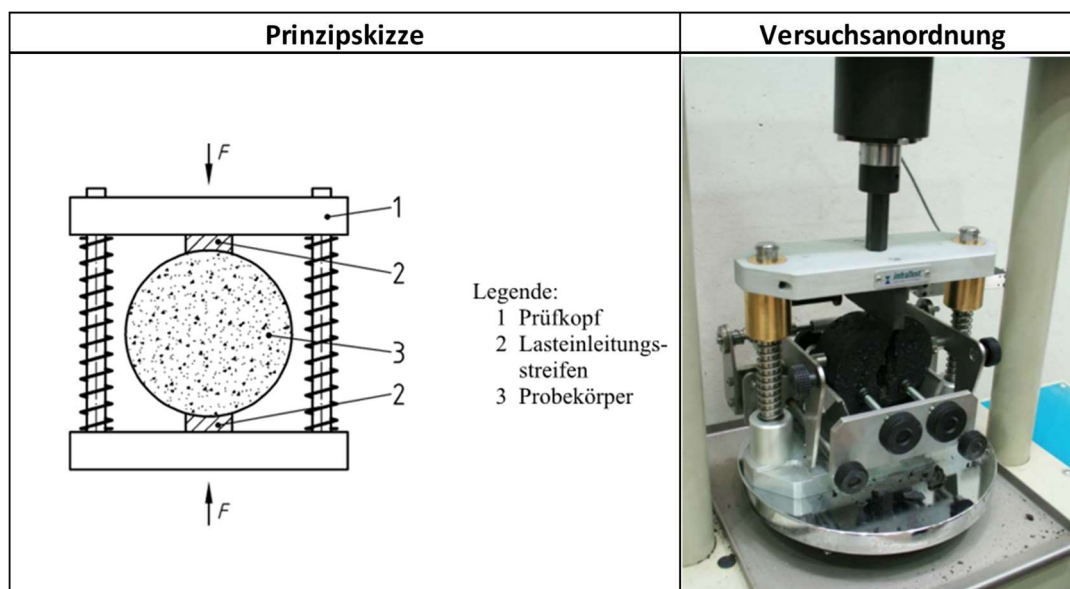


Abbildung 3-6: Prüfeinrichtung zur Bestimmung der Spaltzugfestigkeit [37,66]

Nach der Lagerung erfolgt die Prüfung mittels der Spaltzugprüfung nach EN 12697-23 [41] bzw. TP Asphalt-StB, Teil 23 [42]. Abschließend wird die Wasserempfindlichkeit ermittelt, die

sich aus dem Verhältnis ITSR (Indirect Tensile Strength Ratio) der Spaltzugfestigkeiten (indirekten Zugfestigkeit) von trockenem und nassem Probekörper ergeben.

3.3.2 Prüfsystematik zur Bestimmung der Wasserempfindlichkeiten von feinen Gesteinskörnungen

Derzeit gibt es drei unterschiedliche Prüfverfahren im Regelwerk, um die Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen zu untersuchen.

- Methylblau (MB)-Wert nach EN 933-9 [43] bzw. TP Gestein-StB, Teil 4.2.2 [44],
- Sandäquivalent (SE(10)) nach EN 933-8 [45] bzw. TP Gestein-StB, Teil 4.2.1 [46],
- Schüttel-Abriebverfahren nach TP Gestein-StB, Teil 6.6.3 [47].

Der MB-Versuch nach EN 933-9 [43] basiert auf einer wässrigen Suspension der Messprobe, der nacheinander kleine Mengen an Methylblau-Lösung zugegeben wird. Für den Nachweis der Anwesenheit freien Farbstoffes wird nach jeder Zugabe der Lösung ihre Adsorption durch die Probe geprüft. Dafür wird ein Färbversuch auf einem Filterpapier durchgeführt (siehe Abbildung 3-7). Abschließend entspricht der MB-Wert dem adsorbierten Farbstoff in Gramm je Kilogramm der geprüften Kornklasse des feinen Gesteinskörnungsgemisches. So kann man den Methylblau-Wert sowohl am Sand (0/2 mm = MB-Wert) als auch am Füller (0/0,125 mm = MB_F) ermitteln.



Abbildung 3-7: Versuchsaufbau zur Bestimmung des MB-Wertes [8]

Beim Sandäquivalent nach EN 933-8 [45] wird eine Probe der feinen Gesteinskörnung mit einem maximalen Feinanteil von 10 M.-% (entweder natürlich vorkommend oder erreichbar durch eine entsprechende Anpassung der Korngrößenverteilung) gemeinsam mit einer geringen Menge einer Wasch- und Flockungsmittellösung in einen Messzylinder gegeben. Diese Lösung beseitigt die anhaftenden Tonminerale an den großen Gesteinskörnern. Die feine Gesteinskörnung wird anschließend unter Zugabe von weiterem Lösungsmittel ausgewaschen, wodurch die feinsten Partikel über der feinen Gesteinskörnung in Suspension gebracht werden (siehe Abbildung 3-8). Nach einer festgelegten Dauer wird der SE(10)-Wert als Anteil der Höhe der Sedimentschicht in Prozent zu der Gesamthöhe des Sediments und der Suspension im Messzylinder berechnet.



Abbildung 3-8: Sandäquivalentverfahren nach EN 933-8 [35]

Da die beiden Länder Österreich und Schweiz in der Bestimmung der Qualität der Feinanteile, wie bereits in Kapitel 3.2.1 beschrieben, auf petrographische Untersuchungen zurückgreifen, wird im Folgenden auf die Bestimmung der Petrographie ebenfalls näher eingegangen. EN 932-3 [48] bildet die Basis für die Bestimmung einer einfachen Petrographie für feine Gesteinskörnungen. Dieses Verfahren dient der genaueren gesteinskundlichen Ansprache (makroskopisch wie auch mikroskopisch) und geht dabei sogar über XRD-Analysen hinaus, da diese keine Aussagen zulassen, ob Schichtsilikate frei oder in anderen Mineralen gebunden

vorliegen. Im Folgenden unterscheidet man im Rahmen dieser Arbeit für die Untersuchung der Tonminerale (siehe Kapitel 6) zwei unterschiedliche Prüfungsansichten:

- Aus mineralogischer Sicht (Röntgendiffraktometrie, XRD-Analyse)
- Aus geochemischer Sicht (Röntgenfluoreszenzanalyse, XRF-Analyse sowie Glühverlust, LOI-Analyse)

Eine Bewertung der Qualität der Feinanteile nach den oben genannten Verfahren ist jedoch nach [35] nicht zielführend. Die Ergebnisse in dieser Forschungsarbeit zeigten, dass lediglich das Schüttel-Abriebverfahren dazu geeignet ist, die Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen bestmöglich abbilden zu können (siehe Kapitel 3.2.1). Aus diesem Grund dienen diese Verfahren bei der Bestimmung der Qualität von Feinanteilen lediglich der Ergänzung zum Schüttel-Abriebverfahren, welches zukünftig fest in der europäischen Norm verankert werden soll [32, 35].

Das Schüttel-Abriebverfahren wurde ursprünglich in den USA entwickelt und von Feix in den 70er Jahren nach Deutschland gebracht. Mittlerweile existieren mit der Prüfung am Marshall-Probekörper sowie am Sandasphalt-Probekörper zwei aussagekräftige Verfahren zur Bestimmung des Schüttel-Abriebs. Die Prüfung am Sandasphalt-Probekörper ist inzwischen fest in der TP Gestein-StB, Teil 6.6.3 [47] verankert. Dieses dient primär der Charakterisierung der feinen Gesteinskörnungen im Asphaltmörtel (siehe Abbildung 3-10). Bei diesem Verfahren wird auf eine definierte Zusammensetzung des feinen Gesteinskörnungsgemisches geachtet und der Bindemittelgehalt entsprechend der Rohdichte des Gesteinskörnungsgemisches eingestellt. Anschließend werden in der Regel zwei Prüfserien gestartet.

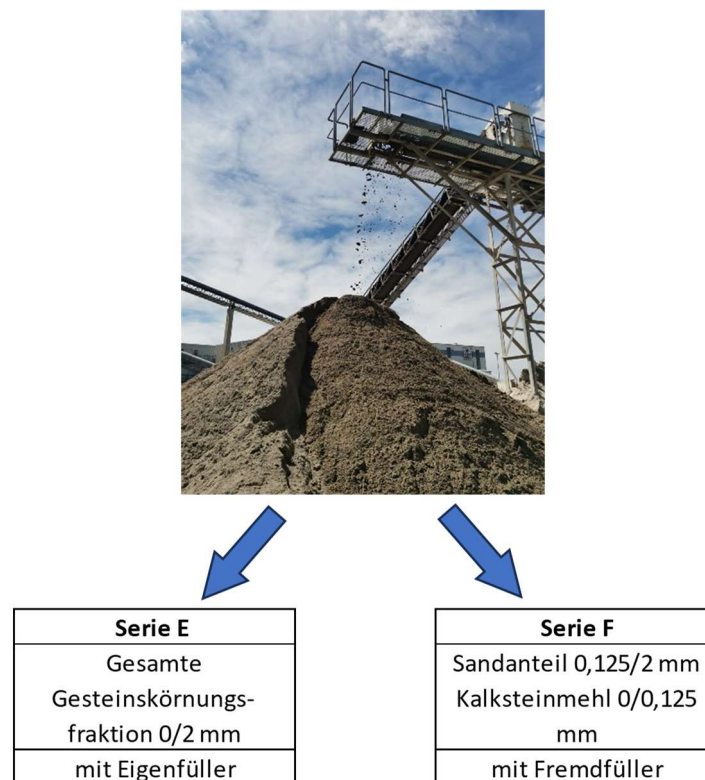


Abbildung 3-9: Schema zur Bildung des Schüttel-Abriebs der Serie E und F

Der Unterschied zwischen den beiden Serien liegt insbesondere in der Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches. So muss zwischen der Serie E (Eigenfüller) und der Serie F (Fremdfüller) unterschieden werden. Bei Serie F wird der Fülleranteil (Kornklasse 0/ 0,125 mm) im feinen Gesteinskörnungsgemisch durch ein Standard-Kalksteinmehl ersetzt, wodurch die Beurteilung der Qualität des Sandanteils (0,125/ 2 mm) möglich ist. Bei Serie E wird die gesamte Gesteinskörnungsfraction der feinen Gesteinskörnung (0/2 mm) ohne Austausch des Füllers geprüft.

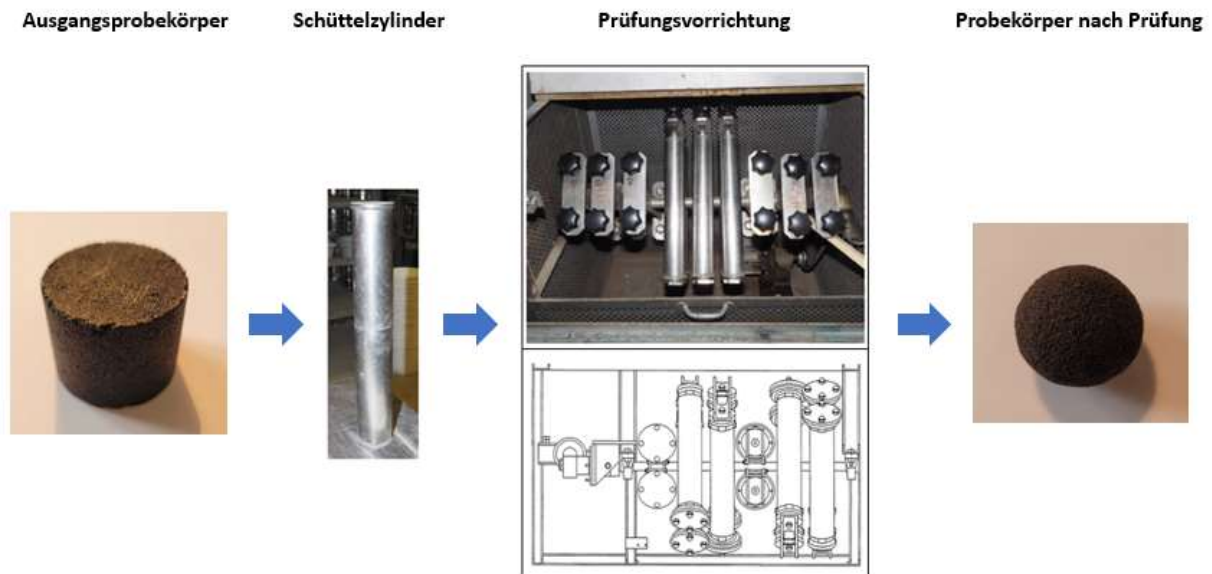


Abbildung 3-10: Schema des Schüttel-Abriebverfahrens nach TP Gestein-StB, Teil 6.6.3 [47]

Als Ergebnis der Schüttel-Abriebs-Prüfung erhält man den Abrieb des Probekörpers im Verhältnis zu der Gesamtmasse des Ausgangsprobekörpers. Dieser entsteht durch eine Überkopf-Bewegung der in wassergefüllten Zylindern lagernden Probekörpern. Abschließend kann die Wasseraufnahme, die Quellung (infolge der Wasserlagerung) und der Schüttel-Abrieb der Probekörper ermittelt werden. Mit Hilfe des Schüttel-Abriebs und der Quellung ist eine Beurteilung der Qualität der feinen Gesteinskörnung möglich. Die Wasseraufnahme dagegen dient der Charakterisierung der Hohlraumverhältnisse im Probekörper. Darüber hinaus ermöglicht das Schüttel-Abriebverfahren eine differenzierte Beurteilung hinsichtlich Bindemittelananspruch, Dauerhaftigkeit, Haftverhalten, Volumenstabilität und Mineralogie und ist zudem für die Überprüfung der Gleichmäßigkeit der feinen Gesteinskörnungen geeignet. In Bayern wird dieses Verfahren bereits zielführend zur Steigerung der Dauerhaftigkeit der Asphaltbefestigung eingesetzt.

Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Dauerhaftigkeit einer Asphaltbefestigung ist die Affinität zwischen Gesteinskörnungsgemisch und Bitumen. 2005 konnte Graf in [49] nachweisen, dass die Ermittlung der Affinität ebenfalls mit einer modifizierten Prüftechnik des Schüttel-Abriebverfahrens möglich ist. Dabei werden Marshall-Probekörper nach [49] vorgegebener Probenvorbereitung und -temperierung im modifiziertem Schüttel-Abrieb-Prüfgerät (siehe Abbildung 3-11) geprüft. Nach erfolgter Temperierung werden die Probekörper in den mit Wasser gefüllten Zylinderbehältern gelegt und in die Prüfvorrichtung -

luftdicht verschlossen - eingespannt. Anschließend erfolgt die Beanspruchung, wobei diese wie bei der Prüfung am Sandasphaltprobekörper mittels Über-Kopf-Bewegungen entsteht. Die Ergebnisse von [32, 35] zeigen, dass eine äußerst gute Korrelation zwischen dem Schüttel-Abrieb am Marshall-Probekörper bzw. am Sandasphalt-Probekörper herzustellen ist.



Abbildung 3-11: Prüfung des Schüttel-Abriebverfahrens am Marshall-Probekörper [32]

Obwohl in Fachkreisen bereits seit längerer Zeit die Tatsache bekannt [8, 17, 28, 35] ist, dass die Mörtel­eigenschaften des Asphaltes maßgeblich auch durch den Sand beeinflusst werden, muss überraschenderweise festgestellt werden, dass die Wasserempfindlichkeit lediglich für die Lieferkörnung „Füller“ in den Europäischen Normen verankert ist. Auf Sande bzw. deren Anteile in Gesteinskörnungsgemischen wird grundsätzlich nicht näher eingegangen [8]. Aus diesem Grund werden im Rahmen dieser Arbeit aufbauend auf den Ergebnissen von [8, 35] die Auswirkungen der feinen Gesteinskörnungen hinsichtlich ihrer Wasserempfindlichkeit auf das Gebrauchsverhalten von Asphalt näher analysiert und eine neue Prüf­vorschrift entwickelt.

4. Voruntersuchungen für den Zusammenhang zwischen Praxis- und Labor-Performance

4.1 Probenauswahl und Streckenbesichtigungen

Unbestritten gilt, dass die Asphal­teigenschaften entscheidend von den Eigenschaften der feinen Gesteinskörnungen (Sande) beeinflusst werden. Feix [28] stellte bereits in den 70er Jahren fest, dass die Dauerhaftigkeit der Gesam­asphaltbefestigung maßgeblich durch die Wasserempfindlichkeit der Sande und deren Einfluss auf die Mörtel­eigenschaften des Asphaltes geprägt wird, dennoch bestand bis 2021 kein allgemein gültiger Bewertungshintergrund für das Beurteilungskriterium „Wasserempfindlichkeit“ von feinen

Gesteinskörnungen; lediglich der Freistaat Bayern integrierte den Kennwert in seinem Regelwerk. Ziel des Forschungsvorhabens [8] war es, die Eigenschaften des Asphaltmörtels hinsichtlich seiner Wasserempfindlichkeit zu überprüfen, um gezielt qualitativ geeignete Sande einsetzen zu können und die Dauerhaftigkeit der Asphaltbefestigung zu erhöhen. Die Untersuchungen erfolgen an frisch produzierten Sanden und der Bewertung von mit diesen Sanden hergestellten Asphaltstrecken. Mit Hilfe des Schüttel-Abriebverfahrens als Performance-Prüfung kann eine praxisgerechte Beurteilung der Qualität der Sande einschließlich des Fülleranteils ermöglicht werden, ohne deren Mineralogie bzw. Petrographie zwingend erfassen zu müssen. Um die Lücke zwischen den im Labor ermittelten Eigenschaften der Sande und dem Praxisverhalten schließen zu können, war es wichtig zunächst einmal einen empirischen Zusammenhang zu erschaffen, um anschließend daraus abgeleitet, praxisgerechte Anforderungswerte für das Bewertungskriterium Wasserempfindlichkeit durch das Merkmal „Schüttel-Abrieb“ festlegen zu können. Dafür wurde ein umfangreiches Untersuchungsprogramm durchgeführt, welches im Folgenden näher beschrieben wird.

Insgesamt wurden 33 feine Gesteinskörnungen in das Untersuchungsprogramm aufgenommen. Dabei wurde darauf geachtet, dass eine Vielzahl unterschiedlicher Gesteinsarten sowie Sande mit Schüttel-Abrieb-Werten, die den gesamten Wertebereich abdecken, einbezogen werden. Diese feinen Gesteinskörnungen wurden mit konventionellen Prüfungen, wie z.B. Rohdichte, Kornform usw., sowie umfangreichen petrographischen und mineralogischen Prüfungen untersucht. Dazu kamen die Bestimmung der Qualität der Feinanteile mittels Methylenblau-Wert, Sandäquivalent und dem Schüttel-Abriebverfahren.

Neben den Untersuchungen an den feinen Gesteinskörnungen, wurden gleichzeitig 36 Strecken besichtigt, in denen die ausgewählten Sande verbaut wurden. Die Beurteilung der Strecken erfolgte auf die Merkmale „Ausmagerung, Kornausbrüche und Risserscheinungen“. Unterstützt wurde die optische Besichtigung um ELAtextur-Messungen nach DIN EN ISO 13473-1 [61], welche die schnelle und berührungslose Erfassung der Fahrbahnoberflächentextur (Mikro- und Makrorauheit) ermöglichen. Dabei tastet ein Lasersensor die Asphaltoberfläche zweidimensional in einem Kreisring ab. Anschließend berechnet das Messgerät die mittlere Profiltiefe (MPD). Bei hinsichtlich der Wasserempfindlichkeit auffälligen Strecken erfolgte die Entnahme von Ausbauproben, welche weitergehend untersucht wurden.

Häufig waren die 36 besichtigten Strecken stark ausgemagert (siehe Abbildung 4-1). Da es jedoch zumeist ein Zusammenspiel aus mehreren Mängelursachen ist, bestand die

Herausforderung diese Schäden herauszufinden, die auf die Folgen der Wasserempfindlichkeit der feinen Gesteinskörnung zurückzuführen sind. Dabei halfen die Ergebnisse des Schüttel-Abriebverfahrens, um einen Eindruck der Qualität der Feinanteile im eingebauten Asphalt gewinnen zu können. Wie beschrieben, unterstützte auch das ELAtextur-Messgerät in der Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit hinsichtlich der Ausmagerung der Asphaltoberfläche. Die B 81 bei Heyenburg beispielsweise ließ erkennen, dass es bereits nach fünf Jahren Liegedauer zu deutlichen Risserscheinungen und Ausmagerungen gekommen ist.



Abbildung 4-1: Fotodokumentation der Streckenbesichtigung B 81 Heyenburg - Kroppenstedt [8]

So zeigte sich auch, dass mit steigendem Schüttel-Abrieb-Wert die ELAtextur-Messergebnisse gestiegen sind. Trotz der vielen unterschiedlichen Einflussfaktoren auf die Oberflächenbeschaffenheit des Asphaltes konnte ein schwacher Zusammenhang hergestellt werden. Abbildung 4-2 zeigt dazu die Ergebnisse der ELAtextur-Messungen von neun Strecken, an denen auch Ausbauproben genommen wurden, in Abhängigkeit des Schüttel-Abriebs der Serie E und F.

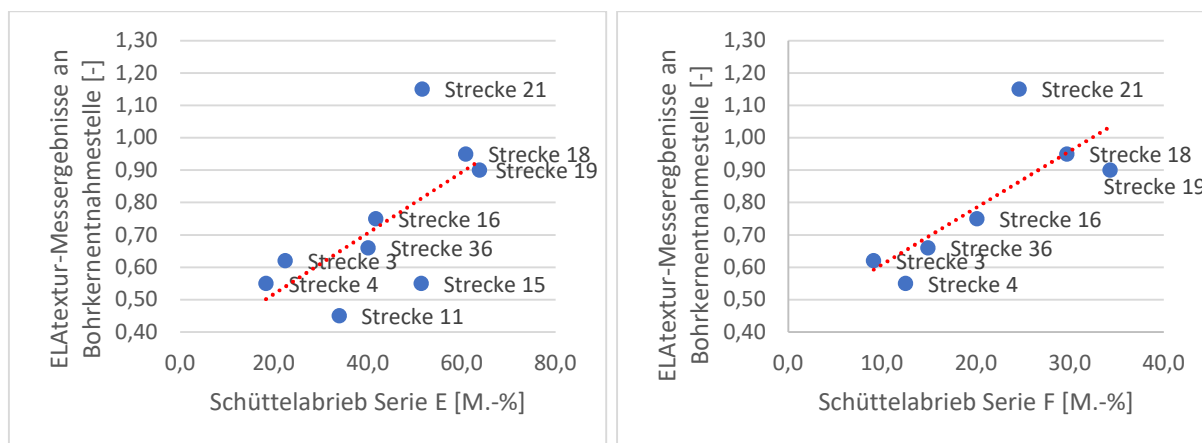


Abbildung 4-2: ELAtextur-Messergebnisse mit Schüttele-Abrieb der Serie E und F [8]

Insbesondere zeigt sich beim Vergleich der Beobachtungen vor Ort und den Ergebnissen des Schüttel-Abriebs, dass sich Ausmagerungserscheinungen vor allem dann ergaben, wenn der Wert des Schüttel-Abriebs über 25 M.-% liegt, Risse dahingegen zeigen sich vermehrt ab Werten von 35 M.-%. Da diese Schadensbilder jedoch auch mit zahlreichen anderen Kriterien im Rahmen der Asphaltkonzeption und hier vor allem mit dem Bindemittelgehalt oder auch mit Einbaufehlern zusammenhängen können, ist ein statistischer Zusammenhang zwischen optischem Erscheinungsbild und Schüttel-Abrieb nur abzuschätzen [8].

4.2 Bestimmung der Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen nach TP Gestein-StB, Teil 6.6.3

An 33 frischen sowie zehn rückgewonnenen Sanden wurden die Wasserempfindlichkeitseigenschaften nach TP Gestein-StB, Teil 6.6.3 [47] untersucht. Die Probennummern der Voruntersuchungen werden im Folgenden mit dem Kürzel „VV“ vor der Nummer definiert (siehe auch Kapitel 7.1). Die an den Sanden ermittelten Werte des Schüttel-Abriebs zeigen mit Eigenfüller und mit Fremdfüller vergleichbare Ergebnisse. Die Werte liegen hierbei zwischen 8,0 M.-% und 85,2 M.-%. Vergleicht man die ermittelten Werte mit den in Bayern geltenden Anforderungswerten (25 M.-% für Asphaltdeck- und -binderschichten) [51], so zeigt sich, dass bei der Prüfung mit Eigenfüller 24 Proben in Bayern keine Verwendung in Asphaltdeck- oder -binderschichten finden dürfen. Bei der Untersuchungsserie mit Fremdfüller scheiden zehn Proben für die Verwendung in Asphaltdeck- und -binderschichten aus. Die Ergebnisse der Schüttel-Abrieb-Prüfungen des Füllers und der Prüfung des Schüttel-Abriebs der Serie E und F am Sand zeigen eine große Wertespreizung der 33 untersuchten Sande auf. Auch zwischen dem Schüttel-Abrieb am Füller und der Serie E ist ein ausgeprägter Zusammenhang ersichtlich. Darüber hinaus zeichnet sich diese Prüfung durch ihre Praxisnähe aus, wie die ermittelten Zusammenhänge von Streckenbesichtigung und den Ergebnissen des Schüttel-Abriebs der Serie E aufzeigen (siehe Kapitel 4.1).

Die an sechs untersuchten rückgewonnenen feinen Gesteinskörnungen ermittelten Werte für den Schüttel-Abrieb liegen durchweg auf einem niedrigeren Niveau. Zusätzlich durchgeführte Untersuchungen lassen vermuten, dass die Hitzebeanspruchung bei der Asphaltproduktion und ggf. auch der Extraktionsprozess des Asphaltmischgutes eine Reduzierung der Schüttel-Abrieb-Werte bewirken (siehe Abbildung 4-3). Eine rückwirkende Beurteilung der feinen Gesteinskörnungen zeigt sich aufgrund der geringen Wertespreizung als äußerst schwierig. Zur

Bewertung der Qualität des Sand- und Fülleranteils nach Rückgewinnung aus dem Asphalt wären weiterführende Untersuchungen notwendig.

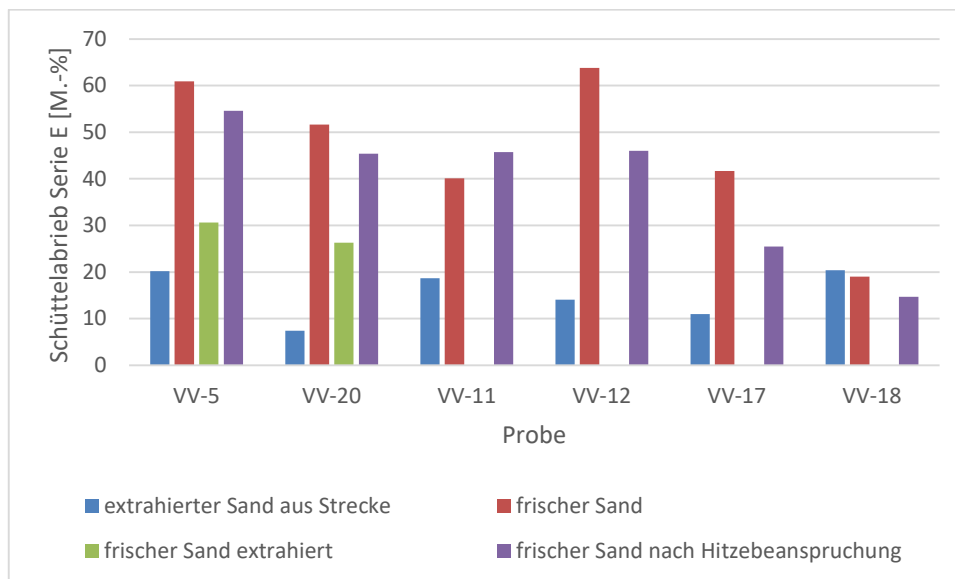


Abbildung 4-3: Ergebnisse des Schüttel-Abriebs der Serie E ausgewählter Sande nach Hitzebeanspruchung [8]

4.3 Untersuchungen am Asphalt

Zusätzlich wurde der Schüttel-Abrieb am Marshall-Probekörper zur Erfahrungssammlung ebenfalls mit den 33 unterschiedlichen feinen Gesteinskörnungen in [8] durchgeführt. Mit Ausnahme eines Natursandes (Schüttel-Abrieb der Serie E = 57,3 M.-%) liegen alle Prüfergebnisse in dem Wertebereich zwischen 6,1 M.-% und 31,5 M.-%.

Einen Zusammenhang (siehe Abbildung 4-4) zwischen dem Schüttel-Abrieb der Serie E und dem Schüttel-Abrieb am Marshall-Probekörper lässt sich in geringem Umfang herstellen. Andere Korrelationen sind nicht erkennbar.

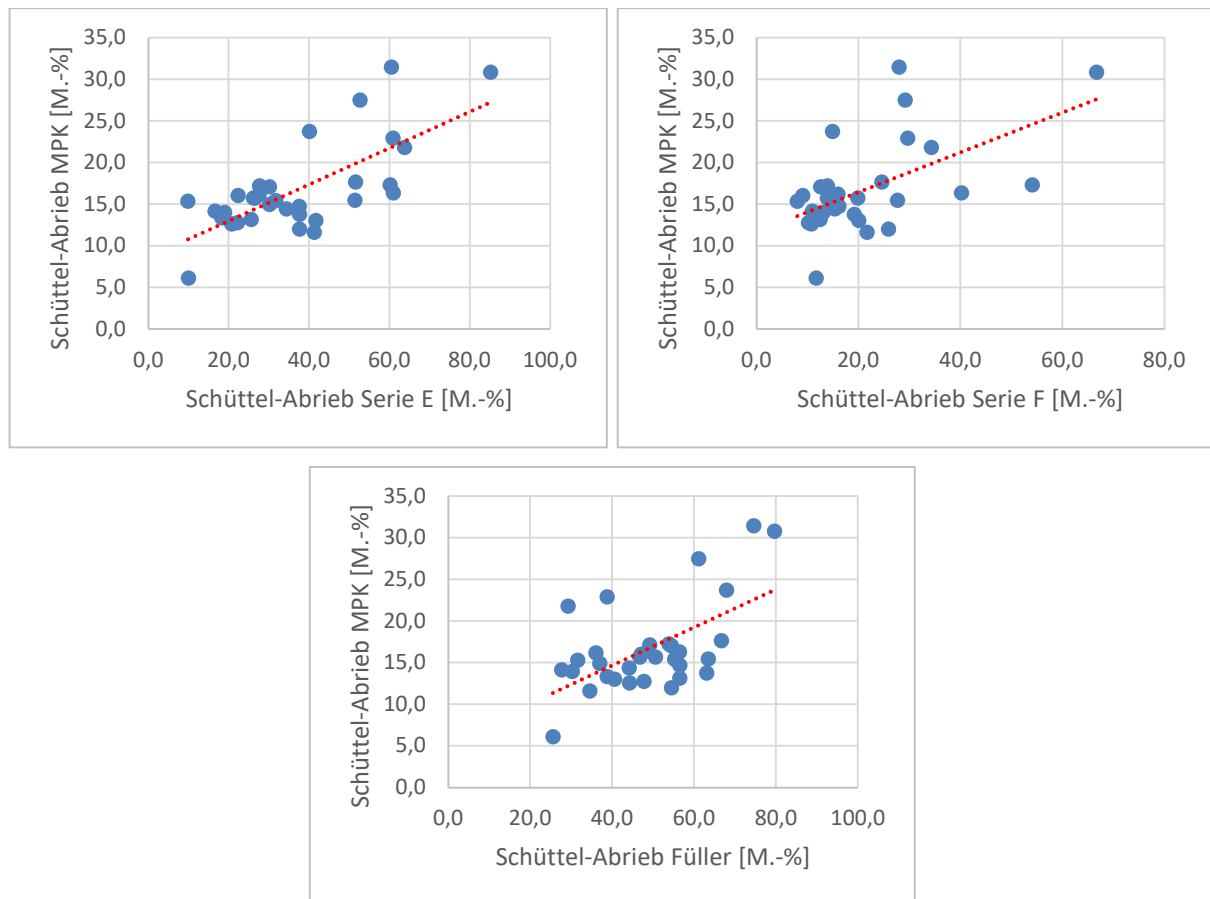


Abbildung 4-4: Korrelationen zwischen den Ergebnissen des Schüttel-Abriebs am Marshall-Probekörper und am Sandasphalt-Probekörper [8]

Zusammenfassend ist in [8] erkennbar, dass ein Zusammenhang zwischen den in der Praxis eingebauten Asphaltdeckschichten und den Laborergebnissen zur Wasserempfindlichkeit festgestellt werden konnte. Hierbei zeigte sich, dass mit steigendem Schüttel-Abrieb – und somit ungünstiger Wasserempfindlichkeit – auch die Auffälligkeiten im Asphalt zunahm. Auf Basis dieser Erkenntnisse lässt sich eine Empfehlung für einen Anforderungswert ableiten. Der in Bayern seit vielen Jahren geltende Anforderungswert erscheint grundsätzlich geeignet. Hier hat die Steine- und Erden-Industrie bewiesen, dass durch Optimierung der Produktion der Anforderungswert zielgerecht eingehalten werden kann. Seit über 10 Jahren wird auf Grundlage der Festlegungen der TL Gestein-StB [51] das Schüttel-Abriebverfahren bundesweit angewendet. Die in den Werken vorliegenden Erfahrungen sollten es unter Beachtung der Präzision des Prüfverfahrens ermöglichen, Sande mit einem Schüttel-Abriebwert der Serie E von max. 35 M.-% für die Asphaltproduktion zielsicher bereitzustellen [8].

4.4 Untersuchung des eingebauten Versuchsfeldes

Nach den erfolgten Untersuchungen an den frischen und rückgewonnenen feinen Gesteinskörnungen sowie der Auswertung der Streckenbesichtigungen in [8] wurden abschließend 15 Sande ausgehend von den Schüttel-Abrieb-Ergebnissen für weitergehende Langzeituntersuchungen ausgewählt. Dabei sind insbesondere die feinen Gesteinskörnungen ausgewählt worden, die einen Schüttel-Abrieb in der Nähe dieses vorgeschlagenen Grenzwertes von 35 M.-% bei der Serie E besitzen. Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass der mittlere Bereich der Schüttel-Abrieb-Werte durch 10 verschiedene Sande, der untere Bereich durch zwei und der obere Bereich durch drei feine Gesteinskörnungen vertreten ist. Die drei Varianten sind anhand der Schüttel-Abrieb-Werte der Serie E, wie folgt, aufgegliedert:

- Unterer Bereich: kleiner 25 M.-%,
- Mittlerer Bereich: zwischen 25 M.-% und 40 M.-%,
- Oberer Bereich: größer 40 M.-%.

Anhand dieser beschriebenen Kriterien wurden die folgenden feinen Gesteinskörnungen für die Langzeituntersuchungen im Versuchsfeld ausgewählt.

Tabelle 4-1: Ausgewählte Sande für die Langzeituntersuchungen im Versuchsfeld [8]

Proben-Nr.	Bereich	Gesteinsart	Schüttel-Abrieb [M.-%]	
			Serie E	Serie F
VV-18	unterer Bereich	Diabas	19,0	13,1
VV-24		Moräne/Kies	18,3	12,5
VV-2	mittlerer Bereich	Gabbro	37,6	16,2
VV-3		Gabbro	30,2	12,6
VV-6		Rhyolith	26,2	19,9
VV-8		Andesit	27,7	13,9
VV-11		Andesit	40,1	14,9
VV-13		Basalt	37,7	25,9
VV-17		Diabas	41,7	20,1
VV-22		Quarzit	31,8	15,6
VV-28		Chloridgneis	37,7	19,2
VV-30		Rhyolith	30,2	15,9
VV-5	oberer Bereich	Rhyolith	60,9	29,7
VV-12		Andesit	63,8	34,3
VV-20		Grauwacke	51,6	24,6

Die dabei rot gekennzeichneten Proben wurden sowohl für Probeplatten aus Splittmastixasphalt als auch für Probeplatten aus Asphaltbeton hergenommen. Da Splittmastixasphalte nur geringe Anteile an feinen Gesteinskörnungen aufweisen, wurden insbesondere die zehn Sande ausgewählt, die die höchsten Schüttel-Abriebe aufweisen, da verhältnismäßig gute Sande voraussichtlich keine Reaktionen zeigen werden.

Für den Einbau in das Versuchsfeld wurden anschließend Grundrezepturen mit den ausgewählten feinen Gesteinskörnungen für einen Asphaltbeton AC 8 D S 25/55-55 A und einen SMA 5 S 25/55-55 A nach TL Asphalt-StB 07/13 [50] erstellt. Für die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Varianten kamen als grobe Gesteinskörnung Diabas und als Fremdfüller Kalksteinmehl zum Einsatz. Mit Hilfe der Grundrezepturen wurden 25 unterschiedliche Asphaltprobenvarianten im Labor gemischt und Asphalt-Probeplatten hergestellt. Diese Probeplatten wurden nach der Herstellung in ein Versuchsfeld auf der B 17 Fahrtrichtung Landsberg am Lech auf Höhe der Anschlussstelle Klosterlechfeld im Standstreifen zur Beobachtung eingebaut (siehe Plan in Anhang A). Dadurch wird eine wechselnde jahreszeitliche Witterungsbelastung inkl. Frost-Tausalz-Wechsel ohne Verkehrsbelastung ermöglicht. Diese Probeplatten wurden Ende 2020 in das Versuchsfeld eingebaut und werden seitdem beobachtet.



Abbildung 4-5: Eingebautes Versuchsfeld 2020 [8]

Nach einem Jahr konnten bereits erste Veränderungen festgestellt werden. Insbesondere optisch wird ersichtlich (siehe Abbildung 4-6), dass der Bindemittelfilm nach einem Jahr Liegedauer Ende 2021 bereits vollständig abgewittert war. Dadurch kommen die unterschiedlichen feinen Gesteinskörnungsfarben im Asphaltmörtel zum Vorschein. Auch konnten bereits erste Kornausbrüche der groben Gesteinskörnung festgestellt werden. Nach einem weiteren Jahr nahmen die Abwitterungserscheinungen nochmals zu. Das äußert sich in einem verstärkten Ausbrechen der groben Gesteinskörnung, ersten Ausmagerungserscheinungen und einem weiteren Verlust des Asphaltmörtels. Dies geschieht vor allem bei den Asphalt-Probepplatten, die mit wasserempfindlichen feinen Gesteinskörnungen hergestellt wurden. In Tabelle 4-2 ist an ausgewählten Probepplatten im Vergleich über die Jahre hinweg ein deutlicher Unterschied feststellbar. Die gesamte Fotodokumentation ist in Anhang B zu finden.





Abbildung 4-6: Gesamtaufnahme Fotodokumentation des Versuchsfeldes (S.36 links: Ende 2021; S.36 rechts: Anfang 2023; S.37 Anfang 2024)

Bei den SMA-Probepplatten sind geringere Mängel sowohl nach einem als auch nach zwei Jahren Liegedauer zu erkennen. Lediglich Probe VV-5 weist auch bei der Probepplatte mit SMA bereits eine deutlich rauere Oberfläche nach zwei Jahren auf. Erste Ausmagerungserscheinungen und Kornausbrüche treten auf. Da Probe VV-5 einen hohen Schüttel-Abrieb-Wert besitzt, ist das wahrscheinlich auf die Wasserempfindlichkeit der feinen Gesteinskörnung zurückzuführen. Andere SMA-Probepplatten weisen auch trotz hohem Schüttel-Abrieb keine schwerwiegenden Mängel auf. Die Vermutung ist, dass infolge des geringeren Sandanteils im SMA auch lediglich geringe Auswirkungen durch eine hohe Wasserempfindlichkeit des Sandes festzustellen sind.

Die Schäden bei den Varianten mit den Asphaltbeton-Probepplatten sind jedoch dafür umso deutlicher. Bei Probe VV-5, VV-11 und VV-13 zeigen sich bereits nach ca. zwei Jahren deutliche Unterschiede im Vergleich zu den Vorjahren.

Bis 2024 nahmen die Ausmagerungen und die Anzahl der Kornausbrüche nochmals zu. Bei Probe VV-11 ist sogar bereits ein erster Riss zu erkennen. Auch die Ausbruchstelle der groben

Gesteinskörnung (siehe Pfeil) nahm bis 2024 nochmals deutlich zu, wodurch der Riss induziert wurde. Auch bei Probe VV-5 resultierte aus den ausgemagerten Bereichen auf der Probepatte erste Kornausbrüche. Generell ist zu verzeichnen, dass sowohl bei den Asphaltbeton-Probepplatten als auch bei den Splittmastixasphalt-Probepplatten die Ausmagerung und die Anzahl der Kornausbrüche von 2020 bis 2024 deutlich zunahm. Trotz der geringeren Zugabemenge an feinen Gesteinskörnungen bei den Splittmastixasphalten sind inzwischen auch einige Kornausbrüche erkennbar. Weiterhin ist dabei zu berücksichtigen, dass die Probepplatten keiner Verkehrsbelastung unterliegen. Würden diese im Rollspurbereich liegen, wären noch weitaus deutlichere Unterschiede zu erkennen.

Tabelle 4-2: Auswahl Fotodokumentation des eingebauten Versuchsfeldes

Asphaltmischgutsorte	Probe	Gesteinsart	Schüttel-Abrieb [M.-%]		Oktober 2020	September 2021	Januar 2023	Januar 2024
			Serie E	Serie F				
Asphaltbeton	VV-5	Rhyolith	60,9	29,7				
	VV-11	Andesit	40,1	14,9				
	VV-13	Basalt	37,7	25,9				
Splittmastixasphalt	VV-5	Rhyolith	60,9	29,7				

Zusätzlich zu den optischen Untersuchungen mittels Fotodokumentation wurden wie bei den Streckenbesichtigungen das ELAtextur-Messgerät zur Bestimmung der Oberflächenbeschaffenheit hergenommen. Dafür wurden die Asphaltoberflächen aller Probeplatten mittels eines Lasers abgetastet und die mittlere Profiltiefe (MPD) ermittelt. Dadurch erhält man einen messbaren Nachweis für den optischen Eindruck. Dies wurde bei jeder Besichtigung und beim Einbau durchgeführt, um einen Verlauf der Oberflächenbeschaffenheiten herstellen zu können. Die Ergebnisse zeigen, dass es vor allem bei den Asphaltbeton-Probeplatten zu deutlichen Unterschieden infolge der Witterung und weiterer klimatische Einwirkungen gekommen ist. Bei Verwendung eines Sandes mit einem Schüttel-Abrieb von größer 35 M.-% ist es zu einem deutlicheren Sprung in der Oberflächenrauheit gekommen. Dies wird an einer großen Spannweite zwischen dem blauen (Messung 2020 bei Einbau) und gelben Punkt (Messung Anfang 2024) ersichtlich. Auch der Maximalwert von 0,73 wird bei einer Probe mit einem Schüttel-Abrieb-Wert von größer 35 M.-% erreicht. Die größte Spreizung zwischen Ausgangsoberfläche 2020 und Anfang 2024 wird bei Probe VV-5 gemessen. Die Spannweite beträgt hierbei sogar 0,22 mm. Die Ergebnisse der ELAtextur-Messungen stimmen mit den optischen Untersuchungen gut überein und bestätigen diese zusätzlich.

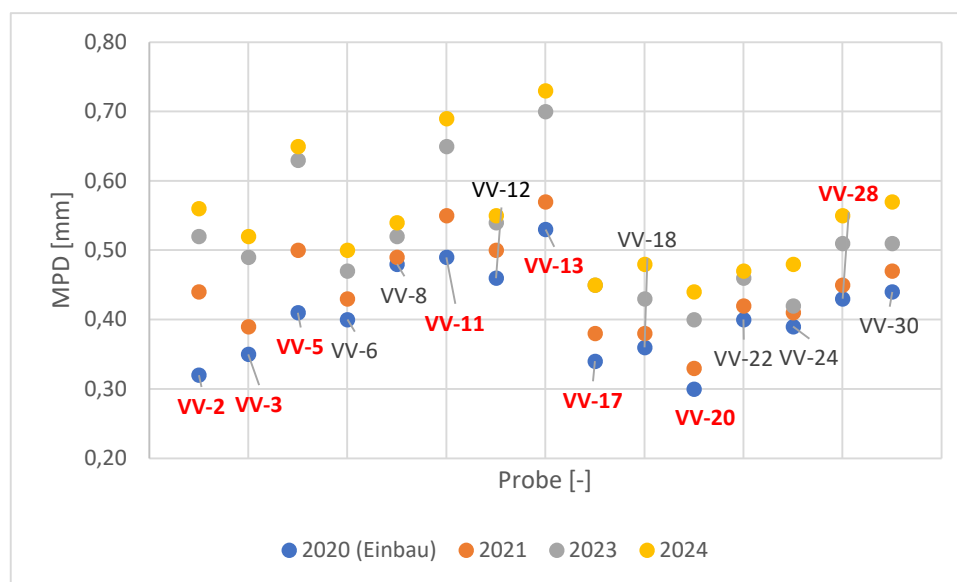


Abbildung 4-7: ELAtextur-Messergebnisse der Asphaltbeton-Probeplatten von 2020 bis 2024 (rot: Proben mit Schüttel-Abrieb-Wert der Serie E > 35 M.-%)

Die Langzeitergebnisse aus dem Versuchsfeld beweisen, dass es bei Verwendung eines Sandes mit einem Schüttel-Abrieb von mehr als 35 M.-% bereits nach drei Jahren Liegedauer zu Mängelerscheinungen kommt.

Um die gewonnen Erkenntnisse mit den Eigenschaften der Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen und deren Einfluss auf das Gebrauchsverhalten des Walzasphaltes direkt am Asphalt mit dynamischen Verfahren prüfen zu können, wird sich diese Arbeit im Folgenden mit dieser Thematik näher beschäftigen.

5. Untersuchungsprogramm

Ziel dieser Arbeit ist es, eine zielführende neue Probekörpervorbereitung zu definieren und eine Performance-Prüfung zu finden, mit welcher die Einflüsse der wasserempfindlichen Sande auf das Verhalten des Asphalts dargestellt werden kann und die praxisgerechte und reproduzierbare Ergebnisse liefert.

Die für die Gebrauchsdauer der Straßenbefestigung aus Walzasphalt wichtigen Baustoffeigenschaft ist der Widerstand gegen bleibende Verformungen sowie der Widerstand gegen kälteinduzierte Rissbildung. Um diese Eigenschaften des Walzasphaltes und damit auch das Gebrauchsverhalten infolge von Wasserzutritt in Verbindung mit wasserempfindlichen feinen Gesteinskörnungen bestimmen zu können, wird folgendes Vorgehen gewählt:

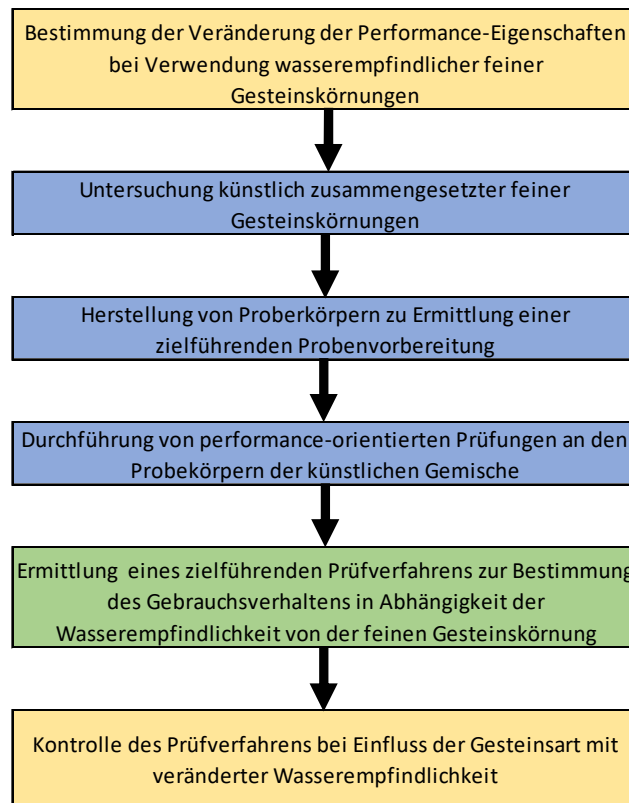


Abbildung 5-1: Vorgehensweise bei der Erstellung einer Prüfvorschrift zur Bestimmung des Gebrauchsverhaltens von Walzasphalt in Abhängigkeit von der Wasserempfindlichkeit der enthaltenen feinen Gesteinskörnungen

AP 1) Herstellung künstlich zusammengesetzter feiner Gesteinskörnungen (siehe Kapitel 6.4)

Basierend auf den Ergebnissen aus [8] wird eine feine Gesteinskörnung ausgewählt, deren Eigenschaften den in Bayern geltenden Anforderungen für den Schüttel-Abrieb von kleiner 25 M.-% bei Asphaltdeckschichten entsprechen. Dieser feinen Gesteinskörnung werden gezielt definiert abgestufte Gehalte kritischer Tonminerale im Feinstkornanteil (Anteil < 0,063 mm) zugegeben, um den Einfluss des Wassers auf die Tonminerale und in der Folge auf das Verhalten des Asphaltes darzustellen. Dabei wurden differenzierte Stufen zwischen 20 und 100 % Zugabemenge bezogen auf den Feinstkornanteil angewendet.

AP 2) Untersuchungen an den künstlich zusammengesetzten feinen Gesteinskörnungen (siehe Kapitel 6.5)

Nach Herstellung der künstlichen Gesteinskörnungsgemische werden diese im Schüttel-Abriebverfahren geprüft, um die Auswirkungen infolge der Zugabe der quellfähigen

Tonminerale abschätzen zu können. Wie [8, 35] zeigen, kann die Bewertung der Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen mit diesem Verfahren zielgerecht und praxisnah erfolgen. Anschließend wird die Variante für weitergehende Untersuchungen ausgewählt, bei der man erwartet, dass die Wasserempfindlichkeit die größten Auswirkungen auf das Gebrauchsverhalten von Asphalt hat.

AP 3) Herstellen einer Labormischung und Probekörper (siehe Kapitel 7.2)

Mit dem ausgewählten künstlich zusammengesetzten feinen Gesteinskörnungsgemisch werden anschließend Asphaltmischungen im Labor hergestellt. Dafür wird eine Grundrezeptur für eine Asphaltbetondeckschicht AC 8 D nach den TL Asphalt-StB 07/13 [50] erstellt. Als Bindemittel kommt entsprechend den Ergebnissen von [17, 36] ein Straßenbaubitumen 50/70 zur Anwendung, da Asphalt mit polymermodifiziertem Bindemittel günstigere Eigenschaften hinsichtlich der Wasserempfindlichkeit aufweist. Die grobe Gesteinskörnung aus Diabas sowie der Füller aus Kalksteinmehl wird über alle Versuchsvarianten konstant gehalten. Dadurch ergibt sich eine gute Vergleichbarkeit für spätere Untersuchungen. Der Bindemittelgehalt ermittelt sich anhand der rechnerischen Rohdichte des Gesteinskörnungsgemisches. Damit Wasserzutritt möglich ist, muss der Probekörper hohlraumreich hergestellt werden. Um den Einfluss des Hohlraumgehaltes auf die Prüfergebnisse darstellen zu können, wurde der Hohlraumgehalt in mehreren Stufen variiert.

Anschließend werden die Probekörper für die in AP 5) aufgeführten Performance-Prüfungen hergestellt.

AP 4) Ermittlung einer zielführenden und praxisgerechten Probekörpervorbereitung (siehe Kapitel 7.3)

Die Probekörpervorbereitung für die performance-orientierten Prüfungen ist im Rahmen dieser Arbeit von entscheidender Bedeutung. Dabei ist eine zielgerichtete und praxisorientierte Probekörperlagerung wichtig, um den Einfluss des Wassers auf die Eigenschaften des Asphaltens hinsichtlich dessen Gebrauchsverhaltens bestmöglich in den Prüfungen darstellen zu können.

Basierend auf der Probekörpervorbereitung nach den TP Asphalt-StB, Teil 12 [38] wird eine modifizierte Methode der Wasserlagerung bzw. Trockenlagerung entwickelt. Dieser Probekörpervorbereitung werden die Probekörper mit dem künstlich hergestellten feinen

Gesteinskörnungsgemisch sowie dem Gemisch ohne Tonminerale unterzogen. Durch die Wassersättigung soll es zu einem Quellen der Tonminerale kommen. In diesem Arbeitspaket soll die optimale Trockenlagerungszeit nach der Wassersättigung und die dabei herrschenden Bedingungen (Raumtemperatur) ermittelt werden, bei denen die Tonminerale die Möglichkeit haben, ihre Quellfähigkeit in größtmöglichen Ausmaß zu entfalten und dadurch den Asphalt entsprechend zu schädigen. Aus diesem Grund ruht der Probekörper nach der Wassersättigung bei Raumtemperatur in gestuften Lagerungszeiten. Dabei unterscheiden sich die Lagerungszeiten zwischen 24 Stunden bis 5 Wochen.

AP 5) Durchführung der performance-orientierten Prüfungen an Asphalten mit den künstlich zusammengesetzten feinen Gesteinskörnungen (siehe Kapitel 7.4 und Kapitel 9)

Die Durchführung der performance-orientierten Prüfungen erfolgt nach den Technischen Prüfvorschriften für Asphalt, wobei geringfügige Anpassungen erfolgen. Wie bereits beschrieben, werden für die Bestimmung des Gebrauchsverhaltens von Walzasphalt in Abhängigkeit der Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen dynamische Prüfungen herangezogen. So wird zunächst auf bewährte Methoden wie das Schüttel-Abriebverfahren am Marshall-Probekörper zurückgegriffen. Da nach [23] Zugbeanspruchungen geeignet sind, um die Wasserempfindlichkeit von Asphalt abbilden zu können, wird im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls auf Zugkräfte näher eingegangen. Um den Widerstand gegen bleibende Verformungen zu bestimmen, werden zusätzlich Druck-Schwell-Versuche durchgeführt. Im Folgenden ist ein kurzer Überblick über das Versuchsprogramm dargestellt:

- Schüttel-Abriebverfahren am Marshall-Probekörper,
- Dynamischer Stempleindringversuch an Walzasphalt nach TP Asphalt-StB, Teil 25 A 2 [52],
- Kälteeigenschaften im einaxialen Zugversuch und Abkühlversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 46 A [53].

AP 6) Probenauswahl, Herstellung und Lagerung der Probekörper - Schaffung eines Bewertungshintergrundes mit unterschiedlichen feinen Gesteinskörnungen (siehe Kapitel 11)

Da im Rahmen dieser Arbeit auch der Einfluss der petrographischen Eigenschaften unterschiedlicher feiner Gesteinskörnungen hinsichtlich ihrer Wasserempfindlichkeit auf das Gebrauchsverhalten von Walzasphalt untersucht werden soll, werden zusätzlich zehn unterschiedliche Sande geprüft. Dabei wird auf die Ergebnisse von [8, 35] zurückgegriffen. In [8] stellte sich heraus, dass Schäden ab einem Schüttel-Abrieb-Wert von 35 M.-% an der Asphaltdeckschicht zunehmen. Aus diesem Grund werden vermehrt Sande in diesem Grenzbereich untersucht. Des Weiteren wird auf eine Wertespreizung der Schüttel-Abrieb-Ergebnisse zwischen 20 M.-% und 90 M.-% geachtet. Aufgrund der großen Wertespreizung sollen Unterschiede in den Prüfergebnissen der dynamischen Prüfungen aus AP 5) erkannt werden. Nach der Auswahl der feinen Gesteinskörnungen werden die Probekörper analog zu AP 3) und AP 4) hergestellt und gelagert.

6. Herstellung und Untersuchung der künstlich zusammengesetzten Gesteinskörnungen

6.1 Eigenschaften von quellfähigen Tonmineralen

Tonminerale sind hydroxidhaltige Aluminiumsilikate mit einem Teilchendurchmesser unter 2 μm . Die meisten davon bilden planare Kristalle und zählen zur Klasse der Schichtsilikate. Die besonderen Eigenschaften der Tonminerale entstehen durch ihren speziellen atomaren Aufbau. Die negative Oberflächenladung der Teilchen, die im wässrigen System zur Anlagerung von Wassermolekülen und dem Austausch von Ionen führt, ist von besonderer Bedeutung für die Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen. Aufgrund ihres speziellen Kristallgitteraufbaus entsteht eine innerkristalline Reaktivität, die sich im Quellvermögen widerspiegelt. Dabei wird das Kristallgitter durch den Austausch von eingelagerten Kationen aufgeweitet. Durch diesen Quellprozess wird das Gesteinsgefüge destabilisiert und es kommt zu einem Herabsetzen der Scherfestigkeit, wodurch es in der Folge zu Schäden am Asphaltoberbau kommt und die Dauerhaftigkeit der Asphaltbefestigung nachhaltig verschlechtert wird.

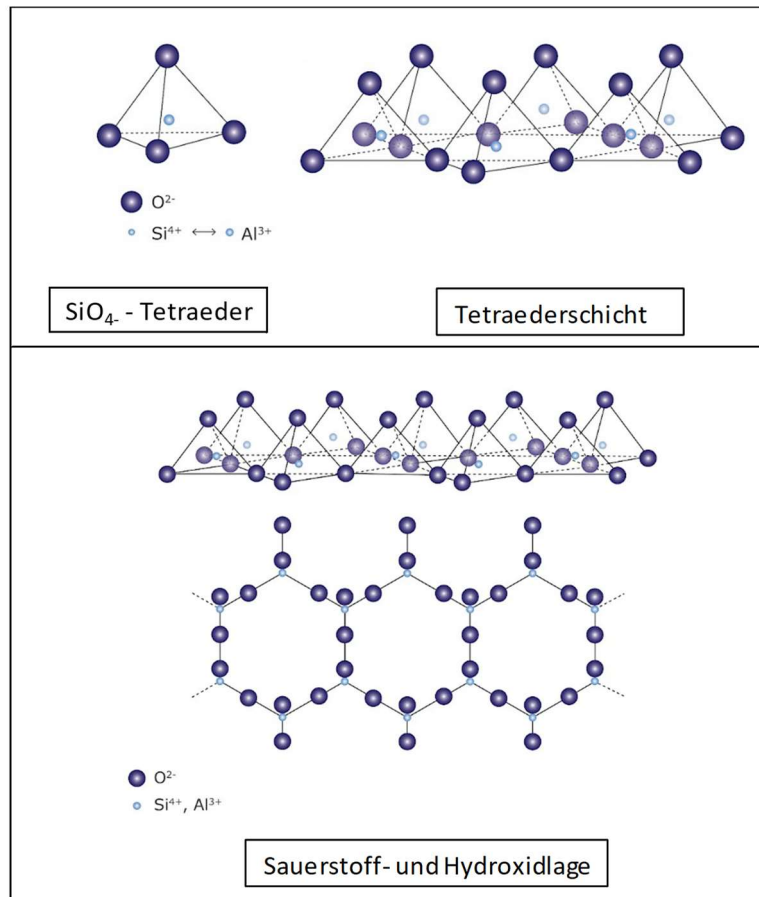


Abbildung 6-1: Modell des strukturellen Aufbaus der Tonminerale [54]

Abbildung 6-1 zeigt den strukturellen Aufbau der Tonminerale. Fundamentale Struktureinheiten der Tonminerale sind Sauerstoff- und Hydroxidlagen, die je nach Koordination der Zentralkationen als Tetraeder- oder Oktaederschichten bezeichnet werden. Die zentralen Tetraederpositionen werden von Silizium-Ionen eingenommen. Partiiell können diese durch Aluminium-Ionen ersetzt sein. Das zentrale Kation (hier: Si⁴⁺ oder Al³⁺) ist von vier Sauerstoff-Ionen umgeben, sodass im Raum ein gleichseitiges Tetraeder aufgespannt wird. Die planare Verknüpfung der SiO₄-Tetraeder erfolgt über Sauerstoffbrücken. Daraus entsteht die Tetraederschicht. Mehrere Tetraederschichten bilden erneut über Sauerstoffbrücken Sauerstoff- und Hydroxidlagen, die gleichseitige Sechsecke mit hexagonaler Symmetrie bilden [54].

Bezogen auf das Verhalten von feinen Gesteinskörnungen im Asphaltmörtel besitzen die enthaltenen Tonminerale einen entscheidenden Einfluss. Zu den wichtigsten Eigenschaften der Tonminerale zählen die Korn- und Oberflächengröße, die für Wasseraufnahme und

Quellvermögen maßgebende Aufweitbarkeit der Schichten, die Kationen-Austauschbarkeit und die Oberflächen- und Gitterveränderungen bei thermischen Beanspruchungen. Die Ionenaustauschfähigkeit beschreibt die Fähigkeit Ionenauslösungen zu sorbieren und äquivalente Mengen anderer Ionen an die Lösungen abzugeben. Austauschbar sind bei Wasserzutritt insbesondere die Ca-, Mg-, K-, Na- und Al-Ionen als Kationen und die H-Ionen, wobei die austauschbare Menge von der Größe der im Aufbau des Kristallgitters verankerten überschüssigen negativen Ladung und von der Größe der zugänglichen Oberfläche abhängig ist. Montmorillonite besitzen mit 600 bis 800 m²/g die größte spezifische Oberfläche. Für die vier wichtigsten Tonminerale werden im Folgenden die Eigenschaften genauer dargestellt [28].

Tabelle 6-1: Beziehungen zwischen Korngröße, spezifische Oberfläche und Ionen-Austauschkapazität der wichtigsten Tonmineral-Gruppen [28]

Tonmineral	Korndurchmesser der Fraktion [μ]	Spez. Oberfläche [m²/g]	Austauschkapazität [mval/100g]
Chlorit-Gruppe	0,1 - 0,7	< 16	< 4,0
Kaolin-Gruppe	> 0,5	16	4,0
	< 0,5	29	4,6
Illit-Glimmer-Gruppe	4 - 10	65	16,8
	2 - 5	73	18,6
	1 - 2,4	96	24,9
	< 1,1	105	26,9
Smektit-Gruppe	0,08 - 0,2	660 - 915	68 - 103
	< 0,08	880 - 1150	89 - 120

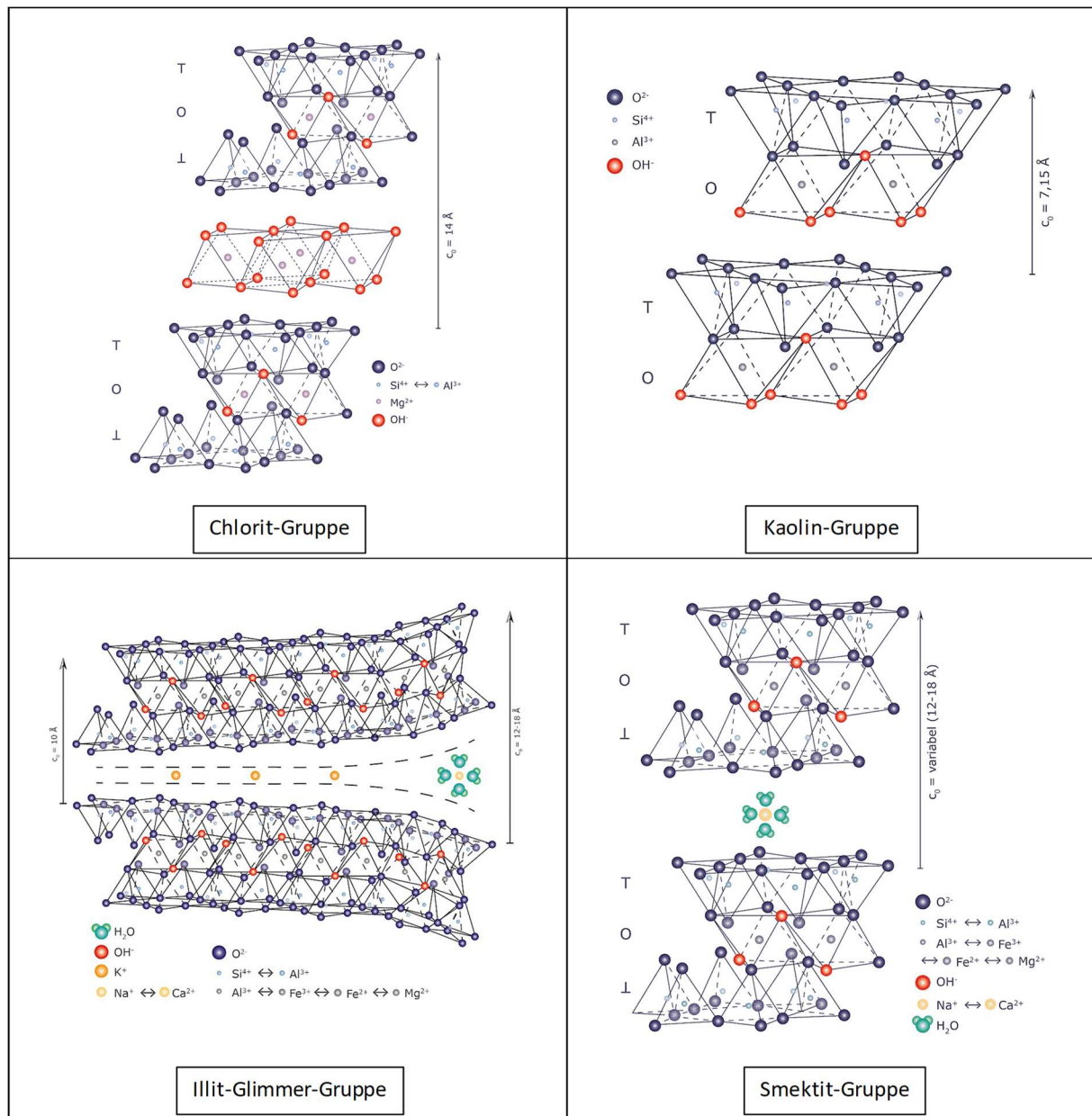


Abbildung 6-2: Räumlicher Aufbau der verschiedenen Tonmineral-Gruppen [54]

Abbildung 6-2 zeigt den räumlichen Aufbau der verschiedenen Tonmineral-Gruppen. Im Folgenden wird im Sinne der Mineralogie auf die betrachteten Mineralgruppen beginnend mit der geringsten Quellfähigkeit näher eingegangen.

- Chlorit-Gruppe

Die Minerale der Chlorit-Gruppe setzen sich aus negativ geladenen Schichtpaketen zusammen, wobei die Schichtladung nicht durch Zwischenschichtkationen, sondern durch positiv geladene Oktaeder-Zwischenschichten kompensiert wird. Man bezeichnet

diese Mineralgruppe daher auch als Dreischicht- oder als Vierschichtminerale. Die negative Ladung der Schichtpakete resultiert vor allem aus der Substitution von Silizium- durch Aluminium-Ionen in den Tetraederschichten. Chlorite sind innerkristallin lediglich geringfügig quellfähig.

- Kaolin-Gruppe

Die Minerale aus dieser Gruppe setzen sich aus Zweierschichten zusammen, die sich aus je einer Tetraeder- und einer Oktaederschicht bilden. Die Schichtpakete werden durch Dipol-Dipol-Wechselwirkungen sowie Wasserstoffbrücken und Van-der-Waals-Kräfte zusammengehalten, sodass die innerkristalline Quellfähigkeit als geringfügig anzusehen ist.

- Illit-Glimmer-Gruppe

Diese Minerale setzen sich aus Dreischichtsilikaten zusammen. Glimmerminerale weisen eine hohe Schichtladung, die durch den Ersatz von Si^{4+} -Ionen durch Al^{3+} -Ionen in den Tetraederschichten verursacht wird. Die negative Schichtladung wird in den Zwischenräumen durch eingelagerte Kalium-Ionen ausgeglichen. In [55] konnte nachgewiesen werden, dass sich eine Reduzierung des Glimmer-Anteils vorteilhaft auf die Eigenschaften der Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen auswirkt. Insbesondere in Granitsanden ist ein problematischer Glimmer-Anteil angereichert, sodass nachgewiesen wurde, dass das Kristallgitter der Glimmerminerale Quellvermögen besitzt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei peripherem Herauslösen der Kalium-Ionen (z.B. durch Verwitterungsprozesse) es zu einer partiellen Einlagerung von Wassermolekülen kommt.

- Smektit-Gruppe

Bei den Mineralen der Smektit-Gruppe handelt es sich wie bei den Glimmern um Dreischichtsilikate. Der einzige Unterschied hierbei ist, dass die Glimmer eine deutlich höhere Schichtladung besitzen. Anstelle von Kalium-Ionen wird die negative Schichtladung durch hydratisierte Kationen neutralisiert. Aufgrund der nur sehr gering vorhandenen elektrostatischen Kräfte, weisen diese Smektite eine starke innerkristalline Quellfähigkeit auf, die sich in einer geringen Stabilität äußern. Ein besonders häufig vorkommendes Mineral ist Montmorillonit. Dieses zeichnet sich insbesondere durch seine große Austauschfähigkeit der Kationen aus und bildet damit die Grundlage der ihrer Quellfähigkeit [54].

Generell (mineralogisch, geochemisch und geologisch) sind Tonminerale äußerst schwierig zu bestimmen. Häufig kommen hierbei unterschiedliche Verfahren gemeinsam zum Einsatz. Einige, die im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls zur Bestimmung der Tonminerale Anwendung fanden, sind im Folgenden näher beschrieben.

- Geochemische Analyse

Die chemische Analyse der Tonminerale fand analog zu den Untersuchungen bei [35] statt. Dabei wurde die XRF-Analysen (Röntgenfluoreszenz-Analyse) an Schmelzlingen der nicht geblühten Probe < 0,063 mm durchgeführt. Die Erfassung der Masse der flüchtigen Bestandteile erfolgte durch Glühverluste bei 1050 °C über zwei Stunden unter Berücksichtigung des Wassergehaltes. XRF-Analysen spiegeln die Element(oxid)verteilung in einer Probe wider. Sie zeichnen sich durch eine sehr gute Wiederholbarkeit und Präzision aus.

- Mineralanalytik

Als Standardverfahren zur Identifizierung des Mineralbestandes gilt die XRD-Analyse (Röntgendiffraktometer-Analyse). Mit Hilfe dieses Verfahrens können die in der Probe vorhandenen Mineralphasen bestimmt werden. Die Aufbereitung und Vorbereitung der Proben erfolgten auch bei diesem Verfahren analog zu [35]. Zur Dispergierung der Probe wurde 10 %-iger Wasserstoffperoxid verwendet. Dadurch kann anschließend die Tonfraktion (< 2 µm) durch Zentrifugation aus der kleiner 20 µm gesiebten Probe gewonnen werden. Der Sorptionskomplex der Tonfraktion wird mittels Schütteln in einer Lösung mit Kalium- und Magnesiumionen belegt. Jeweils 10 mg Tonmineral wird auf poröse Keramikplatten aufgebracht und über Nacht in einem Exsikkator über einer gesättigten NH₄NO₃-Lösung getrocknet. Im weiteren Verlauf wird die Probe geröntgt. Nach dem Röntgen werden alle Plättchen zur Bestimmung der quellfähigen Tonminerale in eine mit Ethylenglykol gesättigte Atmosphäre gegeben. Zur Identifizierung von gut kristallisiertem Kaolinit werden die Plättchen zusätzlich mit Dimethylsulfoxid behandelt. Danach temperiert man die Plättchen bei 300 bis 550 °C für zwei Stunden, um primären Chlorit nachweisen zu können. Nach jeder Behandlung werden die Proben geröntgt und die Anteile der Tonminerale gemessen.

Die XRD-Analyse berücksichtigt jeden Impuls des gemessenen Röntgendiagramms. Über Strukturmodelle können abschließend quantitative Aussagen über die in der Probe vorhandenen Mineralphasen getätigt werden.

- Thermische Analyse

Das thermische Analyseverfahren liefert ergänzende Informationen über die mineralogische Zusammensetzung einer Probe. Die dabei zu untersuchende Probe wird kontinuierlich erhitzt und gleichzeitig die Gewichtsveränderung sowie der Wärmefluss gemessen. Da Tonminerale unterschiedliche Mengen an Hydroxylgruppen besitzen, die sich unter Temperatureinwirkung zersetzen, können diese Veränderungen in Form von Dehydroxilierung oder Umkristallisationen detektiert werden. Smektiten (z.B. Montmorillonit) besitzen einen hohen Anteil an Zwischenschichtwasser, der beim Erhitzen abgegeben wird. Dieser Masseverlust eignet sich für die Quantifizierung der enthaltenen quellfähigen Tonminerale und ermöglicht die Absicherung der Ergebnisse der XRF- bzw. XRD-Analysen.

Nach Kugler in [35] zeigte sich, dass die XRF-Analyse in Ergänzung zur XRD-Analyse vertrauenswürdiger Ergebnisse liefert als ein Verfahren allein, sodass auch in dieser Arbeit diese Kombination Anwendung findet.

6.2 Probenauswahl der Tonminerale

Insgesamt wurden vier unterschiedliche Tonminerale in das Untersuchungsprogramm dieser Arbeit aufgenommen. Zwei Muskovit-Glimmer, die sich in der Mahlfeinheit unterscheiden, sowie ein Kaolinit und ein Kalzium-Bentonit wurden ausgewählt. Erkenntnisse zu diesen Tonmineralen sollen aus den angeforderten Datenblätter, die in Anhang C zu finden sind, gezogen werden.

Nach Analyse der Datenblätter hinsichtlich der Mineralphasen ist zu vermuten, dass bei Einsatz von Kalzium-Bentonit in den feinen Gesteinskörnungen die Auswirkungen auf die Eigenschaften des Asphaltes infolge von Wasserzutritt am größten sind. Das wird an dem hohen Anteil an Montmorillonit von 76 M.-% festgemacht. Wie bereits in Kapitel 6.1 beschrieben, besitzen diese eine starke innerkristalline Quellfähigkeit, sodass bei Zugabe dieses Minerals ein hoher Schüttel-Abrieb zu erwarten ist. Die Ergebnisse dazu sind in Kapitel 6.5. zu finden. Trotzdem werden zu Referenzzwecken alle Tonminerale mit dem Schüttel-Abriebverfahren am Sandasphaltprobekörper nach TP Asphalt, Teil 6.6.3 [29] untersucht, um diese Aussage bestätigen zu können.

Die Daten der Eigenüberwachung bei der chemischen Analyse zeigen, dass die Glimmer-Minerale die gleichen chemischen Bestandteile aufgrund des gleichen Materials besitzen.

Bei Vergleich der Tonminerale untereinander erkennt man, dass die chemische Zusammensetzung hinsichtlich ihrer Bestandteile annähernd ähnlich ist. Die prozentualen Anteile unterscheiden sich jedoch teilweise in erheblichem Umfang. SiO₂ kommt in der Probe der Glimmer-Tonminerale am meisten vor, wohingegen Aluminiumoxid (Al₂O₃) bei Kaolinit den größten Anteil im Vergleich zu den anderen Proben besitzt. Kalzium-Bentonit weist insbesondere einen erhöhten Eisenoxid (Fe₂O₃)-Anteil auf. Die Muskovit-Glimmer-Proben zeigen im Gegensatz zu Kalzium-Bentonit und Kaolinit einen erhöhten Kaliumoxid (K₂O)-Gehalt auf. Kaolinit wird mit einem Glühverlust von 12,7 M.-% weiterhin charakterisiert. Sämtliche weitere Bestandteile werden aufgrund ihrer geringen prozentualen Anteile im Folgenden vernachlässigt.

6.3 Untersuchungsergebnisse der ausgewählten Tonminerale

Zwei der vier verschiedenen Tonminerale wurden aufgrund der Ergebnisse des Schüttel-Abriebverfahrens (siehe Abbildung 6-4) mineralogisch und chemisch analysiert. Hierbei entschied man sich für die Tonminerale Kaolinit und Kalzium-Bentonit, da man nach Analyse der Datenblätter davon ausgehen konnte, dass diese beiden die negativsten Auswirkungen auf die Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen besitzen. In Tabelle 6-2 sind diejenigen chemischen Anteile orange markiert, bei denen der größte Unterschied zwischen den Angaben aus den Datenblättern sowie der Analyse im Rahmen dieser Arbeit zu finden ist.

Tabelle 6-2: Geochemische Analyse der Tonminerale

Chemische Anteile	Kaolin T240		Kalzium-Bentonit B 316	
	Analyse NEU	Datenblatt	Analyse NEU	Datenblatt
	[%]		[%]	
SiO ₂	46,89	47,50	51,70	43,40
TiO ₂	0,90	1,10	3,23	3,60
Al ₂ O ₃	39,53	36,50	16,19	17,50
Fe ₂ O ₃	0,48	0,50	14,46	17,80
Mn ₃ O ₄	0,03		0,25	0,50
MgO	0,00	0,10	3,72	2,70
CaO	0,10	0,00	2,33	2,70
Na ₂ O	0,00	0,10	0,07	0,00
K ₂ O	0,40		0,52	0,50
P ₂ O	0,05	0,90	0,49	
SO ₃	0,02		0,00	< 0,0075

V ₂ O ₅	0,02		0,05	
Cr ₂ O ₃	0,04		0,05	
SrO	0,00		0,02	
ZrO ₂	0,02		0,06	
BaO	0,02		0,08	
NiO	0,01		0,01	
CuO	0,00		0,01	
ZnO	0,00		0,02	
PbO	0,00		0,00	
HfO ₂	0,01		0,01	
LOI	13,12	12,70	7,76	

Die neue geochemische Analyse von Kaolinit zeigt, dass die Probe einen höheren Al-Gehalt, einen höheren LOI (Glühverlust) und weniger Si sowie K enthalten, als das Datenblatt vorgibt. Daher ist im Datenblatt der Mineralanalyse auch weniger Kaolinit und mehr Quarz und Feldspat angegeben. In der vorliegenden Probe muss jedoch nach geochemischer Verrechnung der Anteile mit einem Kaolinitgehalt von 95 M.-% gerechnet werden.

Der Kalzium-Bentonit unterscheidet sich teilweise erheblich vom Datenblatt des Herstellers. Der SiO₂-Anteil ist nach neuer geochemischer Analyse der vorliegenden Probe deutlich höher, während der Anteil an Fe₂O₃ geringer ist. Auch der Glühverlust war im Datenblatt von Kalzium-Bentonit nicht zu finden. Hinzu kommt, dass die mineralogischen Ergebnisse praktisch nicht mit den chemischen Angaben in Deckung zu bringen sind. Zahlreiche geochemische Rechenversuche wurden unternommen, jedoch konnten weder die Daten der chemischen Analyse der Datenblätter mit den Ergebnissen der XRD-Analyse noch die neuen Ergebnisse der neuen XRD-Analyse in Einklang gebracht werden. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Ergebnisse der neuen RFA- und XRD-Analyse zuverlässiger und vertrauenswürdiger sind. Es wird vermutet, dass diese Unterschiede auf eine heterogene Lagerstätte zurückzuführen sind. Der Umstand der Diskrepanz zwischen Chemie und Mineralogie kann offenbar mit dem angewandten Methoden-Setting nicht beseitigt werden. Zahlreiche Mikroanalysen der Bentonite, um den tatsächlichen Chemismus der Montmorillonite zu entschlüsseln, wären nötig, um anschließend zielgerichtet geochemisch rechnen zu können. Für weitergehende Ergebnisse wären STA-Analysen (simultane Messungen von Massenänderungen und kalorischen Effekten bei einer bestimmten Temperaturregelung) zu empfehlen.

Die Ergebnisse der mineralogischen Analyse (siehe Tabelle 6-3) decken sich im Wesentlichen mit den Ergebnissen der Eigenüberwachung aus den Datenblättern. Aufgrund der Diskrepanzen zwischen geochemischen und mineralogischen Ergebnissen wird, wie bereits in Kapitel 5 festgelegt, aus praktischer Sicht auf das Schüttel-Abriebverfahren zurückgegriffen, da bereits [8, 35] zeigten, dass dieses Prüfverfahren geeignet ist, um die Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen abzubilden. Im Hinblick auf die Ergebnisse der vorangegangenen Analysen wird im Folgenden mit abgestuften Gehalten an Tonmineralanteilen in den Sanden gearbeitet.

Tabelle 6-3: Mineralogische Analyse der Tonminerale

Mineral	Kaolinit T 240	Kalzium-Bentonit B 316
	[%]	[%]
Kaolinit	87,0	2,0
Illit	5,0	5,0
Quarz	4,0	11,0
Feldspat	4,0	6,0
Fe-Ti	1,0	0,0
Montmorillonit/Smektit	-	76,0

6.4 Zusammensetzung der künstlichen feinen Gesteinskörnungen

Aufgrund der Ergebnisse aus Kapitel 6.3 werden einem Referenzsand abgestufte Tonmineralgehalte zugegeben. Als Referenzsand kommt ein Moräne-Kies-Sand zum Einsatz, der sich in der Praxis bewährt hat und niedrige Schüttel-Abrieb-Werte sowohl bei Serie E als auch bei Serie F besitzt. Durch einen Referenzsand mit einem niedrigen Schüttel-Abrieb-Wert können die Auswirkungen der Quellfähigkeit von Tonmineralen infolge von Wasserzugabe optimal abgebildet und analysiert werden. Für die Untersuchung der künstlichen Gemische werden Sandasphaltprobekörper nach TP Gestein-StB, Teil 6.6.3 [47] hergestellt.

Kornklassen				
0,71 - 2,0 mm	20%	48 g	Referenzsand	
0,25 - 0,71 mm	35%	84 g	Referenzsand	
0,125 - 0,25 mm	20%	48 g	Referenzsand	
0,063 - 0,125 mm	15%	36 g	Standardkalksteinmehl	
0 - 0,063 mm (insgesamt)	10%	24 g	Standardkalksteinmehl + Spezialkomponente	
	↓			
	davon Spezialkomponente		davon Standardkalksteinmehl	
	20%	4,8 g	80%	19,2 g
	50%	12 g	50%	12 g
	100%	24 g	0%	0 g

Abbildung 6-3: Zusammensetzung des Sandasphaltprobekörpers bei der Serie F

Wie Abbildung 6-3 zeigt, besteht der Referenzsand aus mehreren verschiedenen Kornklassen. Diese werden anhand einer vorgegeben Sieblinie nach den TP Gestein-StB, Teil 6.6.3 [47] zusammengesetzt. Da man lediglich die Auswirkungen der quellenden Tonmineral-Eigenschaften ermitteln will, greift man auf die Prüfung des Schüttel-Abriebs der Serie F zurück. Hierbei wird die Kornklasse 0 - 0,125 mm durch ein Standardkalksteinmehl ersetzt. Dadurch eliminiert man den schädlichen Einfluss des Eigenfüllers des Referenzsand und erhält den alleinigen Einfluss des Tonminerals. Die Kornklasse 0 - 0,125 mm kann weiterhin unterteilt werden in 0 - 0,063 mm und 0,063 - 0,125 mm. Im Rahmen dieser Arbeit ist dieser Anteil (0 bis 0,063 mm) mit 10 % zu definieren. Da die Tonminerale aufgrund ihrer geringen Größe in diese Kornklasse fallen, musste eine Möglichkeit gefunden werden, um einen abgestuften Tonmineralgehalt herstellen zu können. Dafür teilte man den 10-prozentigen Anteil der Kornklasse 0 - 0,063 mm bezogen auf das gesamte Gesteinskörnungsgemisch im Sandasphaltprobekörper nochmals auf (siehe Abbildung 6-3). Anschließend wurde die Spezialkomponente (Tonmineral) abgestuft und mit den prozentualen Anteilen von 0 %, 20 %, 50 % sowie der kompletten Ersetzung der Kornklasse 0 - 0,063 mm mit Tonmineralen angesetzt.

Um die benötigte Bindemittelmenge ermitteln zu können, wurde zusätzlich die Rohdichte der einzelnen Tonminerale und der feinen Gesteinskörnung nach TP Gestein-StB, Teil 3.2.2 [56] ermittelt. Mit Hilfe der Rohdichten des Gesteinskörnungsgemisches aus Tonmineral und feiner Gesteinskörnung konnte abschließend die erforderliche Bindemittelmenge bestimmt und der

Sandasphaltprobekörper nach TP Gestein-StB, Teil 6.6.3 [47] hergestellt werden. Die Ergebnisse der Rohdichten-Bestimmung sind im Anhang D zu finden.

6.5 Untersuchungsergebnisse der künstlich zusammengesetzten feinen Gesteinskörnungen

Nachdem die Probekörper hergestellt waren, konnte man mit der Prüfung der Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen mit Hilfe dem Schüttel-Abriebverfahren nach TP-Gestein-StB, Teil 6.6.3 [47] beginnen.

Wie Abbildung 6-4 zeigt, besteht eine große Wertspreizung der Ergebnisse des Schüttel-Abriebs sowohl zwischen den Zugabemengen des Tonmineral-Anteils als auch ein Unterschied zwischen den verschiedenen Tonmineralen. Eine tabellarische Auswertung ist in Anhang E zu finden.

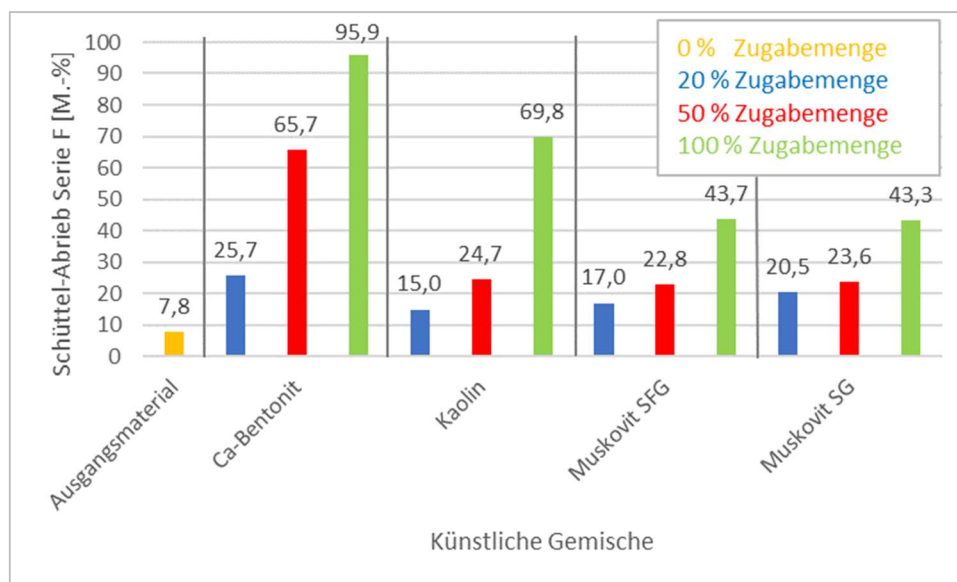


Abbildung 6-4: Ergebnisse der Schüttel-Abrieb-Prüfung der Serie F

Abbildung 6-4 verdeutlicht, dass durch die Zugabe der Tonminerale der Schüttel-Abrieb sämtlicher Varianten gestiegen ist. Der größte Schüttel-Abrieb ist bei Zugabe von 100 M.-% Kalzium-Bentonit (95,9 M.-%) zu verzeichnen, der kleinste bei Kaolinit (15,0 M.-%). Bei Zugabe von 100 M.-% Kalzium-Bentonit kam es zu einem kompletten Zerfall des Probekörpers. Dies bestätigt bereits die Vermutungen bei Durchsicht der Mineralanalyse (siehe Kapitel 6.2) und dem hohen Anteil an Montmorillonit im Kalzium-Bentonit-Tonmineral. Beide Schüttel-Abrieb-Varianten mit Muskovit-Glimmer weisen trotz hoher Zugabemenge an

Tonmineral einen geringen Schüttel-Abrieb auf. Auch einen Unterschied zwischen Muskovit SFG und Muskovit SG, die sich hinsichtlich der Mahlfeinheit unterscheiden, konnte lediglich in geringem Ausmaß festgestellt werden und ist somit vernachlässigbar. Die Variante mit Kaolinit zeigte erst bei Zugabe von 100 M.-% einen signifikanten Zuwachs des Schüttel-Abriebs. Dennoch konnten die Varianten der Zugabemenge bis 50 M.-% mit Kaolinit, Muskovit SFG und Muskovit SG die in Bayern geltenden Anforderungen von maximal 25 M.-% einhalten. Mit Ausnahme der Kalzium-Bentonit-Varianten sowie den Varianten mit 100 M.-% Zugabemengen können alle feinen Gesteinskörnungsvarianten in Asphaltdeckschichten von Bayerns Straßen Verwendung finden.

Beide Muskovit-Glimmer und auch Kaolinit haben so geringe Schüttel-Abrieb-Werte, sodass davon ausgegangen werden muss, dass auch die Auswirkungen auf den Asphalt direkt nur in sehr geringem Umfang zu verzeichnen wären. Die größten Auswirkungen am Gebrauchsverhalten von Walzasphalt wären bei der Variante mit 100 M.-% Kalzium-Bentonit erkennbar. Dennoch wurde für die weitergehenden Untersuchungen die Variante mit lediglich 50 M.-% Anteil hergenommen, da durch den Zerfall des gesamten Probekörpers bei der Variante mit 100 M.-% im Schüttel-Abriebverfahren am Sandasphaltprobekörper auch die Ergebnisse direkt am Asphalt vermutlich schwer auszuwerten gewesen wären. Aus diesem Grund wird in den weiteren Untersuchungen die Variante 50 M.-% Kalzium-Bentonit in allen Asphaltprobekörpern Anwendung finden.

7. Herstellung und Untersuchung der künstlich zusammengesetzten Asphaltmischungen

7.1 Definition Probennummern

Zum besseren Verständnis für die verschiedenen Untersuchungsvarianten wie z.B. die Asphaltmischgutvariante oder die Trockenlagerungszeit, die in den folgenden Kapiteln durchgeführt werden, wurde eine einheitliche Probennummerdefinition entwickelt. Wie bereits in Kapitel 4 ersichtlich, wurden alle Ergebnisse der Voruntersuchungen mit dem Kürzel „VV“ abgekürzt. Um eine Vergleichbarkeit zwischen allen Voruntersuchungen und dieser Arbeit herstellen zu können, wurde die Probennummer stets gleich belassen. Zudem muss zwischen der 0-Variante (Ausgangsmaterial – siehe auch Abbildung 6-4) und dem künstlichen Gemisch (KG-Variante), welchem das quellfähige Tonmineral „Kalzium-Bentonit“ hinzugegeben worden ist, zukünftig unterschieden werden (siehe dazu auch Kapitel 7.3). Es wird „künstliches Gemisch“

genannt, da entsprechend Abbildung 6-3 die quellfähigen Tonminerale künstlich der feinen Gesteinskörnung hinzugegeben werden. Die unterschiedlichen darauffolgenden Untersuchungsvarianten werden in den folgenden Kapiteln näher beschrieben.

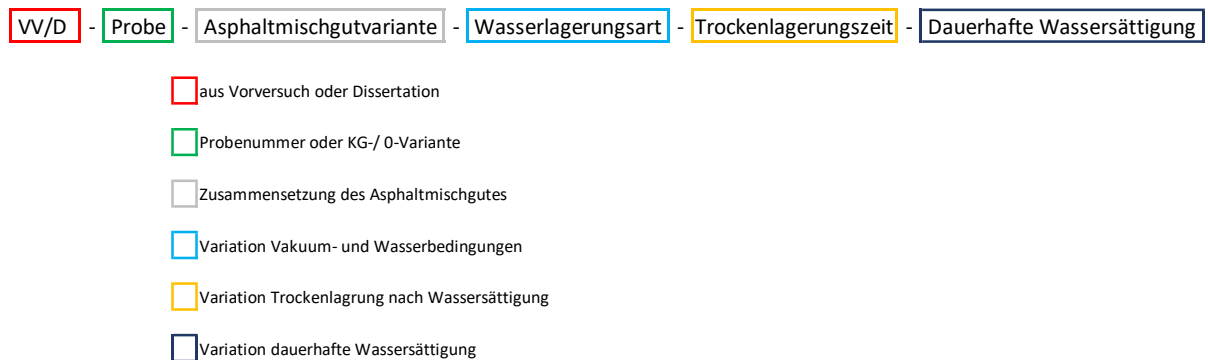


Abbildung 7-1: Definition der Probenummern

7.2 Variationen in der Asphaltmischgutkonzeption

Da im Rahmen dieser Arbeit die Auswirkungen der schädlichen quellfähigen Tonminerale direkt auf den Asphalt untersucht werden, müssen die Ergebnisse aus Kapitel 6 auf direkte Versuche am Walzasphalt projiziert werden. Das erfolgt durch verschiedene Variationen der Asphaltmischgutkonzeption, um Einflussfaktoren wie Bindemittel und grobe Gesteinskörnungen ausschließen bzw. möglichst minimieren zu können. Ziel der Untersuchung der folgenden unterschiedlichen Variationen ist es herauszufinden, welche Variante geeignet ist, dass die enthaltenen Tonminerale ihre maximale Quellung und anschließendes Schwinden entfalten können, um ihre schädlichen Auswirkungen auf den Asphalt zu zeigen.

Für die Untersuchungen direkt am Asphalt kommt eine Asphaltdeckschicht aus Walzasphalt zum Einsatz, da diese den direkten Witterungseinflüssen ausgesetzt ist und an diese die höchsten Anforderungen an Griffbarkeit, Verformungsbeständigkeit und Dauerhaftigkeit gestellt wird. Aus diesem Grund wurde ein Asphaltbeton AC 8 D S 50/70 für die weitergehenden Untersuchungen gewählt. Wie bereits beschrieben, wurde ein Straßenbaubitumen 50/70 sowie für die grobe Gesteinskörnung ein Diabas für die Asphaltmischgutkonzeption verwendet. Diese beiden Parameter sind über alle Versuchsvarianten konstant gehalten. Entgegen der heutigen Entwicklung und dem vermehrten Einsatz von polymermodifizierten Bitumen findet im Rahmen dieser Arbeit ein Straßenbaubitumen Anwendung, um die Auswirkungen bestmöglich

darstellen zu können, da polymermodifizierte Bitumen die Eigenschaften der Wasserempfindlichkeit maßgeblich verbessern [17] und somit die Quellfähigkeit der Tonminerale mit ihren Auswirkungen schlechter herausgestellt hätte werden können.

Entsprechend der TL Asphalt-StB 07/13 [50] wurde eine Grundrezeptur erstellt. Nachdem die Mischgutzusammensetzung feststand, musste der Hohlraumgehalt V geprüft werden. Um die Ergebnisse über den gesamten Bereich der Hohlraumgehalte darstellen zu können, wurden unterschiedliche Varianten in Abhängigkeit ihres Hohlraumgehaltes festgelegt. Dafür wird definiert, dass man bei Asphalten < 3 Vol.-% von einem dichten Asphalt, zwischen 3 Vol.-% und 6 Vol.-% von einem mitteldichten Asphalt und > 6 Vol.-% von einem hohlraumreichen bzw. wasserdurchlässigen Asphalt gesprochen werden kann. Wie Tabelle 7-1 zeigt, decken sämtliche Varianten alle Bereiche vom dichten bis hohlraumreichen Asphalt ab, dabei entsprechen Variante A1 mit 2,0 Vol.-% Hohlraumgehalt einem dichten Walzasphalt und auch Variante A2 mit 3,3 Vol.-% Hohlraumgehalt den Anforderungen der TL Asphalt-StB 07/13 [50]. Variante A3 dahingegen entspricht den Anforderungen nach TL Asphalt-StB 07/13 [50] nicht.

Die Mischgutzusammensetzung der Grundrezeptur wurde so entwickelt, dass sich daraus ein dichter Asphaltprobekörper herstellen ließ. Dabei wurde ein Bindemittelgehalt von 6,5 M.-% bezogen auf die Gesamteinwaage hergenommen, um einen Hohlraumgehalt von 2,0 Vol.-% herstellen zu können. Dieser entspricht den Anforderungen der TL Asphalt-StB 07/13 [50] hinsichtlich des minimalen Hohlraumgehaltes. Anschließend wurde ein Walzasphalt kreiert, der sich am oberen Rand des maximalen Hohlraumgehaltes orientiert. Dabei ergab sich die Variante A2, die einen Hohlraumgehalt von 3,3 Vol.-% aufweist. Mit einem maximalen Hohlraumgehalt von 3,5 Vol.-% bei einem AC 8 D S 50/70 nach TL Asphalt-StB 07/13 bildet diese Variante die letzte den Anforderungen entsprechende zulässige Variante ab. Dies gelang durch ein Herabsetzen des Bindemittelgehaltes von 6,5 M.-% auf 6,2 M.-%.

Da jedoch davon ausgegangen werden muss, dass bei einem mitteldichten Walzasphalt die Wasserzufuhr bis zu den Tonmineralen noch zu gering ist, musste eine weitere Variante entwickelt werden, die den Zugang des Wassers in größtem Ausmaß ermöglicht und die quellfähigen Tonminerale ihre schädliche Wirkung entfalten können.

Aufgrund der Tatsache, dass der Gesteinsanteil am Asphaltmischgut über alle Varianten konstant gehalten wurde, ist der Hohlraumgehalt auf mechanische Art und Weise bei der

Probekörper-Herstellung herzustellen. Der Bindemittelgehalt sollte ebenfalls nicht unter den Mindestbindemittelgehalt fallen, um den Anforderungen der TL Asphalt-StB 07/13 weiterhin zu entsprechen. Aus diesem Grund wurde bei Variante A3 die TP Asphalt-StB, Teil 12 [38] herangezogen, um einen noch hohlraumreicheren Asphalt herstellen zu können. Für die Ermittlung der Wasserempfindlichkeit von Walzasphalt werden Marshall-Probekörper mit 35 anstelle von 50 Schlägen je Probekörperseite hergestellt. Anders als bei Variante A1 und A2, die mit jeweils 50 Schlägen hergestellt wurden, ergibt sich dadurch ein noch größerer Hohlraumgehalt. Wie Tabelle 7-1 zeigt, folgt daraus ein Hohlraumgehalt von 6,1 Vol.-%. Da man ab 6,0 Vol.-% von einem hohlraumreichen bzw. wasserdurchlässigen Walzasphalt spricht, ist bei dieser Variante die größte Wasserzufuhr möglich. Dadurch wird bei dieser Variante mit dem höchstem Schüttel-Abrieb-Wert gerechnet.

Die Wasseraufnahme der quellfähigen Tonminerale spielt eine entscheidende Rolle, um die Eigenschaften der Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen beim Schüttel-Abriebverfahren am Marshall-Probekörper darstellen zu können. Aus diesem Grund wurde auch darauf verzichtet, den Füller-Anteil in der Asphaltmischgut-Konzeption zu verändern, obwohl dieser ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf den Hohlraumgehalt besitzt. Fraglich ist, wie die Tonminerale ihre schädliche Quellfähigkeit bei Wasserzutritt voll ausschöpfen können. Darauf wird in Kapitel 8 jedoch noch näher eingegangen.

Die folgende Tabelle zeigt einen Überblick über die drei verschiedenen Varianten.

Tabelle 7-1: Zusammensetzung der unterschiedlichen Asphaltmischgutvarianten

Bezeichnung	Variante A1	Variante A2	Variante A3
Bindemittelgehalt [M.-%]	6,5	6,2	6,2
Korngruppen:			
Über 5,6 [mm]	4,7	4,7	4,7
2,0 bis 5,6 [mm]	94,8	94,8	94,8
1,0 bis 2,0 [mm]	0,5	0,5	0,5
0,063 bis 1,0 [mm]	0,0	0,0	0,0
0 bis 0,063 [mm]	0,0	0,0	0,0
Rohdichte [g/cm ³]	2,527	2,548	2,548
Raumdichte [g/cm ³]	2,477	2,464	2,393
Hohlraumgehalt [Vol.-%]	2,0	3,3	6,1

7.3 Probekörpervorbereitung und -lagerung für das Schüttel-Abriebverfahren am Marshall-Probekörper

7.3.1 Allgemeines

Aufbauend auf Kapitel 7.2 mit den unterschiedlichen Varianten hinsichtlich der Asphaltmischgutzusammensetzung wird in diesem Kapitel nochmals hinsichtlich der Probekörpervorbereitung und -lagerung unterschieden. Vorerst muss jedoch das Prinzip der Probekörpervorbereitung beim Schüttel-Abriebverfahren am Marshall-Probekörper genauer betrachtet werden.

Die Gebrauchsdauer der Asphaltbetondeckschicht hängt entscheidend von der Affinität zwischen Gesteinskörnungsgemisch und Bindemittel sowie der Wasserempfindlichkeit ab. Zukünftig gilt es zu vermeiden, Asphalte herzustellen, die zwar gegen bleibende Verformungen hohe Widerstandskräfte besitzen, jedoch bei Wasserzutritt ihre Dauerhaftigkeit verlieren. Die Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen spielt dabei eine entscheidende Rolle und kann, wie bereits geprüft, mit dem Schüttel-Abriebverfahren beschrieben werden. Die Möglichkeit über die Aussage der Performance-Eigenschaften muss jedoch weiterhin erforscht werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird aus diesem Grund untersucht, ob sich das Quellverhalten der Tonminerale infolge von Wasserzutritt mit Hilfe einer zielführenden Probekörpervorbereitung und -lagerung sowie Performance-Prüfung auf das Gebrauchsverhalten auswirkt.

Um die Modifikation der Probekörpervorbereitung verstehen zu können, wird im Folgenden die Ausgangs-Probekörpervorbereitung dargestellt. Die Bewertung der Wasserempfindlichkeit von Walzasphalten erfolgt mittels der Bestimmung des Masseverlusts an Marshall-Probekörpern nach mechanischer Beanspruchung in Gegenwart von Wasser (siehe auch Kapitel 3.3.2). Drei verschieden temperierte Wasserbäder sind für die Untersuchung der Wasserempfindlichkeit mittels des Schüttel-Abriebverfahrens notwendig. Nach Herstellung von Marshall-Probekörpern nach TP Asphalt-StB, Teil 30 [39] erfolgt die Raumdichtebestimmung nach TP Asphalt-StB, Teil 6 [58] Verfahren B (SSD-Verfahren), wobei hier der Probekörper für eine Dauer von (90 ± 30) min in einem mit 25 °C temperierten Wasserbad gelegt wird. Wichtig ist dabei, dass das Wasserbad mit einem Zwischenboden ausgerüstet ist, um eine ganzheitliche Umhüllung des Wassers um den Probekörper zu ermöglichen. Nach den 90 Minuten der ersten Temperierungsstufe wird der Probekörper anschließend in ein mit 1 °C temperierten Behälter unter Vakuum gegeben. Die

Vakuumkammer ist innerhalb von 30 Minuten auf einen Restdruck von 25 mbar zu evakuieren. Anschließend wird dieser Restdruck über 150 Minuten lang konstant gehalten. Danach ist in der Vakuumkammer wieder ein atmosphärischer Druck innerhalb von 60 Minuten aufzubauen. Nach erneutem Aufbau des atmosphärischen Drucks werden die Probekörper weitere 30 Minuten in dem 1 °C kaltem Wasser gelagert (siehe Ablauf in Abbildung 7-2).

Anschließend werden diese in einem weiteren Wasserbad mit + 50 °C für 24 Stunden gelagert. Unmittelbar vor der Schüttelabrieb-Beanspruchung werden die Probekörper wieder aus dem + 50 °C warmen Wasserbad herausgenommen und erneut für 90 Minuten unter Wasser bei 25 °C temperiert.

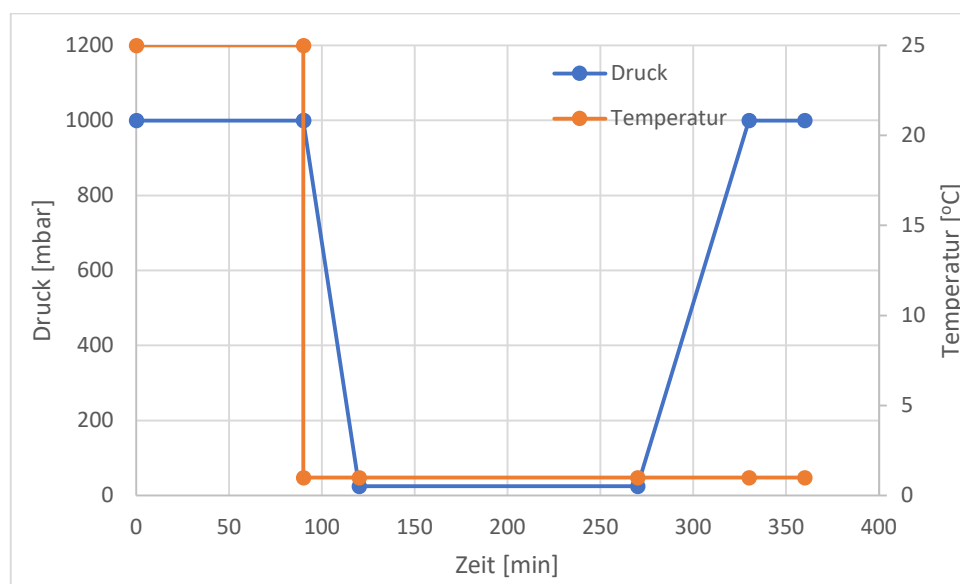


Abbildung 7-2: Probekörpertemperatur und -druckverlauf über die Zeit

Nach erfolgter rotierender Beanspruchung im Schüttel-Abrieb-Prüfgerät wird der Schüttel-Abrieb als prozentuale Differenz der Masse des Probekörpers vor und nach der Beanspruchung, bezogen auf die Masse des Ausgangsprobekörpers vor der Beanspruchung berechnet [35].

7.3.2 Variation der Probekörpervorbereitung und -lagerung

Um die Auswirkungen der Quellfähigkeit der Tonminerale in einer zeitlichen und temperaturbedingten Abhängigkeit untersuchen zu können, mussten dafür verschiedene Probekörpervorbereitungsvariationen geprüft werden, um die bestmögliche Variante auswählen zu können.

Dafür wurde vorab untersucht, ob die Wasserlagerung bei 1 °C zielführend ist oder ob eine andere Möglichkeit geeignet ist, um das Quellverhalten der Tonminerale zu beschleunigen. Eine Probekörperlagerung von Bohrkernen größer 150 mm bei 1 °C unter Vakuum ist im Sinne der Praktikabilität in den kleinen Behältern nicht möglich, sodass man untersuchte, ob eine andere Art der Wasserlagerung zielführender und praktikabler ist. Dazu wurden vier Varianten (siehe Tabelle 7-2) festgelegt.

Tabelle 7-2: Wasserlagerungsart der Probekörper

Variante	Wasserlagerungsart [W]
W1	entsprechend [35]
W2	25 °C für Raumdichte, 20 °C unter Vakuum
W3	ohne Raumdichtebestimmung, 1 °C unter Vakuum
W4	ohne Raumdichtebestimmung, 20 °C unter Vakuum

Eine Variante (W1) entspricht den Anforderungen, wie sie in Kapitel 7.3.1 beschrieben sind. Somit wird bei dieser Variante W1 der Marshall-Probekörper einer Temperierung von 1 °C im Wasserbad ausgesetzt. Bei Variante W2 wird der Probekörper bei einer Wassertemperatur von 20 °C temperiert. Nach erfolgter Temperierung werden die Probekörper dem Vakuum ausgesetzt. Bei Variante W3 und W4 entfällt die Raumdichtebestimmung, die direkt vor der Probekörperlagerung erfolgt, sodass der Probekörper direkt in das mit 20 °C oder 1 °C temperierte Behältnis unter Vakuum gegeben wird. Die Raumdichtebestimmung der Probekörper erfolgt bei diesen Varianten vorab und steht in keinem zeitlichen Verhältnis mit der Wasserlagerung. Im Falle dieser Untersuchungen wurde die Raumdichtenbestimmung mindestens 16 Stunden (wie bei der Wasserempfindlichkeitsbestimmung von Asphalt nach TP Asphalt-StB, Teil 12 [38]) im Voraus durchgeführt. Anschließend werden die Probekörper für eine Zeitdauer von mindestens 16 Stunden bei Raumtemperatur belastungsfrei gelagert.

Für die Ermittlungen der Auswirkungen der unterschiedlichen Wasserlagerungsarten kommt das Schüttel-Abriebverfahren mit der Variante A3 (Hohlraumgehalt 6,1 Vol.-%) und einer Trockenlagerungszeit T2 von 48 Stunden zur Anwendung, da diese den größten Hohlraumgehalt und damit die größte Möglichkeit des Wasserzutritts besitzt. Die Ergebnisse (siehe Abbildung 7-3) zeigen, dass die Temperierung bei 25 °C bei der Raumdichtenbestimmung keine Auswirkungen auf die Quellfähigkeit der Tonminerale hat. Das wird an den lediglich geringen Unterschieden zwischen D-KG-A3-W1 und D-KG-A3-W3 sowie zwischen D-KG-A3-W2 und D-KG-A3-W4 ersichtlich. Des Weiteren erkennt man, dass

sich die Schüttel-Abrieb-Ergebnisse der Varianten mit 20 °C (D-KG-A3-W2 und D-KG-A3-W4) generell auf einem höheren Wertenniveau befinden als die Varianten mit einer Wassertemperatur von 1 °C.

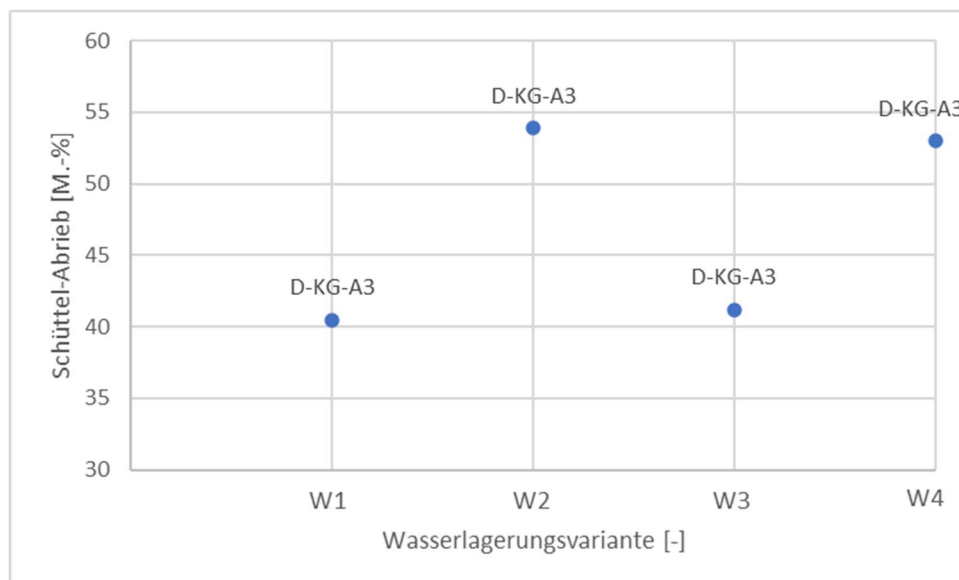


Abbildung 7-3: Ergebnisse des Schüttel-Abriebverfahrens in Abhängigkeit der Wasserlagerungsart

Mit Hilfe der Ergebnisse aus Abbildung 7-3 ergab sich die folgende neue und zielführende Probekörpertemperatur (W4) mit dem dargestellten Druckverlauf.

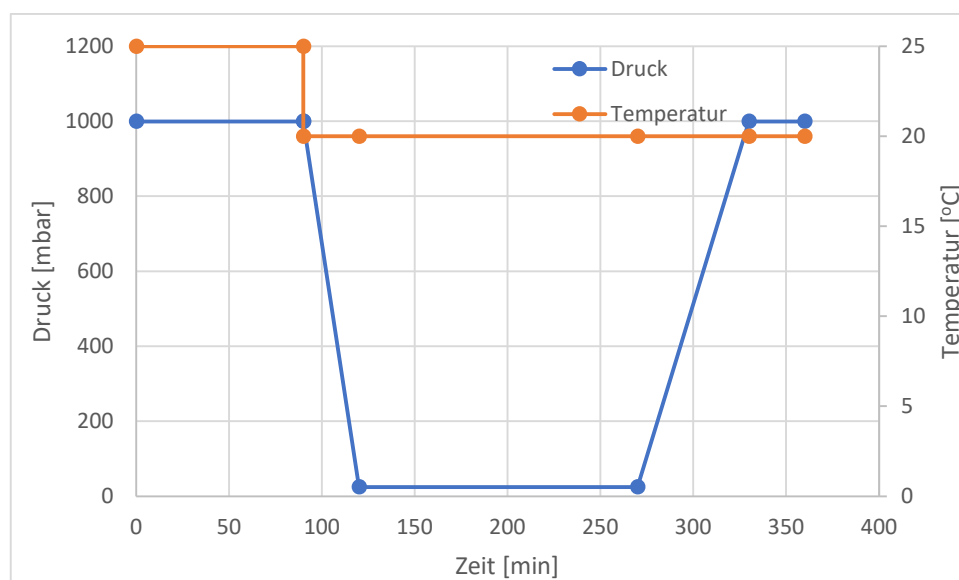


Abbildung 7-4: Neue zielführende Probekörpertemperatur und -druckverlauf über die Zeit

Anschließend musste herausgefunden werden, zu welchem Zeitpunkt die Tonminerale ihre volle Quellfähigkeit entfaltet haben. Da es dazu keine Erfahrungswerte gibt, wurden weiterhin fünf zeitlich verschiedene Varianten definiert, um die Auswirkungen sowohl nach kurzer Dauer als auch nach langer Dauer untersuchen zu können.

Nach erfolgter Wassertemperaturung bei 20 °C wurden die Probekörper bei Raumtemperatur von 25 °C belastungsfrei bis zur Prüfung zwischengelagert. Durch diese Trockenlagerung versprach man sich einen erneuten Verlust der Wassermenge im Probekörper, sodass es dadurch auch zu einer erneuten Reduktion der Quellung der Tonminerale kommt und weitere Hohlräume im Asphaltmörtel entstehen, die das Gefüge des Asphaltmörtels und somit die Dauerhaftigkeit des Walzasphaltes nachhaltig schädigen.

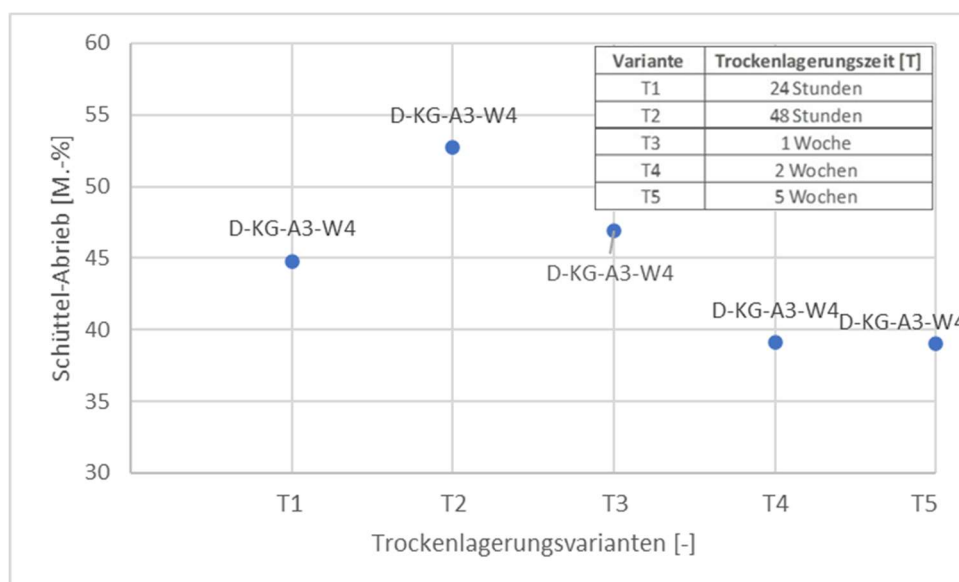


Abbildung 7-5: Ergebnisse des Schüttel-Abriebverfahrens in Abhängigkeit der Trockenlagerungszeit

Die Ergebnisse des Schüttel-Abriebverfahrens mit unterschiedlichen Trockenlagerungszeiten zeigen, dass die Variante T2 (Trockenlagerungszeit von 48 Stunden) den größten Schüttel-Abrieb-Wert erkennen lässt. Bei einer Trockenlagerung über 48 Stunden kommt es zu einer Reduzierung des Schüttel-Abriebs. Dies wird anhand von weiteren (siehe Kapitel 7.4) ebenfalls noch ersichtlich. Daraus wird konstatiert, dass die Variante mit einer Trockenlagerungszeit von 48 Stunden am stärksten differenziert.

Um ausschließen zu können, dass auch eine Wasserlagerung geeignet wäre, wurde gleichzeitig untersucht, ob eine dauerhafte Wasserlagerung zielführender ist. Dazu sind zusätzlich

entsprechend der Zeiten der Trockenlagerungszeiten auch Varianten gebildet worden, in denen die Probekörper dauerhaft bei 25 °C in einem Wasserbad liegen.

Wie bereits vermutet, konnten keine weiteren Auswirkungen aufgrund einer dauerhaften Wasserlagerung bei 25 °C festgestellt werden. Wie Abbildung 7-6 zeigt, liegen sämtliche Varianten auf demselben Wertenniveau um 38 M.-%. Nach erfolgter Wassersättigung des Probekörpers können die Tonminerale nicht weiter quellen. Lediglich die erneute Volumen-Reduktion der Tonminerale und den damit entstehenden Hohlräumen bewirkt einen vergrößerten Schüttel-Abrieb. Da eine dauerhafte Wassersättigung in der Praxis aufgrund von ständig wechselnden Witterungsbedingungen nicht möglich ist, wird im Folgenden lediglich in der Gesamtauswertung der Ergebnisse des Schüttel-Abriebverfahrens auf diese Variante noch näher eingegangen.

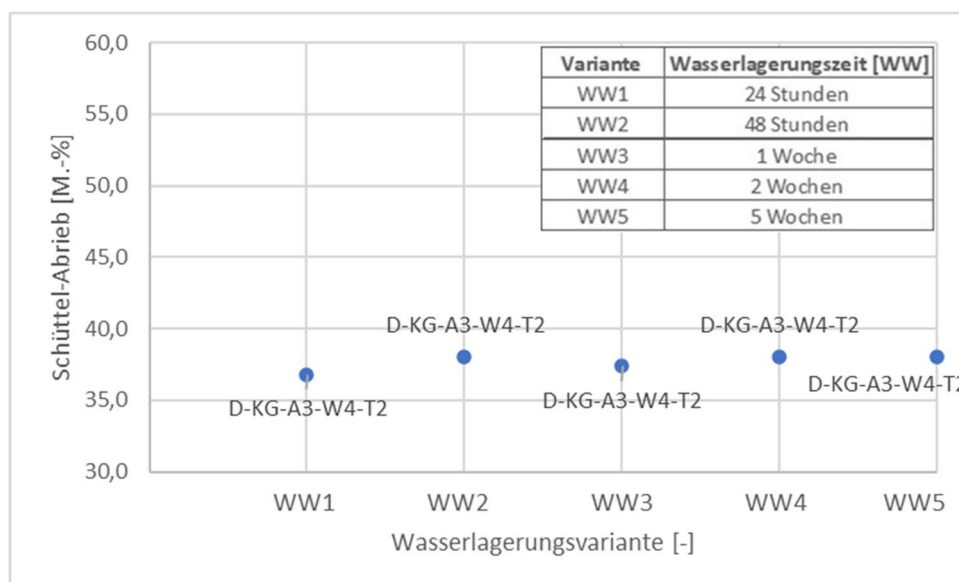


Abbildung 7-6: Schüttel-Abrieb-Ergebnisse in Abhängigkeit einer dauerhaften Wasserlagerung nach Wassersättigung

Basierend auf den Ergebnissen der Voruntersuchungen wurden alle Asphaltvarianten (A1 bis A3) mittels dem Schüttel-Abriebverfahren sowie allen Trockenlagerungszeiten untersucht. Daraus ergab sich, dass insbesondere die Trockenlagerungszeit von 48 Stunden entscheidend ist, um das Quellverhalten der Tonminerale mit ihrem schädlichen Einfluss abbilden zu können. Anschließend wird eine zielführende Probekörpervorbereitung für zukünftige Wasserempfindlichkeitsuntersuchungen in Kapitel 8 definiert.

7.4 Ergebnisse des Schüttel-Abriebverfahrens am Marshall-Probekörper

Pro Untersuchungsvariante wurden zwei Probekörper geprüft. Daraus bildet sich das Mittel der Ergebnisse der beiden Proben. Im Folgenden erfolgt, wie bereits in Kapitel 7.1 beschrieben, stets eine Unterscheidung zwischen der 0-Variante, die keine quellfähigen Tonminerale enthält und dem künstlichen Gemisch (KG) mit Tonmineralen. Mit A1 bis A3 (siehe auch Tabelle 7-1) sowie A3-WW (dritte Asphaltmischgutvariante A3 mit dauerhafter Wassersättigung WW) werden die Asphaltmischgutvarianten im Probenamen abgekürzt. Anschließend bezeichnet die Zeitangabe T im Probenamen diejenige Ruhezeit der Probekörper nach der Wassersättigung, die den Tonmineralen gegeben wird, um ihre Quellfähigkeit in vollem Ausmaß entfalten zu können (siehe dazu auch Abbildung 7-1). In Abbildung 7-7 sind die dazugehörigen Ergebnisse je Variante dargestellt. Variante A1 bis A3 unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Asphaltmischgutzusammensetzung (reduzierter Bindemittelgehalt), was sich in einem steigendem Hohlraumgehalt zeigt. Lediglich Variante A3-WW entspricht hinsichtlich der Asphaltmischgutzusammensetzung der Variante A3. Der Unterschied zwischen Varianten A3 und A3-WW liegt in der Lagerung nach der Wassersättigung. So bleibt der Probekörper bei Variante A3-WW, wie bereits beschrieben (siehe Abbildung 7-6), auch nach der Wassersättigung in einem Behälter mit Wasser über die gesamte Ruhephase hinweg liegen. Die Einzelergebnisse jeder Probe sind im Anhang F zu finden.

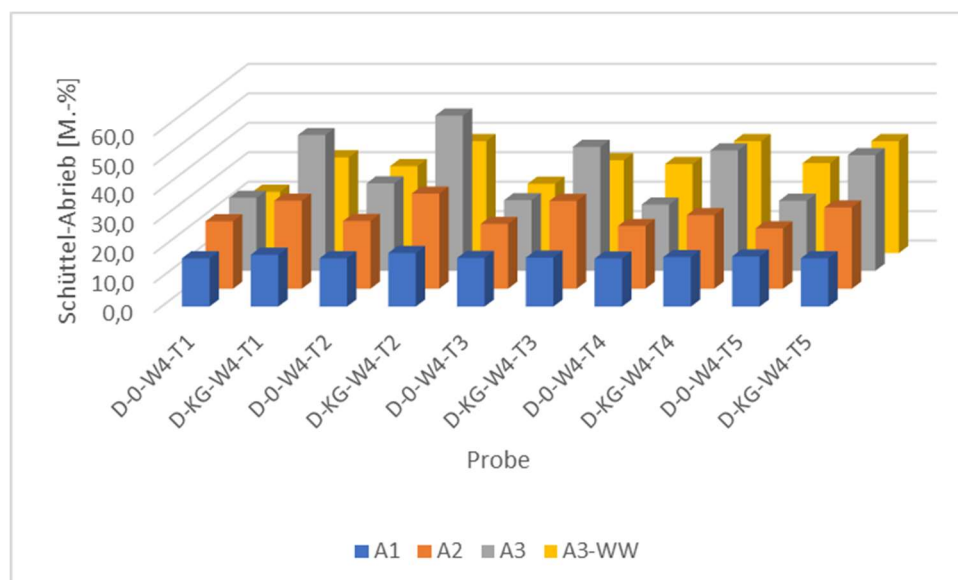


Abbildung 7-7: Ergebnisse des Schüttel-Abriebverfahrens am Marshall-Probekörper

Die Ergebnisse zeigen, dass mit Zunahme des Hohlraumgehaltes der Schüttel-Abrieb-Wert gestiegen ist. Lediglich bei weiterer Lagerung in Wasser nach der Wassersättigung kam es erneut zu einer Reduktion der Schüttel-Abrieb-Werte (siehe Abbildung 7-7 und Anhang G). Probe D-KG-A3-W4-T2 weist mit 52,7 M.-% den größten Schüttel-Abrieb-Wert auf, wohingegen Probe D-0-A1-W4-T4 mit 16,3 M.-% den geringsten Wert aufweist.

Im Folgenden wird bei Analyse der Ergebnisse unterschieden zwischen den Asphaltvarianten sowie innerhalb der Variante in Abhängigkeit der Ruhezeiten. Bei Betrachtung von A1 (siehe Abbildung 7-8) zeigt sich, dass sich die Werte generell auf einem sehr niedrigen Wertenniveau befinden. Bei einem Hohlraumgehalt von 2,0 M.-% zeigt die Probe D-KG-A1-W4-T2 mit Tonmineralen nach einer Ruhezeit von 48 Stunden bei Raumtemperatur den größten Wert von 18,2 M.-%, den kleinsten Wert mit 16,3 M.-% bei Probe D-0-A1-W4-T4. Bei den Proben ohne Tonmineralen sind die Unterschiede zwischen den Ruhezeiten von 16,4 M.-% bis maximal 17,0 M.-% ebenfalls vernachlässigbar gering.

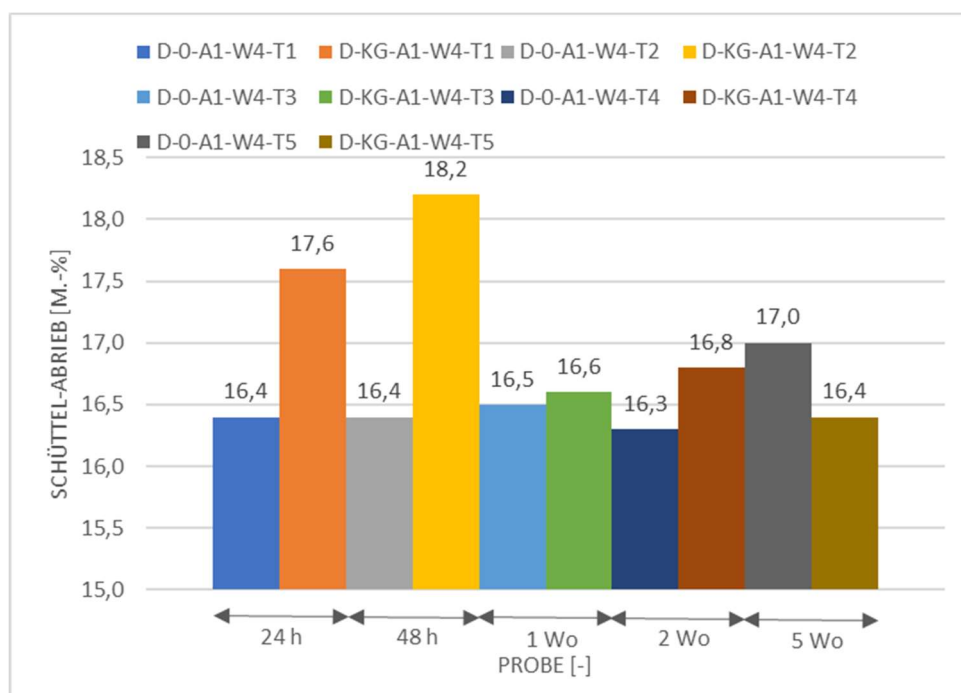


Abbildung 7-8: Einzelauswertung der Ergebnisse der Variante A1

Die Analyse der Schüttel-Abrieb-Ergebnisse, unterschieden in Proben mit und ohne Tonminerale („0“ bzw. „KG“-Variante), zeigt, dass mit einer steigenden Ruhezeit nicht gleichzeitig auch der Schüttel-Abrieb am Marshall-Probekörper gestiegen ist. Dies lässt sich sowohl bei der 0-Variante als auch bei der KG-Variante erkennen. Abschließend kann bei A1

konstatiert werden, dass die 0-Variante bei einem Hohlraumgehalt von 2,0 Vol.-% erst nach fünf Wochen den größten Schüttel-Abrieb-Wert mit 17,0 M.-% aufweist, wohingegen bei der KG-Variante bereits nach 48 Stunden der größte Schüttel-Abrieb zu erkennen ist.

Bei Variante A2 wurde der Hohlraumgehalt weiter auf 3,3 Vol.-% erhöht. In dieser Untersuchungsvariante wird wieder zwischen den Ruhezeiten und dem künstlichen Gemisch sowie der 0-Variante unterschieden.

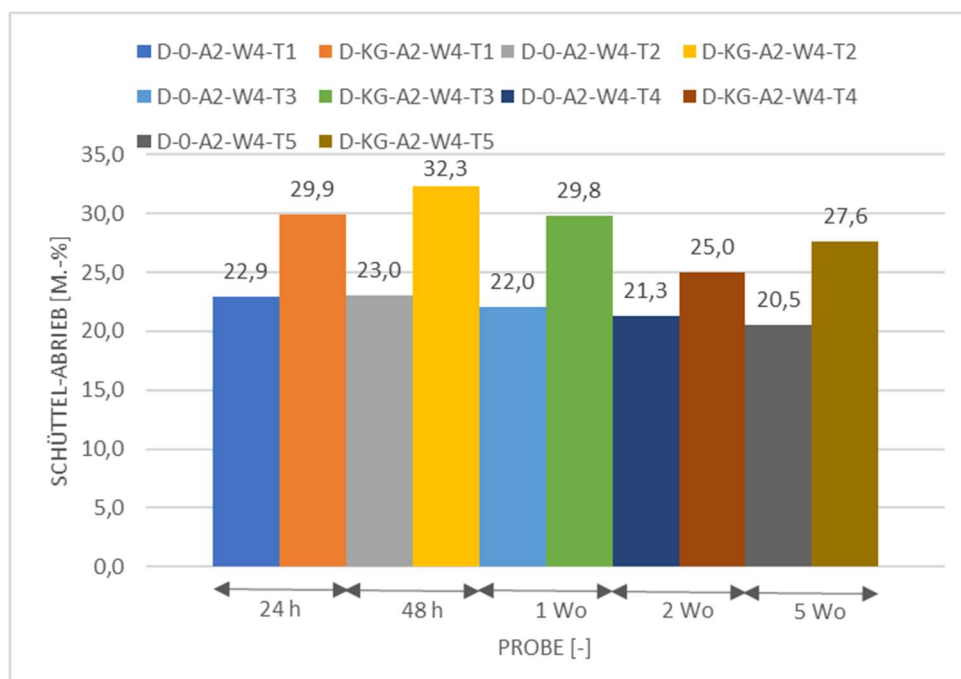


Abbildung 7-9: Einzelauswertung der Ergebnisse der Variante A2

Auch bei A2 zeigt sich, dass mit steigender Ruhezeit nicht gleichzeitig auch der Schüttel-Abrieb-Wert gestiegen ist. Sowohl bei der 0-Variante als auch bei der KG-Variante ist der größte Schüttel-Abrieb in der Variante mit 48 Stunden Ruhezeit zu verzeichnen. Die 0-Variante weist dabei einen Schüttel-Abrieb von 23,0 M.-% und die KG-Variante einen Wert von 32,3 M.-% auf.

Bei der Einzelauswertung der 0-Variante zeigt sich, dass sich auch bei A2 lediglich ein geringer Unterschied zwischen den Varianten mit unterschiedlichen Ruhezeiten ergibt. So bewegt sich die Spanne zwischen 20,5 und 23,0 M.-%. Dadurch kann auch diese Differenz vernachlässigt werden. Auch bei der KG-Variante sind erneut geringe Unterschiede zwischen den Ruhezeit-Varianten 24 (T1) und 48 Stunden (T2) sowie einer Woche (T3) zu erkennen. Erst nach einer

Ruhezeit von über einer Woche kommt es zu einer deutlicheren Reduktion des Schüttel-Abriebs von 32,3 M.-% auf 25 M.-%.

Die Variante A3 wurde mit dem größten Hohlraumgehalt hergestellt. Dabei ergab sich eine noch größere Wasseraufnahmefähigkeit und es wurden damit höhere Schüttel-Abriebe erwartet. Wie die Ergebnisse in Abbildung 7-10 zeigen, ist das Werte-Niveau insbesondere bei den Varianten der künstlichen Gemische deutlich gestiegen. Wie bei der Variante A2 wird der größte Schüttel-Abrieb-Wert bei einer Ruhezeit von 48 Stunden (T2) erreicht. Dies ist sowohl bei der 0-Variante als auch bei der KG-Variante zu erkennen.

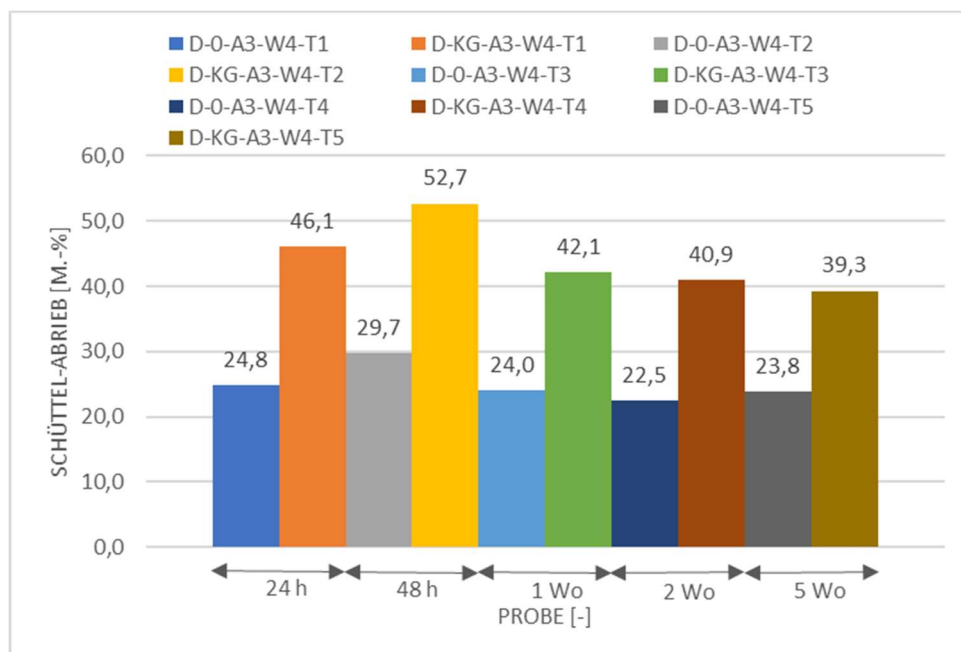


Abbildung 7-10: Einzelauswertung der Ergebnisse der Variante A3

Auch bei einem Hohlraumgehalt von 6,1 M.-% und ohne enthaltene Tonminerale (0-Variante) sind erneut lediglich geringe Unterschiede zwischen den verschiedenen Ruhezeiten zu erkennen. So erreicht zwar der Schüttel-Abrieb mit 29,7 M.-% bei 48 Stunden Ruhezeit (T2) sein Maximum in der Variante A3, jedoch fällt der Unterschied im Vergleich zum Minimum von 22,5 M.-% bei einer Ruhezeit von 2 Wochen (T4) eher gering aus.

Die Ergebnisse des Schüttel-Abriebs bei den künstlichen Gemischen zeigen dahingegen differenzierte Ergebnisse auf. Der größte Schüttel-Abrieb-Wert mit 52,7 M.-% ist auch bei den künstlichen Gemischen bei einer Ruhezeit von 48 Stunden (T2) zu verzeichnen. Wie Abbildung

7-10 verdeutlicht, kommt es nach 48 Stunden Ruhezeit erneut zu einer Reduktion des Schüttel-Abriebs.

Um ausschließen zu können, dass eine dauerhafte Wasserlagerung, das heißt auch nach der Wassersättigung bleibt der Probekörper über die gesamte Ruhezeit im Wasser (die Trockenlagerungsdauer entfällt), besser geeignet wäre, wurde die Variante A3 nochmals für alle Ruhezeiten durchgeführt. Der größte Schüttel-Abrieb der 0-Variante ist mit einem Wert von 30,5 M.-% bei einer Ruhezeit von fünf Wochen zu erkennen. Bei der Variante mit dem künstlichen Gemisch ist keine klare Zuordnung des größten Schüttel-Abriebs möglich, da die Ruhezeit-Varianten 48 Stunden, zwei Wochen und auch fünf Wochen denselben Schüttel-Abrieb-Wert von 38 M.-% besitzen. Der kleinste Wert der Variante mit den Tonmineralen (31,5 M.-%) ist bei einer Ruhezeit von einer Woche erkennbar, wohingegen die 0-Variante ihr Minimum mit 20,8 M.-% bei bereits 24 Stunden erreicht hat.

Auffällig bei Analyse der Diagramme ist, dass sowohl bei den Varianten ohne Tonminerale als auch den Varianten mit Tonmineralen erneut relativ geringe Unterschiede zu verzeichnen sind (siehe auch Abbildung 7-11).

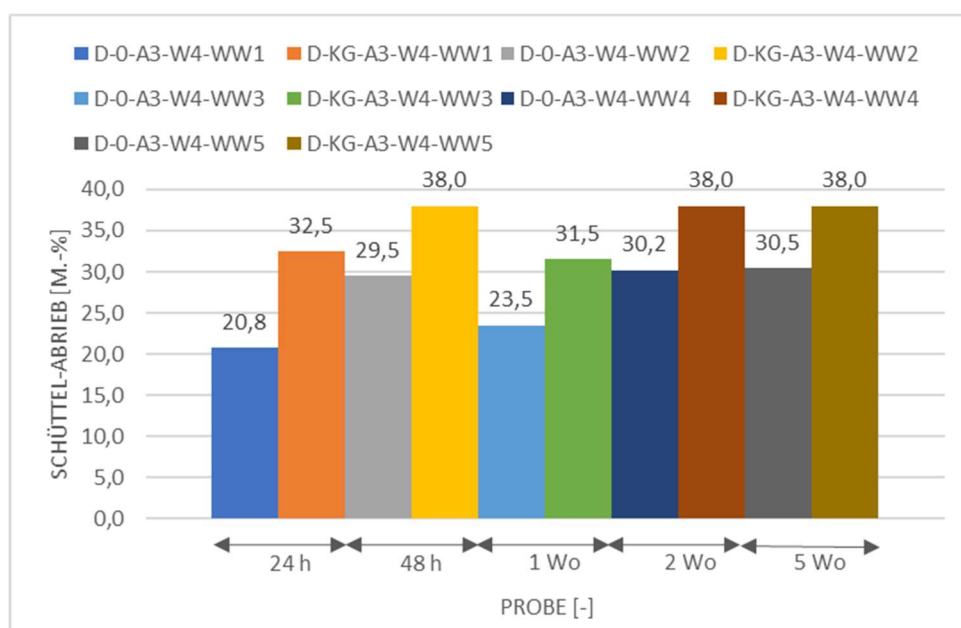


Abbildung 7-11: Einzelauswertung der Ergebnisse der Variante A3-WW

Bereits nach 48 Stunden Ruhezeit in Wasser ist das Maximum des Schüttel-Abriebs erreicht. Anschließend kommt es bei der Variante mit einer Woche Ruhezeit erneut zu einem Abfall des

Schüttel-Abrieb-Werte mit 31,5 M.-%. Damit wird das Werte-Niveau wie bei Variante T1 (24 Stunden) erreicht. Ab zwei Wochen Ruhezeit steigt erneut der Schüttel-Abrieb-Wert auf sein Maximum von 38,0 M.-% an.

Vergleicht man die Ergebnisse der Variante A3 und der Variante A3-WW miteinander (siehe Zusammenfassung in Abbildung 7-12), so kann verdeutlicht werden, dass es trotz gleicher Asphaltkonzeption bei der 0-Variante zu einem Anstieg des Schüttel-Abriebs infolge der dauerhaften Wasserlagerung ab zwei Wochen Lagerungszeit im Wasser gekommen ist. Anders ist das bei der Variante mit den enthaltenen Tonmineralen (KG-Variante). In Abbildung 7-12 erkennt man, dass alle untersuchten Ruhezeit-Varianten der Variante A3 die Untersuchungsvariante der Variante A3-WW überschreiten. Damit ist bewiesen, dass eine dauerhafte Wasserlagerung für das schädliche Quellverhalten nicht förderlich ist. Dies bestätigt die Ergebnisse der Voruntersuchungen aus Kapitel 7.3.2. Es ist aus diesem Grund davon auszugehen, dass die Trocknungsvorgänge auch einen entscheidenden Einfluss auf die Quellung ausüben.

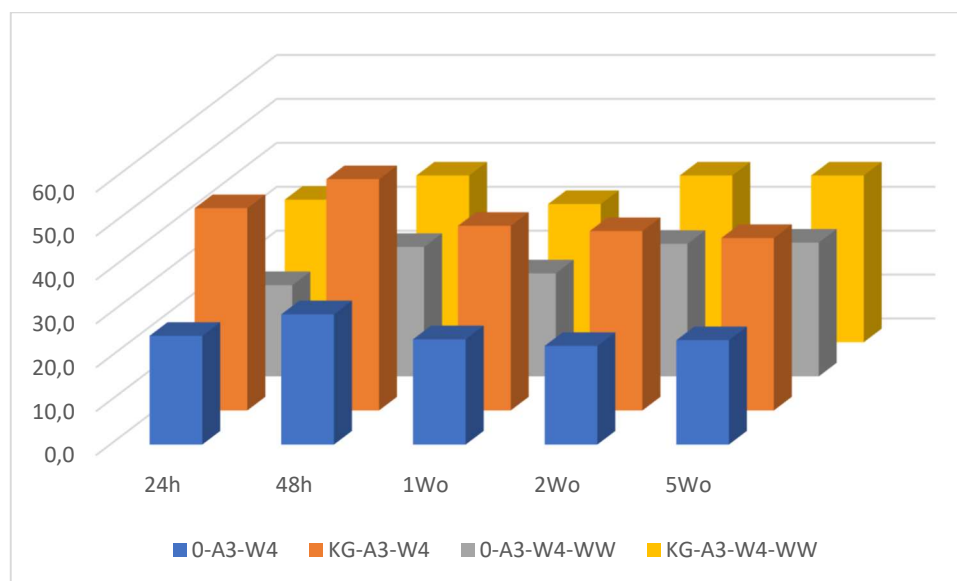


Abbildung 7-12: Vergleich der Schüttel-Abrieb-Ergebnisse zwischen der Variante A3 und der Variante A3-WW

Abschließend für die Untersuchungen des Schüttel-Abriebverfahrens am Marshall-Probekörper wird die Abhängigkeit des Schüttel-Abriebs vom Hohlraumgehalt näher analysiert. Wie bereits in den Abbildungen zuvor ersichtlich, steigt der Schüttel-Abrieb insbesondere bei der Variante mit Tonminerale erheblich mit zunehmendem Hohlraumgehalt (siehe auch Abbildung 7-13).

Lediglich bei dauerhafter Wassersättigung sinkt der Schüttel-Abrieb erneut. Aus diesem Grund wird diese Variante in den folgenden Auswertungen nicht berücksichtigt. Der Hohlraumgehalt bleibt zwischen der Variante A3 und der Variante A3-WW auch konstant. Da in der 0-Variante keine Tonminerale bzw. nur ein geringer Tonmineralanteil aus dem Referenzsand vorhanden ist, kann es zu lediglich kleinen Quellerscheinungen gekommen sein. Aus diesem Grund befindet sich der Schüttel-Abrieb trotz steigendem Hohlraumgehalt annähernd auf demselben Wertenniveau wie bei der Variante A1 mit lediglich 2,0 Vol.-% Hohlraumgehalt bzw. steigt in eher geringerem Ausmaß als bei der Variante mit Tonmineralen. Dies wird anhand der Trendlinie und der geringeren Steigung von 3,1 (bei der 0-Variante) ersichtlich. Eine Korrelation zwischen Hohlraumgehalt und Schüttel-Abrieb der 0-Variante ist zu erkennen.

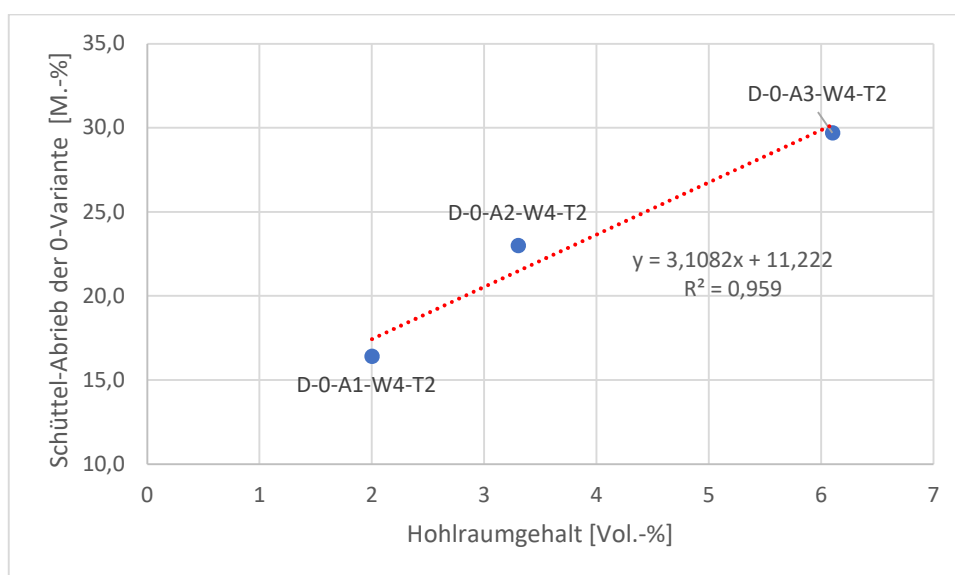


Abbildung 7-13: Abhängigkeit des Schüttel-Abriebs der 0-Varianten vom Hohlraumgehalt und Asphaltmischgutzusammensetzung

Anders ist das bei der KG-Variante (siehe Abbildung 7-14). Hier ist ebenfalls eine Korrelation zu erkennen, doch zeigt diese Auswertung eine deutlich höhere Abhängigkeit des Schüttel-Abriebs vom Hohlraumgehalt. So sind bei den künstlichen Gemischen Differenzen bis zu 34,5 M.-% erkennbar. Zudem ist die Steigung der Trendlinie auf 8,2 gestiegen.

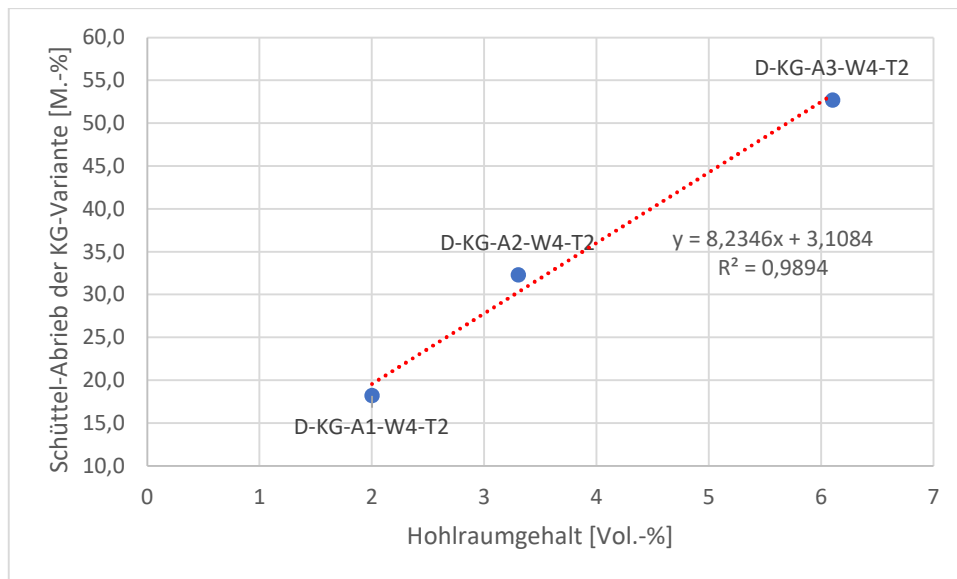


Abbildung 7-14: Abhängigkeit des Schüttel-Abriebs der KG-Varianten vom Hohlraumgehalt und Asphaltmischgutzusammensetzung

Folglich ist aus den Untersuchungen abzuleiten, dass bei weiteren Untersuchungen ein Hohlraumgehalt von über 6,0 M.-% angestrebt werden muss, um das volle Quellverhalten der Tonminerale und deren schädlichen Auswirkungen auf das Gebrauchsverhalten zu entfalten.

Probe	Ruhezeit T2	A1	A2	A3	A3-WW
0-Variante	48 h				
KG-Variante	48 h				

Abbildung 7-15: Fotodokumentation der Probekörper nach der Schüttel-Abrieb-Prüfung mit einer Ruhezeit T2 von 48 Stunden

Auch die Fotodokumentation zeigt, dass aus optischer Sicht ein deutlicher Unterschied zwischen den künstlichen Gemischen und der 0-Variante besteht. Dies kann an der verringerten Größe der künstlichen Gemische und an größeren Abrieben deutlich gemacht werden. Innerhalb der 0-Varianten bei einer Ruhezeit von 48 Stunden sind geringe optische Unterschiede zu erkennen. Bei den künstlichen Gemischen dagegen sind deutliche Veränderungen feststellbar. Insbesondere die Variante A3 zeigt eine verringerte Masse im Vergleich zu den anderen Varianten bei 48 Stunden Ruhezeit. Mit Hilfe der Fotodokumentation konnten die Ergebnisse abschließend sichtbar gemacht werden und veranschaulichen die Ergebnisse des Schüttel-Abriebverfahrens am Marshall-Probekörper. Die restliche Fotodokumentation der geprüften Probekörper ist in Anhang H zu finden.

7.5 Zwischenfazit nach den Ergebnissen des Schüttel-Abriebverfahrens am Marshall-Probekörper

Die Ergebnisse zeigen, dass das Quellverhalten der Tonminerale in der feinen Gesteinskörnung einen entscheidenden Einfluss auf das Gebrauchsverhalten hat. So steigt der Schüttel-Abrieb mit zunehmendem Hohlraumgehalt insbesondere bei den künstlichen Gemischen an, da dadurch der Wasserzutritt begünstigt wird. Durch die Zugabe des Tonminerals Kalciumbentonit stieg in jeder Untersuchungsvariante der Schüttel-Abrieb an. Bei Variante A3 und einer Ruhezeit von 48 Stunden ist der größte Schüttel-Abrieb-Wert bei den künstlichen Gemischen mit 52,7 M.-% zu verzeichnen. Der kleinste Wert ist mit 16,3 M.-% Schüttel-Abrieb bei Variante A1 und einer Ruhezeit von zwei Wochen bei der 0-Variante entstanden.

Die Ergebnisse der Voruntersuchungen konnten durch die Versuchsreihe bestätigt werden, dass die Ruhezeit-Variante mit 48 Stunden am besten geeignet ist, um das Quellverhalten der Tonminerale mit ihrem schädlichen Einfluss abbilden zu können. Mit Ausnahme von zwei Asphaltmischgutvariationen bei der 0-Variante haben alle Proben ihr Maximum nach 48 Stunden Ruhezeit erreicht. Aus diesem Grund wurde daraus geschlossen, dass das schädliche Ausmaß der Tonminerale nach 48 Stunden die optimale Probekörpervorbereitung ist, um das Gebrauchsverhalten des Asphaltes in Abhängigkeit der Quellfähigkeit der in der feinen Gesteinskörnung enthaltenen Tonminerale zu prüfen.

Daraufhin wurde die im folgenden Kapitel festgelegte neue zielführende Probekörpervorbereitung definiert und diese für die weiteren Performance-Prüfungen angewendet, um das Gebrauchsverhalten des Walzasphaltes in Abhängigkeit der Wasserempfindlichkeit der feinen Gesteinskörnungen prüfen zu können.

8. Definition der neuen zielführenden Probekörpervorbereitung und -lagerung

Basierend auf den Ergebnissen aus Kapitel 7 konnte festgestellt werden, dass die festgelegte Probekörpervorbereitung für die Ansprache der Quellfähigkeit von Tonmineralen beim Schüttel-Abriebverfahren am Marshall-Probekörper lediglich mit einer Trockenlagerungszeit von 48 Stunden zielführend ist. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit eine neu definierte Probekörpervorbereitung entwickelt, um die Wasserempfindlichkeit der feinen Gesteinskörnungen und der damit verbundenen Quellfähigkeit der darin enthaltenen Tonminerale bestmöglich ansprechen zu können.

Derzeit wird die Wasserempfindlichkeit von Asphalt-Probekörpern mittels TP Asphalt-StB, Teil 12 [38] bestimmt. Dabei kommt folgende Probekörper-Vorbehandlung zum Einsatz.

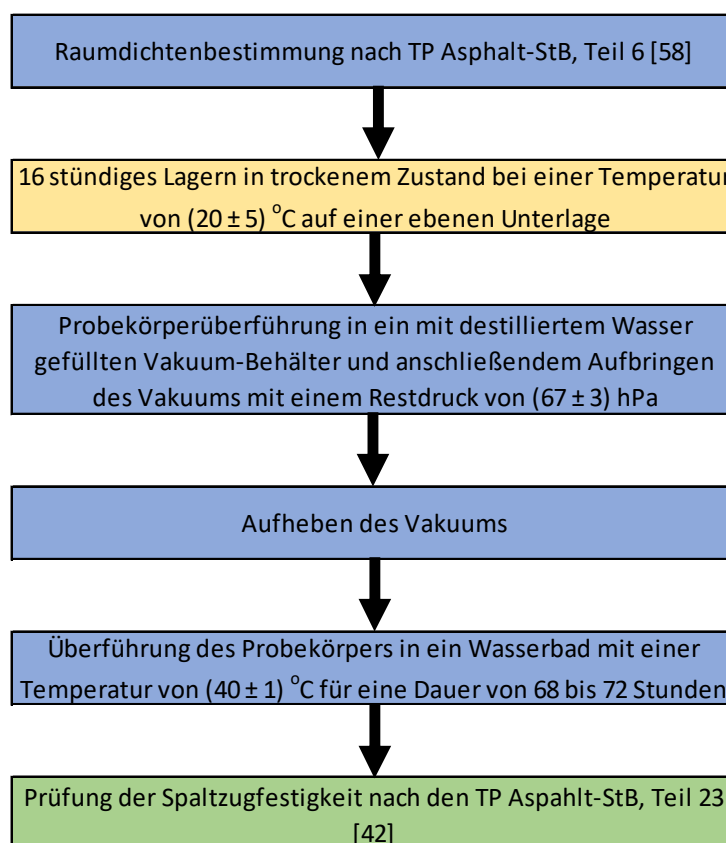


Abbildung 8-1: Probekörpervorbereitung nach TP Asphalt-StB, Teil 12 [38]

Nach erfolgter Raumdichtenbestimmung, Verfahren B nach TP Asphalt-StB, Teil 6 [58] werden die Probekörper für eine Zeitdauer von mindestens 16 Stunden bei Raumtemperatur gelagert. Anschließend sind diese in einem mit destilliertem Wasser bei $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ gefüllten Vakuum-Behälter zu geben. Das Vakuum mit einem Restdruck von (67 ± 3) hPa muss innerhalb (10 ± 1) Minuten aufgebracht werden und ist dann für (30 ± 5) Minuten zu halten. Danach wird es aufgehoben. Nach weiteren (30 ± 5) Minuten werden die Probekörper abschließend in ein Wasserbad mit $(40 \pm 1)^\circ\text{C}$ für eine Dauer von 68 bis 72 Stunden gegeben.

Zusammenfassend aus allen Ergebnissen des Kapitels 7 und den Analysen der Probekörpervorbereitungen anderer Prüfmethode zeigt sich, dass eine Wasserlagerung bei 25°C nicht entscheidend für die Ergebnisse der Wasserempfindlichkeit der feinen Gesteinskörnungen und deren schädlichen Auswirkungen auf das Gebrauchsverhalten ist. Aus diesem Grund kann die Raumdichtebestimmung, wie bereits in Kapitel 7.3.2 beschrieben, auch vorab – mindestens jedoch 16 Stunden zuvor – nach TP Asphalt-StB, Teil 6 [58] bestimmt werden und muss nicht in einer direkten Verbindung mit der Probekörpervorbereitung stehen. Damit bei allen Probekörpern gleiche Wassergehalte aufzuweisen sind, wurde im Rahmen dieser Arbeit die Lagerungszeit von genau 16 Stunden festgesetzt. Auch eine Wasserlagerungsdauer bei 50°C von 68 bis 72 Stunden ist nicht von Bedeutung, sodass entsprechend Kapitel 7 eine Wasserlagerungsdauer von (30 ± 6) Stunden festgelegt wird. Entscheidend für die schädlichen Auswirkungen der Quellfähigkeit der Tonminerale in den feinen Gesteinskörnungen ist vor allem die abschließende trockene Lagerung. Dadurch wird dem Tonmineral die Möglichkeit gegeben seine Masse wieder zu reduzieren und Hohlräume infolge deren Ausdehnung bei Wasserzutritt zwischen den feinen Gesteinskörnungen und dem Bindemittel zu bilden. Diese Hohlräume bilden die Grundlage für die Verschlechterung des Gebrauchsverhaltens des Asphaltes (siehe auch Abbildung 3-4). Aus diesem Grund wurde für weitergehende performance-orientierten Prüfungen die folgende Probekörperherstellung und -vorbereitung festgelegt.

Um eine möglichst große Wasseraufnahme der Tonminerale bei den feinen Gesteinskörnungen zu ermöglichen, muss der Probekörper möglichst hohlraumreich hergestellt sein. Das gelingt beim Schüttel-Abriebverfahren am Marshall-Probekörper anhand von lediglich 35 Schlägen je Seite (analog zu TP Asphalt-StB, Teil 12 [38]) und einem reduzierten Bindemittelgehalt (siehe Variante A3). Da bei den weitergehenden performance-orientierten Prüfungen keine Marshall-Probekörper, sondern Bohrkern bzw. Prismen aus Probepplatten bei der Prüfung zum Einsatz kommen, wurde die Programmierung des Walzsektor-Verdichtungsgeräts so angepasst, dass

eine Probeplattenhöhe von 40 mm mit einem Hohlraumgehalt von 6,1 Vol.-% erreicht wird. Die Ermittlung der Masse an Asphaltmischgut für die Herstellung der Probeplatten erfolgt nach folgender Gleichung:

$$M = 3328 \text{ cm}^3 \cdot \rho_{bssd} [\text{g}] \quad (2)$$

mit:

3328 cm^3 = Volumen der Asphalt-Probepatte mit einer Höhe von 40 mm

ρ_{bssd} = Raumdichte in $[\text{g}/\text{cm}^3]$

Abschließend konnte die folgende zielführende und praxisorientierte Probekörpervorbereitung festgelegt werden.

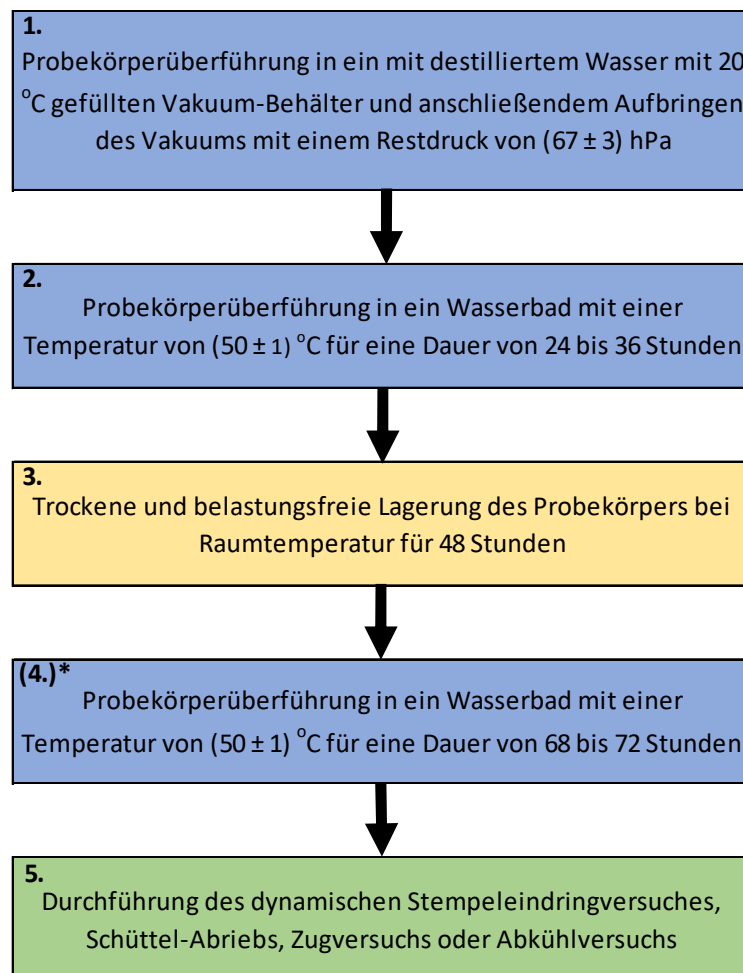


Abbildung 8-2: Neu definierte zielführende und praxisorientierte Probekörpervorbereitung (*nur bei dynamischem Stempel Eindringversuch und dauerhafter Wasserlagerung)

1. Probekörperlagerung in 20 °C warmen Wasser unter Vakuum

Nach erfolgter Raumdichtebestimmung werden die Probekörper (für den Schüttel-Abrieb und dynamischen Stempeleindringversuch je zwei Probekörper; für den Zug- und Abkühlversuch je drei Probekörper) in einen mit 20 °C temperierten Behälter mit destilliertem Wasser gegeben und in die Vakuumkammer gestellt. Dabei ist zu beachten, dass der Probekörper vollständig mit Wasser umgeben ist. Die Dauer und der Restdruck in der Vakuumkammer entsprechen dabei den Anforderungen der TP Asphalt-StB, Teil 12 [38]. Das Vakuum ist mit einem Restdruck von (67 ± 3) hPa innerhalb von (10 ± 1) Minuten aufzubringen und für eine Dauer von (30 ± 5) Minuten aufrechtzuhalten. Danach ist in der Vakuumkammer stufenweise innerhalb von 60 Minuten ein atmosphärischer Druck wieder aufzubauen.

2. Probekörperüberführung in 50 °C warmes Wasser

Nach erfolgter Temperierung aus 1. und Durchlaufen des Vakuums werden die Probekörper in ein auf 50 °C temperiertes Wasserbehälter gegeben und darin für (30 ± 6) Stunden darin belassen.

3. Trockene Probekörperlagerung bei Raumtemperatur

Die Probekörper werden nach erfolgter Wasserlagerung für 48 Stunden bei Raumtemperatur belastungsfrei und trocken gelagert.

(4.) Erneute Wasserlagerung beim dynamischen Stempeleindringversuch

Da eine Variante bei der Durchführung der Prüfung des dynamischen Stempeleindringversuches erneut auf einer Wasserlagerung (siehe Kapitel 9.1.2) des Probekörpers während der Prüfung beruht, wird bei dieser Variante der Probekörper nochmals in ein mit 50 °C temperiertes Wasserbad gegeben. Dadurch erhält der Probekörper gleich vor der Temperierung im Prüfgerät die geforderten 50 °C für die Durchführung des Stempeleindringversuches.

5. Prüfungsdurchführung

Mit Hilfe der Probekörpervorbereitung entsprechend der Punkte 1. bis 3. wurde eine Methode entwickelt, die zielführend und praxisorientiert die Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen im Asphalt anspricht. Es kann das Quellverhalten der Tonminerale abgebildet werden und wird in den zukünftigen Kapiteln dazu verwendet, um weitere

Prüfmethoden zu entwickeln, die das Gebrauchsverhalten des Walzasphaltes in Abhängigkeit der Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen abbilden können.

9. Durchführung der performance-orientierten Prüfungen an dem künstlichen Asphaltgemisch

9.1 Dynamischer Stempeleindringversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 25 A 2

9.1.1 Allgemeines

Kapitel 7 hat gezeigt, dass es mit dem Schüttel-Abriebverfahren eine Möglichkeit gibt, die Wasserempfindlichkeit von Sanden direkt am Asphalt zu prüfen. Das Gebrauchsverhalten des Walzasphaltes in Abhängigkeit der Wasserempfindlichkeit soll jedoch zukünftig auch mit weiteren Performance-Prüfungen bestimmt werden. Dafür wurden der dynamische Stempeleindringversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 25 A 2 [52] sowie Zug- und Abkühlversuche nach TP Asphalt-StB, Teil 46 A [53] ausgewählt. Mit der Auswahl dieser beiden Prüfverfahren sollen die Krafteinwirkungen durch den Einfluss von Verkehr und von tiefen Temperaturen abgedeckt werden. Nach erfolgreicher Durchführung der Prüfungen soll abschließend eine neue zielführende und praxisorientierte Prüfsystematik entwickelt werden, mit der die Performance-Eigenschaften abgebildet werden können.

Der dynamische Stempeleindringversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 25 A 2 [52] beschreibt ein Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes von Asphalt gegen bleibende Verformungen. Dabei werden zylindrische Walzasphalt-Probekörper aus einer Probeplatte, die nach TP Asphalt-StB, Teil 33 [42] hergestellt wurden, geprüft. Die im Labor hergestellten Asphalt-Probepplatten müssen bei einem Größtkorn von $D = 8 \text{ mm}$ eine Dicke von $(40 \pm 1) \text{ mm}$ aufweisen. Nach erfolgter Probekörperherstellung wird der Probekörper in das Prüfgerät gelegt. Je Prüfreihe sind gemäß TP Asphalt-StB, Teil 25 A 2 [52] zwei Probekörper zu prüfen. Dabei werden die Probekörper in einer Wärmekammer für eine Dauer von mindestens 2,5 Stunden auf eine Temperatur von $(50 \pm 0,3) \text{ °C}$ temperiert und anschließend geprüft. Für die Lasteinleitung in den Asphalt-Probekörper wird ein kreisförmiger Stempel (siehe Abbildung 9-1) verwendet. Die genauen Prüfbedingungen sind in TP Asphalt-StB, Teil 25 A 2 [52] zu finden.

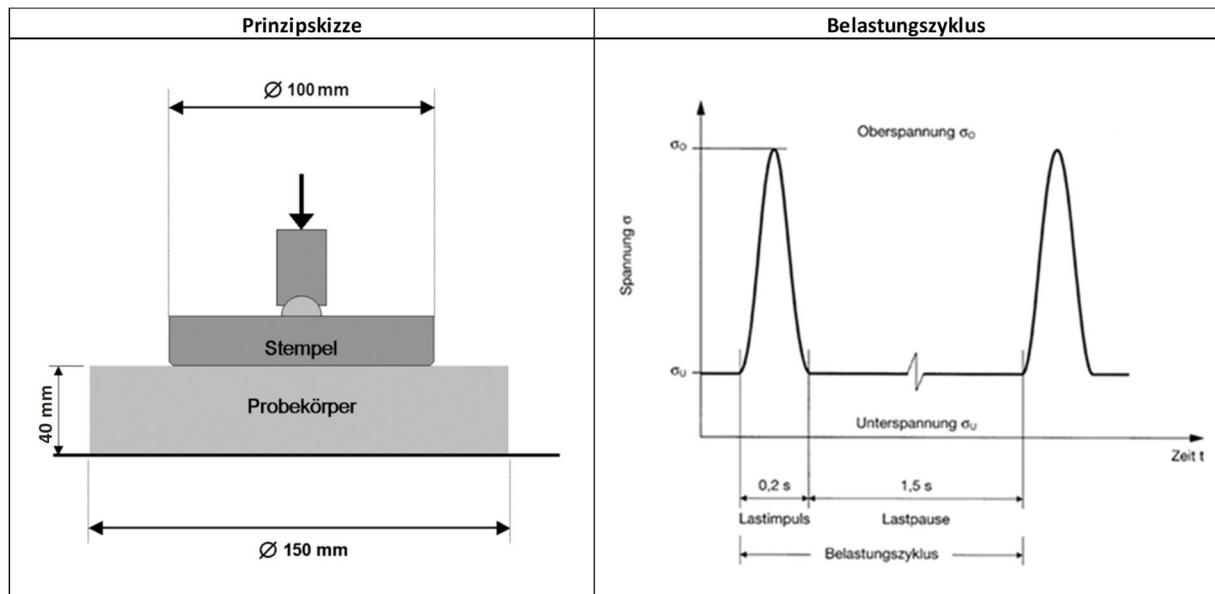


Abbildung 9-1: Prinzipskizze (links) und Belastungszyklus des dynamischen Stempeleindringversuches nach [52]

Nach erfolgter haversinen-impulsförmigen Druck-Schwellbelastung wird der Versuch nach 10.000 Belastungszyklen oder nach einer Verformung von 5 mm (Stempeleindringtiefe) je nachdem, welches Kriterium zuerst auftritt, abgebrochen. Als Ergebnis erhält man die absolute Verformung in mm und einen Dehnungsverlauf über die 10.000 Belastungszyklen. Für die Interpretation der Ergebnisse kann dabei Abbildung 9-2 hergenommen werden, die nach [60] typische Dehnungsverläufe bei Walzasphalt-Probekörpern darstellt.

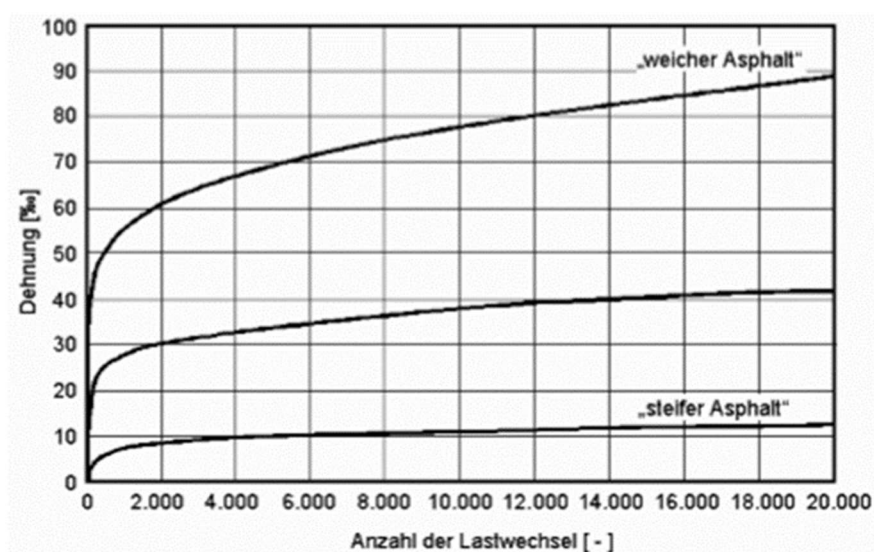


Abbildung 9-2: Typische Dehnungsverläufe des dynamischen Stempeleindringversuches [60]

Bereits in [32] wurden drei unterschiedliche Durchführungsvarianten des dynamischen Stempeleindringversuchs definiert. Dabei wurde eine standardisierte Versuchsdurchführung nach TP Asphalt-StB, Teil 25 A 2 [52], ein geschliffener Probekörper sowie eine Versuchsdurchführung mit einem eingespannten Probekörper ausgeführt und näher untersucht. Dabei wurde ermittelt, dass die Unterschiede bei Verwendung eines Polymermodifiziertem Bindemittel gering sind. Bei Verwendung eines Straßenbaubitumens stellte es sich jedoch heraus, dass bis zu einer Recycling-Quote von 50 M.-% insbesondere die standardisierte Methode am geeignetsten ist, um die Ergebnisse der bleibenden Verformungen darstellen zu können [32]. Da im Rahmen dieser Arbeit auch ein Straßenbaubitumen bei der Herstellung des Asphaltmischgutes verwendet wird, wurde die standardisierte Variante für die weitergehenden Untersuchungen ausgewählt.

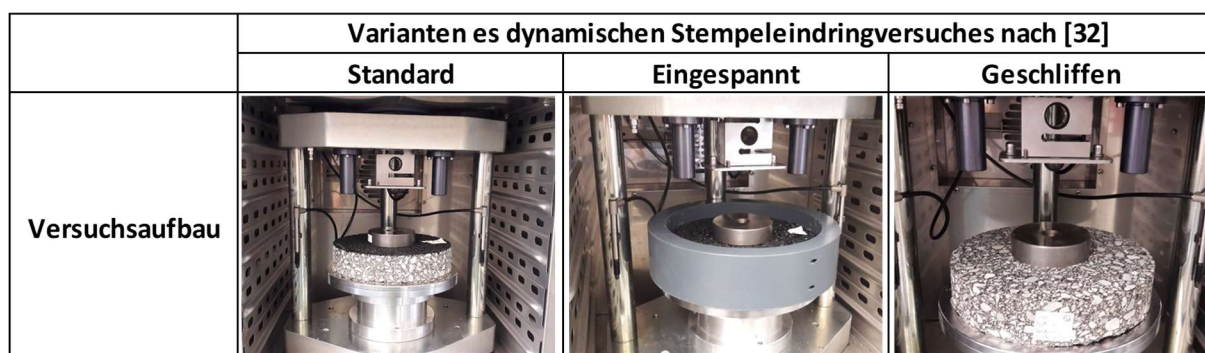


Abbildung 9-3: Varianten des Stempeleindringversuchs nach [32]

9.1.2 Entwicklung der neuen Prüfungsmöglichkeiten

Nachdem die zielführende Probekörpervorbereitung anhand der in Kapitel 7 durchgeführten Prüfungen in Kapitel 8 festgelegt werden konnte, muss versuchstechnisch ermittelt werden, welche Prüfungsmöglichkeiten geeignet sind, um das Gebrauchsverhalten des Walzasphaltes anhand der dynamischen Performance-Prüfung „Dynamischer Stempeleindringversuch“ bestmöglich darstellen zu können. Da dies in Abhängigkeit der Wasserempfindlichkeit der feinen Gesteinskörnung erfolgen soll, musste die Prüfung so modifiziert werden, dass bei einer Prüfmöglichkeit auch bei Wassersättigung des Probekörpers eine Prüfung möglich ist. Dazu wurden im Rahmen dieser Arbeit weitere drei verschiedene neue Prüfungsvarianten (siehe Abbildung 9-4) untersucht.

Die erste Variante entspricht der standardisierten Variante aus Kapitel 9.1.1. Da eine Möglichkeit gefunden werden musste, den Probekörper auch während der Prüfung dauerhaft in Wasser lagern zu können, wurde eine Schale mit Innendurchmesser 220 mm hergestellt, um den Probekörper in die mit Wasser gefüllten Schale zu geben. Dafür wurde das Wasser aus der Vortemperierung des Probekörpers genommen, um eine konstante Temperatur von $(50 \pm 0,3)$ °C halten zu können. Schritt 1 bis 3 aus Kapitel 8 wird dadurch um einen 4. Schritt ergänzt. Auch die Schale wurde bereits vorab der Prüfung für 2,5 Stunden in der Wärmekammer des dynamischen Stempelleindringversuches gestellt und vortemperiert, um kein Temperaturgefälle des Wassers und der Innentemperatur der Wärmekammer entstehen zu lassen. Dadurch konnte eine dauerhafte Wassersättigung des Probekörpers gewährleistet werden, die gleichzeitig eine dauerhafte Quellung der Tonminerale ermöglicht sowie ein zu starkes Austrocknen bzw. den Entzug von Wasser verhindert.

Abschließend wurde der Probekörper ohne Wasser in die Schale gelegt und ebenfalls geprüft, um ausschließen zu können, dass es durch die Schale zu Schwingungen kommt und dadurch die Dehnung infolge der Lasteinwirkung des Stempels reduziert wird. In der folgenden Abbildung ist die Versuchsanordnung dargestellt.



Abbildung 9-4: Varianten des Stempelleindringversuches zur Prüfung der Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen

9.1.3 Untersuchungsergebnisse

Nach erfolgter Probekörpervorbereitung entsprechend der neu entwickelten Vorgehensweise in Kapitel 8 wurden je Prüfungsvariante aus Abbildung 9-4 zwei Probekörper gemäß TP Asphalt-StB, Teil 25 A 2 [52] geprüft. Die dazugehörigen Einzel-Ergebnisse sind in Anhang I zu finden. Im Folgenden wird nach den verschiedenen Varianten im Stempelleindringversuch sowie den

einzelnen Probekörpern unterschieden. Aus diesem Grund wird jede Probennummer in den folgenden Kapiteln um die Probekörpernummer (z.B. P8) zur Unterscheidung ergänzt.

Begonnen wurde mit der Untersuchung der standardisierten Prüfmethode. Dabei stellte sich heraus, dass bei der 0-Variante die maximale Eindringtiefe des Stempels von 5 mm nicht erreicht wurde. Der Probekörper „0-Variante - Standard - P8“ weist nach 10.000 Belastungszyklen eine Dehnung von 3,15 mm auf (siehe Abbildung 9-6 und Tabelle 9-1). Im Gegensatz zur 0-Variante erreicht ein Probekörper mit dem künstlichen Gemisch („KG-Variante - Standard - P1) bereits nach 4079 Belastungszyklen das Abbruchkriterium von 5 mm Eindringtiefe. Da es bei diesem Probekörper zu einem Versagen der Gesamtkonstruktion (siehe auch Abbildung 9-6) gekommen ist, muss zukünftig für weitergehende Analysen die berechnete dynamischen Eindringtiefe bei 10.000 Belastungszyklen verwendet werden. Der zweite Probekörper würde bei weiteren Belastungszyklen versagen, da bei der gelben Linie in Abbildung 9-6 eine Erhöhung der Steigung der Kurve ab ca. 8500 Impulsen ersichtlich und bereits erste Risse im Asphaltprobekörper zu finden sind (siehe Abbildung 9-5). Das zeigt, dass durch die Zugabe der Tonminerale der Widerstand gegen bleibende Verformungen verringert wurde. Nachdem es jedoch bei der KG-Variante zu Ungleichmäßigkeiten bzgl. des Versagens gekommen ist (Vergleich zwischen Kurve gelb und grau) wurde eine weitere Probe (KG-Variante - Standard - P11) untersucht. Auch diese Variante kann die 10.000 Belastungszyklen nicht erreichen. Der Probekörper ist bei 9434 Belastungszyklen gebrochen. Das beweist, dass die KG-Variante einen verminderten Widerstand gegen bleibende Verformungen besitzt.



Abbildung 9-5: Fotodokumentation der ersten Anzeichen des Versagens des Probekörpers

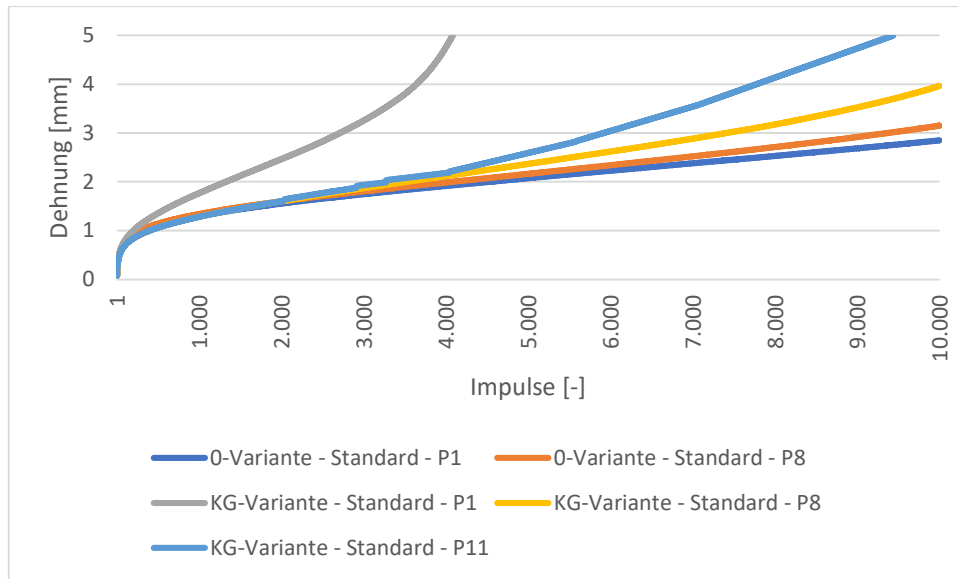


Abbildung 9-6: Ergebnisse der Variante "Standard" des dynamischen Stempelindringversuches

Um wie beim Schüttel-Abriebverfahren ausschließen zu können, dass eine dauerhafte Wassersättigung des Probekörpers eine deutlichere Reduzierung der Widerstandsfähigkeit gegen bleibende Verformungen verursacht, wurde die Untersuchungsvariante „Wassergesättigt“ näher untersucht. Die Ergebnisse (siehe Abbildung 9-7 und Tabelle 9-1) verdeutlichen, dass die absolute Dehnung im Vergleich zur standardisierten Prüfmethode auf einem deutlich niedrigeren Wertenniveau liegt. Bei der 0-Variante ist eine maximale Stempel Eindringtiefe von 2,02 mm zu erkennen. Auch bei der Variante mit den Tonmineralen ist eine deutliche Reduzierung des Wertenniveaus im Vergleich zur standardisierten Methode aufgetreten. So weist die Probe „KG-Variante - Wassergesättigt - P7“ mit 2,01 mm die höchste Eindringtiefe auf. Vergleicht man die Kurven der Künstlichen Gemisch-Varianten mit den Varianten ohne Tonminerale so sind lediglich geringe Unterschiede zu erkennen. Dies wird auch an den Eindringtiefen nach 10.000 Belastungszyklen ersichtlich. Diese sind beinahe identisch. Daraus wird gefolgert, dass eine dauerhafte Wassersättigung nicht zielführend ist, um das Gebrauchsverhalten des Walzasphaltes abbilden zu können. Dies bestätigt die Ergebnisse des Schüttel-Abriebverfahrens. Zurückzuführen ist das erneut auf eine fehlende Reduktionsmöglichkeit der Quellung der Tonminerale nach der Wassersättigung und den damit einhergehenden gefüllten Hohlräumen im Asphaltmörtelgefüge.

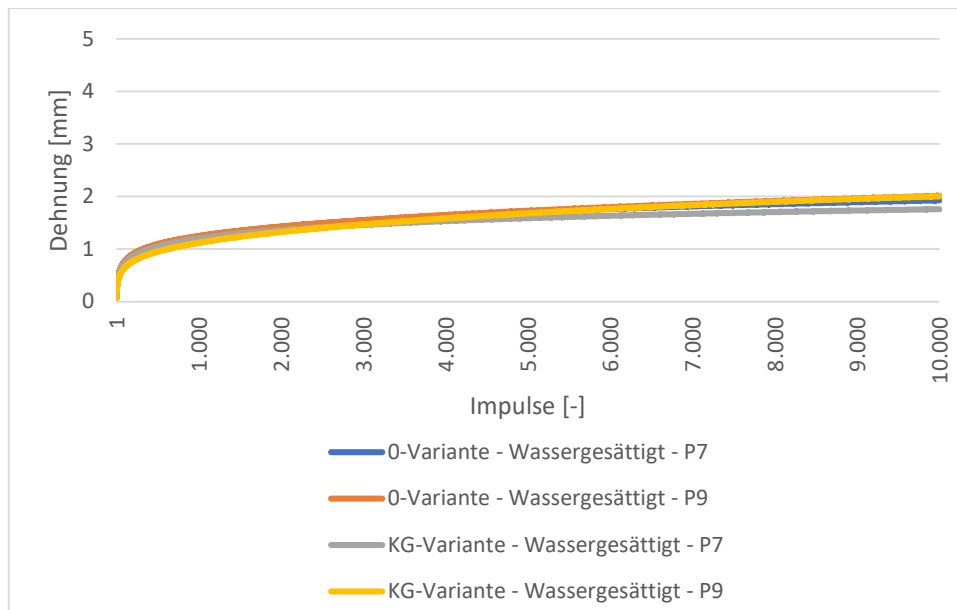


Abbildung 9-7: Ergebnisse der Variante „Wassergesättigt“ des dynamischen Stempel Eindringversuches

Zusätzlich wurde die Variante mit Schale jedoch ohne temperiertem Wasser entwickelt, um den Einfluss der Schale (siehe Abbildung 9-4) herauszufinden. Auch hier ist erneut ein niedrigeres Wertenniveau zu erkennen (siehe Abbildung 9-8 und Tabelle 9-1). Ein Unterschied zwischen den Kurven der 0-Varianten und der KG-Varianten ist lediglich in geringem Ausmaß zu erkennen. Die größte absolute Eindringtiefe ist bei der 0-Variante mit 2,10 mm zu verzeichnen, bei den Varianten mit den Tonmineralen weisen beide Probekörper dieselbe absolute Eindringtiefe von 1,94 mm auf.

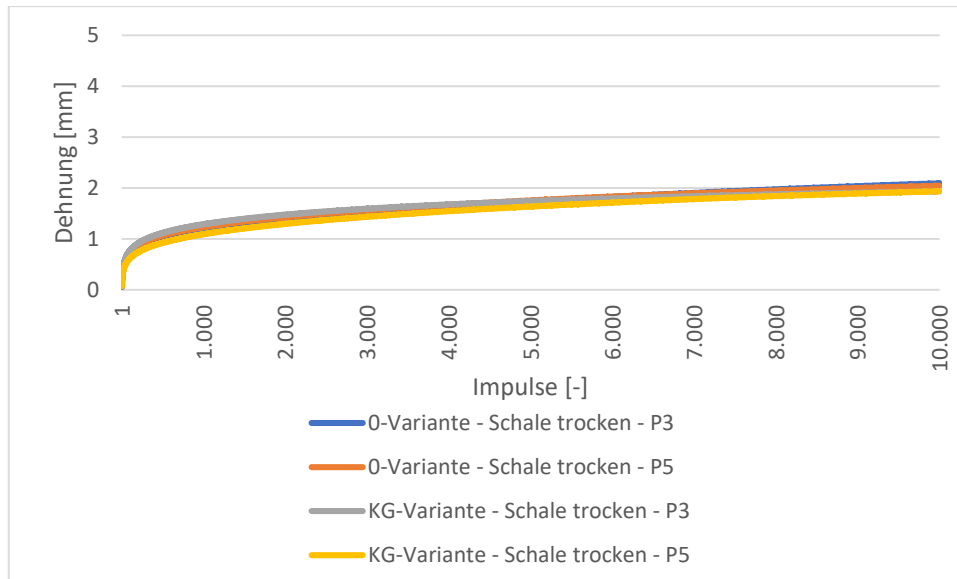


Abbildung 9-8: Ergebnisse der Variante "in Schale trocken" des dynamischen Stempelindringversuches

Abschließend wurde die Enddehnung des Probekörpers ins Verhältnis zur Probekörperhöhe gesetzt, um die Dehnung in Promille zu erhalten und einen Vergleich zu Abbildung 9-2 herstellen zu können. Die Ergebnisse (siehe Tabelle 9-1 und Abbildung 9-9) zeigen eindeutig, dass die standardisierte Variante die größte Dehnung sowohl bei der 0-Variante als auch bei der KG-Variante aufweist. Beide Varianten entfallen nach [60] in die Kategorie eines „weichen Asphaltes“. Sowohl bei der wassergesättigten Variante als auch bei der Variante „Trocken in Schale“ sind lediglich geringe Unterschiede zwischen dem künstlichen Gemisch und der 0-Variante zu erkennen. Alle geprüften Probekörper dieser beiden Untersuchungsvariante können der Kategorie eines „normalen“ Asphaltes gegen bleibende Verformungen zugeordnet werden.

Tabelle 9-1: Auswertung des dynamischen Stempelindringversuches

Standard

Variante	Dehnung [mm]					
	P1	P8	P11	Mittelwert	StabW	VarK
0-Variante	2,85	3,15		3,00	0,212	7,1%
KG-Variante	5,57	3,97	5,130	4,89	0,827	16,9%

Variante	Dehnung [‰]					
	P1	P8	P11	Mittelwert	StabW	VarK
0-Variante	69,51	76,83		73,17	5,174	7,1%
KG-Variante	142,82	101,79	131,20	125,27	21,146	16,9%

Wassergesättigt

Variante	Dehnung [mm]					
	P7	P9		Mittelwert	StabW	VarK
0-Variante	2,02	1,93		1,98	0,064	3,2%
KG-Variante	2,01	1,76		1,89	0,177	9,4%

Variante	Dehnung [‰]					
	P7	P9		Mittelwert	StabW	VarK
0-Variante	50,50	48,25		49,38	1,591	3,2%
KG-Variante	50,25	42,93		46,59	5,178	11,1%

Trocken in Schale

Variante	Dehnung [mm]					
	P3	P5		Mittelwert	StabW	VarK
0-Variante	2,10	2,05		2,08	0,035	1,7%
KG-Variante	1,94	1,94		1,94	0,000	0,0%

Variante	Dehnung [‰]					
	P3	P5		Mittelwert	StabW	VarK
0-Variante	52,50	50,00		51,25	1,768	3,4%
KG-Variante	48,50	49,74		49,12	0,877	1,8%

Folglich kann konstatiert werden, dass sich für die Abbildung des Gebrauchsverhaltens von Asphalt hinsichtlich der Widerstandsfähigkeit gegen bleibende Verformungen gezeigt hat, dass die standardisierte Variante nach TP Asphalt-StB, Teil 25 A 2 [52] die zielführendste Variante ist.

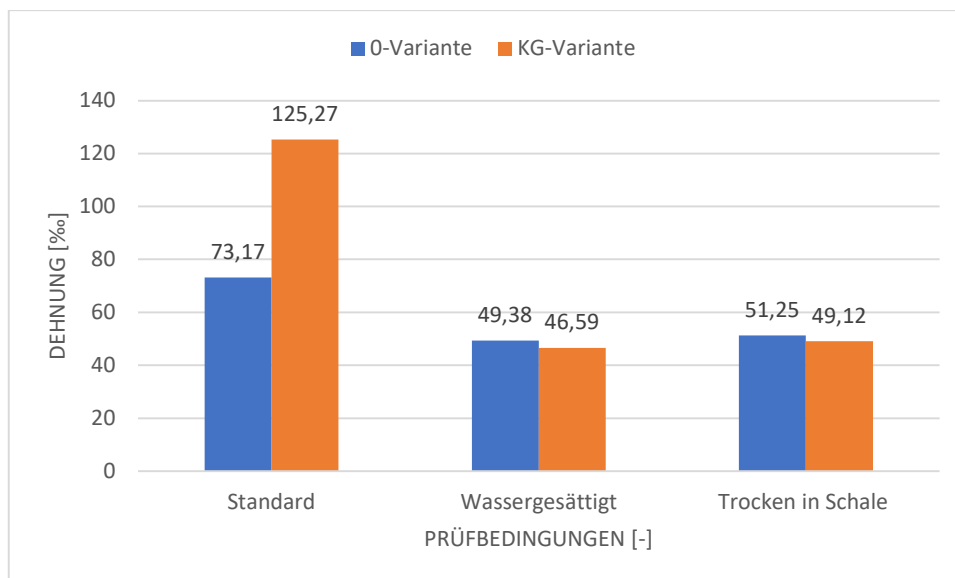
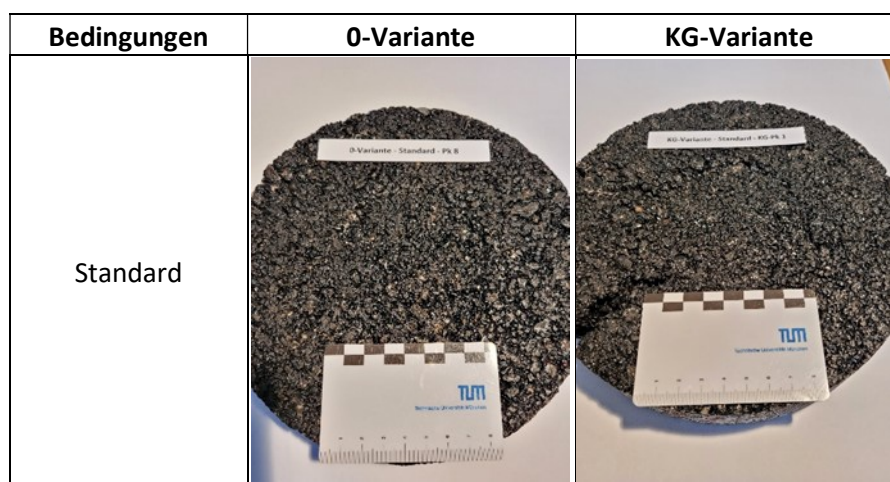


Abbildung 9-9: Ergebnisse der Gesamtauswertung der Dehnung in [%]

Auch die optische Analyse der Probekörper (siehe Abbildung 9-10) verdeutlicht, dass die Probekörper der standardisierten Prüfmethode die größte Stempeleindringtiefe besitzen. Ein optischer Unterschied zwischen den Varianten „Wassergesättigt,“ und „Trocken in Schale“ ist nicht zu erkennen. Auch Risse oder andere Zerstörungen an den Probekörpern sind bei diesen Varianten – anders als bei der Variante „Standard“ – nicht zu verzeichnen. Weitere Fotos und Einzelauswertungen sind in Anhang J zu finden.



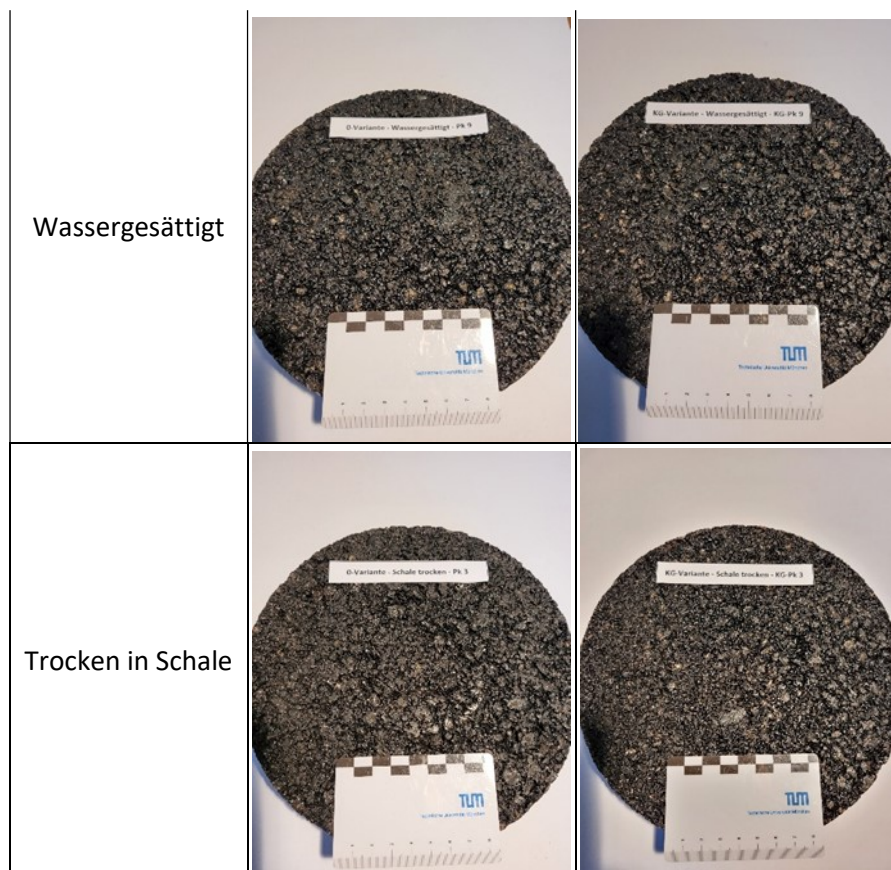


Abbildung 9-10: Fotodokumentation einiger Probekörper nach der Prüfung des dynamischen Stempel Eindringversuches (restliche Fotodokumentation in Anhang J)

Einen Zusammenhang zwischen den Ergebnissen des Schüttel-Abriebverfahrens und dem dynamischen Stempel Eindringversuch zeigt sich ebenfalls nur an der standardisierten Untersuchungsvariante (siehe Abbildung 9-11). Bei dieser Variante steigt sowohl die absolute Dehnung als auch die Dehnung bezogen auf die Probekörperhöhe mit zunehmendem Schüttel-Abrieb. Die Varianten „Wassergesättigt“ und „Trocken in Schale“ zeigen nur geringe Unterschiede zwischen der KG- und 0-Variante auf und sind deswegen nicht geeignet zur Bestimmung der Eigenschaften der quellfähigen Tonminerale im Asphaltprobekörper.

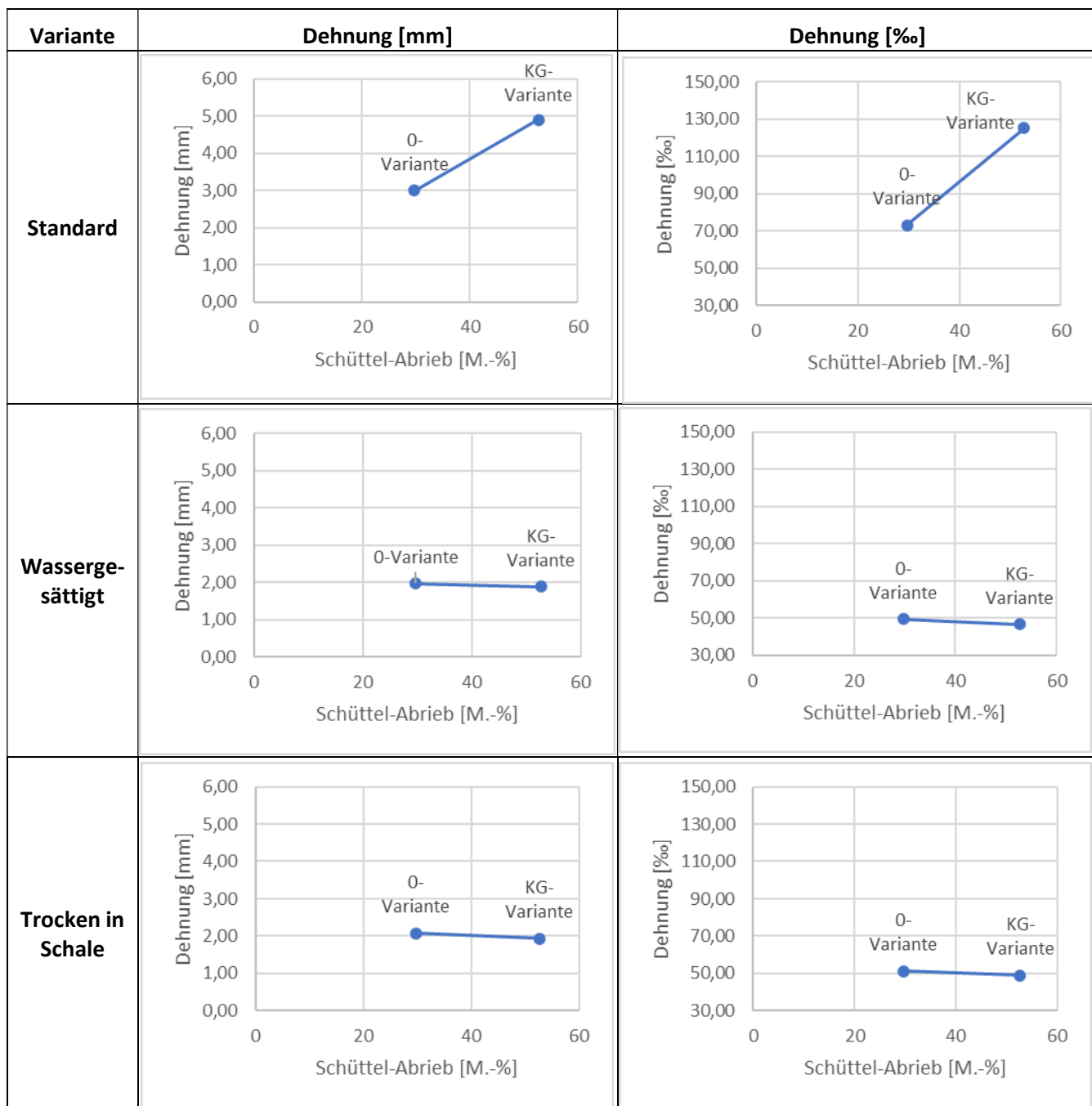


Abbildung 9-11: Dehnung in Abhängigkeit des Schüttel-Abriebs am Marshall-Probekörper

9.2 Kälteverhalten – Einaxialer Zugversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 46 A

9.2.1 Allgemeines

Da bereits die Simulation des Verkehrs im hohen Temperaturbereich mit Hilfe der Untersuchungen im dynamischen Stempelindringversuch untersucht wurde, wird in diesem Kapitel auf die Untersuchungen mittels Zugversuche im niedrigen Temperaturbereich näher eingegangen. Dafür wird auf den einaxialen Zugversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 46 A [53] zurückgegriffen. Diese technische Prüfvorschrift basiert auf den DIN EN 12697-46 [62]. Dabei beschreibt der einaxiale Zugversuch ein Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes von Asphalt gegen kälteinduzierte Rissbildung.

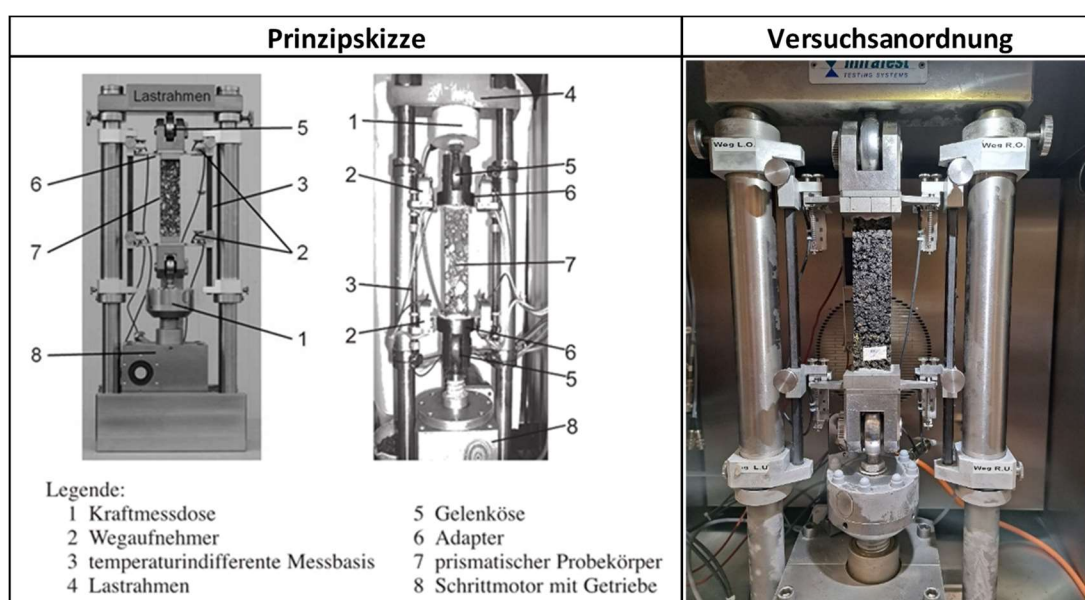


Abbildung 9-12: Prüfeinrichtung des einaxialen Zugversuches nach [53]

Für jedes Asphaltmischgut werden mindestens drei prismatische Asphalt-Probekörper gemäß TP Asphalt-StB, Teil 46 A [53] geprüft. Diese Probekörper werden aus Asphalt-Probepplatten gewonnen, die mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät hergestellt wurden. Für die AC 8 D S 50/70 Asphaltdeckschicht, die im Rahmen dieser Untersuchungen als Asphaltmischgut verwendet wird, müssen die Asphalt-Probekörper die Abmessungen (40 ± 2) mm x (40 ± 2) mm x (160 ± 2) mm aufweisen. Die Probekörper sind aus der Mitte der Platte auszusägen und müssen mindestens einen Abstand von 20 mm zum Rand der Asphalt-Probepplatte besitzen. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass die Längsachse des prismatischen Asphalt-Probekörpers

quer zur Walzrichtung liegt. Nach dem Ausschneiden der Probekörper wird die Raumdichte durch Ausmessen nach TP Asphalt-StB, Teil 6 [58] bestimmt. Die Lagerung der Asphalt-Probekörper vor der Prüfung weicht jedoch von der Vorschrift nach TP Asphalt-StB, Teil 46 A [53] ab. In dieser Arbeit erfolgt die Lagerung nach Abbildung 8-2. Dadurch ergeben sich ebenfalls Unterschiede bei der Bestimmung der Abmessungen nach TP Asphalt-StB, Teil 29 [63]. Im Rahmen dieser Untersuchungen werden die Abmessungen vor und nach der Wasserlagerung sowie nach der Trockenlagerungszeit ermittelt, um die Unterschiede infolge des Wasserzutritts feststellen zu können. Die längste Seite der Prismen ist als Länge L_0 , die kürzeren Breiten als B_0 und die Höhe als H_0 definiert.

Nach erfolgter Probekörpervorbereitung wird der Probekörper in das Prüfgerät (siehe Abbildung 9-12) eingebaut. Vor Beginn der Prüfung wird der Probekörper während der Temperierung spannungsfrei gehalten, bis er ein Temperaturnausgleichgewicht erreicht hat. Zur Untersuchung des niedrigen Temperaturgebrauchsverhaltens wurde zur Durchführung des Versuches die Prüftemperatur von -10 °C ausgewählt. Anhand von Erfahrungsberichten konnte für die Untersuchungen dieser Arbeit eine Temperierdauer von 150 Minuten festgelegt werden, bis das eingebaute Asphalt-Prisma die Zieltemperatur von $(-10 \pm 0,1)\text{ °C}$ erreicht hat. Nach Abschluss der Temperierung wird der einaxiale Zugversuch gestartet. Dabei wird der Asphalt-Probekörper mit einer konstanten Dehngeschwindigkeit bis zum Bruch auseinandergezogen. Anschließend kann die Zugfestigkeit $\beta_t(T)$ und die Bruchdehnung $\epsilon_F(T)$ bestimmt werden. Diese berechnen sich anhand folgender Formeln [53]:

- Zugfestigkeit $\beta_t(T) = \frac{F_{Max}}{B_0 \cdot H_0} \text{ [MPa]} \quad (3)$

- Bruchdehnung $\epsilon_F(T) = \frac{(L_F - L_0)}{L_0} \text{ [‰]} \quad (4)$

Mit:

F_{Max} = Maximale Zugkraft während des Zugversuches [N]

B_0, H_0 = Abmessungen des Probekörpers vor der Prüfung [mm]

L_0 = Probekörperlänge bei Versuchsbeginn [mm]

L_F = Probekörperlänge bei Auftreten des Zugkraftmaximums [mm]

Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt anhand der Orientierungswerte nach [64]. Dieser Orientierungswert für die Zugfestigkeit bei einer Temperatur von -10 °C wird für Asphaltbetondeckschichten mit $\geq 4,0\text{ MPa}$ festgesetzt. Die Bruchdehnung mit $\geq 0,4\text{ ‰}$.

9.2.2 Untersuchungsergebnisse

Analog zu den Untersuchungen der Stempeleindringversuche muss nach erfolgter Probekörpervorbereitung entsprechend Abbildung 8-2 wieder zwischen den Untersuchungen an den künstlichen Gemischen (KG-Variante) und der 0-Variante unterschieden werden. Sowohl für die 0-Variante als auch die KG-Varianten wurden die Prüfungen an drei unterschiedlichen Probekörpern bei einer Prüftemperatur von -10 °C durchgeführt. Diese werden in den folgenden Auswertungen als P4 bis P6 bezeichnet.

Tabelle 9-2: Auswertung einaxialer Zugversuch

Variante	Zugfestigkeit [MPa]					
	P4	P5	P6	Mittelwert	StabW	VarK
0-Variante	4,032	4,168	4,065	4,088	0,071	1,7%
KG-Variante	3,348	3,038	3,795	3,394	0,381	11,2%
Variante	Bruchdehnung [‰]					
	P4	P5	P6	Mittelwert	StabW	VarK
0-Variante	12,671	14,014	13,784	13,490	0,718	5,3%
KG-Variante	18,099	18,450	17,059	17,869	0,723	4,0%

Die Untersuchungsergebnisse der 0-Variante zeigen, dass die Probekörper hinsichtlich Zugfestigkeit und Bruchdehnung alle auf einem annähernd gleichen Wertenniveau liegen. Die Zugfestigkeit der drei 0-Varianten-Probekörper erreicht im Mittel einen Wert von $4,088\text{ MPa}$. Der Mittelwert der Bruchdehnung liegt bei $13,490\text{ ‰}$. Die Zugfestigkeit der KG-Varianten-Probekörper erreicht im Mittel einen Wert von $3,394\text{ MPa}$, eine Bruchdehnung von $17,869\text{ ‰}$. Zur Ergänzung sind in folgender Tabelle auch die maximalen Zugkräfte der 0-Variante und der KG-Variante gegenübergestellt.

Tabelle 9-3: Auswertung einaxialer Zugversuch nach F_{Max}

Variante	Maximale Zugkraft F_{max} [kN]					
	P4	P5	P6	Mittelwert	StabW	VarK
0-Variante	6,531	6,802	6,732	6,688	0,141	2,1%
KG-Variante	5,369	4,800	6,056	5,408	0,629	11,6%

Die Ergebnisse in Tabelle 9-3 zeigen, dass sich die maximale Zugkraft der KG-Variante auf einem niedrigeren Niveau befindet als die Ergebnisse der 0-Variante. Weiter kann man erkennen, dass die 0-Variante eine bessere Gleichmäßigkeit bei den Messergebnissen aufweist als die KG-Variante. Das wird an der geringeren Varianz ersichtlich.

Die Ergebnisse der KG-Variante weisen im Vergleich zur 0-Variante eine um ca. 0,7 MPa verringerte Zugfestigkeit infolge der Verwendung eines wasserempfindlichen Sandes. Des Weiteren erreicht die KG-Variante (3,393 MPa) im Gegensatz zur 0-Variante (4,088 MPa) den Orientierungswert von 4,0 MPa für die Zugfestigkeiten bei Asphaltbetondeckschicht nach [64] nicht. Insbesondere auch bei der Bruchdehnung sind Unterschiede aufgetreten. So weist die 0-Variante im Mittel noch eine Bruchdehnung von 13,490 %, wohingegen die Bruchdehnung der KG-Variante 17,869 % beträgt. Es kam somit zu einem Unterschied von 4,379 %. Abbildung 9-13 zeigt diesen Unterschied zusätzlich grafisch auf.

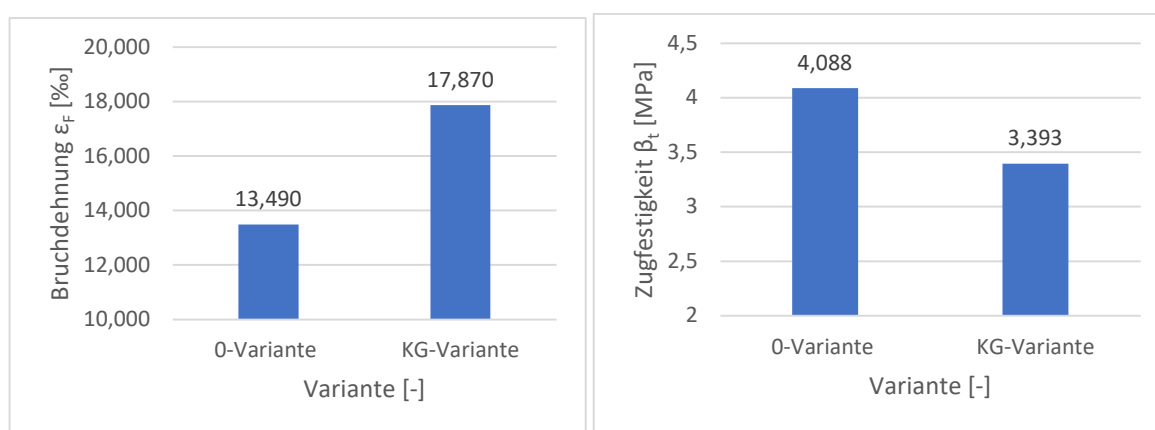


Abbildung 9-13: Gesamtauswertung Bruchdehnung und Zugfestigkeit der 0- und KG-Variante

Auch eine Abhängigkeit zwischen Schüttel-Abrieb am Marshall-Probekörper der Variante A3 und 48 h Trockenlagerungszeit nach Kapitel 7.4 ist in Abbildung 9-14 zu erkennen. So ist die KG-Variante mit einem schlechten Schüttel-Abrieb auch bei der Zugfestigkeit und bei der Bruchdehnung schlechter als die 0-Variante.

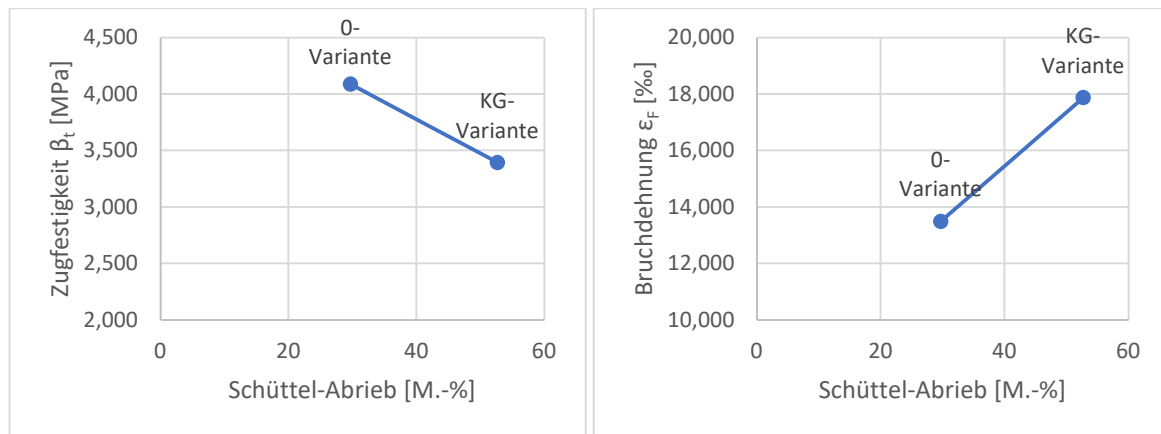


Abbildung 9-14: Zugfestigkeit und Bruchdehnung in Abhängigkeit des Schüttel-Abriebs am Marshall-Probekörper

Anhand der Ergebnisse wird somit verdeutlicht, dass der einaxiale Zugversuch geeignet ist, die Folgen des Einsatzes eines wasserempfindlichen Sandes auf Gebrauchsverhalten des Walzasphaltes abzubilden. Bei Untersuchungen bzgl. der in den Probekörper enthaltenen Restfeuchten stellte sich heraus, dass diese ebenfalls keinen Einfluss auf das Ergebnis des einaxialen Zugversuches besitzen, da diese sich sowohl bei der KG-Variante als auch bei der 0-Variante auf einem annähernd konstanten Wertenniveau von 1,4 M.-% befindet (siehe Anhang K).

9.3 Kälteverhalten – Abkühlversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 46 A

9.3.1 Allgemeines

Zum einaxialen Zugversuch können des Weiteren Abkühlversuche nach TP Asphalt-StB, Teil 46 A [53] zur Beschreibung der Kälteeigenschaften des Asphaltes herangezogen werden. Dabei wird ein Probekörper während der Prüfung bei konstanter Länge gehalten und einer Temperaturabsenkung mit konstanter Abkühlgeschwindigkeit ausgesetzt. Aufgrund des verhinderten thermischen Schrumpfung werden kryogene Spannungen im Probekörper induziert.

Wie bei den Untersuchungen im einaxialen Zugversuch wurden erneut drei Probekörper der KG-Variante sowie drei der 0-Variante geprüft. Der Einbau sowie die Probekörpervorbereitung erfolgte analog zu den Untersuchungen im einaxialen Zugversuch. Diese Probekörper wurden so lange einer konstanten Temperaturabsenkung unterzogen, bis es zum Versagen kommt.

Anschließend erhält man den Verlauf der kryogenen Spannungen in Abhängigkeit der Temperatur $\sigma_{\text{cry}}(T)$ sowie die Bruchspannung σ_F bei der Bruchtemperatur T_F .

Die Bewertung erfolgt anhand der Orientierungswerte nach [64]. Dabei muss zwischen verschiedenen Frosteinwirkungszonen nach der RStO 12 [1] unterschieden werden. Im Rahmen dieser Untersuchungen wird von einer Frosteinwirkungzone II für den Standort „München“ ausgegangen. Dabei wird ein Orientierungswert für die Bruchtemperatur von $\leq -20\text{ °C}$ für eine Asphaltbetondeckschicht angegeben.

9.3.2 Untersuchungsergebnisse

Abbildung 9-15 zeigt den Verlauf der kryogenen Spannungen in Abhängigkeit der Probekörpertemperatur. Anhand dieser Probekörpertemperatur kann auch die Bruchtemperatur ermittelt werden. Drei Probekörper (P1, P2 und P3) wurden dabei geprüft. Man erkennt, dass es zu Unterschieden zwischen den Probekörpern bekommen ist. So beträgt die Bruchtemperatur von P1 beispielsweise $-26,6\text{ °C}$, die von P3 jedoch lediglich $-6,1\text{ °C}$. Dabei entsteht eine Differenz von $20,5\text{ °C}$. Nach [53] dürfen die Ergebnisse nicht um mehr als 2 °C voneinander abweichen, wenn es sich um denselben Prüfer und demselben Prüfgerät handelt. Beides war bei allen Untersuchungen gegeben, sodass die Ergebnisse nicht dem vorgeschriebenen Orientierungswert entsprechen.

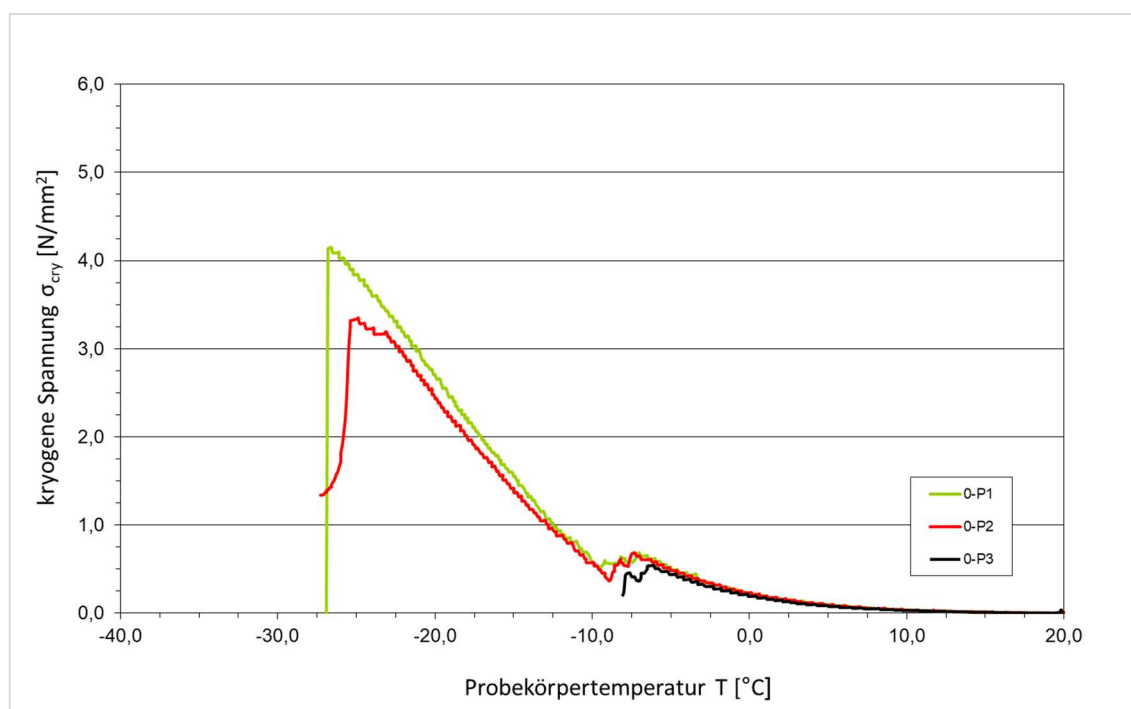


Abbildung 9-15: Spannungsverlauf in Abhängigkeit der Probekörpertemperatur der 0-Variante

Der Orientierungswert von -20 °C nach [64] ist bei Probekörper 1 und 2 überschritten. Probekörper 3 entspricht mit einem Wert von $-6,1\text{ °C}$ nicht den Anforderungen von [64]. Da die Ergebnisse der 0-Variante insbesondere durch Probekörper P3 nicht zusammenpassen wurde dieser eliminiert. Die statische Auswertung zeigt dadurch, dass die Varianz deutlich reduziert werden kann. Daraus kann gefolgert werden, dass die Ergebnisse innerhalb einer Variante gut zusammenpassen. Anhand des gebildeten Mittelwerts wird ersichtlich, dass die Bruchtemperatur von 0- und KG-Variante eng beieinander liegen und lediglich um $0,485\text{ °C}$ unterscheiden.

Tabelle 9-4: Auswertung der Bruchtemperatur im Abkühlversuch

Variante	Bruchtemperatur T_F [°C]					
	P1	P2	P3	Mittelwert	StabW	VarK
0-Variante	-26,600	-24,900		-25,750	1,202	-4,7%
KG-Variante	-28,400	-26,504	-23,800	-26,235	2,312	-8,8%

Die Untersuchungen der KG-Variante zeigen, dass alle drei Probekörper den Orientierungswert von -20 °C überschreiten. Mit Ausnahme von P3 sind alle Prüfergebnisse auf einem annähernd konstantem Wertenniveau, sodass es nicht zu einer Verschlechterung des Gebrauchsverhalten infolge der Zugabe eines wasserempfindlichen Sandes gekommen ist.

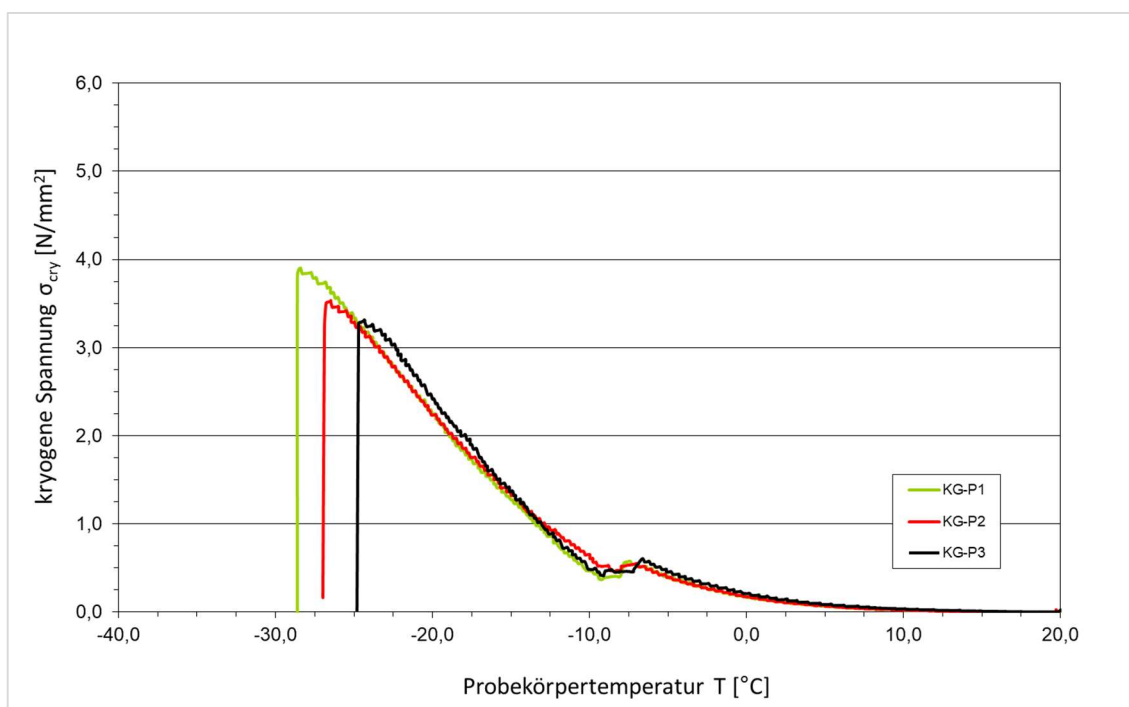


Abbildung 9-16: Spannungsverlauf in Abhängigkeit der Probekörpertemperatur der KG-Variante

Auffällig ist, dass sowohl die 0-Variante als auch die KG-Variante bei ca. -6 °C ein Absenken der kryogenen Spannung erfährt, wie Abbildung 9-15 und 9-16 zeigt. Anschließend kommt es erneut zu einem Anstieg. Eine zusätzliche Prüfung an Probekörpern ohne vorheriger Probekörpervorbereitung nach Abbildung 8-2 beweist, dass beim Abkühlversuch die Restfeuchte doch (anders als beim einaxialen Zugversuch) einen entscheidenden Einfluss auf die kryogene Spannung besitzt (siehe Abbildung 9-17). So bricht beispielsweise die 0-Variante bereits bei $-6,1\text{ °C}$ bei der Variante mit der Probekörpervorbereitung, bei einer Prüfung ohne festgelegter Probekörpervorbereitung kommt es zu keinem Absenken der kryogenen Spannung.

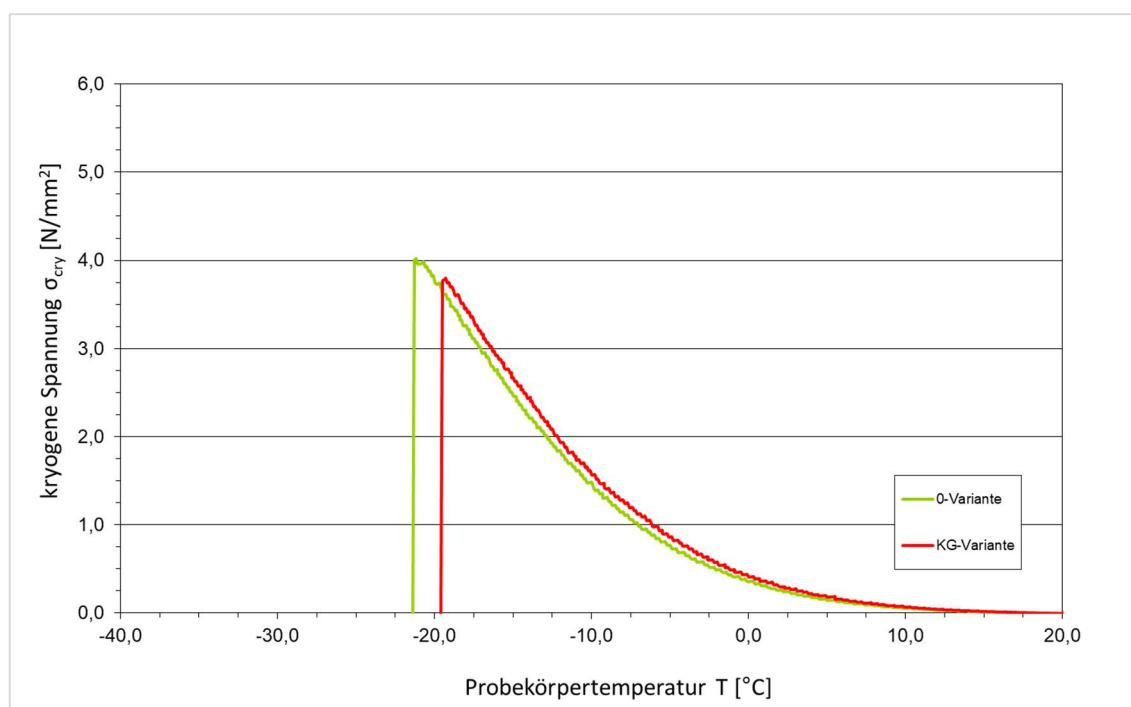


Abbildung 9-17: Spannungsverlauf von 0- und KG-Variante ohne Probekörpervorbereitung nach Abbildung 8-2

Anhand dieser Untersuchungsergebnisse der 0- und KG-Variante kann aus diesem Grund daraus geschlossen werden, dass der Abkühlversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 46 A [53] nicht geeignet ist, das Gebrauchsverhalten des Asphaltes im tiefen Temperaturbereich infolge wasserempfindlicher Sande abzubilden.

10. Erstellung einer neuen Prüfungssystematik

Entsprechend der Ergebnisse der Performance-Untersuchungen kann festgestellt werden, dass die Qualität der feinen Gesteinskörnungen und hier insbesondere die Wasserempfindlichkeit einen entscheidenden Einfluss auf das Gebrauchsverhalten des Asphaltes hat. Sowohl mit dem dynamischen Stempeleindringversuch als auch mit dem einaxialen Zugversuch konnte nachgewiesen werden, dass die Reduzierung der Dauerhaftigkeit mit beiden Verfahren abgebildet werden kann. Die beste Differenzierungsmöglichkeit bietet entsprechend der Voruntersuchungen an 0- und KG-Variante der einaxiale Zugversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 46 A [53]. Hier kam es zu einem Abfallen der Zugfestigkeit infolge der Zugabe der Tonminerale zum Sand und der damit verbundenen höheren Wasserempfindlichkeit des Sandes. Die Ergebnisse wiesen eine hohe Gleichmäßigkeit im Vergleich zum dynamischen Stempeleindringversuch (siehe Abbildung 9-6 und Tabelle 9-2) auf. Außerdem überzeugte der einaxiale Zugversuch mit seiner einfachen und schnellen Durchführung der Prüfungen und wird aus diesem Grund für die weitergehenden Untersuchungen an verschiedenen feinen Gesteinskörnungen ausgewählt.

Die Probekörpervorbereitung und -lagerung erfolgte nach Abbildung 8-2. Ein beispielhafter Ablaufplan in Tabelle 10-1 zeigt eine Prüfmöglichkeit. Drei Tage vor der Prüfung können vier bis fünf Probekörper vorbereitet werden. Dabei beginnt man mit der Temperierung der Probekörper. Nach 24 bis 36 Stunden in einem Wasserbad mit 50 °C werden die Probekörper der Trockenlagerungszeit von 48 Stunden zugeführt. Nach den ersten 24 Stunden ist die Oberfläche des Asphalt-Prismas bereits so abgetrocknet, dass die Möglichkeit besteht, die Adapter für den einaxialen Zugversuch zu kleben. Nach weiteren 24 Stunden Trockenlagerungszeit ist zwar im Probekörper noch eine gewisse Restfeuchte, wie die Untersuchungen die Massen der Probekörper (siehe auch Anhang K) kurz vor der Prüfung belegen, jedoch kann diese vernachlässigt werden, da die Restfeuchte sowohl bei der 0-Variante als auch bei der KG-Variante konstant gleich hoch ist. Die Voruntersuchungen an Dummies belegen, dass eine Temperierzeit von 150 min ausreicht, um die Zieltemperatur von -10 °C im Probekörper zu erreichen.

Tabelle 10-1: Ablaufplan der Prüfungsmöglichkeiten im einaxialen Zugversuch mit Probekörpervorbereitung

	Prüfung am Donnerstag				
	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag
Tätigkeit	- Temperierungsbeginn Probekörper	- Temperierungs-ende - Probekörperüberführung in Trockenlagerungszeit	- Adapter an Probekörper kleben	- Prüfung einaxialer Zugversuch	- Auswertung

	Prüfung am Freitag				
	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag
Tätigkeit	- Auswertung der Vorwoche	- Temperierungsbeginn Probekörper	- Temperierungs-ende - Probekörperüberführung in Trockenlagerungszeit	- Adapter an Probekörper kleben	- Prüfung einaxialer Zugversuch

Daraus wird ersichtlich, dass pro Woche neun Probekörper geprüft werden können. Das bedeutet, dass drei verschiedene Proben vollständig untersucht werden könnten. Ob eine weitere Reduzierung der Temperierzeit unter 48 Stunden möglich ist, müssen weitergehende Untersuchungen zeigen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass mit jeder Reduzierung der Trockenlagerungszeit auch die Restfeuchte im Probekörper erhöht wird. Auch das Kleben der Adapter kann frühestens nach 24 Stunden Trockenlagerungszeit erfolgen.

11. Prüfung der Performance-Eigenschaften in Abhängigkeit von feinen Gesteinskörnungen mit unterschiedlicher Wasserempfindlichkeit

11.1 Probenauswahl

Bei der Probenauswahl der zehn feinen Gesteinskörnungen für die Schaffung eines ersten Bewertungshintergrundes in Abhängigkeit der Gesteinsart wurde deren Einsatz in der Praxis sowie den Prüfungsumfang der Eigenschaften der feinen Gesteinskörnungen anhand von Voruntersuchungen berücksichtigt. Dabei griff man auf die ausgewählten Sande aus [8] und [35] zurück, da die Eigenschaften dieser Sande umfassend bestimmt wurden. Die folgende Tabelle zeigt die ausgewählten Sande mit den dazugehörigen Schüttel-Abrieb-Werten der Serie E und Serie F.

Tabelle 11-1: Übersicht der ausgewählten feinen Gesteinskörnungen

Probe-Nr.	Gesteinsart	Schüttel-Abrieb [M.-%]	
		Serie E	Serie F
D-1	Granit	34,4	15,4
D-2	Gabbro	37,6	16,2
D-5	Rhyolith	60,9	29,7
D-11	Andesit	40,1	14,9
D-14	Basalt	51,4	27,7
D-18	Diabas	19,0	13,1
D-Q11	Kalkstein, Jura	33,5	19,6
D-20	Grauwacke	51,6	24,6
D-23	Kies gebrochen	22,4	9,1
D-Q19	Kies ungebrochen	92,4	46,5

Wie Abbildung 11-1 verdeutlicht, wurde bei der Probenauswahl insbesondere darauf geachtet, dass eine möglichst große Wertspreizung des Schüttel-Abriebs der Serie E miteinbezogen wurde. So kann mit den ausgewählten Sanden ein Wertebereich von 19,0 M.-% bis 92,4 M.-% abgedeckt werden. Ein weiterer Fokus bei der Gesteinsauswahl lag um den in [8] empfohlenen neuen Grenzwert von 35 M.-% für den Schüttel-Abrieb der Serie E. Daraus erhofft man sich neue Erkenntnisse in Bezug auf das Gebrauchsverhalten des Asphaltes insbesondere im Grenzbereich des Schüttel-Abriebs. Aus diesem Grund wurden die Proben D-Q11, D-1, D-2 und D-11 für die weitergehenden Untersuchungen ausgewählt. Die in Abbildung 11-1 mit „Q“ bezeichneten feinen Gesteinskörnungen sind aus dem Forschungsprojekt [35] herangezogen worden. Die restlichen feinen Gesteinskörnungen entsprechen den Proben aus [8]. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen werden die Probennummern der feinen Gesteinskörnungen aus [35] um ein „Q“ ergänzt.

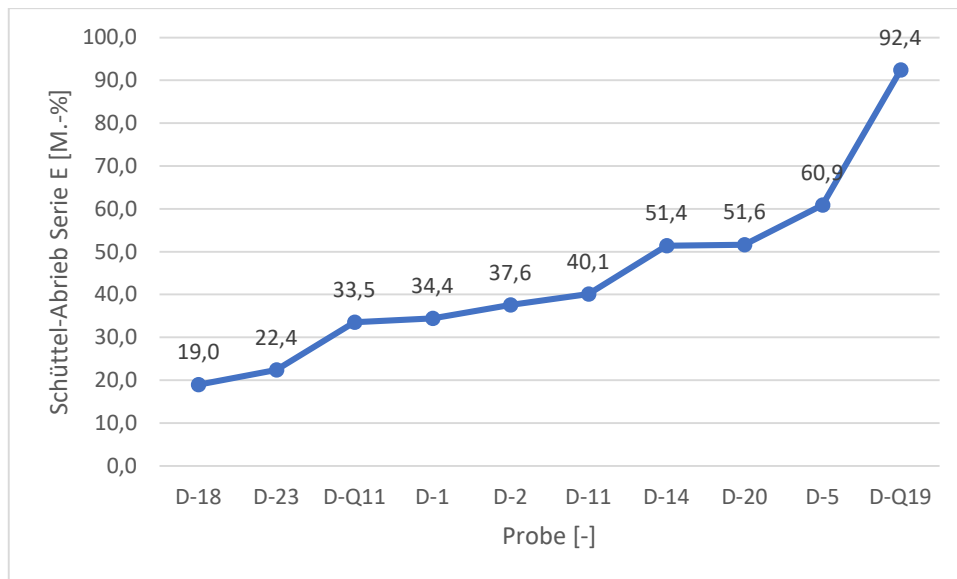


Abbildung 11-1: Schüttel-Abrieb-Werte der zehn ausgewählten feinen Gesteinskörnungen

11.2 Untersuchungsergebnisse

Nachdem die zehn feinen Gesteinskörnungen ausgewählt waren, wurden die Probekörper entsprechend der neu entwickelten Probekörpervorbereitung nach Abbildung 8-2 für die einaxiale Zugprüfung vorbereitet. Bei der Herstellung der Asphaltprobekörper wurde darauf geachtet, dass wie bei den Probekörpern der KG- und 0-Variante der Hohlraumgehalt von 6,1 Vol.-% eingestellt wurde. Das gelang über die Steuerung der Probemenge im Walzsektor-Verdichtungsgerät. Als grobe Gesteinskörnung kam erneut ein Diabas, als Fremdfüller Kalksteinmehl zum Einsatz.

Da noch keine Grenzwerte für den einaxialen Zugversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 46 A [53] definiert sind, wurde für die Auswertung der Ergebnisse wie in Kapitel 9 das Arbeitspapier Tieftemperaturverhalten von Asphalt [64] herangezogen. Hier wird ein Orientierungswert von 4,0 MPa für die Zugfestigkeit definiert.

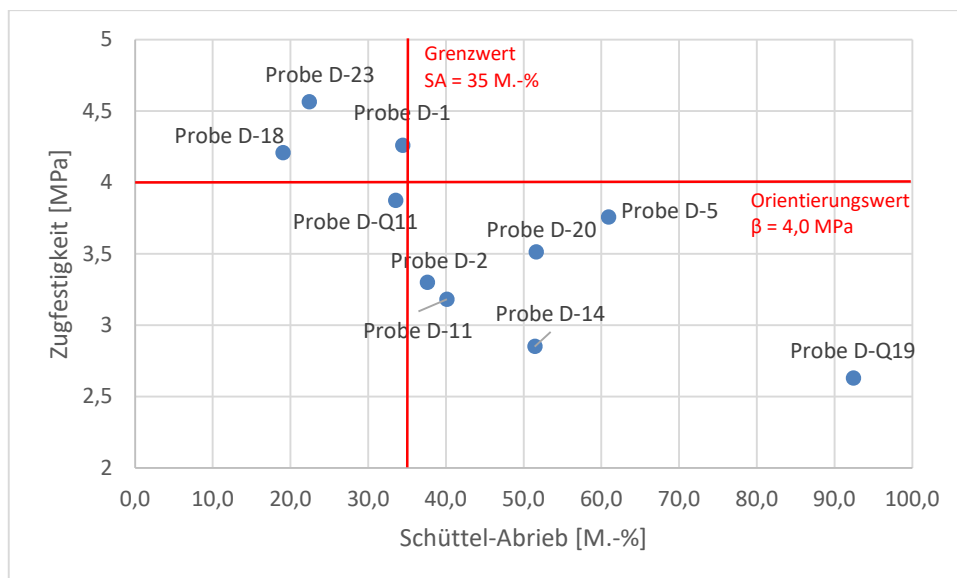


Abbildung 11-2: Auswertung der Ergebnisse des einaxialen Zugversuches mit den zehn unterschiedlichen feinen Gesteinskörnungen

In Abbildung 11-2 ist eine Zusammenfassung der Ergebnisse des einaxialen Zugversuches mit den zehn verschiedenen feinen Gesteinskörnungen in Abhängigkeit ihrer Schüttel-Abrieb-Werte dargestellt. Der Wert der Zugfestigkeit bildet sich hierbei aus dem Mittelwert von drei geprüften Probekörpern. Die Einzelauswertung aller Proben sowie die gesamte Fotodokumentation der Probekörper nach der Zugprüfung sind in Anhang L zu finden. Abbildung 11-3 zeigt beispielhaft einen Probekörper nach erfolgter Zugprüfung.



Abbildung 11-3: Probekörper der Probe D-18.2 nach erfolgter Zugprüfung

Die Ergebnisse in Abbildung 11-2 zeigen, dass eine hohe Wertspreizung erreicht wurde. Mit Probe D-Q19 wurde die geringste Zugfestigkeit von 2,630 MPa ermittelt. Die höchste Zugfestigkeit ist bei Probe D-23 mit einem Wert von 4,565 MPa festzustellen. Zusätzlich wurden in Abbildung 11-2 der neu vorgeschlagene Grenzwert für den Schüttel-Abrieb der Serie E von 35 M.-% nach [8] sowie der Orientierungswert für die Zugfestigkeit nach [64] eingezeichnet. Dabei wird ersichtlich, dass es bei Überschreitung eines Schüttel-Abrieb-Wertes von 35 M.-% zu einem Abfall der Zugfestigkeit gekommen ist. Sämtliche Proben, die diesen Grenzwert überschreiten, fallen unter den Orientierungswert der Zugfestigkeit von 4,0 MPa. Weiterhin ist erkennbar, dass es mit steigendem Schüttel-Abrieb auch zu einem Abfall der Zugfestigkeit gekommen ist. Lediglich Probe D-5 und D-20 weisen höhere Werte als Probe D-Q19, D-14, D-11 und D-2 auf.

12. Ausblick

Die Ergebnisse zeigten, dass die Wasserempfindlichkeit der feinen Gesteinskörnung einen entscheidenden Einfluss auf das Gebrauchsverhalten des Walzasphaltes besitzt. Die derzeit gültigen Richtlinien in Deutschland und Europa reichen nicht aus, um diesen schädlichen Einfluss mit Grenzwerten zu reduzieren. Anhand der Ergebnisse dieser Untersuchungsreihe sowie weitere Vorprojekte kann verdeutlicht werden, dass es mit dem Schüttel-Abriebverfahren sowie dem einaxiale Zugversuch eine Möglichkeit gibt, das Gebrauchsverhalten infolge der Wasserempfindlichkeit der feinen Gesteinskörnungen bestimmen zu können. Es gilt jedoch bei der Durchführung der Prüfungen einiges zu beachten.

Bei der Probekörperherstellung muss darauf geachtet werden, dass diese einen Hohlraumgehalt von größer 6,0 Vol.-% bei Asphaltdeckschichten besitzen. Dadurch wird eine größtmögliche Wasserzufuhr ermöglicht. Im Rahmen dieser Arbeit hat sich der Hohlraumgehalt von 6,1 Vol.-% bewährt und wird für weitergehende Untersuchungen festgelegt.

Die Probekörpervorbereitung zur Entfaltung der negativen wasserempfindlichkeitsbetreffenden Eigenschaften wie Quellung und Reduktion der enthaltenen Tonminerale stellte sich dabei als entscheidend heraus, um das Gebrauchsverhalten in Abhängigkeit der Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen beeinflussen zu können. Nach erfolgter Wassersättigung der Asphaltprobekörper muss den quellfähigen Tonmineralen die Möglichkeit gegeben werden, sich in der Trockenphase wieder in ihrer Masse zu reduzieren. Anhand der Ergebnisse dieser Untersuchungen wird eine Trockenlagerungszeit von 48 Stunden empfohlen. In dieser Zeit

müssen die Probekörper belastungsfrei bei Raumtemperatur gelagert sein. Nach 24 Stunden Trockenlagerungszeit ist die Probekörperoberfläche so weit abgetrocknet, dass die Adapter für die Prüfung der Zugfestigkeit im einaxialen Zugversuch an die Probekörper (siehe Kapitel 10) angeklebt werden können.

Der nach [8] vorgeschlagene neue Grenzwert von 35 M.-% für das Schüttel-Abriebverfahren der Serie E stellte sich auch im Rahmen dieser Untersuchungen als geeignet heraus, um die Qualität der feinen Gesteinskörnungen und damit die Qualität der Asphaltdeckschichten zu verbessern. Dieser sollte in näherer Zukunft fest in der Europäischen Norm verankert werden.

Mit Hilfe des einaxialen Zugversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 46 A [53] kann das Gebrauchsverhalten des Walzasphaltes auch im Tieftemperaturbereich bestimmt werden. Dieses Verfahren stellt eine Chance dar, die Auswirkungen wasserempfindlicher Sande direkt auf den Asphalt abzubilden. Die Prüfbedingungen bei -10 °C sind dafür geeignet, diese Auswirkungen bestmöglich darstellbar zu machen. Grenzwerte müssen jedoch noch festgelegt werden. Der Orientierungswert von 4,0 MPa aus dem Arbeitspapier nach [64] stellten sich auch im Rahmen dieser Untersuchungen als geeignet heraus und sollte fest in die Normen integriert werden.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden lediglich Asphaltdeckschichten näher betrachtet, da diese den direkten Beeinflussungen von Witterung und Belastung ausgesetzt sind. In weitergehenden Prüfungen können noch andere Asphaltmischgutsorten näher untersucht werden.

Abschließend zeigen diese Untersuchungsergebnisse, dass in der Bestimmung der Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen noch ein großes Potential vorhanden ist, um die Dauerhaftigkeit von Asphaltdeckschichten weiter zu erhöhen. Aus diesem Grund muss dafür weiter geforscht werden.

13. Zusammenfassung

Der Widerstand von Asphalt gegen Rissbildung im Tieftemperaturgebrauchsverhalten spielt zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit eine entscheidende Rolle. Schäden in der Asphaltdeckschicht entstehen dabei in den Bereichen, in denen der Asphalt durch hohe Zugspannungen beansprucht wird. Neben der hauptsächlich bei Durchbiegung unter der fahrenden Verkehrslast auftretenden mechanogenen Zugspannung werden Asphaltbefestigungen bei sinkenden Temperaturen durch

kryogene Zugspannungen beansprucht. Die aus beiden Beanspruchungen entstehenden Risse schädigen die Asphaltgesamtbefestigung erheblich.

Um den Schäden infolge der Wasserempfindlichkeit feiner Gesteinskörnungen entgegenwirken zu können und somit die Dauerhaftigkeit der Asphaltbefestigung zu erhöhen, wurde eine neue Prüfsystematik entwickelt, um die Folgen von wasserempfindlichen feinen Gesteinskörnungen auf den Asphalt prüftechnisch ermitteln zu können.

Entscheidend für die Wasserempfindlichkeit ist die Quellung der in den feinen Gesteinskörnungen enthaltenen Tonminerale. Dafür musste ein Hohlraumgehalt von 6,1 Vol.-% eingestellt werden, um eine möglichst große Wasserzufuhr zu ermöglichen. Darüber hinaus musste eine neue Probekörpervorbereitung erstellt werden, damit diese quellfähigen Tonminerale ihre schädliche Wirkung auf die Asphaltbefestigung entfalten können. Hierbei setzte man insbesondere auf eine abgestufte Trockenlagerungszeit nach Wassersättigung des Probekörper von 24 h, 48 h, 1 Wo, 2 Wo und 5 Wo. Die Effektivität der Trockenlagerungszeiten wurde mit Schüttel-Abrieb-Prüfungen am Marshall-Probekörper evaluiert. Dabei stellte sich die Trockenlagerungszeit von 48 Stunden als die am geeignetste heraus, sodass für weitergehende Untersuchungen mit Hilfe dieser eine neue zielführende Probekörpervorbereitung definiert werden konnte.

Anschließende dynamische Stempeldring-, Abkühl- und Zugversuche sollten die Auswirkungen der Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen auf die Dauerhaftigkeit des Asphaltes überprüfen. Dadurch konnte der komplette Gebrauchstemperaturbereich abgedeckt sowie verschiedene Belastungsarten untersucht werden.

Der dynamische Stempeldringversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 25 A 2 [52] wurde anhand von drei unterschiedlichen Prüfmethode untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass lediglich mit der standardisierten Prüfmethode eine vergrößerte Dehnung infolge des Einsatzes eines wasserempfindlichen Sandes aufgetreten ist. Die anderen beiden Methoden sind für die Differenzierung nicht geeignet.

Der Abkühlversuch wurde gemäß TP Asphalt-StB, Teil 46 A [53] durchgeführt. Die Untersuchungen zeigten, dass dieses Verfahren nicht geeignet ist, um die Auswirkungen der Wasserempfindlichkeit von Sanden zu bestimmen.

Die Ergebnisse der Zugversuche nach [53] dagegen weisen deutliche Unterschiede zwischen der 0-Variante und der KG-Variante auf. So sank die Zugfestigkeit durch die Zugabe des wasserempfindlichen Sandes deutlich. Durch diese Zugabe konnte der Orientierungswert nach [64] von 4,0 MPa durch die KG-Variante nicht mehr eingehalten werden. Untersuchungen bzgl. den Folgen einer noch vorhandenen Restfeuchte im Probekörper aufgrund der quellfähigen Tonminerale beweisen, dass diese keine Auswirkungen auf das Ergebnis des Zugversuches besitzen. Aus diesem Grund wurde eine neue zielführende Prüfsystematik mit der neu definierten Probekörpervorbereitung und dem einaxialen Zugversuch erstellt.

Zur Evaluierung dieser neuen Prüfsystematik wurde zusätzlich ein erster Bewertungshintergrund geschaffen. Dieser wurde mit zehn verschiedenen feinen Gesteinskörnungen durchgeführt. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass es durch die Zugabe eines wasserempfindlichen Sandes zu einer Reduzierung der Zugfestigkeit gekommen ist. Insbesondere Sande, die einen Schüttel-Abrieb von größer 35 M.-% besitzen, können den Orientierungswert von 4,0 MPa nach [64] für die Zugfestigkeit nicht erreichen. Das stellt einen weiteren Beweis für den neu vorgeschlagenen Anforderungswert von 35 M.-% für den Schüttel-Abrieb der Serie E nach [8] dar.

Parallellaufende Untersuchungen in einem Versuchsfeld (eingebaute Probepplatten mit unterschiedlichen Sanden) belegen die Ergebnisse dieser Arbeit, dass mit steigendem Schüttel-Abrieb die Auffälligkeiten wie z.B. Ausmagerungen und Kornausbrüche gestiegen sind.

Somit kann abschließend konstatiert werden, dass die Wasserempfindlichkeit feiner Gesteinskörnungen einen entscheidenden Einfluss auf das Gebrauchsverhalten von Asphalt und somit die Dauerhaftigkeit der Gesamtbefestigung besitzt. Die neu ermittelten Prüfsystematik liefert praxisgerechte und reproduzierbare Ergebnisse, sodass hiermit die Chance besteht, dauerhafte Asphalte herstellen zu können.

14. Literatur

- [1] Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 12), Ausgabe 2012, Korrekturen Juni 2020; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln – FGSV 499
- [2] Deutscher Asphaltverband e.V.: Bautechnik, Hinweise zur Asphaltbauweise; online verfügbar unter: https://www.asphalt.de/fileadmin/user_upload/technik/asphaltschichten_und_ihr_aufgaben.pdp; zuletzt geprüft am 12.11.2022
- [3] Mollenhauer, K.: Dimensionierungsrelevante Prognose des Ermüdungsverhaltens von Asphalt mittel einaxialer Zug-Schwellversuche; Dissertation; Technische Universität Braunschweig; Braunschweig 2008
- [4] Hutschenreuther, J., Wörner, Th.: Asphalt im Straßenbau. Kirschbaum Verlag GmbH; Fachverlag für Verkehr und Technik. 3. Aufl., Bonn 2017
- [5] Arand, W., Lorenzl, H.: Einfluss der Bitumenhärte auf das Ermüdungsverhalten von Asphaltbefestigungen unterschiedlicher Dicke in Abhängigkeit von der Tragfähigkeit der Unterlage, der Verkehrsbelastung und der Temperatur; Teil 2; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik; Heft 696; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen, Bonn 1995
- [6] Wistuba, M.: Vermeidung von Kälterissen in Asphaltstraßen; Straße und Verkehr, Heft 10, 2006
- [7] Lorenzl, H.: Modell zur Ermittlung der Nutzungsdauer von Fahrbahnbefestigungen aus Asphalt in Abhängigkeit der Bindemittelviskosität; Schriftenreihe des Instituts für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig, Heft 13; Braunschweig, 1996
- [8] Wörner, Th., Rogg, D., Westiner, E., Patzak, Th., Neidinger, S.: Bewertung des Einflusses der Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen auf die Mörtel Eigenschaften von Asphaltdeckschichten aus Walzasphalt. CGB, 2021
- [9] HIRSCH, V., FRIEMEL-GÖTTLICH, B.: Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontaktwinkelmessmethode; Straßenbau Heft, S. 59; Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, 2009

- [10] McBAIN, J. W., HOPKINS, D. G.: On Adhesives and Adhesive Action. The Journal of Physical Chemistry; Vol. 29, 1924
- [11] Brown, E.R., Kandhal, P.S. and Zhang, J.: Performance Testing for Hot Mix Asphalt. National Center for Asphalt Technology (NCAT), Report 2001-05, Alabama, 2001
- [12] MAJIDZADEH, K.; BROVOLD, F. N.: Special Report 98: State of the Art: Effect of Water on Bitumen -Aggregate Mixtures; HRB, National Research Council; Washington D.C.; 1968; übersetzt von Gragger; Schriftenreihe der Ilseder Schlackenverwertung Dr. Schmidt & CO. KG, Heft 11, 1971
- [13] Radenberg, M., Nytus, N., Boetcher, S.: Weiterführende Untersuchungen zur Beurteilung des Adhäsionsverhaltens zwischen Bitumen und Gestein; Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen; Heft S 116, 2017
- [14] McGennis, R.B., Kennedy, T.W. and Machmehl, R.B.: Stripping and Moisture Damage in Asphalt Mixtures; Report 253-1; Center for Transportation Research, Austin, Texas, 1984
- [15] Hicks, R.G.: NCHRP Synthesis of Highway Practice 175; Moisture Damage in Asphalt Concrete. TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1991
- [16] Diab, A., Singh, D., Pais, J. C.: Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures: A Literature Review; Conference Paper; 4th Conference of Transportation Research Group of India (CTRG), 2017
- [17] 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, Bonn, 2007
- [18] RENKEN, P.: Haftung zwischen Bitumen und Gesteinskörnungen – ein Statusbericht; Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie e.V. (ARBIT); Bitumen, Heft 1, 2003
- [19] Tarrer, A.R., Wagh, V.: The Effect of the Physical and Chemical Characteristics of the Aggregate on Bonding; Strategic Highway Research Program; National Research Council, Washington, D.C., 1991

- [20] Kiggundu, B.M., Roberts, F.L.: Stripping in HMA mixtures: State-of-the-art and critical review of test methods; Rep. No. 88-02; National Center for Asphalt Technology, Auburn Univ.; Auburn, GA., 1988
- [21] Scott, J.A.N., Adhesion and Disbonding Mechanisms of Asphalt Used in Highway Construction and Maintenance. Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 47, pp. 19-48, 1978
- [22] Fromm, H.J.: The mechanisms of asphalt stripping from aggregates surfaces; Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists; Vol. 43, pp.191-223, 1974
- [23] Moreno-Navarro, F., García-Travé, G., Del Carmen Rubio-Gámez, M., Martínez-Echevarria, M. J.: Analysis of the moisture susceptibility of hot bituminous mixes based on the comparison of two laboratory test methods; Dyna (Medellin, Colombia); Granada, 2013
- [24] Vidal, G. V., Calabi-Floody, A. Sanchez-Alonso, E.: Evaluation of the durability of asphalt mixtures depending in the physical properties of aggregates; FONDECYT INICIACION Project N° 11130723; Universidad La Frontera, Temuco, Chile, 2016
- [25] Bagampadde, U.: On investigation of stripping propensity of bituminous mixtures; Kungliga Tekniska högskolan (KTH); Department of Infrastructure and Planning; Stockholm, 2004
- [26] Bagampadde, U.: Investigations on moisture damage-related behaviour of bituminous materials; Kungliga Tekniska högskolan (KTH); Department of Infrastructure and Planning; Stockholm, 2005
- [27] DIN EN 12697-12-2018, Asphalt - Prüfverfahren - Teil 12: Bestimmung der Wasserempfindlichkeit von Asphalt-Probekörpern, Beuth Verlag
- [28] 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
- [29] Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TP Gestein-StB) Teil 6.6.3: Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen – Schüttel-

Abriebverfahren; Ausgabe 2018; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln – FGSV 610

- [30] Westiner, E.; Neidinger, S.; Wörner, Th.: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Gesteinstagung 2007; Vorträge der Tagung der Arbeitsgruppe „Gesteinskörnungen, Ungebundene Bauweisen“. Sand: Qualitätseigenschaften und Auswirkungen auf Asphalt; Göttingen, 2007
- [31] Grönninger, J., Wistuba, M.: Einfluss der feinen Gesteinskörnungen und des Asphaltmörtels auf die Gebrauchseigenschaften von Asphalt, unveröffentlichter Abschlussbericht zum Forschungsprojekt FE 06.090/2008/DGB, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen (ISBS), April 2014
- [32] Rogg, D.: Einfluss der Zugabe von Asphaltgranulat auf die mechanischen Eigenschaften des resultierenden Asphalt; Master's Thesis; Technische Universität München, München, 2018
- [33] Kugler, H.: Frostsicherheit im Straßenbau – Ein verbessertes Mineralkriterium; Dissertation am Institut für Angewandte Geologie, Univ. f. BOKU Wien; Wien, 2002
- [34] Kugler, H.; Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG): Inhalt des Angebots für das Programm DACH Kooperation Verkehrsinfrastrukturforschung. 2. Ausschreibung, 2017
- [35] Kugler, H., Wörner, Th., Westiner, E., Neidinger, S., Röthlisberger, F., Ottner, F.: 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, 2019
- [36] Grönninger, J., Wistuba, M.: Einfluss der feinen Gesteinskörnungen und des Asphaltmörtels auf die Gebrauchseigenschaften von Asphalt, unveröffentlichter Abschlussbericht zum Forschungsprojekt FE 06.090/2008/DGB, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen (ISBS), April 2014
- [37] Mollenhauer, K.: Qualitätssicherung von Asphalt ohne Lösemittel - Erarbeitung alternativer Verfahrensweisen für die Durchführung der WPK; Schlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 18942 N; Kassel, 2018

- [38] Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB) Teil 12: Wasserempfindlichkeit von Asphalt-Probekörpern; Ausgabe 2007; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; Köln – FGSV 756
- [39] Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB) Teil 30: Herstellung von Marshall-Probekörpern mit dem Marshall-Verdichtungsgerät (MVG); Ausgabe 2007; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; Köln – FGSV 756
- [40] Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB) Teil 27: Probenahme; Ausgabe 2020; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; Köln – FGSV 756
- [41] DIN EN 12697-23-2018, Asphalt - Prüfverfahren - Teil 23: Bestimmung der indirekten Zugfestigkeit von Asphalt-Probekörpern, Beuth Verlag
- [42] Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB) Teil 23: Spaltzugfestigkeit von Asphalt-Probekörpern; Ausgabe 2007; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; Köln – FGSV 756
- [43] DIN EN 933-9-2020, Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 9: Beurteilung von Feinanteilen – Methylenblau-Verfahren, Beuth Verlag
- [44] Technische Prüfvorschriften für Gestein im Straßenbau (TP Gestein-StB) Teil 4.2.2: Bestimmung des Methylenblau-Wertes; Ausgabe 2008; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; Köln – FGSV 610
- [45] DIN EN 933-8-2015: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 8: Beurteilung von Feinanteilen - Sandäquivalent-Verfahren, Beuth Verlag
- [46] Technische Prüfvorschriften für Gestein im Straßenbau (TP Gestein-StB) Teil 4.2.1: Bestimmung des Sandäquivalent-Wertes der Kornklasse 0/2 mm mit einem produkttypischen Feinanteil größer 10 M.-%; Ausgabe 2018, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; Köln – FGSB 610
- [47] Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TP Gestein-StB) Teil 6.6.3: Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen – Schüttel-

- Abriebverfahren; Ausgabe 2018; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; Köln – FGSV 610
- [48] DIN EN 932-3-2003, Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 3: Durchführung und Terminologie einer vereinfachten petrographischen Beschreibung, Beuth Verlag
- [49] Graf, K.: Prüfung der Affinität mit dem IFM-Schüttelabrieb an Marshall-Probekörper Straße und Autobahn, Heft 56, 2005
- [50] Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut (TL Asphalt-StB) für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen; Ausgabe 2007/ Fassung 2013; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln – FGSV 797
- [51] Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Ausgabe 2004, Fassung 2018 (TL Gestein-StB 04/18) Bekanntmachung des Bayerischen Staatsministeriums für Wohnen, Bau und Verkehr vom 18. März 2019, Az.49-43415-4-3
- [52] Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB) Teil 25 A2: Dynamischer Stempeldringversuch an Walzasphalt; Ausgabe 2010; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; Köln – FGSV 756
- [53] Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB) Teil 46 A: Kälteeigenschaften: Einaxialer Zugversuch und Abkühlversuch; Ausgabe 2022; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; Köln – FGSV 756
- [54] Krakow, L.: Tonmineralogie; online verfügbar unter: <https://www.dr-krakow-labor.de/geo-ceramic-labor/tonmineralogie/>; zuletzt geprüft am 12.11.2022
- [55] Geier, P., Wörner, Th., Westiner, E., Neidinger, S., Kazakova, S.: Entwicklung eines unmittelbar in die Aufbereitung integrierbaren Verfahrens zur trockenen Absonderung des Glimmers aus Granitbrechsanden. AiF e.V. Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V., 2008

- [56] Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TP Gestein-StB) Teil 3.2.2: Rohdichte; Ausgabe 2013; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; Köln – FGSV 610
- [57] Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB) Teil 8: Volumetrische Kennwerte von Asphalt-Probekörpern und Verdichtungsgrad; Ausgabe 2012; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; Köln – FGSV 756
- [58] Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB) Teil 6: Raumdichte von Asphalt-Probekörpern; Ausgabe 2021; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; Köln – FGSV 756
- [59] Leutner, R.; Lorenzl, H.; Schmoeckel, K.; u. v. m.: Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen; Heft S45, 2006
- [60] Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB) Teil 5: Rohdichte von Asphalt; Ausgabe 2013; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; Köln – FGSV 756
- [61] DIN EN ISO 13473-1: Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen - Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe (ISO 13473-1:1997); Deutsche Fassung EN ISO 13473-1:2004
- [62] DIN EN 12697-46: Widerstand gegen Kälterisse und Tieftemperaturverhalten bei einachsigen Zugversuchen; Deutsche Fassung EN 12697-46:2020
- [63] Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB) Teil 29: Maße von Asphalt-Probekörpern; Ausgabe 2021; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; Köln – FGSV 756
- [64] Arbeitspapier Tieftemperaturverhalten von Asphalt Teil 1: Zug- und Abkühlversuche; Ausgabe 2012; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; Köln – FGSV 725
- [65] Bundesministerium für Digitales und Verkehr: Interview Volker Wissing „Güterverkehr steigt um 34 %“, Volker Wissing über den Bau neuer Straßen und wie er die Klimaziele erreichen will; online verfügbar unter:

<https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/RedenUndInterviews/2023/wissing-reutlinger-general-anzeiger-30-01-2023.html>, 30.01.23; zuletzt geprüft am 18.06.23

- [66] Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB) Teil 23: Spaltzugfestigkeit von Asphalt-Probekörpern; Ausgabe 2007; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; Köln – FGSV 756
- [67] Labib, M. E.: Asphalt-aggregate interactions and mechanism for water stripping. Prep. Pap. American Chemical Society, Div. Fuel Chemistry 37 (3), 1992
- [68] Rogg, D.: Modification of the performance properties of rolled asphalt by using fine aggregates with different water sensitivities, Paper 122, 8th International Conference Bituminous Mixtures and Pavements, Thessaloniki, 2024
- [69] Rogg, D.: Modification of the performance properties of rolled asphalt by using fine aggregates with different water sensitivities, Paper ID 69, 8TH E&E Congress, Budapest, 2024.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Verhältnis Größtkorn zu Schichtdicke [2]	10
Abbildung 3-2: Superposition von kryogenen und mechanogenen Spannungen [5, 6, 7]	11
Abbildung 3-3: Gegenüberstellung der Spannweite des Schüttel-Abriebs der Serie E und F mit dem Prüfergebnis	14
Abbildung 3-4: Modellvorstellung einer Bindemittelablösung durch die Porendrucktheorie [28]	18
Abbildung 3-5: Ergebnisse des Schüttel-Abriebverfahrens der Serie E [36]	21
Abbildung 3-6: Prüfeinrichtung zur Bestimmung der Spaltzugfestigkeit [37,66]	22
Abbildung 3-7: Versuchsaufbau zur Bestimmung des MB-Wertes [8]	23
Abbildung 3-8: Sandäquivalentverfahren nach EN 933-8 [35]	24
Abbildung 3-9: Schema zur Bildung des Schüttel-Abriebs der Serie E und F	26
Abbildung 3-10: Schema des Schüttel-Abriebverfahrens nach TP Gestein-StB, Teil 6.6.3 [47]	27
Abbildung 3-11: Prüfung des Schüttel-Abriebverfahrens am Marshall- ... Probekörper [32]	28
Abbildung 4-1: Fotodokumentation der Streckenbesichtigung B 81 Heyenburg - Kroppenstedt [8]	30
Abbildung 4-2: ELAtextur-Messergebnisse mit Schüttele-Abrieb der Serie E und F [8]	30
Abbildung 4-3: Ergebnisse des Schüttel-Abriebs der Serie E ausgewählter Sande nach Hitzebeanspruchung [8]	32
Abbildung 4-4: Korrelationen zwischen den Ergebnissen des Schüttel-Abriebs am Marshall-Probekörper und am Sandasphalt-Probekörper [8]	33
Abbildung 4-5: Eingebautes Versuchsfeld 2020 [8]	35
Abbildung 4-6: Gesamtaufnahme Fotodokumentation des Versuchsfeldes (S.36 links: Ende 2021; S.36 rechts: Anfang 2023; S.37 Anfang 2024)	37

Abbildung 4-7: ELAtextur-Messergebnisse der Asphaltbeton-Probepplatten von 2020 bis 2024 (rot: Proben mit Schüttel-Abrieb-Wert der Serie E > 35 M.-%)	39
Abbildung 5-1: Vorgehensweise bei der Erstellung einer Prüfvorschrift zur Bestimmung des Gebrauchsverhaltens von Walzasphalt in Abhängigkeit von der Wasserempfindlichkeit der enthaltenen feinen Gesteinskörnungen.....	41
Abbildung 6-1: Modell des strukturellen Aufbaus der Tonminerale [54]...	45
Abbildung 6-2: Räumlicher Aufbau der verschiedenen Tonmineral-Gruppen [54]	47
Abbildung 6-3: Zusammensetzung des Sandasphaltprobekörpers bei der Serie F	54
Abbildung 6-4: Ergebnisse der Schüttel-Abrieb-Prüfung der Serie F.....	55
Abbildung 7-1: Definition der Probenummern	57
Abbildung 7-2: Probekörpertemperierung und -druckverlauf über die Zeit	61
Abbildung 7-3: Ergebnisse des Schüttel-Abriebverfahrens in Abhängigkeit der Wasserlagerungsart	63
Abbildung 7-4: Neue zielführende Probekörpertemperierung und -druckverlauf über die Zeit.....	63
Abbildung 7-5: Ergebnisse des Schüttel-Abriebverfahrens in Abhängigkeit der Trockenlagerungszeit	64
Abbildung 7-6: Schüttel-Abrieb-Ergebnisse in Abhängigkeit einer dauerhaften Wasserlagerung nach Wassersättigung	65
Abbildung 7-7: Ergebnisse des Schüttel-Abriebverfahrens am Marshall-Probekörper	66
Abbildung 7-8: Einzelauswertung der Ergebnisse der Variante A1	67
Abbildung 7-9: Einzelauswertung der Ergebnisse der Variante A2	68
Abbildung 7-10: Einzelauswertung der Ergebnisse der Variante A3	69
Abbildung 7-11: Einzelauswertung der Ergebnisse der Variante A3-WW	70

Abbildung 7-12: Vergleich der Schüttel-Abrieb-Ergebnisse zwischen der Variante A3 und der Variante A3-WW.....	71
Abbildung 7-13: Abhängigkeit des Schüttel-Abriebs der 0-Varianten vom Hohlraumgehalt und Asphaltmischgutzusammensetzung.	72
Abbildung 7-14: Abhängigkeit des Schüttel-Abriebs der KG-Varianten vom Hohlraumgehalt und Asphaltmischgutzusammensetzung.	73
Abbildung 7-15: Fotodokumentation der Probekörper nach der Schüttel-Abrieb-Prüfung mit einer Ruhezeit T2 von 48 Stunden.....	73
Abbildung 8-1: Probekörpervorbereitung nach TP Asphalt-StB, Teil 12 [38]	75
Abbildung 8-2: Neu definierte zielführende und praxisorientierte Probekörpervorbereitung (*nur bei dynamischem Stempeleindringversuch und dauerhafter Wasserlagerung)	77
Abbildung 9-1: Prinzipskizze (links) und Belastungszyklus des dynamischen Stempeleindringversuches nach [52].....	80
Abbildung 9-2: Typische Dehnungsverläufe des dynamischen Stempeleindringversuches [60].....	80
Abbildung 9-3: Varianten des Stempeleindringversuchs nach [32].....	81
Abbildung 9-4: Varianten des Stempeleindringversuches zur Prüfung der Wasserempfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen....	82
Abbildung 9-5: Fotodokumentation der ersten Anzeichen des Versagens des Probekörpers.....	83
Abbildung 9-6: Ergebnisse der Variante "Standard" des dynamischen Stempeleindringversuches.....	84
Abbildung 9-7: Ergebnisse der Variante „Wassergesättigt“ des dynamischen Stempeleindringversuches.....	85
Abbildung 9-8: Ergebnisse der Variante "in Schale trocken" des dynamischen Stempeleindringversuches.....	86
Abbildung 9-9: Ergebnisse der Gesamtauswertung der Dehnung in [%]...	88

Abbildung 9-10: Fotodokumentation einiger Probekörper nach der Prüfung des dynamischen Stempeleindringversuches (restliche Fotodokumentation in Anhang J)	89
Abbildung 9-11: Dehnung in Abhängigkeit des Schüttel-Abriebs am Marshall-Probekörper	90
Abbildung 9-12: Prüfeinrichtung des einaxialen Zugversuches nach [53].	91
Abbildung 9-13: Gesamtauswertung Bruchdehnung und Zugfestigkeit der 0- und KG-Variante	94
Abbildung 9-14: Zugfestigkeit und Bruchdehnung in Abhängigkeit des Schüttel-Abriebs am Marshall-Probekörper	95
Abbildung 9-15: Spannungsverlauf in Abhängigkeit der Probekörpertemperatur der 0-Variante	96
Abbildung 9-16: Spannungsverlauf in Abhängigkeit der Probekörpertemperatur der KG-Variante	97
Abbildung 9-17: Spannungsverlauf von 0- und KG-Variante ohne Probekörpervorbereitung nach Abbildung 8-2	98
Abbildung 11-1: Schüttel-Abrieb-Werte der zehn ausgewählten feinen Gesteinskörnungen	102
Abbildung 11-2: Auswertung der Ergebnisse des einaxialen Zugversuches mit den zehn unterschiedlichen feinen Gesteinskörnungen.....	103
Abbildung 11-3: Probekörper der Probe D-18.2 nach erfolgter Zugprüfung	103

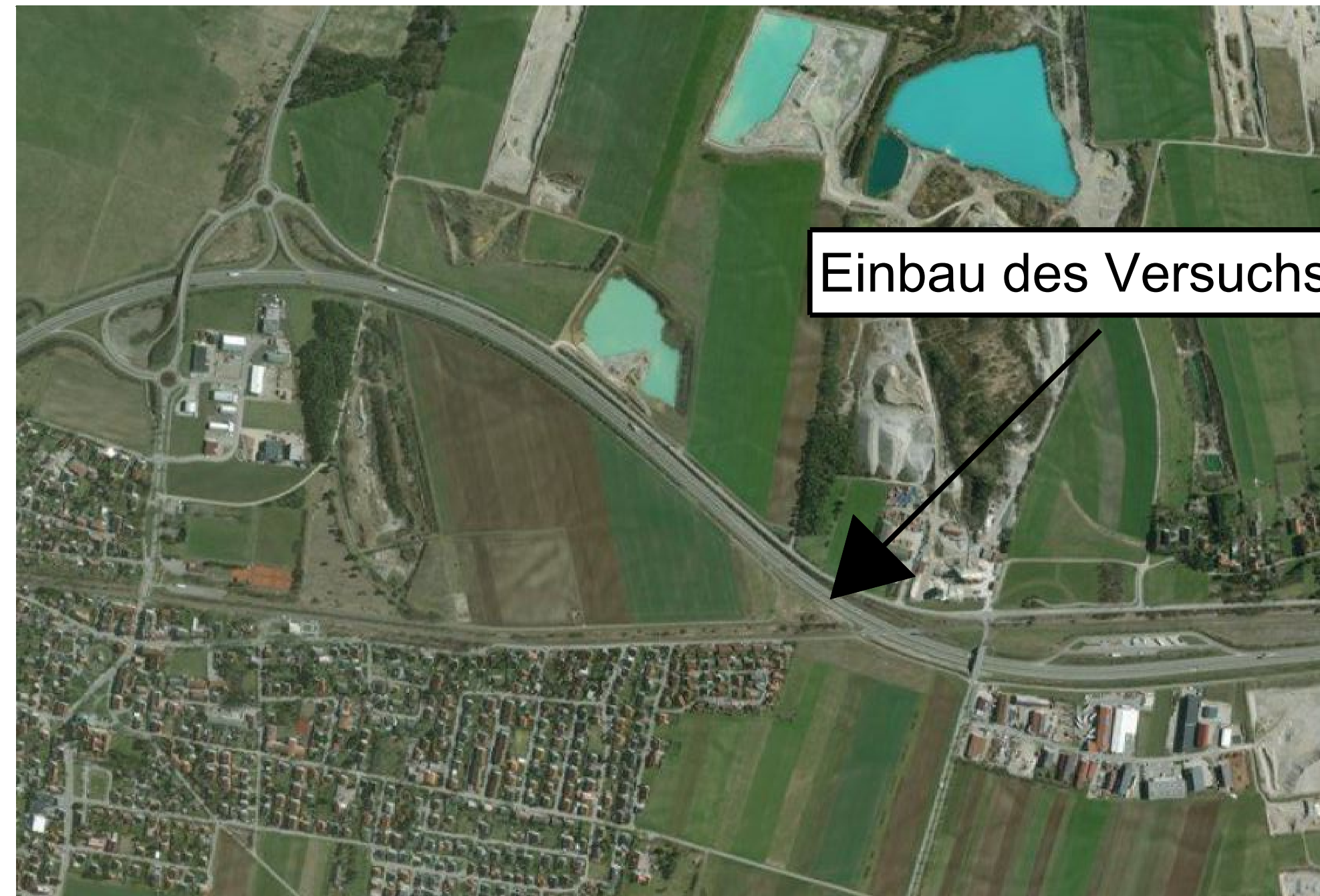
Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Adhäsionsmodelle [9]	16
Tabelle 3-2: Einflussgrößen auf das Haftverhalten [13]	19
Tabelle 5-1: Ausgewählte Sande für die Langzeituntersuchungen im Versuchsfeld [8]	34
Tabelle 5-2: Auswahl Fotodokumentation des eingebauten Versuchsfeldes	38
Tabelle 6-1: Beziehungen zwischen Korngröße, spezifische Oberfläche und Ionen- Austauschkapazität der wichtigsten Tonmineral-Gruppen [28]	46
Tabelle 6-2: Geochemische Analyse der Tonminerale	51
Tabelle 6-3: Mineralogische Analyse der Tonminerale	53
Tabelle 7-1: Zusammensetzung der unterschiedlichen Asphaltmischgutvarianten	59
Tabelle 7-2: Wasserlagerungsart der Probekörper	62
Tabelle 9-1: Auswertung dynamischer Stempelindringversuch.....	87
Tabelle 9-2: Auswertung einaxialer Zugversuch	93
Tabelle 9-3: Auswertung einaxialer Zugversuch nach F_{Max}	93
Tabelle 9-4: Auswertung der Bruchtemperatur im Abkühlversuch	97
Tabelle 10-1: Ablaufplan der Prüfungsmöglichkeiten im einaxialen Zugversuch mit Probekörpervorbereitung	100
Tabelle 11-1: Übersicht der ausgewählten feinen Gesteinskörnungen	101



Anhang

- Anhang A: Lageplan des Versuchsfeldes
- Anhang B: Fotodokumentation des Versuchsfeldes
- Anhang C: Datenblätter der verwendeten Tonminerale
- Anhang D: Rohdichten der feinen Gesteinskörnungen
- Anhang E: Tabelle des Schüttel-Abriebs der Sandasphaltprobekörper
- Anhang F: Einzelauswertung des Schüttel-Abriebs der 0-/ KG-Varianten
- Anhang G: Diagramm der Schüttel-Abrieb-Ergebnisse der 0-/ KG-Varianten
- Anhang H: Fotodokumentation der Schüttel-Abrieb-Probekörper nach der Prüfung
- Anhang I: Einzelergebnisse des dynamischen Stempeleindringversuches
- Anhang J: Fotodokumentation des dynamischen Stempeleindringversuches
- Anhang K: Auswertung Restfeuchte der 0-/ KG-Variante
- Anhang L: Auswertung und Fotodokumentation der Zugversuche feine Gesteinskörnungen
- Anhang M: Auswertung Restfeuchte






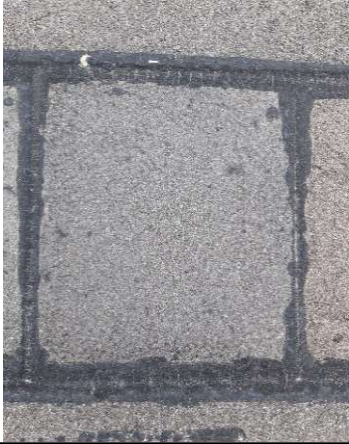










Probe 2 Asphalt- beton	Probe 3 Asphalt- beton	Probe 5 Asphalt- beton	Probe 6 Asphalt- beton	Probe 8 Asphalt- beton	Probe 11 Asphalt- beton	Probe 12 Asphalt- beton	Probe 13 Asphalt- beton	Probe 17 Asphalt- beton	Probe 18 Asphalt- beton	Probe 22 Asphalt- beton	Probe 25 Asphalt- beton	Probe 27 Asphalt- beton	Probe 34 Asphalt- beton	Probe 36 Asphalt- beton	Probe 2 Splitt- mastix- asphalt	Probe 3 Splitt- mastix- asphalt	Probe 5 Splitt- mastix- asphalt	Probe 11 Splitt- mastix- asphalt	Probe 12 Splitt- mastix- asphalt	Probe 13 Splitt- mastix- asphalt	Probe 17 Splitt- mastix- asphalt	Probe 22 Splitt- mastix- asphalt	Probe 34 Splitt- mastix- asphalt	Probe 25 Splitt- mastix- asphalt
------------------------------	------------------------------	------------------------------	------------------------------	------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	------------------------------------------	------------------------------------------	------------------------------------------	-------------------------------------------	-------------------------------------------	-------------------------------------------	-------------------------------------------	-------------------------------------------	-------------------------------------------	-------------------------------------------



Einbau des Versuchsfeldes

 Technische Universität München cbm - Centrum Baustoffe und Materialprüfung Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen	Unterlage Nr. Blatt Nr. 001 Reg. Nr.		
	Datum	Zeichen	
PROJEKT Bewertung des Einflusses der Wasser- empfindlichkeit von feinen Gesteinskörnungen auf die Mörtel Eigenschaften von Asphaltdeckschichten aus Walzasphalt	bearbeitet	12.11.2020	Schmid L.
	gezeichnet	12.11.2020	
	geprüft	12.11.2020	
Lageplan			
Auftraggeber  Bundesanstalt für Straßenwesen Brüderstraße 53 51427 Bergisch Gladbach			
Inhalt Lageplan für Einbau des Versuchsfeldes			

Anhang B

















Probe	Gesteinsart	Schüttel-Abrieb [M.-%]		Okt 20	Sep 21	Jan 23	Jan 24
		Serie E	Serie F				
AC -VV Probe 2	Gabbro	37,6	16,2				
AC -VV Probe 3	Gabbro	30,2	12,6				
AC -VV Probe 5	Rhyolith	60,9	29,7				
AC -VV Probe 6	Rhyolith	26,2	19,9				










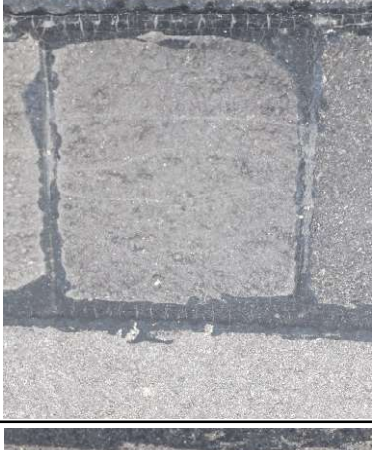






AC -VV Probe 8	Andesit	27,7	13,9				
AC -VV Probe 11	Andesit	40,1	14,9				
AC -VV Probe 12	Andesit	63,8	34,3				
AC -VV Probe 13	Basalt	37,7	25,9				






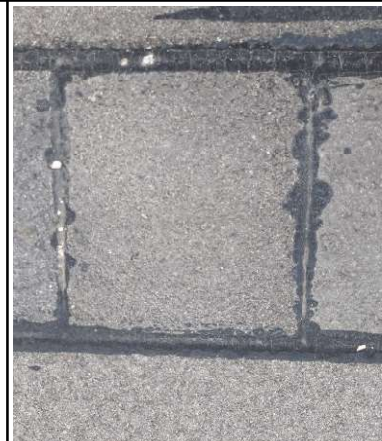


AC -VV Probe 17	Diabas	41,7	20,1				
AC -VV Probe 18	Diabas	19,0	13,1				
AC -VV Probe 20	Grauwacke	51,6	24,6				
AC -VV Probe 22	Quarzit	31,8	15,6				

AC -VV Probe 24	Moräne/ Kies	18,3	12,5				
AC -VV Probe 28	Chloridgneis	37,7	19,2				
AC -VV Probe 30	Rhyolith	30,2	15,9				

Anhang B-1: Fotodokumentation Versuchsfeld, Probepplatten aus Asphaltbeton

Probe	Gesteinsart	Schüttel-Abrieb [M.-%]		Okt 20	Sep 21	Jan 23	Jan 24
		Serie E	Serie F				
SMA -VV Probe 2	Gabbro	37,6	16,2				
SMA -VV Probe 3	Gabbro	30,2	12,6				
SMA -VV Probe 5	Rhyolith	60,9	29,7				
SMA -VV Probe 11	Andesit	40,1	14,9				

SMA -VV Probe 12	Andesit	63,8	34,3				
SMA -VV Probe 13	Basalt	37,7	25,9				
SMA -VV Probe 17	Diabas	41,7	20,1				
SMA -VV Probe 20	Grauwacke	51,6	24,6				

SMA -VV Probe 22	Quarzit	31,8	15,6				
SMA -VV Probe 28	Chloridgneis	37,7	19,2				

Anhang B-2: Fotodokumentation Versuchsfeld, Probeplatten aus Splittmastixasphalt

Anhang C

Kalzium-Naturbentonit - B316

Chemische Analyse	SiO ₂	43,4 %
	Al ₂ O ₃	17,5 %
	TiO ₂	3,6 %
	Fe ₂ O ₃	17,8 %
	CaO	2,7 %
	MgO	2,7 %
	K ₂ O	0,5 %
	Na ₂ O	0,0 %
	MnO	0,5 %
	SO ₃	< 0,0075 %
Mineralanalyse	Kaolinit	2 %
	Illit	5 %
	Quarz	11 %
	Montomorillonit/ Smektit	76 %
	Feldspat	6 %
	Fe-Ti	0 %
Sedimentationsanalyse	< 250 µm	100,0 %
	< 63 µm	99,5 %
	< 20 µm	93,0 %
	< 2 µm	51,0 %
Weitere Daten		
Feuchtigkeit		ca. 5 %
Schüttgewicht		650 g/l
Quellvermögen		5 ml/2g
Gründruck		10 N/cm ²
Nasszug		0,2 N/cm ²
Salzgehalt		0,3 g/l
Wasseraufnahme (Enslin)		160 %
pH-Wert		5,5
Kationenaustauschkapazität		76 mval/100g
Elektrische Leitfähigkeit		0,020 mS/cm
Farbe		beige-braun
Lieferform	Pulver oder Granulat 0-10mm	
Verpackung	lose/ Big-Bag à 1to/ 25kg-Säcke	

Anhang C-1: Datenblatt Kalzium-Naturbentonit

Kaolin T240

Chemische Analyse		
SiO ₂		47,5 %
Al ₂ O ₃		36,5 %
TiO ₂		1,1 %
Fe ₂ O ₃		0,5 %
CaO		0,0 %
MgO		0,1 %
K ₂ O		0,9 %
Na ₂ O		0,1 %
Glühverlust		12,7 %

Mineralanalyse		
Kaolinit		87 %
Illit		5 %
Quarz		4 %
Feldspat		4 %
Fe-Ti		1 %

Sedimentationsanalyse		
< 63 µm		98,0 %
< 20 µm		95,0 %
< 2 µm		65,0 %
< 1 µm		51,0 µm
D50		1,0 µm

Weitere Daten		
Feuchtigkeit		<1 %
Dichte		2,6 g/cm ³
Schüttdichte		0,40 g/cm ³
pH-Wert		7-8
Spezifische Oberfläche		12 m ² /g
Weißgrad (ungebrannt) (D65, Minolta CR-400)		89
Brennfarbe		hellweiß

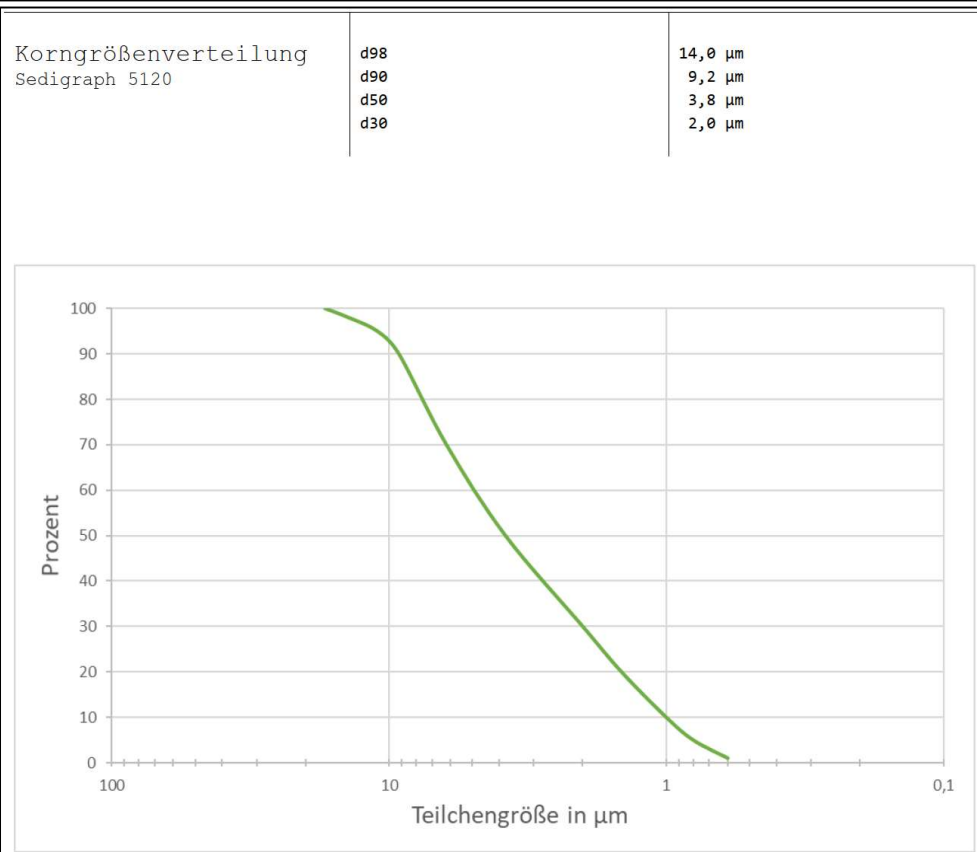
Lieferform		
		Pellets
		Pulver 63µm

Verpackung		
		lose
		Big-Bag
		15kg-Papiersäcke

MICA SFG20

Aspanger Glimmer ist ein Muskovit-Glimmer aus der eigenen Lagerstätte. Nähere Details dazu finden Sie sowohl im Produktübersichtsblatt Aspanger Glimmer als auch auf www.aspanger.com

Allgemeine Informationen	Dichte (g/cm ³) ISO 787/10-1981	2,85
	Mohs'sche Härte	2,5
	FMY-Wert (%)	83
	Wassergehalt (%) ISO 787/2-1981	< 1
	pH-Wert ISO 787/9-1981	9,5
	Ölzahl (g/100g) ISO 787/5-1980	26
	Spez. Oberfläche (m ² /g)	12
	Schüttgewicht (g/l)	370
Chemische Analyse	SiO ₂	51,5 %
	Al ₂ O ₃	27,0 %
	K ₂ O	10,0 %
	CaO	0,4 %
	Fe ₂ O ₃	2,9 %
	MgO	2,8 %
	TiO ₂	0,4 %
	Na ₂ O	0,2 %
	P ₂ O ₅	0,2 %
	MnO	0,03 %
Glühverlust bei 600°C	<2,0 %	

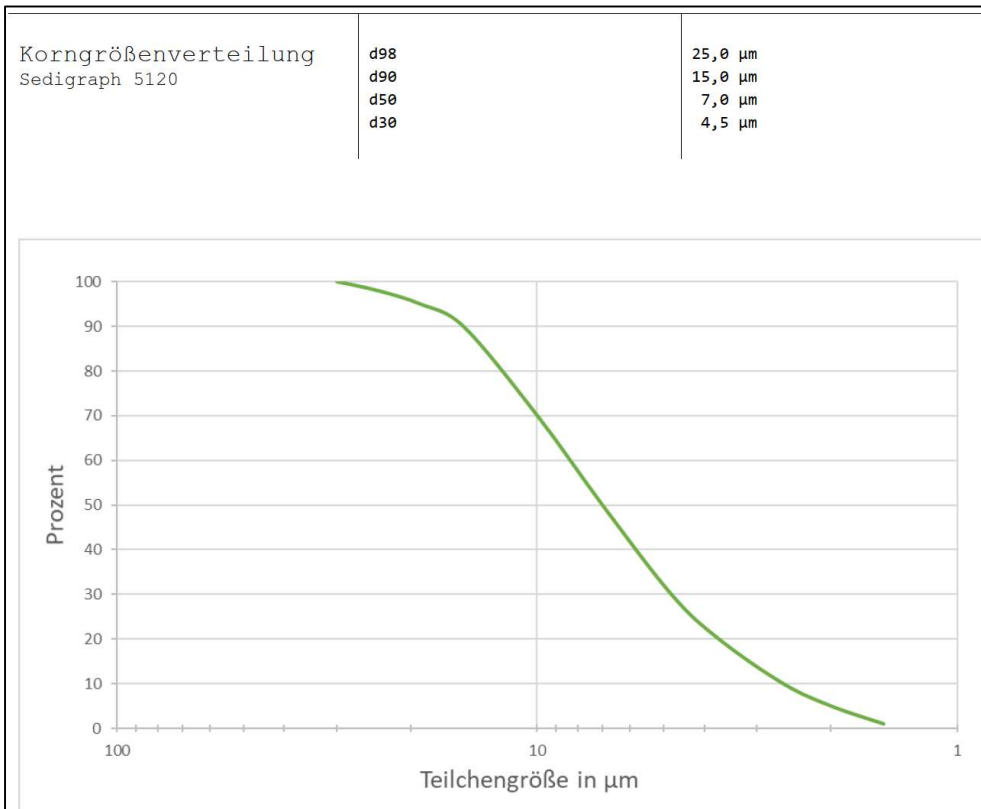


Anhang C-3: Datenblatt, Muskovit-Glimmer SFG20

MICA SG

Aspanger Glimmer ist ein Muskovit-Glimmer aus der eigenen Lagerstätte. Nähere Details dazu finden Sie sowohl im Produktübersichtsblatt Aspanger Glimmer als auch auf www.aspanger.com

Allgemeine Informationen	Dichte (g/cm ³) ISO 787/10-1981	2,85
	Mohs'sche Härte	2,5
	FMY-Wert (%)	78
	Wassergehalt (%) ISO 787/2-1981	< 1
	pH-Wert ISO 787/9-1981	9,5
	Ölzahl (g/100g) ISO 787/5-1980	20
	Spez. Oberfläche (m ² /g)	7
	Schüttgewicht (g/l)	500
Chemische Analyse	SiO ₂	51,5 %
	Al ₂ O ₃	27,0 %
	K ₂ O	10,0 %
	CaO	0,4 %
	Fe ₂ O ₃	2,9 %
	MgO	2,8 %
	TiO ₂	0,4 %
	Na ₂ O	0,2 %
	P ₂ O ₅	0,2 %
	MnO	0,03 %
Glühverlust bei 600°C	<2,0 %	



Anhang C-4: Datenblatt Muskovit-Glimmer SG

Anhang D

Tonmineral	Rohdichte [g/cm ³]	
	< 0,125 mm	0,125/2 mm
Ca-Bentonit	2,327	2,846
Kaolin	2,606	
Muskovit SFG	2,817	
Muskovit SG	2,818	
Eigenfüller	2,818	

Anhang D-1: Auswertung Rohdichte für Sandasphaltprobekörper

Anhang E

Tonmineral	Zugabemenge [M.-%]	Schüttel-Abrieb [M.-%]
		Serie F
Ausgangsmaterial	0	7,8
Ca-Bentonit	20,0	25,7
	50,0	65,7
	100,0	95,9
Kaolin	20,0	15,0
	50,0	24,7
	100,0	69,8
Muskovit SFG	20,0	17,0
	50,0	22,8
	100,0	43,7
Muskovit SG	20,0	20,5
	50,0	23,6
	100,0	43,3

Anhang E-1: Tabellarische Auswertung der Schüttel-Abrieb-Ergebnisse der künstlichen Gemische

Tonmineral	Zugabemenge [M.-%]	Schüttel-Abrieb Serie F [M.-%]			
		Pk 1	Pk 2	Pk 3	Mittel
Ausgangsmaterial	0	7,2	8,4	7,8	7,8
Ca-Bentonit	20,0	23,1	25,2	28,7	25,7
	50,0	64,0	67,3	65,8	65,7
	100,0	95,9	96,4	95,3	95,9
Kaolin	20,0	15,1	14,7	15,3	15,0
	50,0	26,5	23,4	24,4	24,7
	100,0	68,1	68,6	72,9	69,8
Muskovit SFG	20,0	15,8	18,0	17,2	17,0
	50,0	24,0	22,5	22,0	22,8
	100,0	43,2	43,4	44,6	43,7
Muskovit SG	20,0	20,2	21,4	20,1	20,5
	50,0	24,0	23,3	23,5	23,6
	100,0	42,9	42,4	44,6	43,3

Anhang E-2: Tabellarische Einzelauswertung der Schüttel-Abrieb-Ergebnisse der künstlichen Gemische

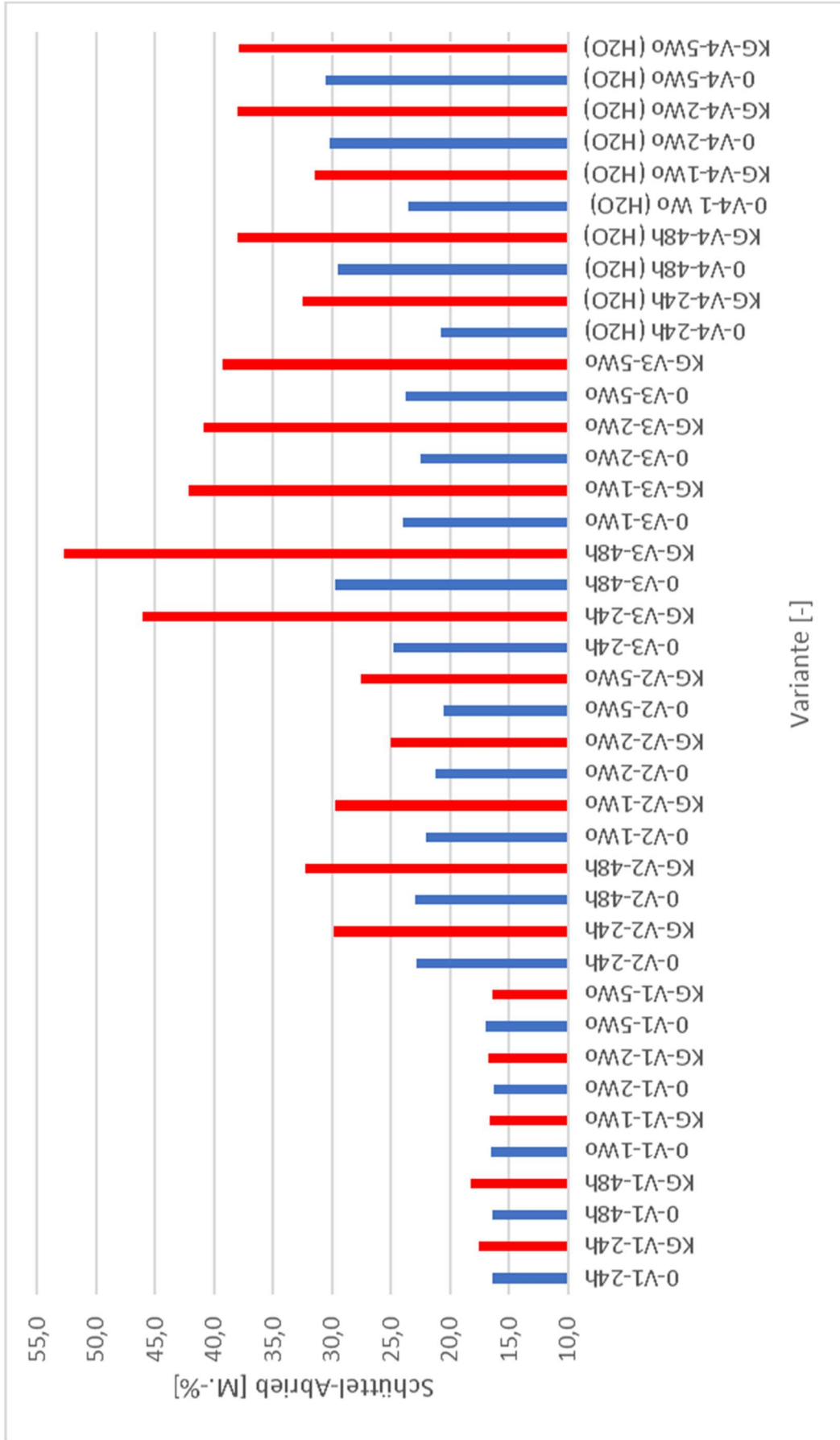
Anhang F

Variante	Ruhezeit	Hohlraumgehalt [M.-%]	MPK	Schüttel-Abrieb	Schüttel-Abrieb Mittel
				[M.-%]	[M.-%]
A1-0-Variante	24h	1,5	1	17,0%	16,7%
	24h		2	16,3%	
	48h		1	16,5%	16,6%
	48h		2	16,6%	
	1Wo		1	16,4%	16,5%
	1Wo		2	16,5%	
	2Wo		1	16,6%	16,3%
	2Wo		2	16,1%	
	5Wo		1	16,8%	17,0%
	5Wo		2	17,2%	
A2-0-Variante	24h	3,3	1	22,7%	22,9%
	24h		2	23,2%	
	48h		1	22,7%	23,0%
	48h		2	23,3%	
	1Wo		1	21,9%	22,0%
	1Wo		2	22,2%	
	2Wo		1	21,2%	21,3%
	2Wo		2	21,4%	
	5Wo		1	21,0%	20,5%
	5Wo		2	20,0%	
A3-0-Variante	48h	6,1	1	28,6%	29,7%
	48h		2	30,9%	
	5Wo		1	23,4%	23,8%
	5Wo		2	24,2%	
A3-WW-0-Variante (Wasserlagerung)	48h	6,1	1	28,7%	29,5%
	48h		2	30,2%	
	2Wo		1	29,3%	30,2%
	2Wo		2	31,0%	
	5Wo		1	30,9%	30,5%
	5Wo		2	30,2%	
A1-KG-Variante	24h	1,5	1	17,5%	17,6%
	24h		2	17,7%	
	48h		1	19,0%	18,2%
	48h		2	17,4%	
	1Wo		1	16,0%	16,6%
	1Wo		2	17,2%	
	2Wo		1	15,6%	15,8%
	2Wo		2	15,9%	
	5Wo		1	17,0%	16,4%
	5Wo		2	15,9%	
A2-KG-Variante	24h	3,3	1	30,9%	29,9%
	24h		2	28,9%	

	48h		1	33,6%	32,3%
	48h		2	31,0%	
	1Wo		1	32,5%	29,8%
	1Wo		2	27,0%	
	2Wo		1	25,8%	25,0%
	2Wo		2	24,2%	
	5Wo		1	28,8%	27,6%
	5Wo		2	26,4%	
A3-KG-Variante	48h	6,1	1	50,7%	52,7%
	48h		2	54,7%	
	5Wo		1	39,4%	39,3%
	5Wo		2	39,1%	
A3-WW-KG- Varinate (Wasserla- gerung)	48h	6,1	1	36,8%	38,0%
	48h		2	39,1%	
	2Wo		1	41,4%	38,0%
	2Wo		2	34,5%	
	5Wo		1	36,9%	38,0%
	5Wo		2	39,1%	









Anhang F: Einzelauswertung der Schüttel-Abrieb-Ergebnisse der Varianten KG und 0







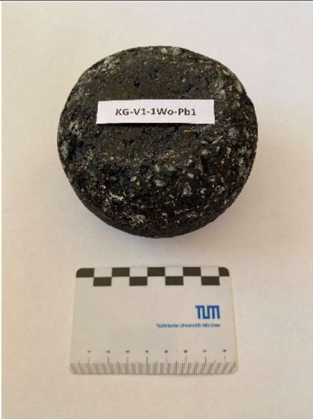

Anhang G

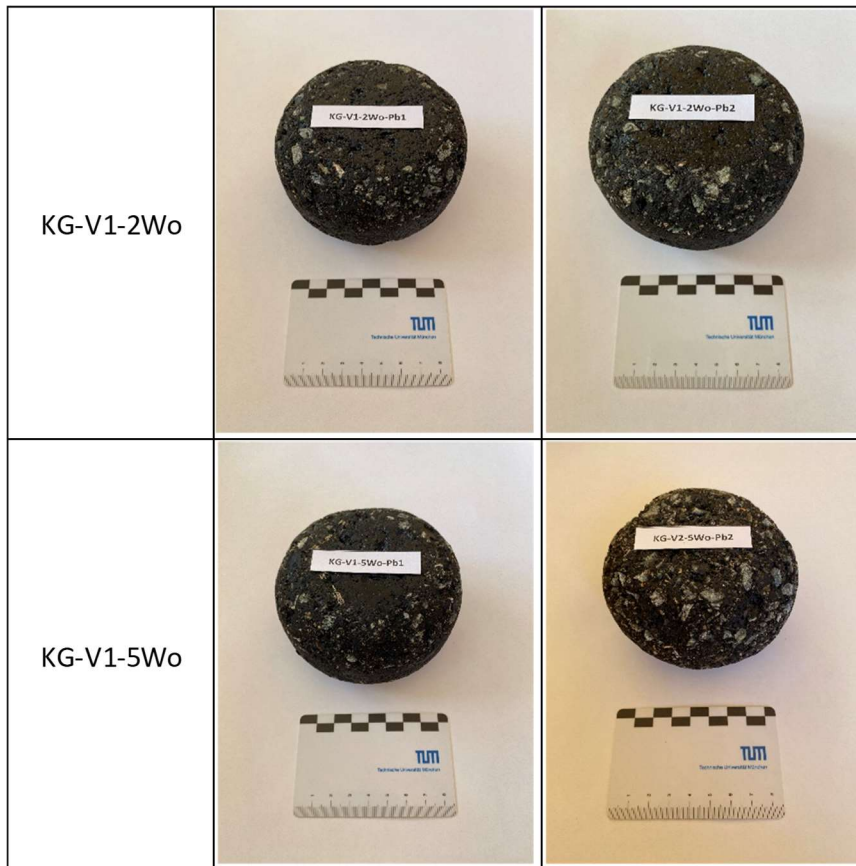


Anhang G: Diagramm-Auswertung der Schüttel-Abrieb-Ergebnisse am Marshall-Probekörper

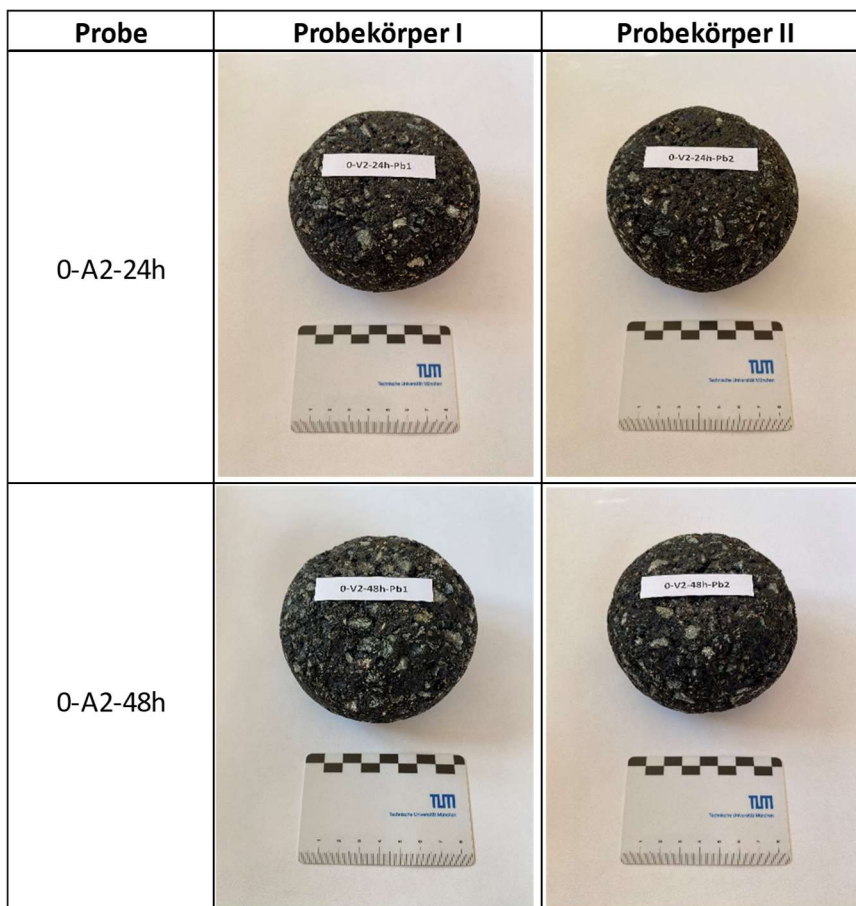
Anhang H









Probe	Probekörper I	Probekörper II
0-A1-24h		
0-A1-48h		
0-A1-1Wo		
0-A1-2Wo		


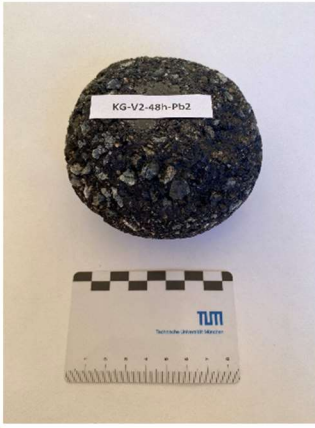






<p>0-A1-5Wo</p>		
<p>KG-A1-24h</p>		
<p>KG-A1-48h</p>		
<p>KG-A1-1Wo</p>		











Anhang H-1: Fotodokumentation der Schüttel-Abrieb-Probekörper der Variante A1 nach Prüfung











<p>0-A2-1Wo</p>		
<p>0-A2-2Wo</p>		
<p>0-A2-5Wo</p>		
<p>KG-A2-24h</p>		

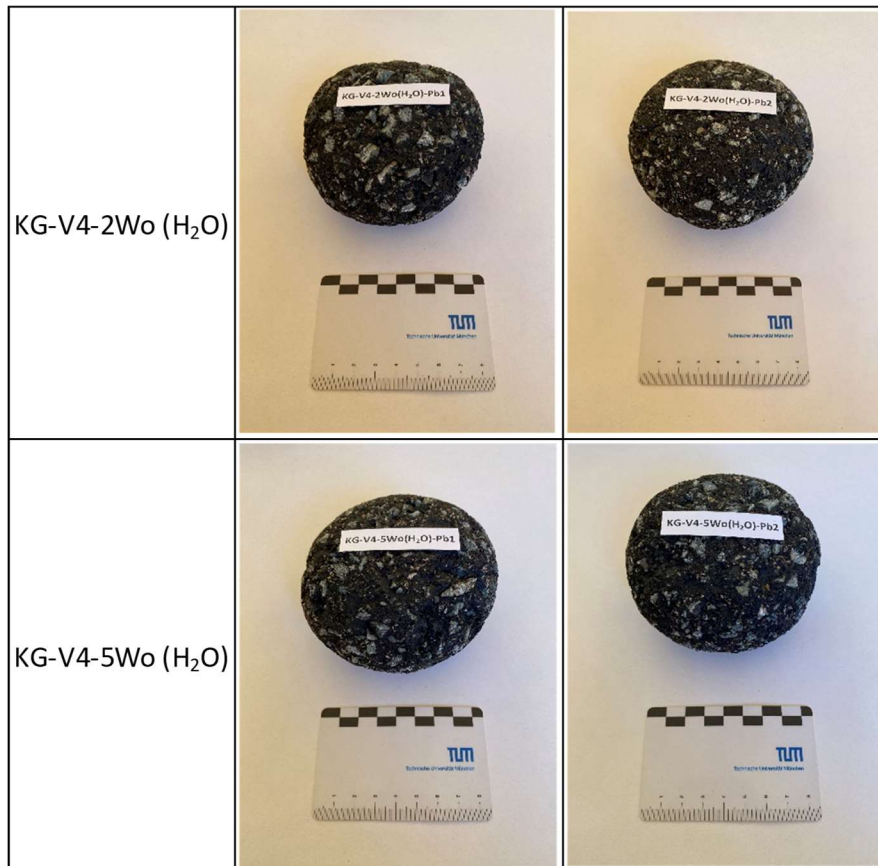
<p>KG-A2-48h</p>		
<p>KG-A2-1Wo</p>		
<p>KG-A2-2Wo</p>		
<p>KG-A2-5Wo</p>		

Anhang H-2: Fotodokumentation der Schüttel-Abrieb-Probekörper der Variante A2 nach Prüfung

Probe	Probekörper I	Probekörper II
0-A3-48h		
0-A3-5Wo		
KG-A3-48h		
KG-A3-5Wo		

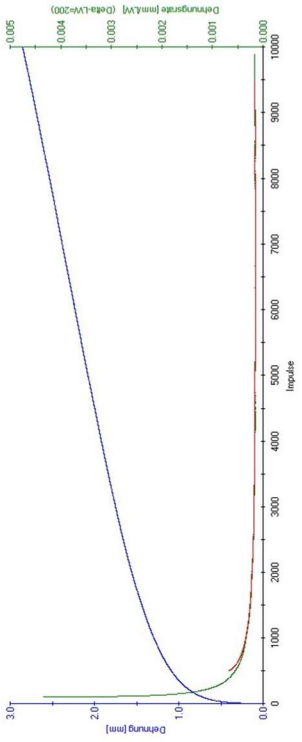
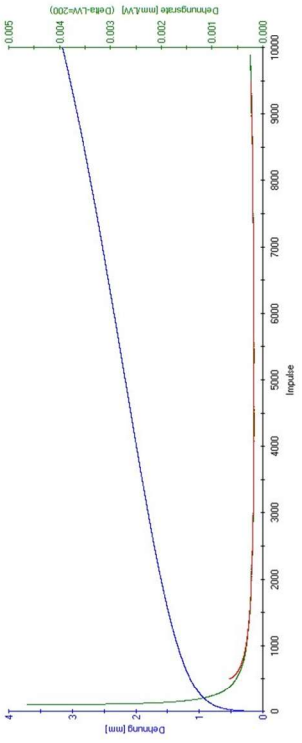
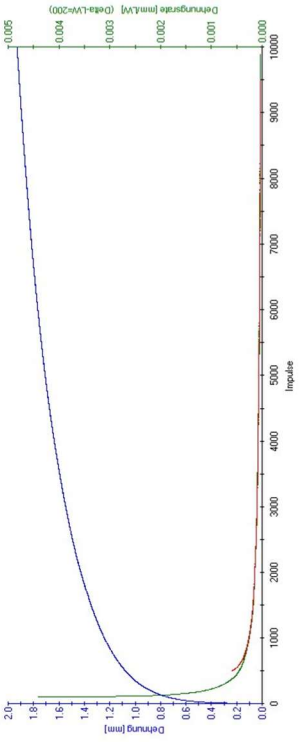
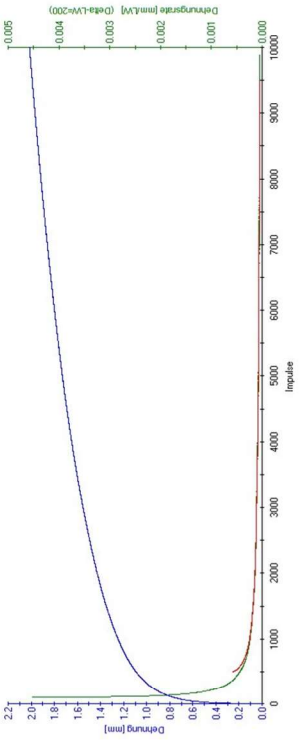
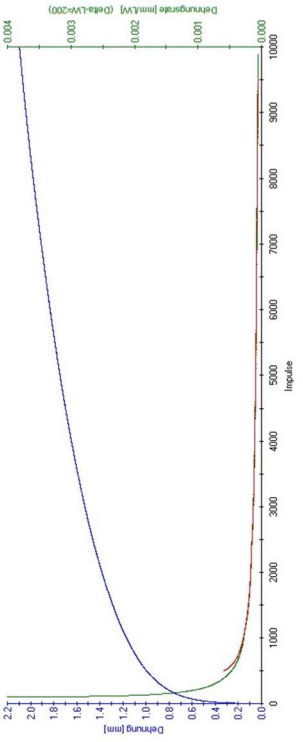
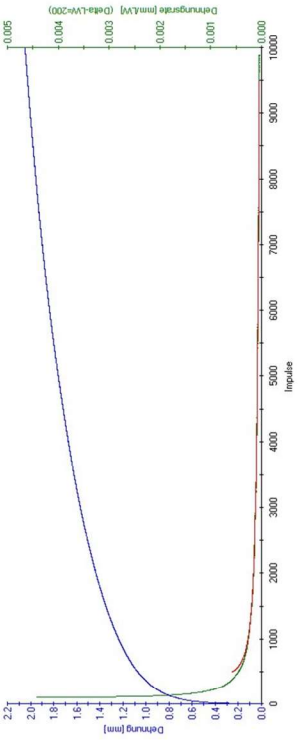
Anhang H-3: Fotodokumentation der Schüttel-Abrieb-Probekörper der Variante A3 nach Prüfung

Probe	Probekörper I	Probekörper II
0-V4-48h (H ₂ O)		
0-V4-2Wo (H ₂ O)		
0-V4-5Wo (H ₂ O)		
KG-V4-48h (H ₂ O)		



Anhang H-4: Fotodokumentation der Schüttel-Abrieb-Probekörper der 4. wassergesättigten Variante (A3-WW) nach Prüfung

Anhang I

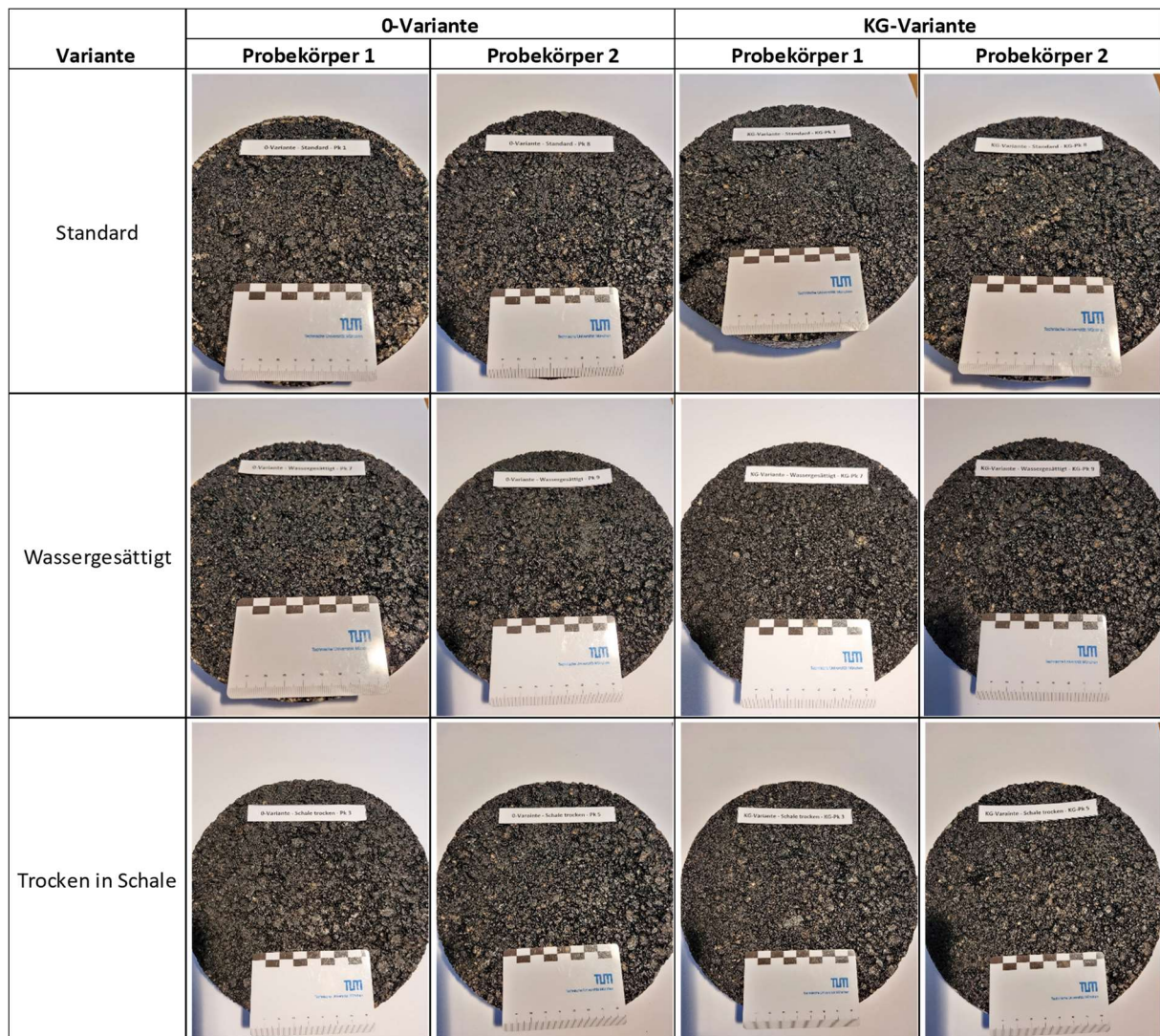
Variante	0-Probekörper 1	0-Probekörper 2
Standard		
Wassergesättigt		
Trocken in Schale		

Anhang I-1: Einzelergebnisse der 0-Variante im dynamischen Stempel Eindringversuch

Variante	KG-Probekörper 1	KG-Probekörper 2
Standard		
Wassergesättigt		
Trocken in Schale		

Anhang I-2: Einzelergebnisse der KG-Variante im dynamischen Stempelindringversuch

Anhang J






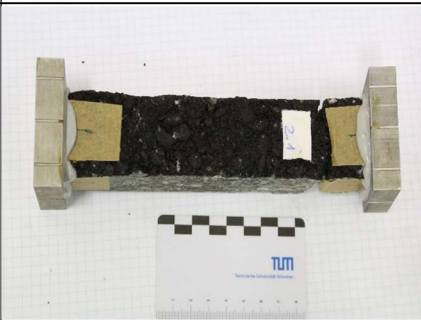

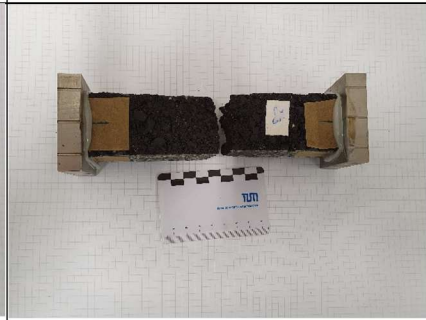



Anhang J: Fotodokumentation der Probekörper nach der Prüfung im dynamischen Stempelindringversuch










Anhang K










Variante	Probekörper vor und nach Wasserlagerung [g]									
	P1		P2		P3		Median		Restfeuchte	Restfeuchte [M.-%]
	vor W.	nach W.	vor W.	nach W.	vor W.	nach W.	vor W.	nach W.		
0-Variante	617,1	625,2	613,9	623,0	590,0	600,0	607,0	616,1	9,1	1,472%
KG-Variante	620,2	629,7	618,0	626,7	617,8	626,7	618,7	627,7	9,0	1,439%




Anhang K: Auswertung der Restfeuchte der 0- und KG-Variante

Anhang L

Probe	Gesteinsart	Schüttel-Abrieb	Zugfestigkeit	Probekörper		
		Serie E [M.-%]	[N/mm ²]	P1	P2	P3
1	Granit	34,4	4,259			
2	Gabbro	37,6	3,300			
5	Rhyolith	60,9	3,757			

11	Andesit	40,1	3,182			
14	Basalt	51,4	2,851			
18	Diabas	19,0	4,207			

Q11	Kalkstein, Jura	33,5	3,873			
20	Grauwacke	51,6	3,406			
23	Kies gebrochen	22,4	4,565			

Q19	Kies ungebrochen	92,4	2,630			
-----	------------------	------	-------	------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------

Anhang L-1: Auswertung Fotodokumentation der untersuchten feinen Gesteinskörnungen

Nr.	Probe-Nr.	Gesteinsart	Schüttel-Abrieb [M.-%]			max. Zugkraft [kN]					Zugfestigkeit [N/mm ²]				
			Serie E	Serie F	Füller	P1	P2	P3	P4	Median	P1	P2	P3	P4	Median
1	1	Granit	34,4	15,4	44,1	5,731	7,192	7,711	7,951	7,146	3,529	4,183	4,533	4,792	4,259
2	2	Gabbro	37,6	16,2	56,5	4,879	5,757	5,690		5,442	3,065	3,367	3,469	3,300	
3	5	Rhyolith	60,9	29,7	38,7	6,617	6,781	5,882		6,427	3,844	3,977	3,450	3,757	
4	11	Andesit	40,1	14,9	67,9	6,256	4,503	5,508		5,422	3,617	2,622	3,308	3,182	
5	14	Basalt	51,4	27,7	63,4	3,864	4,646	4,932		4,481	2,424	3,024	3,106	2,851	
6	18	Diabas	19,0	13,1	30,2	6,684	6,826	6,597		6,702	4,149	4,287	4,186	4,207	
7	11	Kalkstein, Jura	33,5	19,6	53,6	5,843	6,848	6,292		6,328	3,676	4,076	3,868	3,873	
8	20	Grauwacke	51,6	24,6	66,6	5,336	6,075	5,785		5,732	3,450	3,600	3,487	3,512	
9	23	Kies gebrochen	22,4	9,1	47,1	5,838	8,576	7,856		7,423	3,649	5,193	4,852	4,565	
10	19	Kies ungebroschen	92,4	46,5	91,4	3,697	5,250	4,109		4,352	2,272	3,112	2,507	2,630	

Anhang L-2: Gesamtauswertung Zugversuch der feinen Gesteinskörnungen

Anhang M

Probe	Schüttel-Abrieb	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Probekörper vor und nach Wasserlagerung [g]										Restfeuchte [M.-%]
	Serie E		P1		P2		P3		Median		Restfeuchte		
	[M.-%]		vor W.	nach W.	vor W.	nach W.	vor W.	nach W.	vor W.	nach W.			
1	34,4	4,259	601,2	606,6	644,2	649,2	640,7	645,2	628,7	633,7	5,0	0,784%	
2	37,6	3,300	596,8	601,7	648,0	653,2	626,1	630,5	623,6	628,5	4,8	0,769%	
5	60,9	3,757	620,3	629,0	618,2	626,8	617,9	627,0	618,8	627,6	8,8	1,402%	
11	40,1	3,182	617,9	628,9	601,8	611,4	584,0	595,1	601,2	611,8	10,6	1,727%	
14	51,4	2,851	601,4	607,2	606,8	612,0	610,4	615,3	606,2	611,5	5,3	0,867%	
18	19	4,207	604,2	612,4	598,5	607,5	597,3	606,3	600,0	608,7	8,7	1,435%	
Q11	33,5	3,873	578,4	588,7	612,6	622,2	596,4	605,6	595,8	605,5	9,7	1,602%	
20	51,6	3,406	598,2	606,5	632,8	641,0	618,4	625,7	616,5	624,4	7,9	1,271%	
23	22,4	4,565	601,4	608,8	620,7	627,0	615,7	622,0	612,6	619,3	6,7	1,077%	
Q19	92,4	2,630	616,1	626,2	613,8	623,1	590,2	599,7	606,7	616,3	9,6	1,563%	

Anhang M: Auswertung der Restfeuchte der untersuchten feinen Gesteinskörnungen